

Решением президиума Высшей аттестационной комиссии журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук



Том 20 № 4 2025

ISSN 1992-1098
e-ISSN 2413-0958

ЮГ РОССИИ: ЭКОЛОГИЯ, РАЗВИТИЕ

Vol.20 no. 4 2025

SOUTH OF RUSSIA: ECOLOGY, DEVELOPMENT

Журнал «Юг России: экология, развитие» входит в Перечень Высшей аттестационной комиссии (ВАК), Белый список и реферативные базы цитирования: Scopus, Web of Science Core Collection (ESCI), Web of Science Zoological Record, Российская система цитирования (РИНЦ), Cyberleninka, Ulrich's Periodicals Directory, Российская государственная библиотека (РГБ), ВИНТИ, The European Library, The British Library, Jisc copac, Google Scholar, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), OCLC WorldCat, EBSCO A-to-Z, Соционет, Open Access Infrastructure for Research in Europe (Open AIRE), Research Bible, Academic Keys and Open Archives Initiative.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**Главный редактор**

Шестопалов Александр Михайлович, директор Федерального исследовательского центра Фундаментальной и трансляционной медицины, доктор биологических наук, профессор (Новосибирск, Россия)

Заместители главного редактора

Гаджиев Алимурад Ахмедович, Институт экологии и устойчивого развития, Дагестанский государственный университет (Махачкала, Россия)

Гусейнова Надира Орджоникидзева, Институт экологии и устойчивого развития, Дагестанский государственный университет (Махачкала, Россия)

Кочуров Борис Иванович, Институт географии Российской академии наук (Москва, Россия)

Научный редактор

Чибилёв Александр Александрович, Институт степи Уральского отделения Российской академии наук (Оренбург, Россия)

Ответственные секретари

Даудова Мадина Гасан-Гусейновна, Институт экологии и устойчивого развития, Дагестанский государственный университет (Махачкала, Россия)

Иванушенко Юлия Юрьевна, Институт экологии и устойчивого развития, Дагестанский государственный университет (Махачкала, Россия)

Теймуров Абдулгамид Абулкасумович, Институт экологии и устойчивого развития, Дагестанский государственный университет (Махачкала, Россия)

Технический редактор

Юсупов Юсуп Газимагомедович, Институт экологии и устойчивого развития, Дагестанский государственный университет (Махачкала, Россия)

EDITORIAL BOARD**Editor-in-Chief**

Alexander M. Shestopalov, Head, Federal Research Centre for Fundamental and Translational Medicine, Doctor of Biological Sciences, Professor (Novosibirsk, Russia)

Deputy Editors-in-Chief

Alimurad A. Gadzhiev, Institute of Ecology and Sustainable Development, Dagestan State University (Makhachkala, Russia)

Nadira O. Guseynova, Institute of Ecology and Sustainable Development, Dagestan State University (Makhachkala, Russia)

Boris I. Kochurov, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Scientific Editor

Aleksander A. Chibilev, Institute of Steppe, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (Orenburg, Russia)

Editorial Executive Secretaries

Madina G. Daudova, Institute of Ecology and Sustainable Development, Dagestan State University (Makhachkala, Russia)

Yuliya Yu. Ivanushenko, Institute of Ecology and Sustainable Development, Dagestan State University (Makhachkala, Russia)

Abdulgamid A. Teymurov, Institute of Ecology and Sustainable Development, Dagestan State University (Makhachkala, Russia)

Technical Editor

Yusup G. Yusupov, Institute of Ecology and Sustainable Development, Dagestan State University (Makhachkala, Russia)

Для ознакомления с целями и задачами, инструкциями по подготовке и подаче рукописи, подписке и другой информации, посетите: <https://ecodag.elpub.ru/ugro/about>

For aims and scope, manuscript preparation and submission instructions, subscription and other information visit: <https://ecodag.elpub.ru/ugro/about>

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Алексеев А.Ю., Федеральный исследовательский центр Фундаментальной и трансляционной медицины (Новосибирск, Россия)

Асадулаев З.М., Горный ботанический сад, ДФИЦ РАН (Махачкала, Россия)

Асхабов А.М., Коми научный центр Российской академии наук (Сыктывкар, Россия)

Асатурова А.М., Федеральный научный центр биологической защиты растений (Краснодар, Россия)

Бехруз Абтахи, Мохаммад Хоссейн, Факультет биологии и биотехнологии, Государственный университет Ш. Бехешти (Тегеран, Иран)

Братков В.В., Московский государственный университет геодезии и картографии (Москва, Россия)

Власов Д.Ю., Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия)

Воевода М.И., ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр фундаментальной и трансляционной медицины» (ФИЦ ФТМ) (Новосибирск, Россия)

Волобуев С.В., Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук (Санкт-Петербург, Россия)

Гаджиев Н.Г., Дагестанский государственный университет (Махачкала, Россия)

Гасангаджиева А.Г., Дагестанский государственный университет (Махачкала, Россия)

Глотов А.Г., Институт экспериментальной ветеринарии Сибири и Дальнего Востока (Краснообск, Россия)

Зайцев В.Ф., Астраханский государственный технический университет (Астрахань, Россия)

Ирза В.Н., Федеральный центр охраны здоровья животных (Владимир, Россия)

Канбетов А.Ш., Каспийский исследовательский институт НАО «Атырауский университет нефти и газа» (Атырау, Казахстан)

Касимов Н.С., Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия)

Магомедов М.Д., Прикаспийский институт биологических ресурсов, ДФИЦ РАН (Махачкала, Россия)

Матишов Г.Г., Южный научный центр РАН (Ростов-на-Дону, Россия)

Миноранский В.А., Южный Федеральный университет (Ростов-на-Дону, Россия)

Москвитина Н.С., Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия)

Набоженко М.В., Прикаспийский институт биологических ресурсов, Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН (Махачкала, Россия)

Огуреева Г.Н., Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия)

Онищенко В.Г., Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия)

Рабазанов Н.И., Прикаспийский институт биологических ресурсов, Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН (Махачкала, Россия)

Рожнов В.В., Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН (Москва, Россия)

Трифонов А.А., Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (Владимир, Россия)

Фальк Хюттманн, Университет Аляски в Фербенксе (Аляска, США)

Шестопалова Л.В., Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)

Щелканов М.Ю., Научно-исследовательский институт эпидемиологии и микробиологии имени Г.П. Сомова (Владивосток, Россия)

Яковенко Н.В., Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова (Воронеж, Россия)

Яковлев Р.В., Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

EDITORIAL COUNCIL

Alexander Yu. Alekseev, Federal Research Centre for Fundamental and Translational Medicine (Novosibirsk, Russia)

Zagirbeg M. Asadulaev, Mountain Botanical Garden, Dagestan Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences (Makhachkala, Russia)

Askhab M. Askhabov, Komi Scientific Centre, Russian Academy of Sciences (Syktyvkar, Russia)

Anzhela M. Asaturova, Federal Research Centre of Biological Plant Protection (Krasnodar, Russia)

Abtahi Behrooz, Mohammad Hossein, Faculty of Life Sciences & Biotechnology, Shahid Beheshti University (Tehran, Iran)

Vitaliy V. Bratkov, Moscow State University of Geodesy and Cartography (Moscow, Russia)

Dmitry Yu. Vlasov, Saint-Petersburg State University (St. Petersburg, Russia)

Mikhail I. Voevoda, Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center for Fundamental and Translational Medicine" (Novosibirsk, Russia)

Sergey V. Volobuev, Komarov Botanical Institute, RAS (St. Petersburg, Russia)

Nazirkhan G. Gadzhiev, Dagestan State University (Makhachkala, Russia)

Aziza G. Gasangadzhieva, Dagestan State University (Makhachkala, Russia)

Aleksandr G. Glotov, Institute of Experimental Veterinary Medicine of Siberia and the Far East (Krasnoobsk, Russia)

Vyacheslav F. Zaitsev, Astrakhan State Technical University (Astrakhan, Russia)

Viktor N. Irza, Federal Centre for animal health (Vladimir, Russia)

Assylbek Sh. Kanbetov, Caspian Research Institute, Atyrau University of Oil and Gas (Atyrau, Kazakhstan)

Nikolay S. Kasimov, M.V. Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

Magomedrasul D. Magomedov, Caspian Institute of Biological Resources, Dagestan Federal Research Centre, RAS (Makhachkala, Russia)

Gennady G. Matishov, Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences (Rostov-on-Don, Russia)

Victor A. Minoranskii, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia)

Nina S. Moskvitina, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia)

Maxim V. Nabozhenko, Caspian Institute of Biological Resources, Dagestan Research Center, RAS (Makhachkala, Russia)

Galina N. Ogureeva, M.V. Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

Vladimir G. Onipchenko, M.V. Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

Nukhkadi I. Rabazanov, Caspian Institute of Biological Resources, Dagestan Research Center, RAS (Makhachkala, Russia)

Viatcheslav V. Rozhnov, Institute of Problems of Ecology and Evolution A.N. Severtsov, RAS (Moscow, Russia)

Tatyana A. Trifonova, Vladimir State University (Vladimir, Russia)

Falk Huettmann, University of Alaska Fairbanks (Alaska, USA)

Lidia V. Shestopalova, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russia)

Mikhail Yu. Shchelkanov, G.P. Somov Research Institute of Epidemiology and Microbiology (Vladivostok, Russia)

Nataliya V. Yakovenko, G.F. Morozov Voronezh State University Forestry and Technologies (Voronezh, Russia)

Roman V. Yakovlev, Altai State University (Barnaul, Russia)

ВИРУСОЛОГИЯ

- Волков Ю.Г., Толкач В.Ф., Какарека Н.Н., Щелканов Е.М., Щелканов М.Ю.
 Фитовирусы естественных растительных сообществ на Дальнем Востоке России.....8-23
 Терновой В.А., Пономарева Е.П., Тупота Н.Л., Степанюк М.А., Карташов М.Ю.,
 Баяндин Р.Б., Трегубчик Т.В., Агафонов А.П.
 Вирусные трансмиссивные патогены в клещах из природных биотопов Европейской части России.....24-34
 Друзяка О.Р., Глущенко А.В., Соболев И.А., Мацкало Л.Л., Друзяка А.В.
 Сезонная и межгодовая динамика зараженности вирусом птичьего гриппа диких уток
 на севере Кулундинской равнины Новосибирской области.....35-42
 Нахимов Т.М., Крикливая Н.П., Екушов В.Е., Шевченко В.В., Ильина Е.А., Шульга Н.Г.,
 Белоусова О.В., Тотменин А.В., Гашникова Н.М.
 Резистентность ВИЧ-1 к АРВП среди инфицированных жителей Алтайского края с неудачей антиретровирусной терапии.....43-56

БОТАНИКА

- Мамалиева М.М., Алибегова А.Н., Солтанмуратова З.И.
 Изучение внутривидовой изменчивости семян *Silybum marianum* (L.) Gaertn. 57-64
 Зилфикаров И.Н., Гусейнова З.А., Рязанова Т.К., Шайхутдинов И.Х., Раджабов Г.К., Ибрагимов Т.А., Бабаева Е.Ю.
 Анализ липофильного комплекса из корней *Eremostachys laciniata* (Lamiaceae) флоры Дагестана
 методом хромато-масс-спектрометрии.....65-76

ЗООЛОГИЯ

- Мухтарова Г.М., Нахиташева Г.М., Гасангаджиева А.Г., Федотова З.А.
 Основные направления трансформации биоразнообразия насекомых и клещей Каспийского региона
 в контексте изменения климата и их влияние на природно-очаговые заболевания.....77-87
 [Маловичко Л.В.] Резанов А.Г., Кузнецова В.В., Резанов А.А.
 Особенности гнездовой биологии и успешность размножения сойки *Garrulus glandarius krynicki* в Ставропольском крае.....88-101
 Гаджиев А.А., Муташев Б.А., Жигалин А.В., Алексеев А.Ю., Джалилов М.Г.
 Новое техногенное убежище Остроухой ночницы *Myotis blythii* (Chiroptera: Vespertilionidae)
 на Северо-Восточном Кавказе.....102-107

ЭКОЛОГИЯ

- Рамзанова Д.М., Гунашев Ш.А., Каспарова М.А., Сайпуллаев У.М., Даудова М.Г., Абдулмджидов С.М.
 Экологический мониторинг и анализ современного состояния водных ресурсов предгорной части Дагестана,
 используемых для орошения пастбищ и водопоя сельскохозяйственных животных.....108-115

БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

- Морковина С.С., Яковенко Н.В., Колесниченко Е.А., Литовченко Д.А., Топчиев А.Н.
 Лесохозяйственные стратегии адаптации к изменениям климата: выбор пород
 и оптимизация технологий лесовосстановления.....116-128
 Девришов Д.А., Марзанова С.Н., Жучков В.А., Марзанов Н.С., Николаева Е.А., Фатахов К.Ф.,
 Есенгалиев К.Г., Давлетова А.М., Нысанов Е.С.
 Аллелофонд гена DRB1 OLA у овец различных пород.....129-137
 Гаджиев Н.Г., Федотова Г.В., Рязанцев И.И., Чураев А.Г., Козенко Т.Е.
 Инновационные технологии продовольственной обеспеченности аридных территорий Юга России.....138-147
 Шеуджен А.Х., Гуторова О.А., Хурум Х.Д., Ашинов Ю.Н., Захарова А.Ю.
 Эколого-агрохимическая эффективность лигногумата в агроценозе риса (*Oryza sativa* L.) 148-154

РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

- Андреева И.В., Головин А.В., Рыбкина И.Д.
 Водно-рекреационные и природоохранные структуры в экотуристском каркасе
 особо охраняемой природной территории.....155-166

ГЕОЭКОЛОГИЯ

- Волошин В.Р., Белов К.В., Мин Оак Со, Боронина Л.В.
 Современные тенденции использования низкопотенциальной тепловой энергии Земли
 в целях устойчивого развития.....167-177
 Атаев З.В., Гаджиев А.А., Гюльмагомедов А.М., Джаммиров Г.С., Теймуров А.А.
 Геоморфологические основы формирования и функционирования аква-территориального (морского)
 карбонового полигона «Каспий» на дагестанском побережье Каспийского моря.....178-189
 Тургумбаев А.А., Левыкин С.В., Казачков Г.В., Чибилёв А.А.
 Кластерное формирование ландшафтно-экологического каркаса Западно-Казахстанской области
 для целей устойчивого развития территории.....190-206
 Братков В.В., Бекмурзаева Р.Х., Гусейнова Н.О.
 Опыт картографирования ландшафтов Макажойской котловины на основе данных
 дистанционного зондирования Земли.....207-217
 Моисеева Ю.А., Пургина Д.В., Торопов А.С., Главная У.В., Ситников П.Т., Шигапова А.Ф.,
 Бояркина В.В., Гринько А.А.
 Гидрохимические особенности водосбора реки Мзымта.....218-230

<i>Ялалетдинова А.В., Малкова М.А., Вожаева М.Ю., Кантор О.Г., Мельницкий И.А., Серебряков П.В., Кантор Е.А.</i>	
Сопоставление качества речной и питьевой воды инфильтрационных водозаборов по статистическим данным перманганатной окисляемости.....	231-239
<i>Крупнова Т.Г., Ракова О.В., Кочегоров В.М.</i>	
Изучение концентраций приземного озона в воздухе промышленного российского города.....	240-254
<i>Ахмедова Л.Ш., Амадзиева Н.А., Идзиев Г.И., Раджабова Р.Т., Султанов З.М.</i>	
Теоретические и методические основы организационно-экономического обеспечения и экологическая эффективность внедрения возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан.....	255-261

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

<i>Кумпан Е.В., Нуруллина Г.Н., Гаджибеков М.И., Нурутдинова Х.К.</i>	
Сравнительный анализ экологических показателей и физико-механических свойств текстильных материалов растительного происхождения.....	262-269
<i>Жуковская Т.В., Ханнанова-Фахрутдинова Л.Р., Гарипова Г.И., Фатхуллина Л.Р.</i>	
Экологически ориентированная технология улучшения эксплуатационных свойств обувных низкосортных натуральных кож с использованием плазменной обработки.....	270-277
<i>Buletova N.E., Golomanchuk E.V., Polozkov M.G., Skachkova S.A., Stepanova E.V., Timofeyeva G.V., Yabbarova R.I.</i>	
Legal and Economic Basis of Western Sanctions and their Impact on Food Security and Russian National Independence.....	278-288

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ.....	289
-----------------------------------	------------

VIROLOGY

- Volkov Yu.G., Talkach V.F., Kakareka N.N., Shchelkanov E.M., Shchelkanov M.Yu.
Phytoviruses of natural plant communities in the Russian Far East.....8-23
- Ternovoi V.A., Ponomareva E.P., Tupota N.L., Stepanyuk M.A., Kartashov M.Yu.,
Bayandin R.B., Tregubchak T.V., Agafonov A.P.
Viral vector-borne pathogens in ticks from natural habitats in the European part of Russia.....24-34
- Druzyaka O.R., Gluschenko A.V., Sobolev I.A., Matskalo L.L., Druzyaka A.V.
Seasonal and Inter-annual Dynamics of Avian Influenza Virus Infection in Wild Ducks
in the northern Kulunda Plain, Novosibirsk Oblast, Russia.....35-42
- Nalimova T.M., Krikliyaya N.P., Ekushov V.E., Shevchenko V.V., Ilina E.A., Shulga N.G.,
Belousova O.V., Totmenin A.V., Gashnikova N.M.
HIV-1 resistance to antiretroviral drugs among infected residents of Altai Krai with antiretroviral therapy failure.....43-56

BOTANY

- Mamalieva M.M., Alibegova A.N., Soltanmuradova Z.I.
Study of intrapopulation variability of *Silybum marianum* (L.) Gaertn seeds.....57-64
- Zilfikarov I.N., Guseynova Z.A., Ryazanova T.K., Shaykhutdinov I.Kh., Radzhabov G.K., Ibragimov T.A., Babaeva E.Yu.
Analysis of the lipophilic complex obtained from the roots *Eremostachys laciniata* (Lamiaceae) flora of Dagestan,
Russia by chromatography-mass spectroscopy.....65-76

ZOOLOGY

- Mukhtarova G.M., Nakhibasheva G.M., Gasangadzhieva A.G., Fedotova Z.A.
The main directions of transformation of the biodiversity of insects and ticks in the Caspian region
in the context of climate change and their impact on natural focal diseases.....77-87
- [Malovichko L.V.] Rezanov A.G., Kuznetsova V.V., Rezanov A.A.
Features of nesting biology and nesting success of the jay *Garrulus glandarius krynicki* in Stavropol Territory.....88-101
- Gadzhiev A.A., Mutashev B.A., Zhigalin A.V., Alekseev A.Yu., Dzhailov M.G.
New man-made shelter for the Lesser Mouse-eared Bat *Myotis blythii* (Chiroptera: Vespertilionidae)
in the North-Eastern Caucasus.....102-107

ECOLOGY

- Ramazanov D.M., Gunashev Sh.A., Kasparova M.A., Saipullaev U.M., Daudova M.G., Abdulmadzhidov S.M.
Environmental monitoring and analysis of the current state of water resources of the foothills of Dagestan
used to irrigate pastures and watering of agricultural animals.....108-115

BIOLOGICAL RESOURCES

- Morkovina S.S., Yakovenko N.V., Kolesnichenko E.A., Litovchenko D.A., Topcheev A.N.
Forest management strategies for adaptation to climate change: Species selection and optimisation
of reforestation technologies.....116-128
- Devrishov D.A., Marzanova S.N., Zhuchkov V.A., Marzanov N.S., Nikolaeva E.A., Fatakhov K.F.,
Yesengaliev K.G., Davletova A.M., Nysanov E.S.
Allele pool of the DRB1 OLA gene in sheep of different breeds.....129-137
- Gadzhiev N.G., Fedotova G.V., Ryazantsev I.I., Churaev A.G., Kozenko T.E.
Innovative technologies for food security in the arid territories of southern Russia.....138-147
- Sheudzhen A.H., Gutorova O.A., Khurum Kh.D., Ashinov Yu.N., Zakharova A.Yu.
Ecological and agrochemical efficiency of lignohumate in rice agroecosis (*Oryza sativa* L.).....148-154

RECREATIONAL GEOGRAPHY

- Andreeva I.V., Golovin A.V., Rybkina I.D.
Water-recreational and nature conservation structures in the ecotourism framework of a specially protected natural area.....155-166

GEOECOLOGY

- Voloshin V.R., Belov K.V., Min Oak So, Boronina L.V.
Modern trends in the utilisation of low-grade geothermal energy for sustainable development.....167-177
- Ataev Z.V., Gadzhiev A.A., Gyulmagomedov A.M., Dzhamirzoev G.S., Teymurov A.A.
Geomorphological Foundations for the Formation and Functioning of the "Caspian" Aqua-Territorial (Marine)
Carbon Polygon on the Dagestan Coast of the Caspian Sea.....178-189
- Turgumbaev A.A., Levykin S.V., Kazachkov G.V., Chibilev A.A.
Cluster formation of the landscape and ecological framework in the west Kazakhstan region for its sustainable development.....190-206
- Bratkov V.V., Bekmurzaeva R.Kh., Guseynova N.O.
Experience in mapping landscapes of the Makazhoy basin, Chechnya, Russia based on remote sensing data.....207-217
- Moiseeva Yu.A., Purgina D.V., Toropov A.S., Glavnaya U.V., Sitnikov P.T., Shigapova A.F.,
Boyarkina V.V., Grinko A.A.
Hydrochemical features of the Mzymta River catchment area.....218-230
- Yalaletdinova A.V., Malkova M.A., Vozhdaeva M.Yu., Kantor O.G., Melnitsky I.A.,
Serebryakov P.V., Kantor E.A.
Comparison of river and drinking water quality of infiltration intakes based on statistical data
of permanganate oxidisability.....231-239

Krupnova T.G., Rakova O.V., Kochegorov V.M.

Study of surface ozone concentrations in the air of an industrial Russian city.....240-254

Akhmedova L.Sh., Amadzieva N.A., Idziev G.I., Radzhabova R.T., Sultanov Z.M.

Theoretical and methodological foundations of organisational and economic support and environmental efficiency of the introduction of renewable energy sources in the Republic of Dagestan.....255-261

GENERAL PROBLEMS

Kumpan E.V., Nurullina G.N., Gadzhibekov M.I., Nurutdinova Kh.K.

Comparative analysis of environmental indicators and physical and mechanical properties of textile materials of plant origin.....262-269

Zhukovskaya T.V., Khannanova-Fakhrutdinova L.R., Garipova G.I., Fatkhullina L.R.

Environmentally oriented technology for improving the performance properties of low-grade natural leather for footwear using plasma modification.....270-277

Buletova N.E., Golomanchuk E.V., Polozkov M.G., Skachkova S.A., Stepanova E.V., Timofeyeva G.V., Yabbarova R.I.

Legal and Economic Basis of Western Sanctions and their Impact on Food Security and Russian National Independence.....278-288

CONTACT INFORMATION.....289

Фитовирусы естественных растительных сообществ на Дальнем Востоке России

Юрий Г. Волков¹, Валентина Ф. Толкач¹, Надежда Н. Какарека^{1,2}, Егор М. Щелканов³, Михаил Ю. Щелканов²

¹Федеральный научный Центр биологического разнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия

²НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Г.П. Сомова Роспотребнадзора, Владивосток, Россия

³Государственный университет просвещения, Мытищи, Россия

Контактное лицо

Михаил Ю. Щелканов, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, директор, НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Г.П. Сомова Роспотребнадзора; 690087 Россия, г. Владивосток, ул. Сельская, 1. Тел. +79245297109
Email adorob@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8610-7623>

Формат цитирования

Волков Ю.Г., Толкач В.Ф., Какарека Н.Н., Щелканов Е.М., Щелканов М.Ю. Фитовирусы естественных растительных сообществ на Дальнем Востоке России // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 8-23.
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-1

Получена 1 сентября 2025 г.

Прошла рецензирование 23 октября 2025 г.

Принята 25 октября 2025 г.

Резюме

Цель работы заключается в обобщении результатов эколого-вирусологических исследований фитовирусов естественных растительных сообществ, которые проводятся на регулярной основе, начиная с 1968 г., Лабораторией вирусологии ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН (Владивосток) на Дальнем Востоке России.

За период 1968–2025 гг. сотрудниками лаборатории были пройдены свыше 400 экспедиционных маршрутов в пределах 9 субъектов Дальневосточного федерального округа, выявлено свыше 200 вирусоподобных заболеваний на более чем 100 видах дикоросов. Полученные изоляты находятся на долговременном хранении в Коллекции вирусов Восточной Азии на базе ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН. Далеко не все вирусные изоляты были идентифицированы – наиболее изученные из них кратко описаны в настоящей работе: 94 изолята, полученные от представителей дикорастущей флоры 58 видов, 47 родов, 24 семейств, 16 порядков на территории 7 субъектов Российской Федерации. Полученные данные включают только вирусные заболевания дикорастущих видов с выраженной симптоматикой, однако вследствие латентного характера протекания инфекционного процесса в растениях естественной флоры фитовирусов гораздо больше.

Требуются дальнейшие исследования фитопатогенных вирусов, их распространенности и способов циркуляции в природе. Необходимым является и строгое соблюдение агротехники и профилактических мероприятий, используемых для предотвращения заражения этих интродуцированных из-за пределов региона растений и распространения вместе с ними вредоносных вирусов.

Ключевые слова

Фитовирусы, штамм, естественная флора, агроценозы, симптоматический комплекс, морфологический тип вириона, Дальний Восток.

Phytoviruses of natural plant communities in the Russian Far East

Yuri G. Volkov¹, Valentina F. Tolkach¹, Nadezhda N. Kakareka^{1,2}, Egor M. Shchelkanov³
and Mikhail Yu. Shchelkanov²

¹Federal Scientific Centre for East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

²G.P. Somov Institute of Epidemiology and Microbiology, Russian Federal Service for Surveillance of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Vladivostok, Russia

³State University of Education, Mytishchi, Russia

Principal contact

Mikhail Yu. Shchelkanov, Doctor of Biological Sciences, Corresponding Member, Russian Academy of Sciences & Director, G.P. Somov Research Institute of Epidemiology and Microbiology, Russian Federal Service for Surveillance of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 1 Selskaya St, Vladivostok, Russia 690087.

Tel. +79245297109

Email adorob@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8610-7623>

How to cite this article

Volkov Yu.G., Tolkach V.F., Kakareka N.N., Shchelkanov E.M., Shchelkanov M.Yu. Phytoviruses of natural plant communities in the Russian Far East. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):8-23. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-1

Received 1 September 2025

Revised 23 October 2025

Accepted 25 October 2025

Abstract

Aim of this work was to summarise the results of ecological and virological studies of phytoviruses circulating in natural plant communities conducted in the Russian Far East on a regular basis since 1968 by the Laboratory of Virology, Federal Research Centre for Biodiversity, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences (Vladivostok).

During the period 1968–2025 laboratory staff completed over 400 expeditions within 9 subjects of the Far Eastern Federal Region and identified over 200 virus-like diseases in more than 100 species of wild plants. The obtained isolates obtained are in long-term storage in the Collection of East Asian Viruses at the Scientific Research Centre for East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences. Many viral isolates have yet to be identified. These most studied are briefly described in this work: 94 isolates obtained from representatives of wild flora of 58 species, 47 genera, 24 families, and 16 orders from 7 subjects of the Russian Federation. The data obtained include only viral diseases of wild-growing species with pronounced symptom; however, due to the latent nature of the infectious process in plants of the natural flora, there are many more phytoviruses.

Further studies of phytopathogenic viruses, their prevalence and ways of circulation in nature are required. Also necessary is strict observance of agricultural techniques and preventive measures used to prevent infection of these plants introduced from outside the region and the spread of harmful viruses associated with them.

Key Words

Phytoviruses, strain, natural flora, agroecosystems, symptomatic complex, morphological type of virion, Far East.

ВВЕДЕНИЕ

Многие фитовирусы-возбудители заболеваний сельскохозяйственных растений имеют природные резервуары в популяциях дикорастущей флоры, в которых они могут не проявлять свой патогенный потенциал вследствие высокой степени адаптации к естественным хозяевам [1–3]. Однако проникновение таких фитовирусов в сельскохозяйственные угодья могут приводить к массовым эпифитотиям с неблагоприятными последствиями [4]. Феномен природной очаговости [5], хорошо известный и активно изучаемый в отношении возбудителей человека и животных [6–8], гораздо реже принимается во внимание в процессе эколого-вирусологических исследований фитовирусов, хотя имеющиеся данные свидетельствуют, что и в этом случае концепция природной очаговости должна рассматриваться как основополагающая [1–4].

Вынос фитовирусов за пределы своего естественного резервуара часто происходит в результате непродуманной хозяйственной деятельности человека или нарушения фитосанитарных норм и правил [9–11]. Поэтому изучение подобных инфекций, их эпифитологии и вредоносности имеет важнейшее народнохозяйственное значение [12; 13].

Лаборатория вирусологии ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН (Владивосток) проводит изучение фитовирусов в экосистемах юга российского Дальнего Востока, начиная с 1962 г. [4; 14; 15]. За этот период изучены возбудители заболеваний сельскохозяйственных – злаковых (Poales: Poaceae) [16–18], бобовых (Fabales: Fabaceae) [19; 20], пасленовых (Solanales: Solanaceae) [21], тыквовых (Cucurbitales: Cucurbitaceae) [22; 23] – плодово-ягодных [24] и декоративных [25; 26] культур. С одной стороны, в перечисленных работах содержится информация и о циркуляции фитовирусов в естественных фитоценозах, но эта информация не носит системный характер, и нуждается в обобщении. С другой стороны, в лаборатории имеется большой массив данных по вирусам дикорастущих растений Уссурийской тайги. Эту работу начал в конце 1960-х гг. В.Д. Костин [1; 27] и позже продолжил её совместно с Ю.Г. Волковым [28–31]. Многие изоляты, полученные в прошлом веке, не были тогда идентифицированы и продолжали храниться в Коллекции вирусов Восточной Азии на базе ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН (Владивосток) [4; 13]; в последние годы в изучении этих штаммов произошёл заметный прогресс, что также требует серьёзной ревизии имеющихся научных представлений о фитовиrome Маньчжурских ландшафтов.

Целью данной работы является обобщение результатов эколого-вирусологических исследований фитовирусов, циркулирующих на Дальнем Востоке России.

ОБСУЖДЕНИЕ

В период 1968–2025 гг. сотрудниками лаборатории вирусологии были пройдены свыше 400 экспедиционных маршрутов (включая 16 постоянных маршрутов в Приморье) от острова Врангеля (Иультинский район Чукотского автономного округа) на севере до нижнего течения реки Туманная (Хасанский район Приморского края) на юге, от отрогов Станового хребта (Амурская область) на западе до Курильских

островов на востоке в пределах 9 субъектов Дальневосточного федерального округа: Республики Саха-Якутия, Чукотского автономного округа, Камчатского, Приморского и Хабаровского краёв, Еврейской автономной области, Амурской, Магаданской и Сахалинской областей. В естественных фитоценозах выявлено свыше 200 вирусных и вироподобных заболеваний на более, чем 100 видах дикоросов. Наиболее изученные фитовирусы из этого перечня представлены в табл. 1.

Наиболее вирусифильными, по нашим наблюдениям, являются представители бобовых (Fabales: Fabaceae; 27 вирусных заболеваний), астровых (Asterales: Asteraceae; 13) и розовых (Rosales: Rosaceae; 12).

На Дальнем Востоке у дикорастущих бобовых были выявлены возбудители заболеваний, широко распространённые в агроценозах: у дикой сои, *Glycine soja* (Fabales: Fabaceae) – вирус мозаики сои, *Potyvirus glycitessellati*¹ (Potyvirales: Potyviridae); у клевера ползучего, *Trifolium repens* (Fabales: Fabaceae) – вирус мозаики белого клевера, *Potexvirus trifolii* (Tymovirales: Alphaflexiviridae); у клевера люпиновидного (*Trifolium lupinaster*), горошка однопарного (*Vicia unijuga*) и горошка приятного (*Vicia amoena*) – вирус желтой мозаики фасоли, *Potyvirus phaseoliteum*. Впервые на клеверах (*Trifolium* spp.) и горошках (*Vicia* spp.) идентифицированные вирусы, не получившие пока официального бинарного названия ICTV: желтой мозаики клевера гибридного (ThYMV – *Trifolium hybridum* yellow mosaic virus); крапчатости клевера ползучего (TrMV – *Trifolium repens* mottle virus); мозаики клевера лугового (RCMV – Red clover mosaic virus); некротической мозаики горошка ложносочевичного (VpNMV – *Vicia pseudorobus* necrotic mosaic virus) и мозаики горошка однопарного (VuMV – *Vicia unijuga* mosaic virus). Наибольшее количество фитовирусов на растениях семейства бобовых представлено потивирисами. Наблюдается значительное штаммовое разнообразие у многих вирусов. Например, VuMV представлен 4 штаммами: 1 штамм выявлен в Амурской области, а 3 – на юге Приморского края. Выявлено несколько штаммов *P. phaseoliteum*, отличающихся друг от друга по ряду физико-химических характеристикам.

На Дальнем Востоке широко представлены природные очаги вирусов огуречной мозаики, *Cucumovirus CMV* (Martellivirales: Bromoviridae), и табачной мозаики, *Tobamovirus tabaci* (Martellivirales: Virgaviridae), имеющие, по-видимому, вторичную природу – то есть проникли в природную среду из антропогенных фитоценозов.

¹ В тех случаях, когда это возможно, мы будем использовать бинарную номенклатуру [33], рекомендованную ICTV (International Committee on the Taxonomy of Viruses – Международным комитетом по таксономии вирусов).

В случае отсутствия утверждённой бинарной номенклатуры, используются традиционные названия вирусов.

Whenever possible we will use the binary nomenclature [33] recommended by the ICTV (International Committee on the Taxonomy of Viruses). In the absence of an approved binary nomenclature traditional virus names are used.

Таблица 1. Наиболее изученные вирусные заболевания дикорастущих видов растений Дальнего Востока России
Table 1. The most studied viral diseases of wild plant species of the Russian Far East

Вид растения* Plant species*	Симптомы заболевания Disease Symptoms	Место сбора** Place of collection**	Морфология частиц на электронно- микроскопических фотографиях Morphology of particles in electron microscopic photographs	Антигенное родство*** Antigenic relationship***	Результат таксономической идентификации Result of taxonomic identification
Зонтичные / Umbellifers (Apiales: Apiaceae)					
Дудник даурский Dahurian angelica (<i>Angelica dahurica</i>)	Жёлтая пятнистость Yellow spotting	ПК: Уссурийский, Тернейский, Надеждинский PK: Ussuriysky, Terneysky, Nadezhdinsky	Изометрические 25–30 нм Isometric 25–30 nm	BOM CMV	BOM CMV
Скрытница японская Japanese honewort (<i>Cryptotaenia japonica</i>)	Мозаика Mosaic	СО: о. Кунашир SR: Kunashir Island	Нитевидные Filamentous	Нет данных No data	Нет данных No data
Амариллисовые / Amaryllis (Asparagales: Amaryllidaceae)					
Черемша Siberian onion (<i>Allium ochotense</i>)	Жёлтая штриховатость Yellow streaks	КК: Елизовский KK: Elizovsky	Нитевидные 750–800 нм Filamentous 750–800 nm	Нет данных No data	Нет данных No data
Астровые / Asters (Asterales: Asteraceae)					
Лопух крупный Greater burdock (<i>Arctium lappa</i>)	Желтая мозаика Yellow mosaic	ПК; ХК PK; KHK	Изометрические Isometric	BOM CMV	BOM CMV
	Пятнистость Spotting	ПК: Влк PK: Vlk	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
	Деформация, пятнистость Deformation, spotting	ПК: Влк, Уссурийский PK: Vlk, Ussuriysky	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
Полынь побегоносная Creeping wormwood (<i>Artemisia stolonifera</i>)	Кольцевая пятнистость Ring spotting	ХК: Хабаровский KHK: Khabarovsky	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
Астра надрезанная Japanese cutleaf aster (<i>Aster incisus</i>)	Жёлтая пятнистость Yellow spotting	ПК: Хасанский PK: Khasansky	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data

Недоспелка ушастая Eared Indian plantain (<i>Cacalia auriculata</i>)	Мозаика, деформация Mosaic, deformation	КК: ППК КК: РРК	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
Бодяк камчатский Kamchatka thistle (<i>Cirsium kamtschaticum</i>)	Пятнистость Spotting	КК: Елизовский, ППК КК: Elizovsky, RPK	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
Бодяк щетинистый Creeping thistle (<i>Cirsium setosum</i>)	Кольцевая пятнистость Ring spotting	ПК PK	Нитевидные 600–630 × 14 нм Filamentous 600–630 × 14 nm	SBK PVS	Нет данных No data
Астра шершавая Korean aster (<i>Doellingeria scabra</i>)	Линейный узор Linear pattern	ПК: Партизанский PK: Partisansky	Палочковидные 200 × 14 нм и 100 × 14 нм Rod-shaped 200 × 14 nm and 100 × 14 nm	ВПГ TRV	Нет данных No data
	Кольцевая пятнистость Ring spotting	ПК: Надеждинский PK: Nadezhdinsky	Изометрические Isometric	Нет данных No data	Нет данных No data
Косогорник Татаринова Tatarinow's rattlesnake root (<i>Prenanthes tatarinowii</i>)	Жёлтая пятнистость Yellow spotting	ПК: Влк, Надеждинский PK: Vlk, Nadezhdinsky	Палочковидные 300 × 18 нм Rod-shaped 300 × 18 nm	BTM TMV	BTM TMV
Соссурия амурская Amur snow lotus (<i>Saussurea amurensis</i>)	Кольцевая пятнистость Ring spotting	АО: Архаринский, Зейский AR: Arkharinsky, Zeysky	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
Осот полевой Field sowthistle (<i>Sonchus arvensis</i>)	Жёлтая мозаика Yellow mosaic	ПК: Влк PK: Vlk	Нет данных No data	ВМ CMV	ВМ CMV
Осот огородный Common sowthistle (<i>Sonchus oleraceus</i>)	Жёлтая мозаика Yellow mosaic	ПК: Партизанский PK: Partisansky	Изометрические Isometric	ВМ CMV	ВМ CMV
Колокольчиковые / Bellflowers (Asterales: Campanulaceae)					
Бубенчик мутноватый Japanese lady bell (<i>Adenophora verticillata</i>)	Мозаика Mosaic	ПК: Надеждинский PK: Nadezhdinsky	Изометрические 30 нм Isometric 30 nm	ВМГО VuMV	Нет данных No data
	Угловатая пятнистость, мраморность Angular spotting, marbling	ПК: Попраничный PK: Pogranishny	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data

Бурчаниковые / Borages (Boraginales: Boraginaceae)					
Короткокистник воронеглазый Drooping bell flower (<i>Brachybotrys paridiformis</i>)	Кольцевая пятнистость Ring spotting	ПК: Надеждинский PK: Nadezhdinsky	Изометрические Isometric	Нет данных No data	Нет данных No data
	Жилковая мозаика Vein mosaic	ПК: Надеждинский PK: Nadezhdinsky	Нитевидные Filamentous	Нет данных No data	Нет данных No data
	Маревые / Amaranths (Caryophyllales: Amaranthaceae)				
Марь белая Goosefoot (<i>Chenopodium album</i>)	Мозаика Mosaic	ПК: Чугуевский PK: Chuguevsky	Изометрические Isometric	Нет данных No data	Нет данных No data
	Гречишные / Knotweeds (Caryophyllales: Polygonaceae)				
Щавель шпинатный Garden patience (<i>Rumex patientia</i>)	Кольцевая пятнистость Ring spotting	ПК PK	Нитевидные 700 нм Filamentous 700 nm	Нет данных No data	Нет данных No data
	Хлорантовые / Chlorants (Chloranthales: Chloranthaceae)				
Хлорант японский Japanese chlorant (<i>Chloranthus japonicus</i>)	Крпчатость Mottling	ПК: Уссурийский PK: Ussuriysky	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
	Бобовые / Legumes (Fabales: Fabaceae)				
Соя уссурийская Wild soybean (<i>Glycine soja</i>)	Мозаика Mosaic	ПК: Спасский PK: Spassky	Нитевидные 750 нм Filamentous 750 nm	ВМС SMV	Нет данных No data
	Яркая жёлтая пятнистость Bright yellow spotting	ПК: Надеждинский PK: Nadezhdinsky	Нитевидные Filamentous	ВЖМФ BYMV	Нет данных No data
Донник ароматный Sweet clover (<i>Mellilotus suaveolens</i>)	Мозаика, угнетение роста Mosaic, growth inhibition	СО: Тымовский SR: Tymovsky	Нитевидные с резкой поперечной исчерченностью Filamentous with a sharp transverse striation	Нет данных No data	Нет данных No data
	Мозаика, пожелтение Mosaic, yellowing	ПК: Влк PK: Vlk	Нитевидные 845 x 12 нм Filamentous 845 x 12 nm	ВОМФ BCMV	<i>Potyvirus</i> sp.
	Мозаика Mosaic	ПК: Партизанский PK: Partisansky	Нитевидные 780 x 12 нм Filamentous 780 x 12 nm	ВЖМФ BYMV	ВМКГ MCMV
Клевер гибридный Alsike clover (<i>Trifolium hybridum</i>)	Мозаика Mosaic	АО: Бурейский AR: Bureyskiy	Нитевидные 750–800 нм Filamentous 750–800 nm	ВЖМФ BYMV	<i>Potyvirus</i> sp.
	Яркая жёлтая пятнистость Bright yellow spotting	ПК: Спасский PK: Spassky	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data

Клевер луговой Red clover (<i>Trifolium pratense</i>)	Мозаичное окаймление жилок Mosaic edging of veins	АО: Бурейский AR: Bureyskiy	Нитевидные 750–800 × 12 нм Filamentous 750–800 × 12 nm	Нет данных No data	<i>Potyvirus</i> sp.
	Яркая жёлтая пятнистость Bright yellow spotting	ПК: Черниговский PK: Chernigovsky	Нитевидные 750 × 12 нм и 850–900 × 13 нм Filamentous 750 × 12 nm and 850–900 × 13 nm	ВЖМФ BYMV	<i>Potyvirus</i> sp.
Клевер ползучий White clover (<i>Trifolium repens</i>)	Крапчатость Mottling	ПК: Уссурийский PK: Ussuriysky	Нитевидные 750–850 × 12 нм Filamentous 750–850 × 12 nm	ВОМФ BSMV	<i>Potyvirus</i> sp.
	Мозаика Mosaic	ПК: Уссурийский PK: Ussuriysky	Нитевидные 480 × 12 нм Filamentous 480 × 12 nm	ВОМФ BSMV	ВМБК WCIMV
Горошек приятный Lovely vetch (<i>Vicia amoena</i>)	Жёлтая пятнистость Yellow spotting	ХК: Комсомольский KHK: Komsomolsky	Нет данных No data	ВЖМФ BYMV	<i>Potyvirus</i> sp.
	Мозаика Mosaic	ХК: Солнечный KHK: Solnechny	Изометрические 28–30 нм Isometric 28–30 nm	Нет данных No data	Нет данных No data
	Карликовая кустистость Dwarf bushiness	ПК: Партизанский PK: Partisansky	Палочковидные 600–650 нм Rod-shaped 600–650 nm	Нет данных No data	Нет данных No data
Горошек мышиный Cow vetch (<i>Vicia cracca</i>)	Пятнистость Spotting	АО: Шимановский AR: Szymanowski	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
	Некроз листьев и верхушки Necrosis of leaves and tips	ПК: Уссурийский PK: Ussuriysky	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
Горошек Ови Ohwi's vetch (<i>Vicia ohwiana</i>)	Кустистая карликовость Bushy dwarfism	ПК: Надеждинский PK: Nadezhdinsky	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
	Мозаика с некротизацией Mosaic with necrotization	АО: Бурейский AR: Bureyskiy	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
Горошек ложносочевичный Pseudo-orobus vetch (<i>Vicia pseudorobus</i>)	Кольцевая пятнистость Ring spotting	АО: Шимановский AR: Szymanowski	Изометрические Isometric	Нет данных No data	Нет данных No data
	Белая мозаика, полосчатый узор White mosaic, striped pattern	АО: Шимановский AR: Szymanowski	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
	Морщинистая мозаика, курчавость Wrinkled mosaic, curly hair	АО: Бурейский AR: Bureyskiy	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
	Некротизация жилок Necrotizing veins	ЕАО; ПК: Чугуевский JAR; PK: Chuguevsky	Нитевидные 650 × 12 нм Filamentous 650 × 12 nm	Нет данных No data	ВПГ PeSV

Горошек разветвленный Branching vetch (<i>Vicia ramuliflora</i>)	Карликовая кустистость Dwarf bushiness	АО: Зейский AR: Zeysky	Нет данных No data	ВЖМФ BYMV	Нет данных No data
	Мозаика Mosaic	АО: Бурейский; ПК: Хасанский AR: Bureyskiy; PK: Khasansky	Изометрические 28 нм Isometric 28 nm	ВМК BMV	ВМГО VuMV
	Мозаика с некротизацией Mosaic with necrosis	ПК: Хасанский PK: Khasansky	Изометрические 28 нм и 17 нм Isometric 28 nm and 17 nm	ВМГО VuMV	ВМГО и его сателлит (меньшего размера) VuMV ant its satellite (smaller size)
	Жёлтая мозаика Yellow mosaic	ПК: Надеждинский PK: Nadezhdinskiy	Нитевидные 750 × 14 нм Filamentous 750 × 14 nm	ВЖМФ BYMV	Нет данных No data
Горошек однопарный Two-leaf vetch (<i>Vicia unijuga</i>)	Морщинистость, деформация Wrinkling, deformation	ПК: Партизанский PK: Partisansky	Нитевидные Filamentous	Нет данных No data	Нет данных No data
	Метельчатость Panicle-like	АО AR	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
	Линейный узор, некротизирующий позднее Linear pattern that later necrotises	ПК: Уссурийский PK: Ussuriysky	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
	Хлоротическая крапчатость Chlorotic mottling	АО: Бурейский AR: Bureyskiy	Нитевидные 1300–1600 × 12 нм Filamentous 1300–1600 × 12 nm	Нет данных No data	<i>Closterovirus</i> sp.
Береза плосколистная Asian white birch (<i>Betula platyphylla</i>)	Березовые / Birchs (Fagales: Betulaceae)				
	Кольцевая пятнистость Ring spotting	КК: Быстринский, Эссо KK: Bystrinskiy, Esso	Изометрические 30 нм Isometric 30 nm	Нет данных No data	Нет данных No data
	Линейный узор Linear pattern	РСЯ: Олёкминск RSY: Olekminsk	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
Герань даурская Daurian geranium (<i>Geranium davuricum</i>)	Гераниевые / Geraniums (Geraniales; Geraniaceae)				
	Мозаика Mosaic	ПК: Тернейский PK: Terneysky	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data

Яснотковые / Mints (Lamiales: Lamiaceae)					
Огневик Максимовича Maximowicz's phlomoides (<i>Phlomoides maximowiczii</i>)	Кольцевая пятнистость Ring spotting	ПК: Надеждинский, Хасанский PK: Nadezhdinsky, Khasansky	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
		Подорожниковые / Plantains (Lamiales: Plantaginaceae)			
Подорожник азиатский Asiatic plantain (<i>Plantago asiatica</i>)	Мозаика Mosaic	ПК: Надеждинский; СО: Анивский, Корсаковский, Невельский PK: Nadezhdinsky; SR: Anivsky, Korsakovsky, Nevelsky	Нитевидные 520–540 × 14 нм Filamentous 520–540 × 14 nm	ХВК PVX	ВМПА PIAMV
		АО: Благовещенск AR: Blagoveshchensk	Нитевидные 780 × 12 нм Filamentous 780 × 12 nm	УВК PVT	УВК PVT
	Темнозелёная мозаика Dark green mosaic	АО: Тындинский AR: Tyndinsky	Палочковидные 300 × 18 нм Rod-shaped 300 × 18 nm	ВТМ TMY	Амурский штамм BTM Amur strain of TMY
		ПК: Уссурийский PK: Ussuriysky	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
	Вербеновые / Verbenas (Lamiales: Verbenaceae)				
Фрима азиатская Asian lopseed (<i>Phryma asiatica</i>)	Зелёная мозаика Green mosaic	ПК: Спасский PK: Spassky	Изометрические 30–32 нм Isometric 30–32 nm	ВКПТ TRSV	<i>Nepovirus</i> sp.
Лилейные / Lilies (Liliales: Liliaceae)					
Лилия тигровая Tiger lily (<i>Lilium tigrinum</i>)	Полосатость Striation	ПК: Надеждинский PK: Nadezhdinsky	Нитевидные 500 × 14 нм Filamentous 500 × 14 nm	Нет данных No data	<i>Potexvirus</i> sp.
Мятликовые / True grasses (Poales: Poaceae)					
Вейник незамечаемый Narrow small-reed (<i>Calamagrostis neglecta</i>)	Деформация верхних листьев Deformation of upper leaves	ПК: Черниговский PK: Chernigovsky	Изометрические 30 нм Isometric 30 nm	Нет данных No data	Нет данных No data
Пырей ползучий Common couch (<i>Elytrigia repens</i>)	Пятнистость Spotting	ПК: Спасский PK: Spassky	Нитевидные 900 × 14 нм Filamentous 900 × 14 nm	Нет данных No data	<i>Tritimovirus</i> sp.

Рогозник Ribbon grass (<i>Phalaroides arundinacea</i>)	Полосатость Striation	ПК: Хасанский PK: Khasansky	Нитевидные 800 нм Filamentous 800 nm	Нет данных No data	Нет данных No data
	Мозаика Mosaic	ПК: Анучинский, Пограничный, Хасанский PK: Anuchinsky, Pogranichny, Khasansky	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
Бамбучник Chishima zasa (<i>Sasa kurilensis</i>)	Полосатость Striation	СО: о. Кунашир SR: Kunashir Island	Изометрические 70 нм Isometric 70 nm	Нет данных No data	Нет данных No data
	Полосатость Striation	ХК: Бурейский КНК: Bureyskiy	Нитевидные Filamentous	Нет данных No data	Нет данных No data
Серебородник сибирский Siberian graybeard (<i>Sporodopogon sibiricus</i>)	Штриховатая мозаика Streaked mosaic	ХК: Бикинский КНК: Bikinsky	Изометрические 28 нм Isometric 28 nm	БМК BMV	БМК BMV
	Полосатость	ПК: Хорольский PK: Khorolsky	Палочковидные Rod-shaped	Нет данных No data	Нет данных No data
	Striation	Маковые / Porpies (Ranunculales: Papaveraceae)			
Чистотел азиатский Asian celandine (<i>Chelidonium asiaticum</i>)	Побеление участков листа Whitening of leaf sections	ПК: Дальнереченский, Пожарский, Ханкайский PK: Dalnerechensky, Pozharsky, Khankaisky	Нитевидные Filamentous	Нет данных No data	Нет данных No data
	Жилковая мозаика Vein mosaic	ПК: Шкотовский PK: Shkotovsky	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
Лесной мак весенний Forest poppy (<i>Hylomecon vernalis</i>)					
Василистник клубненосный Meadow rue (<i>Thalictrum tuberiferum</i>)	Кольцевая пятнистость Ring spotting	ПК: Анучинский PK: Anuchinsky	Нет данных No data	Нет данных No data	Нет данных No data
	Лютиковые / Buttercups (Ranunculales: Ranunculaceae)				
Хмелевик лазающий Japanese hop (<i>Humulopsis scandens</i>)	Мозаика Mosaic	ПК: Уссурийский PK: Ussuriysky	Палочковидные 300 × 18 нм Rod-shaped 300 × 18 nm	БТМ TMV	БТМ TMV
	Жёлтая пятнистость Yellow mosaic	ПК: Надеждинский PK: Nadezhdinsky	Нитевидные Filamentous	УБК PVY	УБК PVY
	Розовые / Roses (Rosales: Rosaceae)				
Репешок мелкобороздчатый Grooved agrimony (<i>Agrimonia striata</i>)	Перистость Cirrinity	ПК: Партизанский PK: Partisansky	Нитевидные 700–750 нм Filamentous 700–750 nm	УБК PVY	УБК PVY

Лабазник дланевидный Siberian meadowsweet (<i>Filipendula palmata</i>)	Мозаика Mosaic	ПК: Дальнереченский, Партизанский PK: Dalnerechensky, Partisansky	Изометрические Isometric	ВОМ CMV	Нет данных No data
Лапчатка земляничная Cinquefoil (<i>Potentilla fragarioides</i>)	Жилковая мозаика Vein mosaic Деформация, пятнистость Deformation, spotting	ПК: Пограничный PK: Partisansky ПК; ХК PK; KHK	Изометрические Isometric Нитевидные Filamentous	ВОМ CMV Нет данных No data	Нет данных No data Нет данных No data
Малина боярышниковлистная Hawthorn-leaved bramble (<i>Rubus crataegifolius</i>)	Диффузная мозаика Diffuse mosaic Жилковая мозаика Vein mosaic	ПК: Надеждинский PK: Nadezhdinsky ПК: Надеждинский PK: Nadezhdinsky ПК: Надеждинский PK: Nadezhdinsky ХК: Ванинский KHK: Vaninsky	Нет данных No data Нет данных No data Нет данных No data Нет данных No data	Нет данных No data Нет данных No data Нет данных No data Нет данных No data	Нет данных No data Нет данных No data Нет данных No data Нет данных No data
Малина сахалинская Sakhalin raspberry (<i>Rubus sachalinensis</i>)	Жёлтая пятнистость Yellow spotting	ПК: Надеждинский; ХК: Комсомольский PK: Nadezhdinsky; KHK: Komsomolsky	Изометрические Isometric	Нет данных No data	Нет данных No data
Рябина бузинолистная Siberian Mountain Ash (<i>Sorbus sambucifolia</i>)	Мозаика Mosaic Перистость Cirrinity Кольцевая пятнистость Ring spotting	АО: Селемджинский AR: Seledmzhinsky АО: Зейский AR: Zeysky КК: Елизовский KK: Elizovsky	Короткие палочковидные Short rod-shaped Нет данных No data Изометрические 30 нм Isometric 30 nm	Нет данных No data Нет данных No data Нет данных No data	Нет данных No data Нет данных No data Нет данных No data
Крапива светло-зеленая Stinging nettle (<i>Urtica laetevirens</i>)	Мозаика Mosaic Жёлтая пятнистость Yellow spotting	Крапивоые / Nettles (Rosales: Urticaceae) ПК: Анучинский PK: Anuchinsky ПК: Партизанский PK: Partisansky			
Ясенец мохнатоплодный Densefruit pittany (<i>Dictamnus dasycarpus</i>)	Кольцевая пятнистость, посветление жилок Ring spotting, vein lightening	Рутовые / Citruses (Sapindales: Rutaceae) АО: Шимановский AR: Szymanowsky			
Бархат амурский Amur cork tree (<i>Phellodendron amurense</i>)	Кольцевая пятнистость Ring spotting	ПК: Влк, Уссурийский PK: Vlk, Ussuriysky	Изометрические 30 нм Isometric 30 nm	Нет данных No data	Нет данных No data

Крыжовниковые / Grossulars (Saxifragales: Grossulariaceae)				
Смородина маньчжурская Manchurian blackcurrant (<i>Ribes mandshuricum</i>)	Кольцевая пятнистость Ring spotting	КК: Елизовский KK: Elizovsky	Изометрические Isometric	Нет данных No data
Пион молочнокветковый Chinese peony (<i>Paeonia lactiflora</i>)	Жёлтая пятнистость Yellow spotting	ПК: Ольгинский PK: Olginsky	Нитевидные 720 × 12 нм Filamentous 720 × 12 nm	YBK PVY
16 порядков, 24 семейства / 16 orders, 24 families				
7 субъектов Российской Федерации,				
47 родов, 58 видов 47 genera, 58 species	94 вирусных изолята с 37 симптоматических комплексов 94 virus isolates with 37 symptom complexes	34 административных района, окрестности 5 городов 7 subjects of the Russian Federation, 34 administrative districts the environs of 5 cities	3 морфологических типа вирионов 3 morphological types of virions	33 (35,1%) серотипирования 12 вирусов 33 (35,1%) serotyping of 12 viruses 30 (31,9%) классифици- рованных вирусов 30 (31,9%) classified viruses

Примечание: *Используется упорядочение по латинским названиям порядков, семейств и видов

**Сокращённое название субъекта Российской Федерации (АО – Амурская область; ЕАО – Еврейская автономная область; КК – Камчатский край; ПК – Приморский край; РСЯ – Республика Саха-Якутия; СО – Сахалинская область; ХБ – Хабаровский край); административный район или город (Влк – Владивосток; ППК – Петропавловск-Камчатский)

***ВЖМФ – вирус желтой мозаики фасоли, *Potyvirus phaseoliteum* (Potatavirales: Potyviridae); ВКПТ – вирус кольцевой пятнистости табака, *Nepovirus nicotianae* (Picornavirales: Secoviridae); ВМКБ – вирус мозаики белого клевера, *Potexvirus trifolii* (Tymovirales: Alphaflexiviridae); ВМГО – вирус мозаики горошка однопарного (Martellivirales: Bromoviridae); ВМК – вирус мозаики костра, *Bromovirus BMV* (Martellivirales: Bromoviridae); ВМКГ – вирус мозаики клевера горного (Patatavirales: Potyviridae, Potyvirus); ВМПА – вирус мозаики подорожника азиатского, *Potexvirus marmorplantagonis* (Tymovirales: Alphaflexiviridae); ВМС – вирус мозаики сои, *Potyvirus glycitessellati* (Patatavirales: Potyviridae); ВОМ – вирус озурченной мозаики, *Cucumovirus CMV* (Martellivirales: Bromoviridae); ВОМФ – вирус обыкновенной мозаики фасоли, *Potyvirus phaseovulgaris* (Patatavirales: Potyviridae); ВПГ – вирус полосатости гороха, *Carlavirus pisi* (Tymovirales: Betaflexiviridae); ВПТ – вирус погречковости табака, *Tobravirus tabaci* (Martellivirales: Virgaviridae); СБК – S-вирус картофеля, *Carlavirus sigmasolani* (Tymovirales: Betaflexiviridae); ХБК – X-вирус картофеля, *Potexvirus espotati* (Tymovirales: Alphaflexiviridae); YBK – Y-вирус картофеля, *Potyvirus yituberosi* (Patatavirales: Potyviridae) [4]

Note: *The arrangement for Latin names of orders, families, and species is used

**Abbreviated name of the subject of the Russian Federation (AR – Amur region; JAR – Jewish autonomous region; KHK – Khabarovsk krai; KK – Kamchatsky krai; PK – Primorsky krai; RSY – Republic of Sakha-Yakutia; SR – Sakhalin region); administrative region or city (PPK – Petropavlovsk-Kamchatsky; Vlk – Vladivostok)

***BCMV – Bean common mosaic virus, *Potyvirus phaseovulgaris* (Patatavirales: Potyviridae); BMV – Brome mosaic virus, *Bromovirus BMV* (Martellivirales: Bromoviridae); BYMV – Bean yellow mosaic virus, *Potyvirus phaseoliteum* (Patatavirales: Potyviridae); CMV – Cucumber mosaic virus, *Cucumovirus CMV* (Martellivirales: Bromoviridae); MCMV – Mountain clover mosaic virus (Patatavirales: Potyvirus); PeSV – Pea streak virus, *Carlavirus pisi* (Tymovirales: Betaflexiviridae); PIAMV – Plantago asiatica mosaic virus, *Potexvirus marmorplantagonis* (Tymovirales: Alphaflexiviridae); PVS – Potato virus S, *Carlavirus sigmasolani* (Tymovirales: Betaflexiviridae); PVX – Potato virus X, *Potexvirus espotati* (Tymovirales: Alphaflexiviridae); PVY – Potato virus Y, *Potyvirus yituberosi* (Patatavirales: Potyviridae); SMV – Soybean mosaic virus, *Potyvirus glycitessellati* (Patatavirales: Potyviridae); TMV – Tobacco mosaic virus, *Tobravirus tabaci* (Martellivirales: Virgaviridae); TRSV – Tobacco ringspot virus, *Nepovirus nicotianae* (Picornavirales: Secoviridae); TRV – Tobacco rattle virus, *Tobravirus tabaci* (Martellivirales: Virgaviridae); VuMV – Vicia unijuga mosaic virus (Martellivirales: Bromoviridae); WCMV – White clover mosaic virus, *Potexvirus trifolii* (Tymovirales: Alphaflexiviridae) [4]

Показано, что наибольшее количество дикорастущих растений с симптомами заболеваний встречаются в местах с интенсивным антропогенным воздействием – вблизи населенных пунктов, в районах с сельскохозяйственным производством, в сукцессиальных биотопах. Наиболее вероятными, на наш взгляд, могут быть две причины: интродукция человеком новых фитопатогенов из других регионов и снижение природной устойчивости в результате воздействия неблагоприятных факторов – контаминации промышленными и иными отходами, изменения микроклимата, вирусиферного давления. При этом, активизируется и обратный процесс: попав в природные растительные сообщества вирус становится опасным для культивируемых растений, поскольку сохраняется в дикорастущих растениях длительное время (особенно в многолетниках), что превращает их в постоянный резервуар инфекции.

Сказанное выше хорошо иллюстрируется на примере *C. CMV*. Было обнаружено значительное количество очагов этого вируса. Причем, больше всего растений, зараженных огуречной мозаикой, наблюдали в пределах населенных пунктов. Среди природной растительности, соседствующей с посевами, *C. CMV* был выявлен на подорожнике азиатском, *Plantago asiatica* (Lamiales: Plantaginaceae) с желтой мозаикой; осоте полевом, *Sonchus oleraceus* (Asterales: Asteraceae) с яркой пятнистостью; клевере ползучем с желтой пятнистостью; дуднике даурском, *Angelica dahurica* (Apiaceae) с яркой желтой пятнистостью; горошке приятном с хлорозом. Особенно много (до 90 %) выявлено инфицированных *C. CMV* растений лопуха большого, *Arctium lappa* (Asterales: Asteraceae). Этот вирус идентифицирован также среди посадок на сорных однолетних растениях сизебекии пушистой *Sigesbeckia pubescens* (Asterales: Asteraceae) и галинколе мелкоцветковой, *Galinsoga parviflora* (Asterales: Asteraceae), канатнике Теофраста, *Abutilon theophrasti* (Malvales: Malvaceae). Природные резервуары *C. CMV* выявлены среди древесных и кустарниковых растений: абрикос обыкновенный, *Prunus armeniaca* (Rosales: Rosaceae); абрикос маньчжурский, *Prunus mandshurica*; слива домашняя, *Prunus domestica*; смородина, *Ribes* sp. (Saxifragales: Grossulariaceae); жимолость съедобная, *Lonicera edulis* (Dipsacales: Caprifoliaceae); леспедеца двуцветная, *Lespedeza bicolor* (Fabales: Fabaceae). Иммунохимическими методами было показано, что на дикорастущих и культивируемых растениях часто присутствуют одни и те же штаммы *C. CMV*.

Следует подчеркнуть, что полученные данные включают только вирусные заболевания дикорастущих видов с выраженной симптоматикой. Однако вследствие латентного характера протекания инфекционного процесса в растениях естественной флоры (по крайней мере, на определенных стадиях вегетации), фитовирусов, конечно, больше, чем обнаружено. Иммунохимическим тестированием установлено, что в некоторых очагах выявляются растения латентно зараженные некоторыми фитовирусами. Иногда наблюдается исчезновение (или маскирование) симптомов заболевания в пределах очага и появление их вновь в последующие годы. Особенно это характерно для заболеваний, вызываемых представителями рода *Nepovirus* (Picornavirales: Secoviridae). Эти патогены, передающиеся через почву, в значительной степени поражают плодово-ягодные и декоративные

культуры и распространяются на небольшие расстояния. В природе эти возбудители выявлены на фриме азиатской, *Phryma asiatica* (Lamiales: Phrymaceae); бархате амурском, *Phellodendron amurense* (Sapindales: Rutaceae); астре шершавой, *Aster scaber* (Asterales: Asteraceae); рябине бузинолистной, *Sorbus sambucifolia* (Rosales: Rosaceae).

Характер распространения фитовирусов в природных биоценозах различен. Мы наблюдали, что некоторые заболевания длительное время существуют в виде четко ограниченных очагов, чаще всего в лесостепной зоне или на южных склонах сопков и холмов. Особенно это характерно для многолетних бобовых растений. В таких очагах иногда присутствовали несколько различных вирусов. По данным К.П. Дьяконова [33–35], в этих местах зимуют тли (Hemiptera: Aphidoidea) – гороховая (*Acyrtosiphon pisum*), бобовая (*Aphis fabae*), виковая (*Megoura viciae*) и др. – способные передавать энтомофильные вирусы. В связи с этим можно предположить, что эти очаги сформировались с участием переносчиков и поддерживаются в многолетних растениях. Кроме того, исследования показали, что в пределах подобных очагов на растениях может наблюдаться коинфекция нескольких вирусов, что, возможно, и является причиной проявления ярких симптомов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На хозяйственное значение фитопатогенов влияет структура сельскохозяйственного производства. Мелкотоварные фермы, дачные участки в большей степени подвержены очаговым инфекциям, поскольку в них наблюдается большое видовое и сортовое разнообразие и всегда находится чувствительное к инфекции растение. В природных фитоценозах, соседствующих с посевами, идентифицированы наиболее важные в экономическом плане патогены, характеризующихся интенсивным формированием новых и опасных штаммов. На дачных участках и огородах особенно часто инфекции вызываются представителями рода *Nepovirus*. Для более крупных хозяйств наибольшую опасность представляют энтомофильные вирусы. Их переносчики более мобильны, по сравнению с нематодами и могут за более короткий период перезаражать большее количество растений. Их природные очаги также хорошо сохраняются в составе естественной флоры. Наиболее экономически важными для Дальнего Востока являются вирусы, поражающие зерновые злаки, картофель и сою – эти патогены чрезвычайно вредоносны, вызывают суровые симптомы и даже гибель растений, снижают урожай и качество сельскохозяйственной продукции. Они также опасны и для естественных растительных сообществ. Все это обуславливает необходимость дальнейшего исследования фитопатогенных вирусов, их распространенности и способов циркуляции в природе, а рекомендации, выработанные на основе исследований следует учитывать сельхозпроизводителям при внедрении новых сортов и видов. Необходимым является и строгое соблюдение агротехники и профилактических мероприятий, используемых для предотвращения заражения этих интродуцированных из-за пределов региона растений и распространения вместе с ними вредоносных вирусов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костин В.Д. Вироzy дикорастущих растений Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2005. 122 с.
2. Костин В.Д., Волков Ю.Г. Этиология некоторых мозаичных заболеваний дикорастущих растений Дальнего Востока // В сб.: Вопросы защиты растений на Дальнем Востоке. Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. С. 3–6.
3. Крылов А.В. Вирусы растений Дальнего Востока: идентификация, особенности биологии, классификация. Москва: Наука, 1992. 112 с.
4. Щелканов М.Ю., Какарека Н.Н., Волков Ю.Г., Толкач В.Ф. Становление фитовирусологии на Дальнем Востоке в контексте развития отечественной вирусологии. Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2022. 142 с.
5. Щелканов М.Ю., Аристов В.А., Чумаков В.М., Львов Д.К. Историография термина «природный очаг» // В сб.: Новые и возвращающиеся инфекции в системе биобезопасности Российской Федерации. Москва: Изд-во Первого МГМУ им. И.М. Сеченова, 2014. С. 21–32.
6. Львов Д.К., Дерябин П.Г., Аристов В.А., Бутенко А.М., Галкина И.В., Громашевский В.Л., Давыдова А.А., Колобухина Л.В., Львов С.Д., Щелканов М.Ю. Атлас распространения возбудителей природноочаговых вирусных инфекций на территории Российской Федерации. Москва: Изд-во МЗ РФ, 2001. 192 с.
7. Щелканов М.Ю., Громашевский В.Л., Львов Д.К. Роль эколого-вирусологического районирования в прогнозировании влияния климатических изменений на ареалы арбовирусов // Вестник РАМН. 2006. N 2. С. 22–25.
8. Онищенко Г.Г., Кривуля С.Д., Чистякова Г.Г., Пакскина Н.Д., Хадарцев О.С., Алексеев В.В., Липницкий А.В., Савченко С.Т., Смелянский В.П., Пашанина Т.П. и др. Мероприятия по борьбе с лихорадкой Западного Нила на территории Российской Федерации. Методические указания МУ 3.1.3.2600-10 (утв. главным государственным санитарным врачом РФ 19 апреля 2010 г.). Москва, 2010. 45 с.
9. Arias J.H., Gómez-Gardeñes J., Meloni S., Estrada E. Epidemics on plants: Modeling long-range dispersal on spatially embedded networks // Journal of Theoretical Biology. 2018. V. 453. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2018.05.004>
10. Gomez D.F., Adams D.C., Cossio R.E., de Grammont P.C., Messina W.A., Royce F.S., Galindo-Gonzalez S., Hulcr J., Muino B.L., Vázquez L.L. Peering into the Cuba phytosanitary black box: An institutional and policy analysis // PLoS One. 2020. V. 15. N 9. Article id: e0239808. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239808>
11. Nazarov P.A., Baleev D.N., Ivanova M.I., Sokolova L.M., Karakozova M.V. Infectious plant diseases: Etiology, current status, problems and prospects in plant protection // Acta Naturae. 2020. V. 12. N 3. P. 46–59. <https://doi.org/10.32607/actanaturae.11026>
12. Kakareka N., Volkov Yu., Tolkach V., Sapotskiy M., Shchelkanov M. Possibilities of obtaining and controlling virus-free material in the process of selection and seed production of main crops // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 937. Article id: 032108. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/3/032108>
13. Щелканов М.Ю., Волков Ю.Г., Какарека Н.Н., Козловская З.Н., Сапоцкий М.В., Толкач В.Ф., Плешакова Т.И., Гапека А.В., Галкина И.В. Организация Российской государственной коллекции вирусов Восточной Азии на базе ДВО РАН // Материалы международной научной конференции «Приморские Зори 2017», Владивосток, 20–22 апреля, 2017. С. 466–470.
14. Volkov Yu.G., Kakareka N.N., Tolkach V.F., Shchelkanov M.Yu. Arthropod-vectors of phytoviruses in the Russian Far East: a review // Far Eastern Entomologist. 2024. N 510. P. 23–32. <https://doi.org/10.25221/fee.510.3>
15. Какарека Н.Н., Волков Ю.Г., Толкач В.Ф., Щелканов М.Ю. Разнообразие штаммов фитовирусов на юге российского Дальнего Востока // Юг России: экология, развитие. 2024. Т. 19. N 3. С. 18–34. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2024-3-2>
16. Какарека Н.Н., Волков Ю.Г., Сапоцкий М.В., Толкач В.Ф., Щелканов М.Ю. Вирусы злаковых культур и их переносчики на юге российского Дальнего Востока // Сельскохозяйственная биология. 2020. Т. 55. N 3. С. 439–450. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2020.3.439rus>
17. Volkov Y.G., Kakareka N.N., Tolkach V.F., Klykov A.G., Shchelkanov M.Yu. Ecology of rice viruses in the South of the Russian Far East // Rice Research: Open Access. 2024. V. 12. N 3. P. 409. <https://doi.org/10.4172/2375-4338.1000409>
18. Гапека А.В., Зеликова А.А., Жмуркина С.К., Леднева В.А., Волков Ю.Г., Какарека Н.Н., Щелканов М.Ю. Вирус штриховатой мозаики ячменя (Virgaviridae, Hordeivirus) как этиологический агент хлоротичной полосатости кукурузы (Zea mays) // Российская сельскохозяйственная наука. 2018. N 1. С. 22–26.
19. Волков Ю.Г., Какарека Н.Н., Толкач В.Ф., Дьяконов К.П., Москвина Т.В., Щелканов М.Ю. Тли (Homoptera: Aphididae) – переносчики вирусных болезней бобовых на Дальнем Востоке // Чтения памяти Алексея Ивановича Куренцова. 2019. N 30. С. 211–222. <https://doi.org/10.25221/kurentzov.30.20>
20. Какарека Н.Н., Волков Ю.Г., Толкач В.Ф., Табакаева Т.В., Белов Ю.А., Муратов А.А., Щелканов М.Ю. Вирусные болезни бобовых культур на юге Российского Дальнего Востока // Юг России: экология, развитие. 2021. Т. 16. N 4. С. 71–85. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2021-4-71-85>
21. Какарека Н.Н., Толкач В.Ф., Сапоцкий М.В., Волков Ю.Г., Щелканов М.Ю. Насекомые-переносчики вирусных заболеваний картофеля на Дальнем Востоке // Чтения памяти Алексея Ивановича Куренцова. 2019. N 30. С. 191–199. <https://doi.org/10.25221/kurentzov.30.18>
22. Толкач В.Ф., Какарека Н.Н., Волков Ю.Г., Козловская З.Н., Сапоцкий М.В., Плешакова Т.И., Дьяконов К.П., Щелканов М.Ю. Вирусные болезни овощных и бахчевых сельскохозяйственных культур на юге Дальнего Востока // Юг России: экология, развитие. 2019. Т. 14. N 4. С. 121–133. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2019-4-121-133>
23. Толкач В.Ф., Какарека Н.Н., Волков Ю.Г., Щелканов М.Ю. Вирусы овощных культур Дальнего Востока России и их переносчики // Чтения памяти Алексея Ивановича Куренцова. 2019. N 30. С. 200–210. <https://doi.org/10.25221/kurentzov.30.19>
24. Волков Ю.Г., Какарека Н.Н., Толкач В.Ф., Щелканов М.Ю. Вирусные заболевания плодово-ягодных культур на юге российского Дальнего Востока // Юг России: экология, развитие. 2022. Т. 17. N 4. С. 88–100. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2022-4-88-100>
25. Толкач В.Ф., Волков Ю.Г., Какарека Н.Н., Алиев М.Р., Щелканов М.Ю. Вирус огуречной мозаики в декоративных культурах на российском Дальнем Востоке // Юг России: экология, развитие. 2023. Т. 18. N 4. С. 91–103. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-4-91-103>
26. Какарека Н.Н., Козловская З.Н., Волков Ю.Г., Плешакова Т.И., Сапоцкий М.В., Щелканов М.Ю. Неповирусы (Picornavirales, Secoviridae, Nepovirus) на юге Дальнего Востока: результаты многолетнего мониторинга // Юг России: экология, развитие. 2017. N 4. С. 105–119. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2017-4-105-119>
27. Костин В.Д., Степаненко В.И., Омельченко В.Т. Кольцевая пятнистость – вирусное заболевание бодяка щетинистого // В сб.: Вирусные болезни сельскохозяйственных растений Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1971. С. 219–220.
28. Костин В.Д., Волков Ю.Г. Некоторые свойства вируса, поражающего подорожник азиатский // В сб.: Вирусные болезни растений Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 205–210.
29. Костин В.Д., Волков Ю.Г. Мозаичное заболевание двукисточника // В сб.: Вирусные болезни растений Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 276–277.
30. Костин В.Д., Волков Ю.Г. Этиология некоторых мозаичных заболеваний дикорастущих растений Дальнего Востока // В сб.: Защита растений на Дальнем Востоке. Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. С. 3–6.
31. Волков Ю.Г., Костин В.Д. Фитовирусы в естественных и искусственных растительных сообществах Дальнего Востока России (экологические и эпидемиологические аспекты) // В сб.: Становление и развитие фитовирусологии на Дальнем Востоке. Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 136–154.
32. Khotimchenko Yu.S., Shchelkanov M.Yu. Viruses of the Ocean: On the shores of the aqua incognita. Horizons of taxonomic diversity // Russian Journal of Marine Biology. 2024. V. 50. P. 1–24. <https://doi.org/10.1134/S106307402401005X>

33. Дьяконов К.П. О возможности переноса некоторых фитовирусов тлями (Homoptera, Aphidinea) неспецифических видов // В сб.: Вирусные болезни растений Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 271–275.
34. Дьяконов К.П. Роль массовых вредителей-насекомых в инвазии ряда фитопатогенных вирусов // Чтения памяти Алексея Ивановича Куренцова. 2000. N 10. С. 5–16.
35. Дьяконов К.П. Трофические связи тлей (Homoptera, Aphidinea) как пример оптимального использования насекомыми кормовых ресурсов // Чтения памяти Алексея Ивановича Куренцова. 2003. N 13. С. 53–60.

REFERENCES

1. Kostin V.D. *Virozy dikorastushchikh rastenii Dal'nego Vostoka Rossii* [Virosis of wild plants of the Russian Far East]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2005, 122 p. (In Russian)
2. Kostin V.D., Volkov Yu.G. *Ehtologiya nekotorykh mozaichnykh zaboolevaniy dikorastushchikh rastenii Dal'nego Vostoka* [Etiology of some mosaic diseases of wild plants of the Far East]. In: *Voprosy zashchity rastenii na Dal'nem Vostoke* [Issues of plant protection in the Far East]. Vladivostok, Far Eastern Branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1989, pp. 3–6. (In Russian)
3. Krylov A.V. *Virussy rastenii Dal'nego Vostoka: identifikatsiya, osobennosti biologii, klassifikatsiya* [Plant viruses of the Far East: identification, features of biology, classification]. Moscow, Nauka Publ., 1992, 112 p. (In Russian)
4. Shchelkanov M.Yu., Kakareka N.N., Volkov Yu.G., Tolkach V.F. *Stanovlenie fitovirusologii na Dal'nem Vostoke v kontekste razvitiya otechestvennoi virusologii* [The formation of phytovirusology in the Far East in the context of the development of Russian virology]. Vladivostok, FEPU Publ., 2022, 142 p. (In Russian)
5. Shchelkanov M.Yu., Aristova V.A., Chumakov V.M., Lvov D.K. *Istoriografiya termina «prirodnyi ochaG»* [Historiography of the term "natural focus"]. In: *Novye i vozvrashchayushchiesya infektsii v sisteme biobezopasnosti Rossiiskoi Federatsii* [New and recurring infections in the biosafety system of the Russian Federation]. Moscow, Publishing House of the I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, 2014, pp. 21–32. (In Russian)
6. Lvov D.K., Deryabin P.G., Aristova V.A., Butenko A.M., Galkina I.V., Gromashevsky V.L., Davydova A.A., Kolobukhina L.V., Lvov S.D., Shchelkanov M.Yu. *Atlas rasprostraneniya vzbuditelei prirodnookhagovykh virusnykh infektsii na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Atlas of the spread of pathogens of naturally occurring viral infections in the territory of the Russian Federation]. Moscow, Ministry of Health of the Russian Federation Publ., 2001, 192 p. (In Russian)
7. Shchelkanov M.Yu., Gromashevsky V.L., Lvov D.K. The role of ecological-virological zoning in predicting the impact of climate change on the ranges of arboviruses. *Vestnik Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Medical Sciences]. 2006, no. 2, pp. 22–25. (In Russian)
8. Onishchenko G.G., Krivulya S.D., Chistyakova G.G., Paskina N.D., Khadartsev O.S., Alekseev V.V., Lipnitsky A.V., Savchenko S.T., Smelyansky V.P., Pashanina T.P., et al. *Meropriyatiya po bor'be s likhoradkoj Zapadnogo Nila na territorii Rossiiskoi Federatsii. Metodicheskie ukazaniya MU 3.1.3.2600-10 (utv. Glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom RF 19 aprelya 2010 g.)* [Measures to combat West Nile fever in the Russian Federation. Methodological guidelines MU 3.1.3.2600-10 (approved by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on April 19, 2010)]. Moscow, 2010, 45 p. (In Russian)
9. Arias J.H., Gómez-Gardeñes J., Meloni S., Estrada E. Epidemics on plants: Modeling long-range dispersal on spatially embedded networks. *Journal of Theoretical Biology*, 2018, vol. 453, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2018.05.004>
10. Gomez D.F., Adams D.C., Cossio R.E., de Grammont P.C., Messina W.A., Royce F.S., Galindo-Gonzalez S., Hulcr J., Muino B.L., Vázquez L.L. Peering into the Cuba phytosanitary black box: An institutional and policy analysis. *PLoS One*, 2020, vol. 15, no. 9, article id: e0239808. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239808>
11. Nazarov P.A., Baleev D.N., Ivanova M.I., Sokolova L.M., Karakozova M.V. Infectious plant diseases: Etiology, current status, problems and prospects in plant protection. *Acta Naturae*, 2020, vol. 12, no. 3, pp. 46–59. <https://doi.org/10.32607/actanaturae.11026>
12. Kakareka N., Volkov Yu., Tolkach V., Sapotskiy M., Shchelkanov M. Possibilities of obtaining and controlling virus-free material in the process of selection and seed production of main crops. *IOF Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 937, article id: 032108. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/3/032108>
13. Shchelkanov M.Yu., Volkov Yu.G., Kakareka N.N., Kozlovskaya Z.N., Sapotskiy M.V., Tolkach V.F., Pleshakova T.I., Gapeka A.V., Galkina I.V. Organizatsiya Rossiiskoi gosudarstvennoi kollektzii virusov Vostochnoi Azii na baze DVO RAN [Organization of the Russian State collection of East Asian viruses on the basis of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Primorskii Zori 2017»*, Vladivostok, 20–22 aprelya, 2017 [Proceedings of International Scientific Conference "Primorsky Dawns 2017", Vladivostok, 20–22 April, 2017]. Vladivostok, 2017, pp. 466–470. (In Russian)
14. Volkov Yu.G., Kakareka N.N., Tolkach V.F., Shchelkanov M.Yu. Arthropod-vectors of phytoviruses in the Russian Far East: a review. *Far Eastern Entomologist*, 2024, no. 510, pp. 23–32. <https://doi.org/10.25221/fee.510.3>
15. Kakareka N.N., Volkov Yu.G., Tolkach V.F., Shchelkanov M.Yu. The diversity of phytovirus strains in the south of the Russian Far East. *South of Russia: Ecology, Development*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 18–34. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2024-3-2>
16. Kakareka N.N., Volkov Yu.G., Sapotskiy M.V., Tolkach V.F., Shchelkanov M.Yu. Cereal viruses and their vectors in the south of the Russian Far East. *Agricultural Biology*, 2020, vol. 55, no. 3, pp. 439–450. (In Russian) <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2020.3.439rus>
17. Volkov Y.G., Kakareka N.N., Tolkach V.F., Klykov A.G., Shchelkanov M.Yu. Ecology of rice viruses in the South of the Russian Far East. *Rice Research: Open Access*, 2024, vol. 12, no. 3, pp. 409. <https://doi.org/10.4172/2375-4338.1000409>
18. Gapeka A.V., Zelikova A.A., Zhmurkina S.K., Ledneva V.A., Volkov Yu.G., Kakareka N.N., Shchelkanov M.Y. Streaked mosaic virus of barley (Virgaviridae, Hordeivirus) as an etiological agent of chlorotic streaking of corn (Zea mays). *Rossiiskaya sel'skokhozyaistvennaya nauka* [Russian Agricultural Science]. 2018, no. 1, pp. 22–26. (In Russian)
19. Volkov Yu.G., Kakareka N.N., Tolkach V.F., Dyakonov K.P., Moskvina T.V., Shchelkanov M.Yu. Aphids (Homoptera: Aphididae) are carriers of viral legume diseases in the Far East. *Readings in Memory of Alexey Ivanovich Kurentsov*, 2019, no. 30, pp. 211–222. (In Russian) <https://doi.org/10.25221/kurentzov.30.20>
20. Kakareka N.N., Volkov Yu.G., Tolkach V.F., Tabakaeva T.V., Belov Yu.A., Muratov A.A., Shchelkanov M.Yu. Viral diseases of legumes in the south of the Russian Far East. *South of Russia: Ecology, Development*, 2021, vol. 16, no. 4, pp. 71–85. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2021-4-71-85>
21. Kakareka N.N., Tolkach V.F., Sapotskiy M.V., Volkov Yu.G., Shchelkanov M.Yu. Insect vectors of viral potato diseases in the Far East. *Readings in Memory of Alexei Ivanovich Kurentsov*, 2019, no. 30, pp. 191–199. (In Russian) <https://doi.org/10.25221/kurentzov.30.18>
22. Tolkach V.F., Kakareka N.N., Volkov Yu.G., Kozlovskaya Z.N., Sapotskiy M.V., Pleshakova T.I., Dyakonov K.P., Shchelkanov M.Yu. Viral diseases of vegetable and melon crops in the south of the Far East. *South of Russia: Ecology, Development*, 2019, vol. 14, no. 4, pp. 121–133. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2019-4-121-133>
23. Tolkach V.F., Kakareka N.N., Volkov Yu.G., Shchelkanov M.Yu. Viruses of vegetable crops of the Russian Far East and their vectors. *Readings in Memory of Alexei Ivanovich Kurentsov*, 2019, no. 30, pp. 200–210. (In Russian) <https://doi.org/10.25221/kurentzov.30.19>
24. Volkov Yu.G., Kakareka N.N., Tolkach V.F., Shchelkanov M.Yu. Viral diseases of fruit and berry crops in the south of the Russian Far East. *South of Russia: Ecology, Development*, 2022, vol. 17, no. 4, pp. 88–100. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2022-4-88-100>
25. Tolkach V.F., Volkov Yu.G., Kakareka N.N., Aliev M.R., Shchelkanov M.Y. Cucumber mosaic virus in ornamental crops in the Russian Far East. *South of Russia: Ecology, Development*, 2023, vol. 18, no. 4, pp. 91–103. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-4-91-103>

26. Kakareka N.N., Kozlovskaya Z.N., Volkov Yu.G., Pleshakova T.I., Sapotsky M.V., Shchelkanov M.Yu. Nepoviruses (Picornavirales, Secoviridae, Nepovirus) in the south of the Far East: results of long-term monitoring. *South of Russia: Ecology, Development*, 2017, no. 4, pp. 105–119. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2017-4-105-119>
27. Kostin V.D., Stepanenko V.I., Omelchenko V.T. Kol'tsevaya pyatnistost' – virusnoe zabolevanie bodyaka shchetinistogo [Ring spotting is a viral disease of the bristly carp]. In: *Virusnye bolezni sel'skokhozyaistvennykh rastenii Dal'nego Vostoka* [Viral diseases of agricultural plants of the Far East]. Vladivostok, Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR Publ., 1971, pp. 219–220. (In Russian)
28. Kostin V.D., Volkov Yu.G. Nekotorye svoystva virusa, porazhayushchego podorozhnik aziatskii [Some properties of the virus affecting the Asian plantain]. In: *Virusnye bolezni rastenii Dal'nego Vostoka* [Viral plant diseases of the Far East]. Vladivostok, Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR Publ., 1976, pp. 205–210. (In Russian)
29. Kostin V.D., Volkov Yu.G. Mozaichnoe zabolevanie dvukistochnika [Mosaic disease of the phalaris]. In: *Virusnye bolezni rastenii Dal'nego Vostoka* [Viral plant diseases of the Far East]. Vladivostok, Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR Publ., 1976, pp. 276–277. (In Russian)
30. Kostin V.D., Volkov Yu.G. Ehtiologiya nekotorykh mozaichnykh zabolevanii dikorastushchikh rastenii Dal'nego Vostoka [Etiology of some mosaic diseases of wild plants of the Far East]. In: *Zashchita rastenii na Dal'nem Vostoke* [Plant protection in the Far East]. Vladivostok, Far Eastern Branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1989, pp. 3–6. (In Russian)
31. Volkov Yu.G., Kostin V.D. Fitovirusy v estestvennykh i iskusstvennykh rastitel'nykh soobshchestvakh Dal'nego Vostoka Rossii (ekologicheskie i ehpidemiologicheskie aspekty) [Phytoviruses in natural and artificial plant communities of the Russian Far East (ecological and epidemiological aspects)]. In: *Stanovlenie i razvitie fitovirusologii na Dal'nem Vostoke* [Formation and development of phytovirusology in the Far East]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2002, pp. 136–154. (In Russian)
32. Khotimchenko Yu.S., Shchelkanov M.Yu. Viruses of the Ocean: On the shores of the aqua incognita. Horizons of taxonomic diversity. *Russian Journal of Marine Biology*, 2024, vol. 50, pp. 1–24. <https://doi.org/10.1134/S106307402401005X>
33. Dyakonov K.P. O vozmozhnosti perenosa nekotorykh fitovirusov tlyami (Homoptera, Aphidinea) nespetsificheskikh vidov [On the possibility of transmission of some phytoviruses by aphids (Homoptera, Aphidinea) of nonspecific species]. In: *Virusnye bolezni rastenii Dal'nego Vostoka* [Viral diseases of plants of the Far East]. Vladivostok, Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR Publ., 1976, pp. 271–275. (In Russian)
34. Dyakonov K.P. The role of mass insect pests in the invasion of a number of phytopathogenic viruses. *Chteniya pamyati Alekseya Ivanovicha Kurentsova* [Readings in memory of Alexei Ivanovich Kurentsov]. 2000, no. 10, pp. 5–16. (In Russian)
35. Dyakonov K.P. Trophic relationships of aphids (Homoptera, Aphidinea) as an example of optimal use of food resources by insects. *Chteniya pamyati Alekseya Ivanovicha Kurentsova* [Readings in memory of Alexey Ivanovich Kurentsov]. 2003, no. 13, pp. 53–60. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Юрий Г. Волков, Валентина Ф. Толкач, Надежда Н. Какарека, Егор М. Щелканов и Михаил Ю. Щелканов разработали концепцию статьи, подготовили ее текст, подбирали научную литературу по тематике статьи и проводили ее анализ. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи, и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Yuri G. Volkov, Valentina F. Tolkach, Nadezhda N. Kakareka, Egor M. Shchelkanov and Mikhail Yu. Shchelkanov developed the concept of the article, prepared its text, selected scientific literature on the subject of the article and analysed it. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Юрий Г. Волков / Yuri G. Volkov <https://orcid.org/0000-0002-4631-1678>
 Валентина Ф. Толкач / Valentina F. Tolkach <https://orcid.org/0000-0002-1893-9580>
 Надежда Н. Какарека / Nadezhda N. Kakareka <https://orcid.org/0000-0002-2567-0452>
 Егор М. Щелканов / Egor M. Shchelkanov <https://orcid.org/0000-0003-0202-958X>
 Михаил Ю. Щелканов / Mikhail Yu. Shchelkanov <https://orcid.org/0000-0001-8610-7623>

Оригинальная статья / Original article

УДК 578.427

DOI: 10.18470/1992-1098-2025-3-2



Вирусные трансмиссивные патогены в клещах из природных биотопов Европейской части России

Владимир А. Терновой, Евгения П. Пономарева, Наталья Л. Тупота, Марина А. Степанюк, Михаил Ю. Карташов, Роман Б. Баяндин, Татьяна В. Трегубчак, Александр П. Агафонов

Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор» Роспотребнадзора, Центр геномных исследований мирового уровня по обеспечению биологической безопасности и технологической независимости в рамках Федеральной научно-технической программы развития генетических технологий, Кольцово, Новосибирская область, Россия

Контактное лицо

Владимир А. Терновой, к.б.н., и.о. заведующего отделом молекулярной вирусологии и вирусных гепатитов, ведущий научный сотрудник, ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора; 630559 Россия, Новосибирская область, г. Новосибирск, р/п Кольцово.

Тел. +79137355577

Email tern@vector.nsc.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1275-171X>

Формат цитирования

Терновой В.А., Пономарева Е.П., Тупота Н.Л., Степанюк М.А., Карташов М.Ю., Баяндин Р.Б., Трегубчак Т.В., Агафонов А.П. Вирусные трансмиссивные патогены в клещах из природных биотопов Европейской части России // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 3. С. 24-34. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-3-2

Получена 18 апреля 2025 г.

Прошла рецензирование 14 июля 2025 г.

Принята 25 июля 2025 г.

Резюме

Целью работы являлось выявление в твердых клещах, собранных в нескольких регионах Европейской части России, вирусов, передающихся трансмиссивно.

Вирусную РНК клещей рода *Ixodes*, собранных из природных очагов клещевого энцефалита Астраханской области, Карелии и Ставропольского края, исследовали методом ПЦР и секвенированием полученных вирусоспецифических ДНК фрагментов.

В клещах, собранных в Астраханской области, Карелии и Ставропольском крае обнаружены геномные маркеры вирусов семейств *Flaviviridae*, *Phenuiviridae* и *Nairoviridae*.

В клещах *Ixodes*, собранных в Астраханской области, Карелии и Ставропольском крае, были обнаружены генетические маркеры вирусов, ранее не описанных для России. Природные очаги клещевых инфекций проявляют тенденцию к расширению ареала, в связи с чем, большую актуальность приобретают исследования по выявлению новых вирусов, экологически связанных с иксодовыми клещами.

Ключевые слова

Иксодовый клещ, НГС, вирус Хасеки, Вирус Кемерово, вирус Гакугса, вирус Таченг 2, вирус Чангпинг 1.

Viral vector-borne pathogens in ticks from natural habitats in the European part of Russia

Vladimir A. Ternovoi, Eugenia P. Ponomareva, Natalia L. Tupota, Marina A. Stepanyuk, Mikhail Yu. Kartashov, Roman B. Bayandin, Tatyana V. Tregubchak and Alexander P. Agafonov

Vector State Research Centre of Virology and Biotechnology, Rospotrebnadzor, World-class Center for Genomic Research to Ensure Biological Safety and Technological Independence within the Framework of the Federal Scientific and Technical Program for the Development of Genetic Technologies, Koltsovo, Novosibirsk Region, Russia

Principal contact

Vladimir A. Ternovoi, PhD, Acting Head, Department of Molecular Virology and Viral Hepatitis, Leading Researcher, Vector State Research Centre of Virology and Biotechnology; Koltsovo, Novosibirsk, Novosibirskiy region, Russia 630559.

Tel. +79137355577

Email tern@vector.nsc.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1275-171X>

How to cite this article

Ternovoi V.A., Ponomareva E.P., Tupota N.L., Stepanyuk M.A., Kartashov M.Yu., Bayandin R.B., Tregubchak T.V., Agafonov A.P. Viral vector-borne pathogens in ticks from natural habitats in the European part of Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(3):24-34. (In Russ.)
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-3-2

Received 18 April 2025

Revised 14 July 2025

Accepted 25 July 2025

Abstract

The aim of the work was to identify viruses transmitted by transmission in hard ticks collected in several regions of the European part of Russia. The viral RNA of ticks of the genus *Ixodes*, collected from natural foci of tick-borne encephalitis in the Astrakhan region, Karelia and Stavropol Krai, was studied by PCR and sequencing of the obtained virus-specific DNA fragments.

Genomic markers of viruses of the *Flaviviridae*, *Phenuiviridae* and *Nairoviridae* families were found in ticks collected in the Astrakhan Region, Republic of Karelia and Stavropol krai.

Genetic markers of viruses previously not described for Russia were found in *Ixodes* ticks collected in the Astrakhan Region, Republic of Karelia and Stavropol krai. Natural foci of tick-borne infections tend to expand their range, and, therefore, research to identify new viruses ecologically associated with ixodid ticks is becoming increasingly important.

Key Words

Ixodes tick, NGS, Haseki tick virus, virus Kemerovo, Gakugsa virus, Tacheng tick virus 2, Changping tick virus 1.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно данным Всемирной организации здравоохранения 17 % заболеваний у людей вызывают трансмиссивные патогены, передаваемые клещами – облигатными кровососущими эктопаразитами, принадлежащими к классу паукообразных, отряду *Parasitiformes* и подотряду (*Mesostigmata*), который в свою очередь делится на три семейства: *Ixodidae* (твердые клещи), *Argasidae* (мягкие клещи) и *Nuttalliellidae* [1]. *Ixodidae* – самое многочисленное семейство клещей, включающее 14 родов и более 700 видов, которые распространены по всему земному шару [2]. В настоящее время клещи хорошо известны как переносчики патогенных для человека и животных вирусов, среди которых флавивirus наиболее хорошо охарактеризованы с точки зрения их географической распространенности и ассоциации с заболеванием у человека. Это, например, вирус клещевого энцефалита, широко распространенный на территории России, вирус Повассан, присутствующий в основном на Северо-Американском континенте [3; 4], вирус Кьясанурской лесной болезни, распространенный на Индийском субконтиненте, Louping ill virus, встречающийся в Европе, вирус Омской геморрагической лихорадки, зарегистрированный на территории Юга России и Средней Азии [5] и др. Известны и другие опасные для человека вирусы, передающиеся клещами, такие как вирус Крымской-Конго геморрагической лихорадки, который обнаруживается в Азии, Африке и Европе, вирус колорадской клещевой лихорадки, встречающийся в западной части США и Канаде [6; 7].

Развитие новых методов исследования дало возможность проводить масштабные исследования микробиома и виroma членистоногих, что, в свою очередь, позволило обнаружить новые вирусы в клещах. Так, у пациента в США был обнаружен новый клещевой буньявирус, названный Heartland virus [8], вирус, выделенный от клещей и человека в Китае, в 2011 г. и вызывающий тяжелую лихорадку с синдромом тромбоцитопении (SFTS) [9; 10], вирусы Карьяна и Кундала [11] и некоторые другие [12; 13].

Целью работы являлось выявление в твердых клещах, собранных в нескольких регионах Европейской части России, новых для России вирусов передающихся трансмиссивно.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В весенне-летний период 2021–2023 годов, в природных биотопах Астраханской области, Ставропольского края и Республики Карелия, были собраны иксодовые клещи. Всего в исследование были взяты 2422 особи *I. persulcatus* (самки – 1300 штук, самцы – 1122 штук). Клещей собирали на флаг с растительности, транспортировали в сумках-холодильниках на влажной салфетке при температуре +4 °C и после хранили при температуре минус 40 °C. Определение видовой принадлежности клещей осуществляли по морфологическим признакам, с последующей верификацией по нуклеотидной последовательности фрагмента (660 п.н.) гена, кодирующего субъединицу I цитохромоксидазы [14]. По пять особей одного вида, с одного места сбора, объединяли в пулы.

Перед гомогенизацией клещей промывали один раз в 70 %-ном этаноле, а затем дважды стерильной водой, для удаления потенциального поверхностного

загрязнения микроорганизмами. Сформированные пулы гомогенизировали на приборе QIAGEN TissueLyser LT с добавлением стерильного физраствора. Полученные гомогенаты центрифугировали при 8000 g 5 мин при 4° C, супернатант отбирали для анализа. После обработки бензоназой [15] тотальную РНК экстрагировали с помощью «Reagent Extract RNA» (Евроген, Россия) согласно протоколу производителя. Экстракт разбавляли 1:1 об./об. свежеприготовленным 70 %-ным этанолом и очищали на спин-колонках Cleanup Mini (Евроген, Россия). Скрининговое исследование виroma членистоногих проводили методом высокопроизводительного секвенирования (NGS). Для этого, с использованием модуля NEBNext® Ultra Directional (New England Biolabs, США) проводили синтез первой цепи кДНК. Синтез второй цепи ДНК проводили с использованием UMI Second Strand Synthesis Module for QuantSeq FWD (Illumina, США). Полученные ДНК библиотеки анализировали на приборе MiSeq с использованием технологии Illumina. Прикладные программы Cutadapt (версия 1.18) и SAMtools (версия 0.1.18), использовали для удаления адаптеров и повторного чтения нуклеотидных последовательностей. Континги были собраны *de novo* с использованием ассемблера MIRA (версия 4.9.6).

Из-за низкой вирусной нагрузки в образцах клещей, для определения нуклеотидных последовательностей и построения филогенетических деревьев выявленных вирусов, были использованы панели вирус специфических праймеров. Для выявления РНК Haseki tick virus (HTV) и Bole tick virus 4 (BTV4) в ПЦР использовали праймеры AGTACATCCGAGCTCTCATCCA (F10224) и TTCGCTCTTGTCCTGATGACC (R10579), Kemerovo virus ACCTTGATGCTGACTACCC (F700) и CAAACTCCGTGGTGACGTG (R1039), Tacheng tick virus 2 (TTV2) и Changping tick virus 1 (CTV1) TTGCTGACCCGTATCGCCTAGTGACCT (2294F) и GATGCTTTCAAAGTCCAACCTCTGTCCAA (2633R), Beiji nairovirus и Gakugsa tick virus AGAGGAAAGAAGTATGCTCAAGACAA (F1427) и CTTGACTTGTTGAAGTGGGTCT (R1856).

Постановку ПЦР проводили в 25 мкл реакционной смеси, содержащей 12,5 мкл BioMaster LR HS-ПЦР (x2) (БиоЛабМикс, Россия), по 0,2 мкМ каждого из праймеров и 3 мкл кДНК. Постановку ПЦР проводили в амплификаторе C1000 (BioRad, США) по программе: 95 °C, 5 мин; далее 40 последовательных циклов — 95 °C, 5 сек, 56 °C, 15 сек и 68 °C, 30 сек; финальная элонгация — 68 °C, 7 мин. Разделение продуктов амплификации проводили методом гель-электрофореза в 2 %-ном агарозном геле, содержащем бромистый этидий. Определение нуклеотидных последовательностей проводили с помощью набора реактивов ABI PRISM® BigDye™ Terminator v. 3.1 (ThermoFisher Scientific, США) с анализом продуктов реакции на ABI PRISM 3500 (Applied Biosystems, США). Анализ полученных хроматограмм проводили с помощью программы SeqMan (DNASTar, США).

Филогенетический анализ выполняли для нуклеотидной последовательности РНК-зависимой РНК-полимеразы (RdRp) и последовательностей известных вирусов из базы данных GenBank, с идентичностью >60 %. Множественное выравнивание последовательностей выполняли в Vector NTI Advance 11. Построение филогенетических деревьев осуществляли в Unipro UGENE v. 1.31 [16] и MEGA 7/12 [17], методом присоединения соседей [18]. Показатель статисти-

ческой надежности узлов филогенетического дерева рассчитывался с помощью бутстрап-анализа с использованием 1000 случайных реплик. Доверительный 95 %-ный интервал уровня инфицированности клещей изучаемыми патогенами рассчитывался с использованием онлайн-сервиса [19].

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нами была проведена оценка генетического разнообразия вирусов у клещей рода *I. persulcatus*, собранных в природных биотопах Республики Карелия (29 экз. – Прионежский район, ст. Шуйская, 33 экз. – Кондопожский район, с. Малая Гомсельга, 210 экз. – Пряжинский район, с. Мишинсельга). При анализе суммарной РНК, методом NGS, нами были выявлены открытые рамки трансляции, имеющие гомологию с

вирусными последовательностями из базы данных GenBank. Далее, методом ПЦР с использованием вирусспецифических праймеров, получили вирусные нуклеотидные последовательности. При построении филогенетического дерева (рис. 1) полученные нуклеотидные последовательности группировались в одну ветвь с вирусами BLTV4 (MZ244340) и Trinbago virus (MN025505), а часть из них образовывали ветвь с HTV (MN218447; MN218444) и с недавно обнаруженными у клещей, еще с неклассифицированными вирусами. Обнаруженные в исследуемых образцах клещей вирусы имели 92,8 % идентичность с HTV (isolate 26-Novosibirsk/2019, MN218447, выделен у человека) и идентичность 87 % – с БТВ 4 (MN 561135, выделенным из *Hyalomma asiaticum* в 2019 г. и PV093870 из *Dermacentor silvarum* в 2022 г. в Китае).

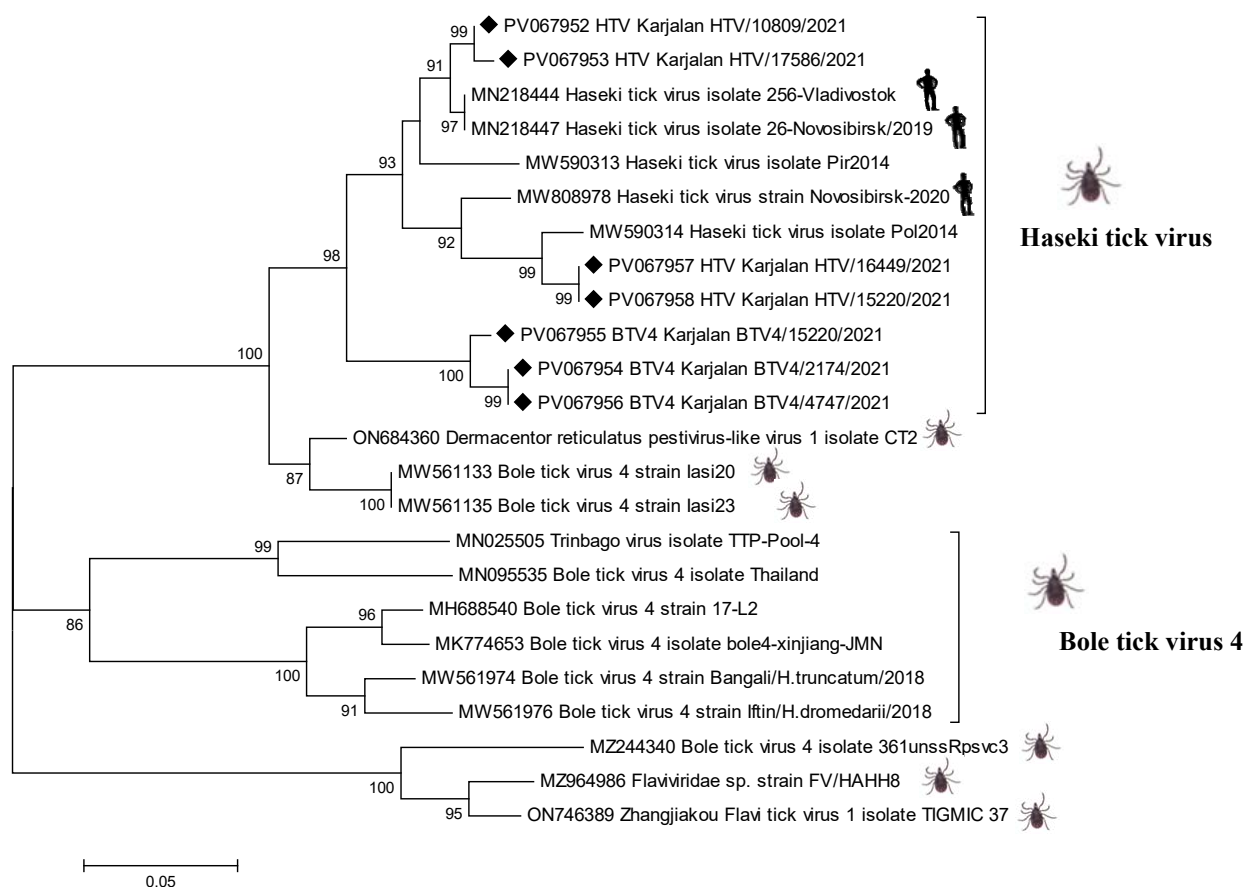


Рисунок 1. Филогендограмма, отображающая анализ максимального правдоподобия нуклеотидных последовательностей (фрагмент 330 нуклеотидов) HTV и БТВ4 у *Ixodes persulcatus* из Республики Карелия (2021 г.) Прототипные штаммы вирусов обозначены номером GenBank и символом (♦)

Индексы поддержки рассчитаны для 1000 повторов

Figure 1. Phylogenogram, displaying maximum likelihood analysis of nucleotide sequences (330 nucleotide fragment) of HTV and BTV4 in *Ixodes persulcatus* from the Republic of Karelia (2021) Prototype virus strains are indicated by a GenBank number and a symbol (♦) Support indices are calculated for 1000 replicates

У клещей рода *I. persulcatus*, собранных в природных биотопах Республики Карелия, были обнаружены вирусы рода *Orbivirus* (рис. 2). Филогенетический анализ их генома показал, что они образуют единую ветвь с известными штаммами вируса Кемерово

(Kemerovo virus), с уровнем идентичности 97,7 % (MF939555), с вирусом Трибек с уровнем идентичности 77,3 % (Tribec virus, KJ010806) и с вирусом Липовник (Lipovnik virus, HM543475), с уровнем идентичности 75,5 %.

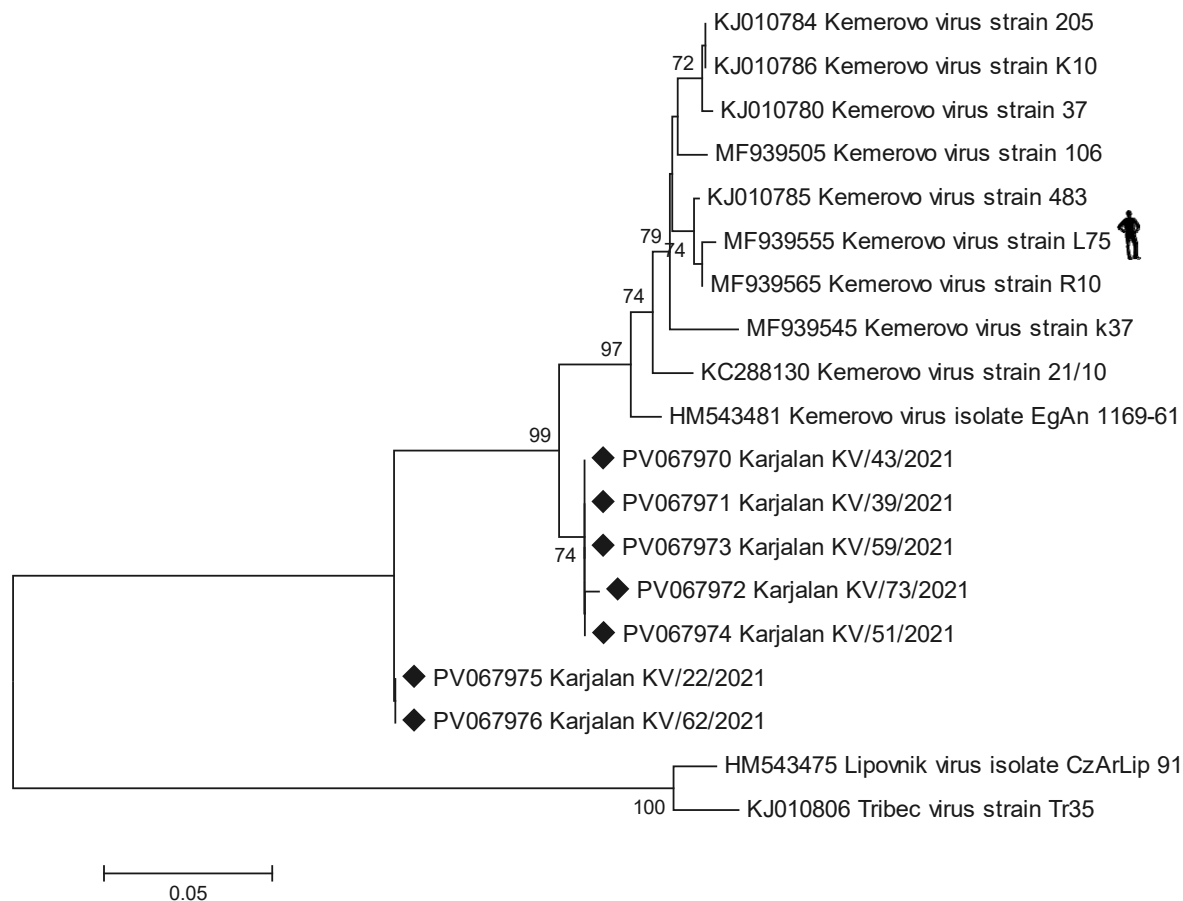


Рисунок 2. Филодендрограмма, отображающая анализ максимального правдоподобия нуклеотидных последовательностей (250 нуклеотидов) вируса Kemerovo у *Ixodes persulcatus* из Республики Карелия (KV) (2021 г.). Прототипные штаммы вирусов обозначены номером GenBank и символом (♦). Индексы поддержки рассчитаны для 1000 повторов

Figure 2. Philodendrogram, displaying maximum likelihood analysis of nucleotide sequences (250 nucleotides) of Virus Kemerovo in *Ixodes persulcatus* from the Republic of Karelia (KV) (2021). Prototype virus strains are indicated by a GenBank number and a symbol (♦). Support indices are calculated for 1000 replicates

Анализ виroma клещей, собранных в природных биотопах Республики Карелия, позволил выявить и новый для России вируса Gakugsa virus. Анализ родственных взаимосвязей этого вируса приведен на рисунке 3. Геном флебовируса Gakugsa семейства *Reoviridae* представлен одноцепочечной РНК (-) и состоит из трех сегментов, кодирующих гены S, M и L. Выявленные нами в клещах из Республики Карелия вирусные изоляты имели более чем 96 %-ную гомологию с ранее описанным Gakugsa virus (MN542363, Rus/Ix_persulcatus/Karelia/1/2018). Важно отметить, что если флебовирусы Gakugsa virus и Beiji paironavirus ранее были обнаружены только у клещей, то вирусы Yezo, Wetland и Orthonairovirus huangpiense были обнаружены у людей, после укусов клещами [20], а заболевание у них протекало с симптомами лихорадки и общего недомогания.

Вирус Yezo, возбудитель передающийся клещами, был впервые зарегистрирован в Японии в 2021 году у людей, относится к семейству *Phenuiviridae*. В 2025 году было сообщение о выявлении 18 случаев заболевания Yezo в Китае. Кроме того, Yezo virus был выделен у клещей, снятых с перелетных птиц [21]. Вирус Yezo передается клещами *I. persulcatus* [22].

Вирус Wetland, или вирус водно-болотных угодий (WELV) – это недавно идентифицированный ортонаировирус, который филогенетически связан с вирусом Крымской-Конго геморрагической лихорадки. Вирус принадлежит к семейству *Phenuiviridae*. Недавно было показано, что WELV является патогенным для человека вирусом: у части пациентов, инфицированных WELV, отмечалось лихорадочное заболевание, сопровождающееся геморрагическими и неврологическими проявлениями [23].

На рисунке 4 представлена филодендрограмма фрагментов гена РНК-зависимой РНК-полимеразы (RdRp), выделенных из клещей *I. persulcatus*, в 2021 году в Карелии и установленных или предполагаемых членов семейства *Phenuiviridae*. Эти вирусы, ближайшими прототипами которых являются трансмиссивные вирусы – CTV 1 и TTV 2, относятся к семейству *Phenuiviridae*, рода *Phlebovirus*. Вирусы имеют линейные или кольцевые геномы, состоящие из одноцепочечной моноцистронной РНК отрицательной полярности. Семейство *Phenuiviridae* содержит 23 рода и 159 видов вирусов, филогенетически определяющими являются *Phleboviruses* Uukuniemi, Bhanja virus, SFTS и Kaisodi virus [24–26].

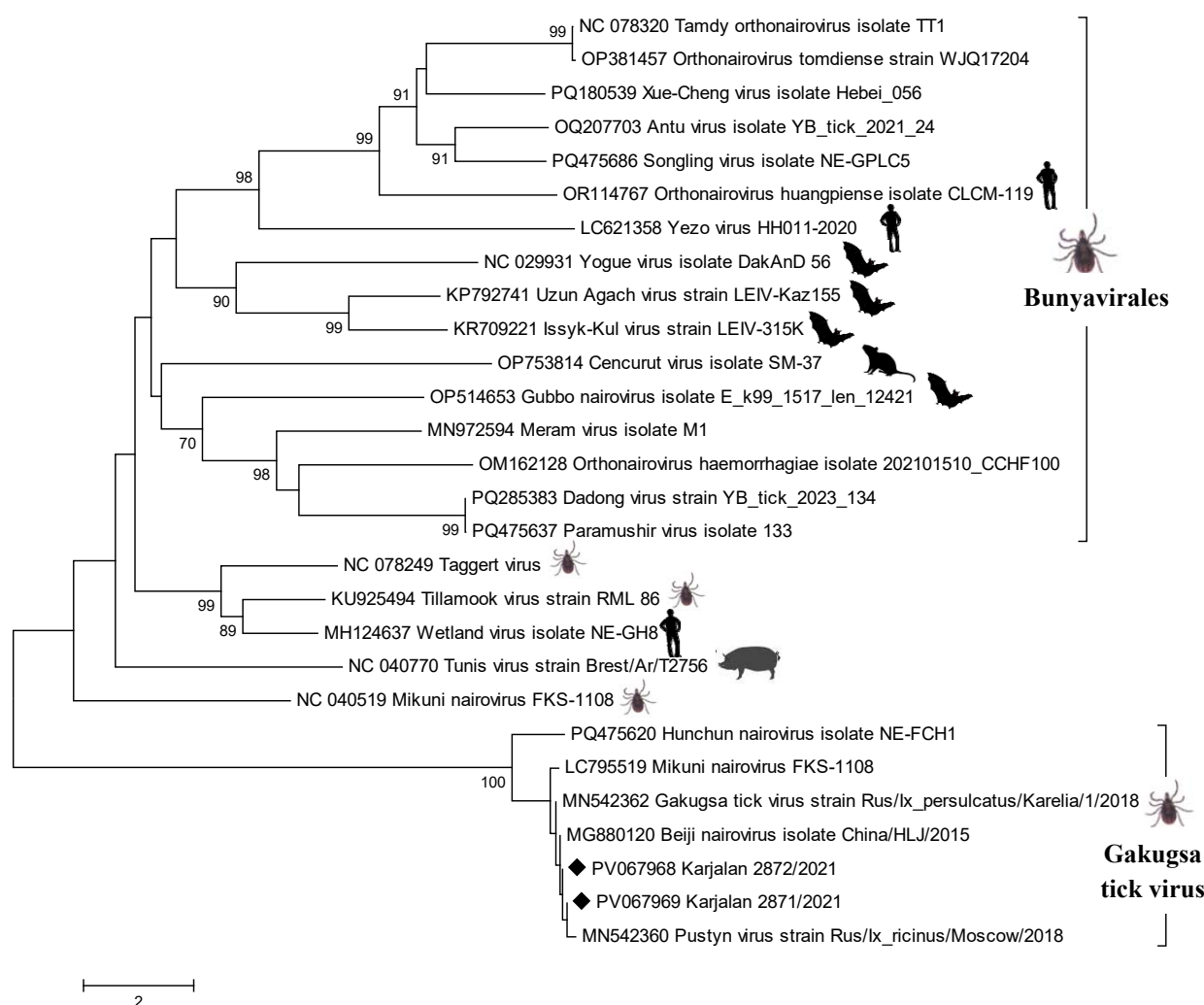


Рисунок 3. Филогендрограмма, отображающая анализ максимального правдоподобия нуклеотидных последовательностей (фрагмент ДНК 400 нуклеотидов) PV067969 Karjalan 2871/2021 и PV067968 Karjalan 2872/2021 у *Ixodes persulcatus* из Республики Карелия (2021 г.)

Прототипные штаммы вирусов обозначены номером GenBank и символом (♦)

Индексы поддержки рассчитаны для 1000 повторов

Figure 3. Philodendrogram, representing the maximum likelihood analysis of nucleotide sequences (400 nucleotide DNA fragment) of PV067969 Karjalan 2871/2021 and PV067968 Karjalan 2872/2021 in *Ixodes persulcatus* from the Republic of Karelia (2021)

Prototype virus strains are designated by GenBank number and symbol (♦)

Support indices are calculated for 1000 repeats

Вирусы, обнаруженные нами у клещей *I. persulcatus*, из природных биотопов Республики Карелия, представляют большой интерес, поскольку включают в себя несколько опасных вирусов для человека и животных. Это выделенные у животных Bluetongue virus, вирус африканской чумы лошадей, вирус эпизоотической геморрагической болезни и выделенные у людей Yezo virus, Orthonairovirus huangpiense и Wetland virus. Вирусы передаются рядом гематофагов – членистоногих переносчиков, размножающихся как в насекомых, так и в клетках млекопитающих.

Отличительной особенностью вирусов семейства *Phenuiviridae* являются их многокомпонентные геномы с дцРНК [25; 27–29]. Геном представителей этого семейства состоит из десяти сегментов дцРНК (S1–S10), заключенных в четырехслойный белковый капсид. В пределах одного и того же вида, разные серотипы орбивирусов могут

обмениваться сегментами генома, что может приводить к изменению их биологических свойств.

Обнаруженные нами вирусы – BTV4 и HTV, предположительно относящиеся к семейству *Flaviviridae*, являются ближайшими родственниками экономически значимых вирусных патогенов. Так, помимо вируса классической чумы свиней и включенного в список OIE [30] вируса Bungowannah, к вирусам BTV4 и роду *Pestivirus* относятся – атипичный свиной пестивирус (*Atypical porcine pestivirus*) и вирус Линда (*Linda virus*) [31]. Кроме того, в 2003 году был обнаружен вирус Bungo, считающийся чрезвычайно опасным для здоровья свиней [31–33], но, к счастью, этот вирус широко не распространен. Напротив, APPV встречается во всем мире и приводит к значительным экономическим потерям [34; 35]. Ранее нами, был выявлен HTV. Этот вирус был найден как у иксовых клещей, так и у людей, из азиатской части России [36]. Вирус генетически близок к неклассифицированным

Flavi-подобным вирусам. Филогенетический анализ нуклеотидных последовательностей HTV показал, что вирусы близки к вирусу клещей BTV 4, который ранее был обнаружен в странах Юго-Восточной Азии, на Балканах в Европе, в Африке и Карибском регионе. По-

видимому, HTV и BTV 4 могут быть классифицированы как предполагаемые представители нового рода внутри *Flaviviridae*. Эти Flavi-подобные вирусы имеют увеличенный вирусный геном (РНК 16 483 н.о.) с оцРНК положительного смысла.



Рисунок 4. Филогендрограмма, отображающая анализ максимального правдоподобия нуклеотидных последовательностей (316 нуклеотидов) CTV 1 и TTV 2 у *Ixodes persulcatus* из Республики Карелия (2021 г.). Прототипные штаммы вирусов обозначены номером GenBank и символом (♦)

Индексы поддержки рассчитаны для 1000 повторов

Figure 4. Phylodendrogram, displaying maximum likelihood analysis of nucleotide sequences (316 nucleotides) of CTV 1 and TTV 2 in *Ixodes persulcatus* from the Republic of Karelia (2021). Prototype virus strains are indicated by a GenBank number and a symbol (♦). Support indices are calculated for 1000 replicates

Выделенные нами в Республике Карелия вирусные изоляты филогенетически формировали отдельные клады с CTV 1 и с TTV 2, с идентичностью нуклеотидных последовательностей 95,3 % и 88,4 %, соответственно (рис. 4). Ранее Tacheng uukuvirus – CTV 1 и TTV 2 были нами выявлены в таежных клещах из Свердловской, Томской областей и Приморского края России. Наибольшее сходство нуклеотидных последовательностей выделенных фрагментов было с TTV 2, strain Iasi20 (94,5 %), выделенного ранее в Румынии (MW561154) и с CTV 1, strain Iasi21 (94,5 %) (MW561143), также найденного в клеще *Dermacentor reticulatus* в Румынии (2019 г.). Обнаружение в Республике Карелия CTV 1 и TTV 2, передающихся иксодовыми клещами, свидетельствует о широком географическом распространении данных вирусов на территории России.

Кроме того, чумирусы были обнаружены нами в клещах *Ixodes* из Астраханской области, Карелии и Ставропольского края. Эти чумирусы формировали отдельную ветвь с флеховирусом TTV 2 (MW561154, вирус выделен у *Dermacentor reticulatus* в Румынии, в 2019 г.), с уровнем гомологии 97,6 % по нуклеотидной последовательности.

Обнаруженные нами CTV 1 и TTV 2 обнаруживались у клещей с частотой около 10 %. Попытки выделить эти вирусы на культурах клеток Vero, 293 и C6/36 не достигли цели.

Всего в семейство *Chuviridae* входят 16 родов и 43 вида вирусов [37]. Чумирусы широко распространены в мире и могут быть обнаружены у различных видов иксодовых клещей, а также у овец и крупного рогатого скота. Недавно было показано, что новый чумирус связан с лихорадкой у человека, а значит он требует пристального внимания, особенно в эндемичных по клещам районах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено выявление трансмиссивных вирусов у клещей рода *I. persulcatus*, собранных в природных биотопах Республики Карелия, Астраханской области и Ставропольском крае. Обнаруженные в клещах Карелии нуклеотидные последовательности, на филогенетическом дереве, группировались с известными вирусами BLTV4 и Tringbago virus, но часть имели 92,8 % идентичность с недавно обнаруженными у клещей HTV. Этот вирус был найден как у иксодовых клещей, так и у людей.

У клещей рода *I. persulcatus* также были обнаружены вирусы – вирус Кемерово, рода Orbivirus и новый для России флеховирус Gakugsa, семейства Reoviridae. Флеховирусы, как правило, обнаруживаются у клещей, но были обнаружены и у людей, после укусов клещами.

Кроме того, обнаружение в Республике Карелия вирусов семейства Phenuiviridae CTV 1 и TTV 2, передающихся иксодовыми клещами, свидетельствует о широком географическом распространении данных вирусов на территории России. CTV 1 и TTV 2 ранее были обнаружены у различных видов иксодовых клещей, а также у овец и крупного рогатого скота.

Таким образом, вирусы, обнаруженные нами у клещей *I. persulcatus*, из природных биотопов Республики Карелия, Астраханской области и Ставропольского края представляют большой интерес, поскольку включают в себя несколько опасных вирусов

для человека и животных. Выявление новых трансмиссивных вирусов в клещах из природных биотопов в Европейской части России подчеркивают необходимость в усилении эпиднадзора за вновь обнаруженными клещевыми инфекциями, особенно за теми, в отношении которых показана способность вызывать у человека заболевания с выраженными клиническими признаками.

БЛАГОДАРНОСТИ

1. Авторы выражают глубокую признательность коллегам из региональных центров гигиены и эпидемиологии за сбор и доставку материала: ФКУЗ Астраханская ПЧС и ФБУЗ ЦГиЭ в Республике Карелия, Пахомовой Т.Н., ФКУЗ «Астраханская ПЧС», Бамматову Д.М. и Соломашченко Н.И. из ФБУЗ ЦГиЭ в Ставропольском крае, а также бывшему сотруднику ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора Швалову А.Н.

2. Исследование было выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2019-1665 и Государственное задание 9/21).

ACKNOWLEDGMENTS

1. The authors express their deep gratitude to their colleagues from the regional centers of hygiene and epidemiology for collecting and delivering the material: Astrakhan Fire and Emergency Situations Centre; Centre for Hygiene and Epidemiology, Republic of Karelia; T.N. Pakhomova, Astrakhan Fire and Emergency Situations Centre, D.M. Bammatov and N.I. Solomashchenko, Centre for Hygiene and Epidemiology, Stavropol krai, as well as a former employee of the Vector State Research Centre of Virology and Biotechnology of Rosпотребнадзор, A.N. Shvalov.

2. The study was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement No. 075-15-2019-1665 and State Assignment 9/21).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Anderson J.F., Magnarelli L.A. Biology of ticks // Infectious Disease Clinics of North America. 2008. V. 22. N 2. P. 195–215. <https://doi.org/10.1016/j.idc.2007.12.006>
- Guglielmone A.A., Robbins R.G., Apanaskevich D.A., Petney T.N., Estrada-Peña A., Horak I. G., Shao R., Barker S.C. The Argasidae, Ixodidae and Nuttalliellidae (Acari: Ixodida) of the world: a list of valid species names // Zootaxa. 2010. V. 28. P. 27–54.
- Kazimirova M., Thangamani S., Bartikova P., Hermance M., Holikova V., Stibraniova I., Nuttall P.A. Tick-borne viruses and biological processes at the tick-host-virus interface // Frontiers in Cellular and Infection Microbiology. 2017. V. 7. P. 339. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2017.00339>
- Hermance M.E., Thangamani S. Powassan virus: An emerging arbovirus of public health concern in North America // Vector-Borne and Zoonotic Diseases. 2017. V. 17. N 7. P. 453–462. <https://doi.org/10.1089/vbz.2017.2110>
- Gould E.A., Solomon T. Pathogenic flaviviruses // Lancet. 2008. V. 371. P. 500–509. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(08\)60238-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(08)60238-X)
- Hawman D.W., Feldmann H. Crimean-Congo haemorrhagic fever virus // Nature reviews. Microbiology. 2023. V. 21. N 7. P. 463–477. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00871-9>
- Harris E.K., Foy B.D., Ebel G.D. Colorado tick fever virus: a review of historical literature and research emphasis for a modern era // Journal of medical entomology. 2023. V. 60. N 6. P. 1214–1220. <https://doi.org/10.1093/jme/tjad094>
- McMullan L.K., Folk S.M., Kelly A.J., MacNeil A., Goldsmith C.S., Metcalfe M.G., Batten B.C., Albarino C.G., Zaki S.R., Rollin P.E., et al. A new phlebovirus associated with severe febrile illness in Missouri // The New England Journal of Medicine. 2012. V.367. N 9. P. 834–841. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1203378>
- Zhang Y.Z., Zhou D.J., Xiong Y., Chen X.P., He Y.W., Sun Q., Yu B., Li J., Dai Y.A., Tian J.H., et al. Hemorrhagic fever caused by a novel tick-

- borne bunyavirus in huaiyangshan, China // *Zhonghua Liu Xing Bing Xue Za Zhi*. 2011. V. 32. N 3. P. 209–220.
10. Zhang Y.Z., He Y.W., Dai Y.A., Xiong Y., Zheng H., Zhou D.J., Li J., Sun Q., Luo X.L., Cheng Y.L., et al. Hemorrhagic fever caused by a novel bunyavirus in China: Pathogenesis and correlates of fatal outcome // *Clinical Infectious Diseases*. 2012. V. 54. P. 527–533. <https://doi.org/10.1093/cid/cir804>
11. Yadav P.D., Whitmer S.L.M., Sarkale P., et al. Characterization of Novel Reoviruses Wad Medani Virus (Orbivirus) and Kundal Virus (Coltivirus) Collected from *Hyalomma anatolicum* Ticks in India during Surveillance for Crimean Congo Hemorrhagic Fever // *Journal of Virology*. 2019. V. 93. N 13. Article id: e00106-19. <https://doi.org/10.1128/JVI.00106-19>
12. Shi J., Hu Z., Deng F., Shen S. Tick-Borne Viruses // *Virologica Sinica*. 2018. V. 33. N 1. P. 21–43. <https://doi.org/10.1007/s12250-018-0019-0>
13. Zhang Y., Hu B., Agwanda B., Fang Y., Wang J., Kuria S., Yang J., Masika M., Tang S., Lichoti J., Fan Z., Shi Z., Ommeh S., Wang H., Deng F., Shen S. Viromes and surveys of RNA viruses in camel-derived ticks revealing transmission patterns of novel tick-borne viral pathogens in Kenya // *Emerging Microbes & Infections*. 2021. V. 10. N 1. P. 1975–1987. <https://doi.org/10.1080/22221751.2021.1986428>
14. Карташов М.Ю., Микрюкова Т.П., Кривошеина Е.И., Кузнецов А.И., Глушкова Л.И., Корабельников И.В., Егорова Ю.И., Терновой В.А., Локтев В.Б. Генотипирование возбудителей клещевого энцефалита и лихорадки Кемерово в таежных клещах, собранных в республике Коми // *Инфекция и иммунитет*. 2020. Т. 10. N 1. С. 159–166. <http://dx.doi.org/10.15789/2220-7619-GOT-1147>
15. Law J., Jovel J., Patterson J., Ford G., O’Keefe S., Wang W., Meng B., Song D., Zhang Y., Tian Z., Wasilenko S.T., Rahbari M., Mitchell T., Jordan T., Carpenter E., Mason A.L., Wong G.K. Identification of hepatotropic viruses from plasma using deep sequencing: a next generation diagnostic tool // *PLoS One*. 2013. V. 8. N 4. Article id: e60595. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0060595>
16. Okonechnikov K., Golosova O., Fursov M. The UGENE team. Unipro UGENE: a unified bioinformatics toolkit // *Bioinformatics*. 2012. V. 28. N 8. P. 1166–1167. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bts091>
17. Kumar S., Stecher G., Tamura K. MEGA7: Molecular Evolutionary Genetics Analysis version 7.0 for Bigger Datasets // *Molecular Biology and Evolution*. 2015. V. 33. N 7. P. 1870–1874. <https://doi.org/10.1093/molbev/msw054>
18. Saitou N., Nei M. The neighbor-joining method: a new method for reconstructing phylogenetic trees // *Molecular Biology and Evolution*. 1987. V. 4. N 4. P. 406–425. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.molbev.a040454>
19. Confidence interval calculator. URL: <http://www.pedro.org.au/english/downloads/confidence-interval-calculator> (дата обращения: 18.04.2025)
20. Kodama F., Yamaguchi H., Park E., Tatemoto K. A novel nairovirus associated with acute febrile illness in Hokkaido, Japan // *Nature Communications*. 2021. V. 12. N 1. P. 5539–5547. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25857-0>
21. Nishino A., Tatemoto K., Ishijima K., Inoue Y., Park E.-S., Yamamoto T., Taira M., Kuroda Y., Virhuez-Mendoza M., Harada M., Nakamura N., Morimoto G., Yamaguchi H., Ariizumi T., Takano A., Shimoda H., Matsuno K., Maeda K. Transboundary Movement of Yezo Virus via Ticks on Migratory Birds, Japan, 2020–2021 // *Emerging Infectious Diseases*. 2024. V. 30. N 12. P. 2674–2678. <https://doi.org/10.3201/eid3012.240539>
22. Zhang M.-Z., Bian C., Ye R.-Z., Cui X.-M., Yao N.-N., Yang J.-H., Chu Y.-L., Su X.-L., Wu Y.-F., Ye J.-L., Liu S.-S., Shi X.-Y., Shi W., Jia N., Chen Y.-G., Zhao L., Zheng Y.-C., Zheng X.-M., Jiang J.-F., Cao W.-C. A series of patients infected with the emerging tick-borne Yezo virus in China: an active surveillance and genomic analysis // *The Lancet Infectious Diseases*. 2025. V. 25. N 4. P. 390–398. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(24\)00616-9](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(24)00616-9)
23. Wang R., Wang X., Zhu J., Li H., Liu W. Effectiveness of nucleoside analogs against Wetland virus infection // *Antiviral Research*. 2025. V. 236. Article id: 106114. <https://doi.org/10.1016/j.antiviral.2025.106114>
24. Schwarz L., Riedel C., Högl S., Sinn L.J., Voglmayr T., Wöchtel B., Dinhopf N., Rebel-Bauder B., Weissenböck H., Ladinig, A., et al. Congenital infection with atypical porcine pestivirus (APPV) is associated with disease and viral persistence // *Veterinary Research*. 2017. V. 48. P. 1–14. <https://doi.org/10.1186/s13567-016-0406-1>
25. Manjunatha N.B., Sushila M., Narender S.M., Joe B., Robert T., Houssam A., Peter P.C.M. Genetic Characterization of the Tick-Borne Orbiviruses // *Viruses*. 2015. V. 7. N 5. P. 2185–2209. <https://doi.org/10.3390/v7052185>
26. Tokarz R., Williams S.H., Sameroff S., et al. Virome analysis of *amblyomma americanum*, *dermacentor variabilis*, and *Ixodes scapularis* ticks reveals novel highly divergent vertebrate and invertebrate viruses // *Journal of Virology*. 2014. V. 88. N 19. P. 11480–11492. <https://doi.org/10.1128/JVI.01858-14>
27. Belhouchet M., Mohd Jaafar F., Firth A.E., Grimes J.M., Mertens P.P., Attoui H. Detection of a fourth orbivirus non-structural protein // *PLOS ONE*. 2011. V. 6. Article id: e25697. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025697>
28. Ratnien M., Caporale M., Golder M., Franzoni G., Allan K., Nunes S.F., Armezani A., Bayoumy A., Rixon F., Shaw A., et al. Identification and characterization of a novel non-structural protein of bluetongue virus // *PLOS Pathog*. 2011. V. 7. Article id: e1002477. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1002477>
29. Mertens P.P., Brown F., Sangar D.V. Assignment of the genome segments of bluetongue virus type 1 to the proteins which they encode // *Virology*. 1984. V. 135. P. 207–217. [https://doi.org/10.1016/0042-6822\(84\)90131-4](https://doi.org/10.1016/0042-6822(84)90131-4)
30. OIE. Terrestrial Animal Health Code. URL: <https://www.oie.int/en/what-we-do/standards/codes-and-manuals/terrestrial-code-online-access/> (дата обращения: 18.04.2025)
31. Kirkland P.D., Frost M.J., Finlaison D.S., King K.R., Ridpath J.F., Gu X. Identification of a novel virus in pigs-bungowannah virus: A possible new species of pestivirus // *Virus Research*. 2007. V. 129. P. 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2007.05.002>
32. Michelitsch A., Dalmann A., Wernike K., Reimann I., Beer M. Seroprevalences of newly discovered porcine pestiviruses in german pig farms // *Veterinary Sciences*. 2019. V. 6. P. 86. <https://doi.org/10.3390/vetsci6040086>
33. Mósen A.C.S., Weber M.N., Cibulski S.P., Silva M.S., Paim W.P., Silva G.S., Medeiros A.A., Viana N.A., Baumbach L.F., Puhl D.E., et al. Survey for pestiviruses in backyard pigs in southern Brazil // *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*. 2020. V. 32. P. 136–141. <https://doi.org/10.1177/1040638719896303>
34. Yuan J., Han Z., Li J., Huang Y., Yang J., Ding H., Zhang J., Zhu M., Zhang Y., Liao J., et al. Atypical porcine pestivirus as a novel type of pestivirus in pigs in China // *Frontiers in Microbiology*. 2017. V. 8. Article id: 862. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00862>
35. Beer M., Wernike K., Dräger C., Höper D., Pohlmann A., Bergemann C., Schröder C., Klinkhammer S., Blome S., Hoffmann B. High prevalence of highly variable atypical porcine pestiviruses found in Germany // *Transboundary and Emerging Diseases*. 2017. V. 64. P. e22–e26. <https://doi.org/10.1111/tbed.12532>
36. Kartashov M.Y., Gladysheva A.V., Shalov A.N., Tupota N. L., Chernikova A. A., Ternovoi V. A., Loktev V. B. Novel Flavi-like virus in ixodid ticks and patients in Russia // *Ticks and Tick-borne Diseases*. 2023. V. 14. Article id: 102101. <https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2022.102101>
37. Current ICTV Taxonomy Release. URL: <https://ictv.global/taxonomy> (дата обращения: 18.04.2025)

REFERENCES

- Anderson J.F., Magnarelli L.A. Biology of ticks. *Infectious Disease Clinics of North America*, 2008, vol. 22, no. 2, pp. 195–215. <https://doi.org/10.1016/j.idc.2007.12.006>
- Guglielmone A.A., Robbins R.G., Apanaskevich D.A., Petney T.N., Estrada-Peña A., Horak I. G., Shao R., Barker S.C. The Argasidae, Ixodidae and Nuttalliellidae (Acari: Ixodida) of the world: a list of valid species names. *Zootaxa*. 2010, vol. 28, pp. 27–54.
- Kazimirova M., Thangamani S., Bartikova P., Hermance M., Holikova V., Stibraniya I., Nuttall P.A. Tick-borne viruses and biological processes at the tick-host-virus interface. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 2017, vol. 7, P. 339. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2017.00339>

4. Hermance M.E., Thangamani S. Powassan virus: An emerging arbovirus of public health concern in North America. *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*, 2017, vol. 17, no. 7, pp. 453–462. <https://doi.org/10.1089/vbz.2017.2110>
5. Gould E.A., Solomon T. Pathogenic flaviviruses. *Lancet*, 2008, vol. 371, pp. 500–509. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(08\)60238-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(08)60238-X)
6. Hawman D.W., Feldmann H. Crimean-Congo haemorrhagic fever virus. *Nature reviews. Microbiology*, 2023, vol. 21, no.7, pp. 463–477. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00871-9>
7. Harris E.K., Foy B.D., Ebel G.D. Colorado tick fever virus: a review of historical literature and research emphasis for a modern era. *Journal of medical entomology*, 2023, vol. 60, no. 6, pp. 1214–1220. <https://doi.org/10.1093/jme/tjad094>
8. McMullan L.K., Folk S.M., Kelly A.J., MacNeil A., Goldsmith C.S., Metcalfe M.G., Batten B.C., Albarino C.G., Zaki S.R., Rollin P.E., et al. A new phlebovirus associated with severe febrile illness in Missouri. *The New England Journal of Medicine*, 2012, vol. 367, no. 9, pp. 834–841. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1203378>
9. Zhang Y.Z., Zhou D.J., Xiong Y., Chen X.P., He Y.W., Sun Q., Yu B., Li J., Dai Y.A., Tian J.H., et al. Hemorrhagic fever caused by a novel tick-borne bunyavirus in huaiyangshan, China. *Zhonghua Liu Xing Bing Xue Za Zhi*, 2011, vol. 32, no. 3, pp. 209–220.
10. Zhang Y.Z., He Y.W., Dai Y.A., Xiong Y., Zheng H., Zhou D.J., Li J., Sun Q., Luo X.L., Cheng Y.L., et al. Hemorrhagic fever caused by a novel bunyavirus in China: Pathogenesis and correlates of fatal outcome. *Clinical Infectious Diseases*, 2012, vol. 54, pp. 527–533. <https://doi.org/10.1093/cid/cir804>
11. Yadav P.D., Whitmer S.L.M., Sarkale P., et al. Characterization of Novel Reoviruses Wad Medani Virus (Orbivirus) and Kundal Virus (Coltivirus) Collected from Hyalomma anatolicum Ticks in India during Surveillance for Crimean Congo Hemorrhagic Fever. *Journal of Virology*, 2019, vol. 93, no. 13, article id: e00106-19. <https://doi.org/10.1128/JVI.00106-19>
12. Shi J., Hu Z., Deng F., Shen S. Tick-Borne Viruses. *Virologica Sinica*, 2018, vol. 33, no. 1, pp. 21–43. <https://doi.org/10.1007/s12250-018-0019-0>
13. Zhang Y., Hu B., Agwanda B., Fang Y., Wang J., Kuria S., Yang J., Masika M., Tang S., Lichoti J., Fan Z., Shi Z., Ommeh S., Wang H., Deng F., Shen S. Viromes and surveys of RNA viruses in camel-derived ticks revealing transmission patterns of novel tick-borne viral pathogens in Kenya. *Emerging Microbes & Infections*, 2021, vol. 10, no. 1, pp. 1975–1987. <https://doi.org/10.1080/22221751.2021.1986428>
14. Kartashov M.Yu., Mikryukova T.P., Krivosheina E.I., Kuznetsov A.I., Glushkova L.I., Korabelnikov I.V., Egorova Yu.I., Ternovoi V.A., Loktev V.B. Genotyping of pathogens of tick-borne encephalitis and Kemerovo fever in taiga ticks collected in the Komi Republic. *Infection and immunity*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 159–166. (In Russia) <http://dx.doi.org/10.15789/2220-7619-GOT-1147>
15. Law J., Jovel J., Patterson J., Ford G., O'Keefe S., Wang W., Meng B., Song D., Zhang Y., Tian Z., Wasilenko S.T., Rahbari M., Mitchell T., Jordan T., Carpenter E., Mason A.L., Wong G.K. Identification of hepatotropic viruses from plasma using deep sequencing: a next generation diagnostic tool. *PLoS One*, 2013, vol. 8, no. 4, article id: e60595. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0060595>
16. Okonechnikov K., Golosova O., Fursov M. The UGENE team. Unipro UGENE: a unified bioinformatics toolkit. *Bioinformatics*, 2012, vol. 28, no. 8, pp. 1166–1167. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bts091>
17. Kumar S., Stecher G., Tamura K. MEGA7: Molecular Evolutionary Genetics Analysis version 7.0 for Bigger Datasets. *Molecular Biology and Evolution*, 2015, vol. 33, no. 7, pp. 1870–1874. <https://doi.org/10.1093/molbev/msw054>
18. Saitou N., Nei M. The neighbor-joining method: a new method for reconstructing phylogenetic trees. *Molecular Biology and Evolution*, 1987, vol. 4, no. 4, pp. 406–425. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.molbev.a040454>
19. Confidence interval calculator. Available at: <http://www.pedro.org.au/english/downloads/confidence-interval-calculator> (accessed 18.04.2025)
20. Kodama F., Yamaguchi H., Park E., Tatemoto K. A novel nairovirus associated with acute febrile illness in Hokkaido, Japan. *Nature Communications*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 5539–5547. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25857-0>
21. Nishino A., Tatemoto K., Ishijima K., Inoue Y., Park E.-S., Yamamoto T., Taira M., Kuroda Y., Virhuez-Mendoza M., Harada M., Nakamura N., Morimoto G., Yamaguchi H., Ariizumi T., Takano A., Shimoda H., Matsuno K., Maeda K. Transboundary Movement of Yezo Virus via Ticks on Migratory Birds, Japan, 2020–2021. *Emerging Infectious Diseases*, 2024, vol. 30, no. 12, pp. 2674–2678. <https://doi.org/10.3201/eid3012.240539>
22. Zhang M.-Z., Bian C., Ye R.-Z., Cui X.-M., Yao N.-N., Yang J.-H., Chu Y.-L., Su X.-L., Wu Y.-F., Ye J.-L., Liu S.-S., Shi X.-Y., Shi W., Jia N., Chen Y.-G., Zhao L., Zheng Y.-C., Zheng X.-M., Jiang J.-F., Cao W.-C. A series of patients infected with the emerging tick-borne Yezo virus in China: an active surveillance and genomic analysis. *The Lancet Infectious Diseases*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 390–398. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(24\)00616-9](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(24)00616-9)
23. Wang R., Wang X., Zhu J., Li H., Liu W. Effectiveness of nucleoside analogs against Wetland virus infection. *Antiviral Research*, 2025, vol. 236, article id: 106114. <https://doi.org/10.1016/j.antiviral.2025.106114>
24. Schwarz L., Riedel C., Högl S., Sinn L.J., Voglmayr T., Wöchtel B., Dinhopf N., Rebel-Bauder B., Weissenböck H., Ladinig, A., et al. Congenital infection with atypical porcine pestivirus (APPV) is associated with disease and viral persistence. *Veterinary Research*, 2017, vol. 48, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1186/s13567-016-0406-1>
25. Manjunatha N.B., Sushila M., Narendar S.M., Joe B., Robert T., Houssam A., Peter P.C.M. Genetic Characterization of the Tick-Borne Orbiviruses. *Viruses*, 2015, vol. 7, no. 5, pp. 2185–2209. <https://doi.org/10.3390/v7052185>
26. Tokarz R., Williams S.H., Sameroff S., et al. Virome analysis of amblyomma americanum, dermacentor variabilis, and Ixodes scapularis ticks reveals novel highly divergent vertebrate and invertebrate viruses. *Journal of Virology*, 2014, vol. 88, no. 19, pp. 11480–11492. <https://doi.org/10.1128/JVI.01858-14>
27. Belhouchet M., Mohd Jaafar F., Firth A.E., Grimes J.M., Mertens P.P., Attoui H. Detection of a fourth orbivirus non-structural protein. *PLOS ONE*, 2011, vol. 6, article id: e25697. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025697>
28. Ratnien M., Caporale M., Golder M., Franzoni G., Allan K., Nunes S.F., Armezzani A., Bayoumy A., Rixon F., Shaw A., et al. Identification and characterization of a novel non-structural protein of bluetongue virus. *PLOS Pathog*, 2011, vol. 7, article id: e1002477. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1002477>
29. Mertens P.P., Brown F., Sangar D.V. Assignment of the genome segments of bluetongue virus type 1 to the proteins which they encode. *Virology*, 1984, vol. 135, pp. 207–217. [https://doi.org/10.1016/0042-6822\(84\)90131-4](https://doi.org/10.1016/0042-6822(84)90131-4)
30. OIE. Terrestrial Animal Health Code. Available at: <https://www.oie.int/en/what-we-do/standards/codes-and-manuals/terrestrial-code-online-access/> (accessed 18.04.2025)
31. Kirkland P.D., Frost M.J., Finlaison D.S., King K.R., Ridpath J.F., Gu X. Identification of a novel virus in pigs-bungowannah virus: A possible new species of pestivirus. *Virus Research*, 2007, vol. 129, pp. 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2007.05.002>
32. Michelitsch A., Dalmann A., Wernike K., Reimann I., Beer M. Seroprevalences of newly discovered porcine pestiviruses in german pig farms. *Veterinary Sciences*, 2019, vol. 6, pp. 86. <https://doi.org/10.3390/vetsci6040086>
33. Mósena A.C.S., Weber M.N., Cibulski S.P., Silva M.S., Paim W.P., Silva G.S., Medeiros A.A., Viana N.A., Baumbach L.F., Puhl D.E., et al. Survey for pestiviruses in backyard pigs in southern Brazil. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*, 2020, vol. 32, pp. 136–141. <https://doi.org/10.1177/1040638719896303>
34. Yuan J., Han Z.; Li J., Huang Y., Yang J., Ding H., Zhang J., Zhu M., Zhang Y., Liao J., et al. Atypical porcine pestivirus as a novel type of pestivirus in pigs in China. *Frontiers in Microbiology*, 2017, vol. 8, article id: 862. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00862>
35. Beer M., Wernike K., Dräger C., Höper D., Pohlmann A., Bergermann C., Schröder C., Klinkhammer S., Blome S., Hoffmann B. High prevalence of highly variable atypical porcine pestiviruses found in Germany. *Transboundary and Emerging Diseases*, 2017, vol. 64, pp. e22–e26. <https://doi.org/10.1111/tbed.12532>
36. Kartashov M.Y., Gladysheva A.V., Shvalov A.N., Tupota N.L., Chernikova A.A., Ternovoi V.A., Loktev V.B. Novel Flavi-like virus in ixodid ticks and patients in Russia. *Ticks and Tick-borne Diseases*,

2023, vol. 14, article id: .102101.
<https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2022.102101>

37. Current ICTV Taxonomy Release. Available at:
<https://ictv.global/taxonomy> (accessed 18.04.2025)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Владимир А. Терновой участвовал в написании работы, в научном дизайне, в анализе и интерпретации результатов. Александр П. Агафонов участвовал в разработке концепции, в корректуре рукописи до подачи в редакцию. Евгения П. Пономарева и Наталья Л. Тупота участвовала в экспериментальной части работы, в анализе и интерпретации результатов, в корректуре рукописи до подачи в редакцию. Михаил Ю. Карташов участвовал в экспериментальной части работы. Роман Б. Баяндин участвовал в анализе и интерпретации результатов. Марина А. Степанюк участвовала в экспериментальной части работы. Татьяна В. Трегубчак участвовала в секвенировании образцов. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Vladimir A. Ternovoi participated in writing the work, in scientific design and in analysis and interpretation of results. Alexander P. Agafonov participated in the development of the concept and in proofreading the manuscript before submission to the Editor. Eugenia P. Ponomareva and Natalia L. Tupota participated in the experimental part of the work, in the analysis and interpretation of results, and in proofreading the manuscript before submission to the Editor. Mikhail Yu. Kartashov participated in the experimental part of the work. Roman B. Bayandin participated in the analysis and interpretation of results. Marina A. Stepanyuk participated in the experimental part of the work. Tatyana V. Tregubchak participated in the sequencing of samples. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Владимир А. Терновой / Vladimir A. Ternovoi <https://orcid.org/0000-0003-1275-171X>
Евгения П. Пономарева / Eugenia P. Ponomareva <https://orcid.org/0000-0002-8237-457X>
Наталья Л. Тупота / Natalia L. Tupota <https://orcid.org/0000-0001-6150-370X>
Марина А. Степанюк / Marina A. Stepanyuk <https://orcid.org/0009-0002-2658-7746>
Михаил Ю. Карташов / Mikhail Yu. Kartashov <https://orcid.org/0000-0002-7857-6822>
Роман Б. Баяндин / Roman B. Bayandin <https://orcid.org/0000-0002-6460-0828>
Татьяна В. Трегубчак / Tatyana V. Tregubchak <https://orcid.org/0000-0001-9608-2044>
Александр П. Агафонов / Alexander P. Agafonov <https://orcid.org/0000-0003-2577-0434>

Оригинальная статья / Original article

УДК 765.31 (578.4)

DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-3



Сезонная и межгодовая динамика зараженности вирусом птичьего гриппа диких уток на севере Кулундинской равнины Новосибирской области

Ольга Р. Друзяка^{1,2,3}, Александра В. Глущенко¹, Иван А. Соболев¹,
Людмила Л. Мацкало², Алексей В. Друзяка^{2,3}

¹Научно-исследовательский институт вирусологии Федерального исследовательского центра фундаментальной и трансляционной медицины Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Новосибирск, Россия

²Институт систематики и экологии животных СО РАН, Новосибирск, Россия

³Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

Контактное лицо

Ольга Р. Друзяка, младший научный сотрудник, ФИЦ ФТМ СО РАН; 630060 Россия, г. Новосибирск, ул. Тимакова, 2; младший научный сотрудник, Институт систематики и экологии животных; 630091 Россия, г. Новосибирск, ул. Фрунзе, 11; кафедра общей биологии и экологии Новосибирского государственного университета; 630090 Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.
Тел. +79231441322

Email abdrashitova-olga@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0009-0005-8441-6939>

Формат цитирования

Друзяка О.Р., Глущенко А.В., Соболев И.А., Мацкало Л.Л., Друзяка А.В. Сезонная и межгодовая динамика зараженности вирусом птичьего гриппа диких уток на севере Кулундинской равнины Новосибирской области // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 35-42. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-3

Получена 2 сентября 2025 г.

Прошла рецензирование 20 октября 2025 г.

Принята 25 октября 2025 г.

Резюме

Целью работы является выявление особенностей сезонной и межгодовой динамики зараженности вирусом гриппа птиц (ВГП) в популяциях диких уток на севере Кулундинской равнины во время миграций.

Сбор образцов проводился с апреля по ноябрь 2015–2024 гг. Биологические образцы были собраны от 15 видов диких уток. Для выделения изолятов вируса гриппа А из клоакальных мазков использовали культивирование на развивающихся куриных эмбрионах (РКЭ) в три последовательных пассажа, следуя стандартной методике.

Были собраны клоакальные мазки у 3733 особей, семейства *Anatidae*. Выделено 163 изолята ВГП из проб, отобранных осенью, тогда как весной было выделено 2 изолята. Анализ данных показал межгодовые колебания зараженности ВГП от 1 до 10 % в различные годы.

Таким образом, сезонная и межгодовая динамика зараженности диких уток присутствует на исследуемой территории и можно предположить, что вызвана видовыми особенностями носителей и условиями среды.

Ключевые слова

Миграция, сезонная динамика, межгодовая динамика, вирус гриппа птиц, экология птиц, дикие утки, юг Западной Сибири.

Seasonal and Inter-annual Dynamics of Avian Influenza Virus Infection in Wild Ducks in the northern Kulunda Plain, Novosibirsk Oblast, Russia

Olga R. Druzyaka^{1,2,3}, Alexandra V. Gluschenko¹, Ivan A. Sobolev¹, Lyudmila L. Matskalo² and Alexey V. Druzyaka^{2,3}

¹Research Institute of Virology, Federal Research Center of Fundamental and Translational Medicine (FRCFTM), Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

²Institute of Systematics and Ecology of Animals, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

³Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russia

Principal contact

Olga R. Druzyaka, Junior Researcher, Research Institute of Virology, Federal Research Center of Fundamental and Translational Medicine (FRCFTM), Siberian Branch, Russian Academy of Sciences; 2 Timakova St, Novosibirsk, Russia 630060; Institute of Systematics and Ecology of Animals, 11 Frunze St, Novosibirsk, Russia 630091; Department of General Biology and Ecology, Novosibirsk State University; 2 Pirogova St, Novosibirsk, Russia 630090. Tel. +79231441322
Email abdrashitova-olga@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0009-0005-8441-6939>

How to cite this article

Druzyaka O.R., Gluschenko A.V., Sobolev I.A., Matskalo L.L., Druzyaka A.V. Seasonal and Inter-annual Dynamics of Avian Influenza Virus Infection in Wild Ducks in the northern Kulunda Plain, Novosibirsk Oblast, Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):35-42. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-3

Received 2 September 2025

Revised 20 October 2025

Accepted 25 October 2025

Abstract

The objective of the study was to identify the features of seasonal and inter-annual dynamics of avian influenza virus (AIV) infection in wild duck populations in the north of the Kulunda Plain during migrations. Biological samples were collected from April to November 2015–2024. from 15 species of wild ducks. To isolate influenza A virus isolates from cloacal smears, cultivation on developing chicken embryos was used in three consecutive passages, following a standard procedure. Cloacal smears were collected from 3,733 individuals of the *Anatidae* family. 163 A AIV VP isolates were isolated from samples taken in autumn, while 2 isolates were isolated in spring. The analysis of the data showed inter-annual fluctuations in the infection rate of AIV from 1 to 10 % in different years.

Varying seasonal and inter-annual dynamics of wild duck infection were determined in the study area and it can be assumed that this is caused by the specific characteristics of the carriers and environmental conditions.

Key Words

Migration, seasonal dynamics, inter-annual dynamics, avian influenza virus, bird ecology, wild ducks, southern Western Siberia.

ВВЕДЕНИЕ

Основным природным резервуаром низкопатогенных штаммов вируса гриппа птиц (ВГП) традиционно считаются водоплавающие и околоводные птицы отряда *Anseriformes* (Гусеобразные), в первую очередь представители семейства *Anatidae* (утиные), а также отдельные виды отряда *Charadriiformes* (Ржанкообразные) [1; 2]. Особую эпидемиологическую значимость среди них представляют речные и нырковые утки (подсемейство *Anatinae*), что обусловлено их высокой численностью [3], спецификой трофического (кормового) поведения (включая фильтрационный тип питания) [4], склонностью к образованию смешанных скоплений [5] и обширными миграционными связями [6]. Эти экологические особенности способствуют распространению вирусов при бессимптомном течении инфекции, делая данную группу птиц ключевым звеном в поддержании природных очагов заболевания.

Водно-болотные угодья северной части Кулундинской равнины, расположенные в Обь-Иртышском междуречье, представляют собой уникальный природный комплекс, играющий особую роль в циркуляции вируса птичьего гриппа [7]. Характеризуясь высокой плотностью пресноводных и солоноватых водоемов, заболоченными территориями и речными поймами с обширными мелководьями [8], эти местообитания образуют ключевые орнитологические территории международного значения. Их уникальность определяется положением на пересечении нескольких миграционных путей [9], что создает оптимальные условия для межвидовой передачи и генетической рекомбинации вирусных штаммов, особенно в периоды пространственно-временного наложения миграционных потоков птиц из различных географических регионов.

Немногочисленные исследования демонстрируют выраженную сезонную динамику зараженности ВГП у диких водоплавающих птиц. Так, в Северной Америке и Северной Европе выявили значительные колебания распространённости вируса – от менее 1 % в период весенней миграции до 30 % в осенний период [10; 11]. Такая динамика объясняется появлением большого количества молодых иммунологически наивных птиц в конце сезона размножения, а также особенностями передачи вируса через контаминированную водную среду и условиями сохранения патогенов [12]. Фекально-оральный механизм передачи обеспечивает длительную персистенцию вируса в экосистемах, а способность адсорбироваться на оперении птиц создает предпосылки для его распространения на значительные расстояния в ходе миграции [13].

Изучение сезонной и межгодовой динамики зараженности низкопатогенными вирусами птичьего гриппа в популяциях диких птиц на территории Кулундинской равнины представляет научную и практическую значимость, несмотря на существования таких исследований в других регионах мира. Эпидемиологические закономерности циркуляции ВГП обладают выраженной географической спецификой, обусловленной особенностями миграционных путей, видового состава птиц-хозяев и местных климатических условий. С учетом этого, существующие данные по сезонной динамике ВГП не могут быть экстраполированы на Сибирь из других регионов мира ввиду существенных различий в видовом составе птиц-хозяев, структуре популяций и динамике миграционных процессов,

особенностями климата. Проведение исследований на территории Кулундинской равнины вносит существенный вклад в глобальную систему эпидемиологического мониторинга (надзора за птичьим гриппом), позволяя выявить специфические закономерности циркуляции ВГП в условиях Западной Сибири. В свою очередь, это необходимо для понимания общих механизмов эволюции и распространения вируса в Евразии. Кроме того, мониторинг зараженности диких птиц на юге Западной Сибири имеет особое значение для прогнозирования эпизоотий и разработки мер биобезопасности.

Целью настоящей работы явилось выявить особенности сезонной и межгодовой динамики зараженности вирусом гриппа птиц в популяциях диких уток во время весенней и осенней массовой миграции на севере Кулундинской равнины.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сбор биологического материала осуществляли в рамках проведения долгосрочного мониторингового исследования (Программа по изучению инфекционных болезней диких животных, ФИЦ ФТМ, Новосибирск), на территории водно-болотных угодий северной части Кулундинской равнины (юга Западной Сибири) (рис. 1). Отбор проб проводился в период государственного охотничьего сезона весенней (апрель-май) и осенней (август-октябрь) миграции водоплавающих птиц с 2015 по 2024 год у птиц, добытых местными охотниками-любителями по лицензиям регионального министерства экологии и природных ресурсов. Настоящее исследование проведено в соответствии с одобрением и требованием Комитета по биомедицинской этике Федерального исследовательского центра фундаментальной и трансляционной медицины (ФИЦ ФТМ), г. Новосибирск (протокол № No 2021–10). В ходе исследования было отобрано 3733 образца, включая 2332 от особей диких уток в осенний период и 1401 от особей в весенний период.

Методика отбора проб на выявление вируса птичьего гриппа соответствовала рекомендациям ВОЗ от 2006 года. Клоакальные мазки отбирали стерильными аппликаторами. Отобранные пробы помещали в 1 мл транспортной среды в криопробирки объемом 2 мл. Обеспечение сохранности проб на всех этапах достигалось за счет их размещения и перевозки в сосуде Дьюара с жидким азотом.

Видовую идентификацию особей проводили с привлечением стандартных полевых определителей: «Определитель птиц СССР» [14], «Guide to the Sex and Age of European Ducks» [15], а также «Определитель птиц Урала, Приуралья и Западной Сибири» [16].

Выделение вируса осуществляли согласно методике ВОЗ путем трех последовательных пассажей на РКЭ. Собранную аллантоисную жидкость тестировали в реакции гемагглютинации (РГА). Все образцы с активностью гемагглютинирующей активностью были протестированы на наличие вирусов гриппа типа А.

Статистическая обработка данных включала расчет показателей распространенности вируса с 95 % доверительными интервалами, анализ сезонных и межгодовых различий с использованием критерия χ^2 .

Для проверки значимости различий для выборок с малыми классами использовали критерий χ^2 с поправкой Йейтса на непрерывность. Ожидаемые частоты во всех ячейках превышали 5 наблюдений, что удовлетворяет условиям применения критерия.

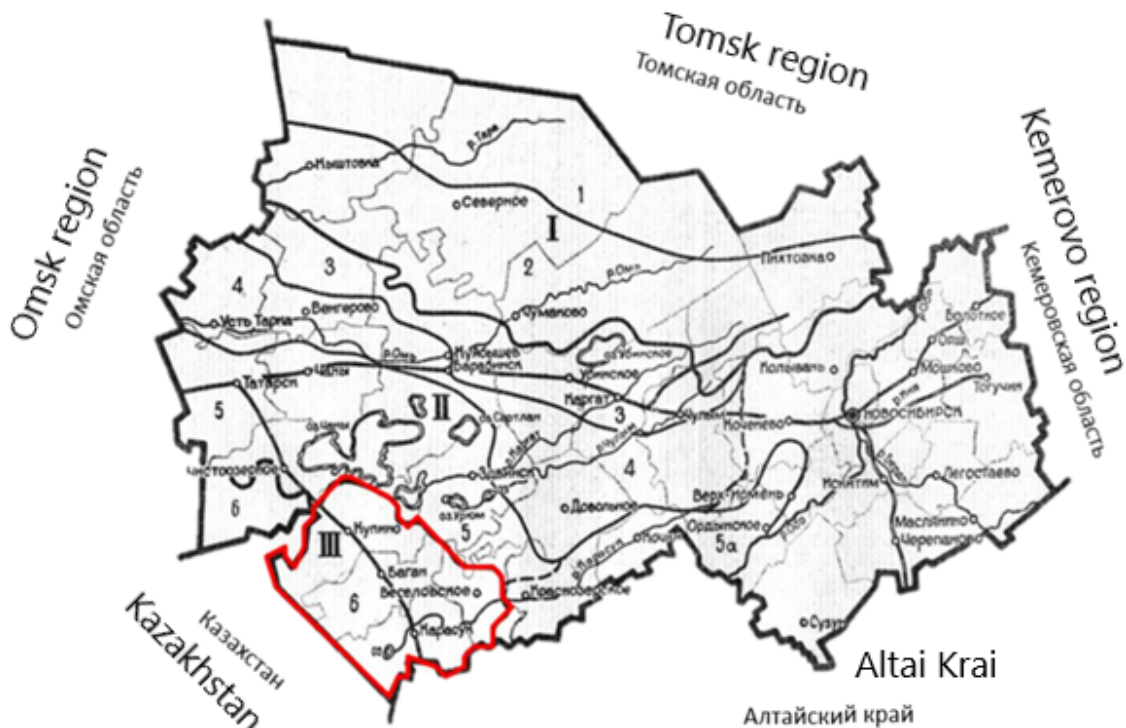


Рисунок 1. Территория проведения исследования
Figure 1. The research area

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе мониторингового исследования на территории северной части Кулундинской равнины Новосибирской области была собрана обширная выборка биологического материала. Всего отобрано 3733 клоакальных мазков у особей диких уток, относящихся к 15 видам семейства *Anatidae*, которые играют важную роль в

сохранении и распространении вируса птичьего гриппа в естественных экосистемах. Видовой состав выборки включал как массовые, так и относительно редкие виды диких уток, что позволяет получить репрезентативные данные о циркуляции ВГП на исследуемой территории (табл. 1).

Таблица 1. Таксономический состав и численность диких уток, отобранных для исследования в период с 2015 по 2024 гг. на территории севера Кулундинской равнины (Новосибирская область)
Table 1. Taxonomic composition and abundance of wild ducks selected for research in the period from 2015 to 2024 in the north of the Kulunda plain (Novosibirsk region)

Вид птиц / Bird species			Количество обследованных особей Number of sampled birds
Латинское название Latin name	Русское название Russian name	Английское название English name	
<i>Aythya ferina</i>	Нырок красноглазый	Common Pochard	1275
<i>Bucephala clangula</i>	Гоголь	Goldeneye	40
<i>Anas platyrhynchos</i>	Кряква обыкновенная	Mallard	453
<i>Mergus albellus</i>	Луток	Smew	27
<i>Aythya nyroca</i>	Нырок белоглазый	White-eyed Pochard	3
<i>Anas penelope</i>	Свиязь	Eurasian wigeon	39
<i>Netta rufina</i>	Нырок красноносый	Red-crested pochard	214
<i>Tadorna tadorna</i>	Пеганка	Common shelduck	7
<i>Oxyura leucocephala</i>	Савка	White-headed duck	3
<i>Anas strepera</i>	Серая утка	Gadwall	308
<i>Aythya fuligula</i>	Чернеть хохлатая	Tufted duck	40
<i>Anas crecca</i>	Чирок-свистунок	Common Teal	623
<i>Anas querquedula</i>	Чирок-трескунок	Garganey	287
<i>Anas acuta</i>	Шилохвость	Northern pintail	145
<i>Anas clypeata</i>	Широконоска	Northern Shoveler	269
Итого / Total:			3733

Используя стандартные методики выделения изолятов вируса птичьего гриппа на развивающихся куриных эмбрионах, из клоакальных мазков, было получено 165 положительных изолятов. Зараженность птиц

осенью (7,0 %) была достоверно выше, чем весной (0,14 %; χ^2 с поправкой Йейтса = 95,63; df = 1; $p < 0,001$). Полученные данные демонстрируют существенно

более высокий уровень зараженности вирусом в популяциях диких уток во время осенней миграции по сравнению с периодом весенней миграции (табл. 2).

Таблица 2. Видовое распределение и количество выделенных изолятов вируса птичьего гриппа от диких уток на севере Кулундинской равнины (2015–2024 гг.)

Table 2. Species distribution and number of isolated avian influenza virus isolates from wild ducks in the north of the Kulunda Plain (2015–2024)

№ п/п	Вид птицы Bird species	Английское название English name	Количество положительных изолятов AIV в период весенней миграции	Количество положительных изолятов ВГП в период осенней миграции
			Number of positive HSV isolates during spring migration period	Number of positive AIV isolates during autumn migration period
1	Нырок красноголовый	Common pochard	2	1
2	Гоголь	Goldeneye	0	0
3	Кряква обыкновенная	Mallard	0	32
4	Луток	Smew	0	0
5	Нырок белоглазый	White-eyed pochard	0	0
6	Свиязь	Eurasian wigeon	0	3
7	Нырок красноносый	Red-crested pochard	0	0
8	Пеганка	Common shelduck	0	0
9	Савка	White-headed duck	0	0
10	Серая утка	Gadwall	0	4
11	Чернеть хохлатая	Tufted duck	0	1
12	Чирок-свистунок	Common teal	0	65
13	Чирок-трескунок	Garganey	0	13
14	Шилохвость	Northern pintail	0	24
15	Широконоска	Northern shoveler	0	20
Итого / Total:			2	163

Особый интерес представляют видовые особенности вирусносительства. В весенний период инфицированные особи были обнаружены только у красноголового нырка (*Aythya ferina*), причем этот же вид показал наименьший уровень зараженности в осенний период. Такая зараженность может быть связана с особенностями биологии вида: характером миграционных путей, сроками размножения, спецификой формирования иммунного ответа. Как видно из полученных данных, зараженность диких уток во время весенней миграции носит характер единичных случаев, наблюдаемых исключительно у одного вида – красноголового нырка.

Уровень вирусного носительства среди диких уток варьировал от 0 до 5 % весной и от 0 до 13,4 % осенью, демонстрируя зависимость от таких факторов, как: месяца отбора проб, года исследования, видовой принадлежности птиц. Полученные данные подчеркивают необходимость учета как сезонных, так и видовых особенностей при организации мониторинга вируса птичьего гриппа в природных популяциях.

Оценивая полученные результаты, можно предположить, что весной зараженные особи встречаются крайне редко, наблюдались единичные случаи в 2021 г. В период осенней миграции, начинающейся во второй половине августа, максимальное количество зараженных ВГП птиц наблюдается в сентябре с последующим снижением в последующие месяцы (рис. 1).

Анализ данных за 2015–2024 гг. выявил статистически значимые различия в уровне зараженности вирусом гриппа птиц (ВГП) среди диких

уток в разные месяцы осенней миграции ($\chi^2 = 18,7$; df = 2; $p < 0,001$). Наибольшая зараженность зарегистрирована в сентябре (9,3 %; 95 % ДИ: 7,7–11,3 %), что значительно превышает показатели августа (5,2 %, $p = 0,0006$) и октября (5,0 %, $p = 0,0003$). Различия между августом и октябрём статистически незначимы ($p = 0,84$).

Выявленный пик зараженности в сентябре согласуется с данными из Северной Европы [17], где максимальная зараженность ВГП также отмечается в начале осени. Вероятное объяснение этому явлению включает комплекс причин: увеличение плотности мигрирующих стай, более благоприятные условия для сохранения и передачи вируса через среду в осенний период, накоплением вируса в водоемах за летний период, а также возможное взаимодействие местных птиц с мигрирующими на миграционных остановках, к которым относится исследуемая территория, что способствует распространению ВГП. Так же стоит отметить продолжительность периода миграции. Сроки весенней миграции значительно более сжаты по времени, по сравнению с осенней миграцией, что снижает возможность повышенных контактов и возможности заражения вирусом от особей разных популяций и из среды.

Зараженность ВГП у диких уток варьировала в зависимости от года отбора проб и составляла от 1 до 10 % (рис. 2). Выявлены статистически значимые различия между годами ($\chi^2 = 28,3$; $p = 0,0008$). Максимальная зараженность в 2019 году (9,4 %) значительно превышала показатели 2016 (4,1 %; $p = 0,03$) и 2022 (4,3 %; $p = 0,03$).

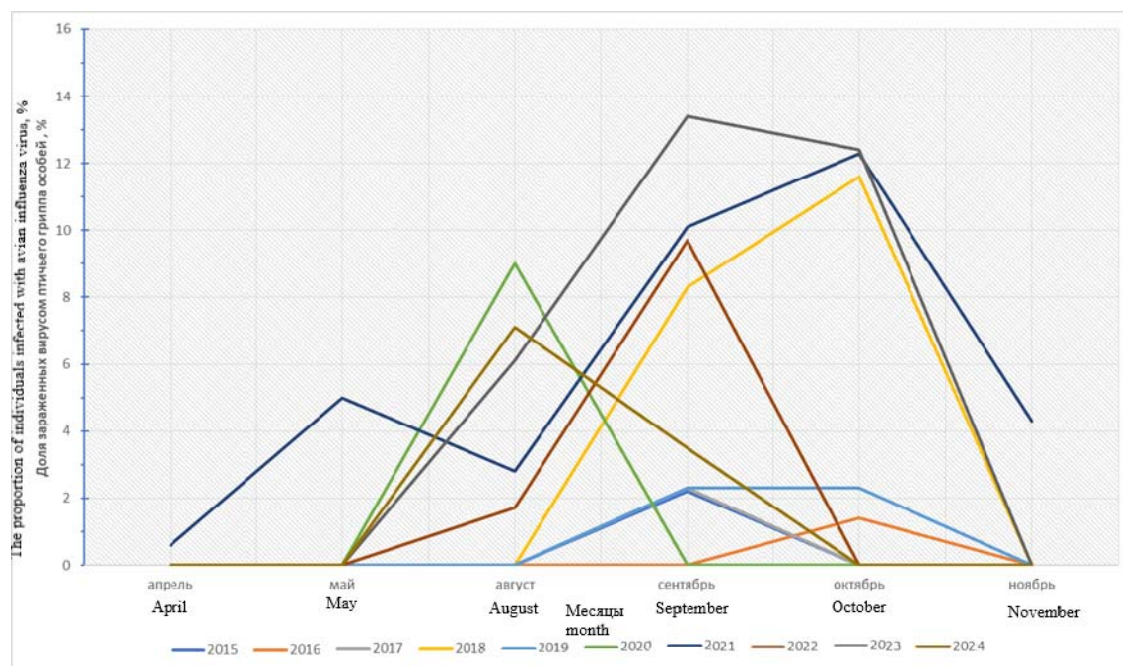


Рисунок 2. Зараженность диких уток вирусом птичьего гриппа на севере Кулундинской равнины Новосибирской области, 2015–2024 гг.

Figure 2. Prevalence of avian influenza virus in wild ducks in the northern part of the Kulunda Plain, Novosibirsk Region, 2015–2024

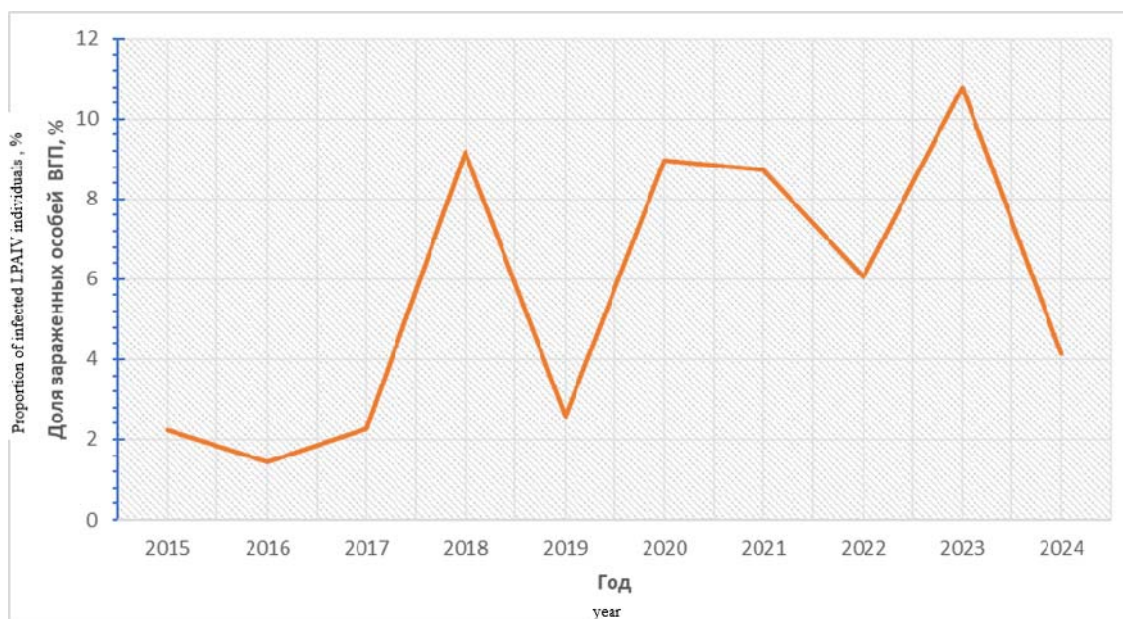


Рисунок 3. Межгодовая динамика зараженности вирусом птичьего гриппа диких уток на севере Кулундинской равнины Новосибирской области в период осенней миграции 2015–2024 гг.

Figure 3. Inter-annual dynamics of avian influenza virus prevalence in wild ducks during autumn migration (2015–2024) in the northern Kulunda Plain, Novosibirsk Region

Эти колебания в уровне зараженности могут быть объяснены различием в видовом составе выборок, так как различные виды уток демонстрируют различные показатели зараженности ВПГ. Разные виды уток обладают уникальными экологическими нишами, что определяет их поведенческие и физиологические особенности, а также возможность заражения ВПГ. Эти особенности и их взаимодействия могут значительно сказываться на общем годовом проценте зараженности диких уток на севере Кулундинской равнины. Например, если в определенный год на территории проведения исследования преобладают виды с

возможным высоким уровнем зараженности, то общий уровень зараженности в популяции будет выше. Напротив, если доминируют менее восприимчивые виды, это приводит к снижению, общего процента зараженности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Десятилетние исследования выявили устойчивые закономерности в сезонной динамике зараженности вирусом гриппа птиц (ВГП) среди популяций диких уток на севере Кулундинской равнины. Наиболее значимым результатом стало полное отсутствие инфицированных

особей в весенний период миграции на фоне выраженного осеннего пика зараженности, достигающего максимума в сентябре. Этот феномен, сопровождающийся межгодовыми колебаниями интенсивности, требует комплексного объяснения с учетом экологических и эпидемиологических факторов.

Анализ полученных данных позволяет предположить, что наблюдаемая сезонная динамика обусловлена сочетанием нескольких ключевых механизмов. Плавный рост зараженности с августа по сентябрь свидетельствует о наличии вируса в локальных популяциях в летний период, что создает предпосылки для активной передачи инфекции в ходе осенней миграции. В этот период массовые скопления птиц, продолжительные миграционные остановки и интенсивные контакты между резидентными и мигрирующими особями формируют идеальные условия для циркуляции патогена. Напротив, весенняя миграция характеризуется принципиально иной экологической ситуацией: более сжатые сроки перелетов, фрагментированные стаи и ограниченные контакты между популяциями, дополненные специфическими климатическими условиями (низкие температуры, ограниченная кормовая база), могут препятствовать эффективной передаче вируса. Особый интерес представляет сентябрьский пик зараженности, который, по-видимому, отражает критическую фазу в эпидемиологическом цикле ВГП в регионе, когда сочетание экологических и поведенческих факторов достигает оптимального баланса для поддержания вируса в популяции.

Полученные результаты согласуются с данными других исследований, однако уникальность наших данных заключается в документально подтвержденном отсутствии весенней зараженности, что требует пересмотра существующих моделей передачи вируса в умеренных широтах. Это явление может быть специфично для экосистем Кулундинской равнины, где сочетание гидрологического режима, температурных градиентов и структуры миграционных путей создает особые условия для сезонной динамики патогенов.

Перспективы дальнейших исследований видятся в нескольких направлениях. Во-первых, необходимы детальные исследования вирусных изолятов для понимания их происхождения и динамики в популяции. Во-вторых, важным представляется изучение роли абиотических факторов (температура, влажность, УФ-излучение) в сезонной выживаемости вируса во внешней среде. В-третьих, требуют уточнения механизмы межвидовой передачи между дикими и домашними птицами в разные сезоны года. Полученные знания позволят не только углубить понимание экологии ВГП, но и разработать научно обоснованную систему эпидемиологического надзора, интегрирующую климатические прогнозы и данные о миграционных потоках птиц. Это особенно актуально в контексте глобальных изменений климата, которые могут существенно изменить традиционные паттерны распространения зоонозных инфекций.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке гранта «Создание актуальной коллекции современных вирусов болезни Ньюкасла (ВБН) для разработки иммунологических биопрепаратов» РНФ № 24-24-00367.

Мы также хотели бы поблагодарить начальника Карасукского научного стационара В.А. Шило и

многочисленных сибирских охотников-любителей, предоставившим нам материал для анализа.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was supported by the Russian Science Foundation grant « Creation of an Up-to-Date Collection of Modern Newcastle Disease Viruses (NDV) for the Development of Immunological Biological Products» RSF № 24-24-00367.

We would also like to thank the head of the Karasuk Scientific Station, V.A. Shilo and numerous Siberian amateur hunters who provided us with the material for analysis.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Verhagen J.H., Fouchier R.A.M., Lewis N. Highly pathogenic avian influenza viruses at the wild-domestic bird interface in Europe: future directions for research and surveillance // *Viruses*. 2021. V. 13. N 2. P. 212. <https://doi.org/10.3390/v13020212>
2. Kalonda A., Saasa N., Nkhoma P., Kajihara M., Sawa H., Takada A., Simulundu E. Avian Influenza Viruses Detected in Birds in Sub-Saharan Africa: A Systematic Review // *Viruses*. 2020. V. 12. N 9. P. 993. <https://doi.org/10.3390/v12090993>
3. Spackman E. Animal Influenza Virus. *Methods in Molecular Biology*. New York, 2020, 294 p. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0346-8_7
4. Papp Z., Clark R.G., Parmley E.J., Leighton F.A., Waldner C., Soos C. The ecology of avian influenza viruses in wild dabbling ducks (*Anas* spp.) in Canada // *PLoS One*. 2017. V. 12. N 5. Article id: e0176297. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176297>
5. Causey D., Edwards S.V. Ecology of avian influenza virus in birds // *Journal of Infectious Diseases*. 2008. V. 197. P. S29-S33. <https://doi.org/10.1086/524991>
6. McDuie F., Matchett E.L., Prosser D.J., Takekawa J.Y., Pitesky M.E., Lorenz A.A., McCuen M.M., Cory O., Ackerman J.T., Cruz S., Casazza M.L. Pathways for avian influenza virus spread: GPS reveals wild waterfowl in commercial livestock facilities and connectivity with the natural wetland landscape // *Transboundary and Emerging Diseases*. 2022. V. 69. N 5. P. 2898–2912. <https://doi.org/10.1111/tbed.14428>
7. De Marco M.A., Sivay M., Sharshov K., Yurlov A., Cotti C., Shestopalov A. Virological evaluation of avian influenza virus persistence in natural and anthropic ecosystems of Western Siberia (Novosibirsk Region, summer 2012) // *PLoS One*. 2014. V. 9. N 6. Article id: e100859. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100859>
8. Strakhovenko V.D., Ovdina E.A., Ermolaeva N.I. Radioactivity assessment of sapropel sediments in small lakes in the Baraba Lowland and Kulunda Plain, West Siberia // *Geochemistry International*. 2022. V. 60. N 8. P. 792–807. <https://doi.org/10.1134/S0016702922080096>
9. Druzyaka A.V., Druzyaka O.R., Sharshov K.A., Kasianov N., Dubovitskiy N., Frolov I.G., Torniainen J., Wang W., Minina M.A., Shestopalov A.M. Stable isotope analysis reveals common teal (*Anas crecca*) molting sites in Western Siberia: implications for avian influenza virus spread // *Microorganisms*. 2024. V. 12. N 2. P. 357. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12020357>
10. Van Dijk J.G.B., Hoyer B.J., Verhagen J.H., Nolet B.A., Fouchier R., Klaassen M. Juveniles and migrants as drivers for seasonal epizootics of avian influenza virus // *Journal of Animal Ecology*. 2014. V. 83. N 1. P. 266–275. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12131>
11. Latorre-Margalef N., Tolf C., Grosbois V., Avril A., Bengtsson D., Wille M., Osterhaus A., Fouchier R., Olsen B., Waldenström B. Long-term variation in influenza A virus prevalence and subtype diversity in migratory mallards in northern Europe // *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2014. V. 281. N 1781. Article id: 20140098. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.0098>
12. Mateus-Anzola J., Gaytan-Cruz L., Espinosa-García A.C., Martínez-López B., Ojeda-Flores R. Risk for waterborne transmission and environmental persistence of avian influenza virus in a wildlife/domestic interface in Mexico // *Food Environ Virol*. 2024. N 16. P. 458–469. <https://doi.org/10.1007/s12560-024-09608-0>
13. Гуляева М.А., Шаршов К.А., Соболев И.А., Юрлов А.К., Гаджиев А.А., Рабазанов Н.И., Шестопалова Л.В., Шестопалов

- А.М. Выделение вируса гриппа А с оперения водоплавающих птиц во время осенней миграции // Юг России: экология, развитие. 2018. Т. 13. № 3. С. 134–141. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2018-3-134-141>
14. Гладков Н.А., Деметьев Г.П., Птушенко Е.С., Судилковская А.М. Определитель птиц СССР. Москва: Высшая школа, 1964. 536 с.
15. Mouronval J.B. Guide to the sex and age of European ducks. Paris: Office National de la chasse et de la faune sauvage, 2016. с. 128
16. Рябицев В.К. Птицы Урала, Приуралья и Западной Сибири. Екатеринбург: Уральский государственный университет им. АМ Горького, 2002. 608 с.
17. Olsen B., Munster V.J., Wallensten A., Waldenstrom J., Osterhaus A.D., Fouchier R.A. Global patterns of influenza A virus in wild birds // Science. 2006. V. 312. N 5772. P. 384–388. <https://doi.org/10.1126/science.1122438>

REFERENCES

- Verhagen J.H., Fouchier R.A.M., Lewis N. Highly pathogenic avian influenza viruses at the wild-domestic bird interface in Europe: future directions for research and surveillance. *Viruses*, 2021, vol. 13, no. 2. p. 212. <https://doi.org/10.3390/v13020212>
- Kalonda A., Saasa N., Nkhoma P., Kajihara M., Sawa H., Takada A., Simulundu E. Avian Influenza Viruses Detected in Birds in Sub-Saharan Africa: A Systematic Review. *Viruses*, 2020, vol. 12, no. 9, p. 993. <https://doi.org/10.3390/v12090993>
- Spackman E. Animal Influenza Virus. *Methods in Molecular Biology*. New York, NY., 2020, 294 p. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0346-8_7
- Papp Z., Clark R.G., Parmley E.J., Leighton F.A., Waldner C., Soos C. The ecology of avian influenza viruses in wild dabbling ducks (*Anas* spp.) in Canada. *PLoS One*, 2017, vol. 12, no. 5, article id: e0176297. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176297>
- Causey D., Edwards S.V. Ecology of avian influenza virus in birds. *Journal of Infectious Diseases*, 2008, vol. 197, pp. S29–S33. <https://doi.org/10.1086/524991>
- McDuie F., Matchett E.L., Prosser D.J., Takekawa J.Y., Pitesky M.E., Lorenz A.A., McCuen M.M., Cory O., Ackerman J.T., Cruz S., Casazza M.L. Pathways for avian influenza virus spread: GPS reveals wild waterfowl in commercial livestock facilities and connectivity with the natural wetland landscape. *Transboundary and Emerging Diseases*, 2022, vol. 69, no. 5, pp. 2898–2912. <https://doi.org/10.1111/tbed.14428>
- De Marco M.A., Sivay M., Sharshov K., Yurlov A., Cotti C., Shestopalov A. Virological evaluation of avian influenza virus persistence in natural and anthropic ecosystems of Western Siberia

- (Novosibirsk Region, summer 2012). *PLoS One*, 2014, vol. 9, no. 6, article id: e100859. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100859>
- Strakhovenko V.D., Ovdina E.A., Ermolaeva N.I. Radioactivity assessment of sapropel sediments in small lakes in the Baraba Lowland and Kulunda Plain, West Siberia. *Geochemistry International*, 2022, vol. 60, no. 8, pp. 792–807. <https://doi.org/10.1134/S0016702922080096>
 - Druzyaka A.V., Druzyaka O.R., Sharshov K.A., Kasianov N., Dubovitskiy N., Frolov I.G., Torniaainen J., Wang W., Minina M.A., Shestopalov A.M. Stable isotope analysis reveals common teal (*Anas crecca*) molting sites in Western Siberia: implications for avian influenza virus spread. *Microorganisms*, 2024, vol. 12, no. 2, p. 357 <https://doi.org/10.3390/microorganisms12020357>
 - Van Dijk J.G.B., Hoyer B.J., Verhagen J.H., Nolet B.A., Fouchier R., Klaassen M. Juveniles and migrants as drivers for seasonal epizootics of avian influenza virus. *Journal of Animal Ecology*, 2014, vol. 83, no. 1, pp. 266–275. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12131>
 - Latorre-Margalef N., Tolf C., Grosbois V., Avril A., Bengtsson D., Wille M., Osterhaus A., Fouchier R., Olsen B., Waldenström B. Long-term variation in influenza A virus prevalence and subtype diversity in migratory mallards in northern Europe. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2014, vol. 281, no. 1781, article id: 20140098. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.0098>
 - Mateus-Anzola J., Gaytan-Cruz L., Espinosa-García A.C., Martínez-López B., Ojeda-Flores R. Risk for waterborne transmission and environmental persistence of avian influenza virus in a wildlife/domestic interface in Mexico. *Food Environ Virol*, 2024, no. 16, pp. 458–469. <https://doi.org/10.1007/s12560-024-09608-0>
 - Gulyaeva M.A., Sharshov K.A., Sobolev I.A., Yurlov A.K., Gadzhiev A.A., Rabazanov N.I., Shestopalova L.V., Shestopalov A. M. The isolation of influenza a virus from plumage of waterfowl during autumn migration. *South of Russia: ecology, development*, 2018, vol. 13, no. 3, pp. 134–141 (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2018-3-134-141>
 - Gladkov N.A., Dementiev G.P., Ptushenko E.S., Sudilovskaya A.M. *Opredelitel' ptits SSSR* [Determinant of birds of the USSR]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1964, 536 p. (In Russian)
 - Mouronval J.B. Guide to the sex and age of European ducks. Paris, Office National de la chasse et de la faune sauvage, 2016, p. 128.
 - Ryabtsev V.K. Birds of the Urals, the Urals and Western Siberia. Yekaterinburg, Ural Gorky State University Publ., 2002, 608 p. (In Russian)
 - Olsen B., Munster V.J., Wallensten A., Waldenstrom J., Osterhaus A.D., Fouchier R.A. Global patterns of influenza A virus in wild birds. *Science*, 2006, vol. 312, no. 5772, pp. 384–388. <https://doi.org/10.1126/science.1122438>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Ольга Р. Друзяка и Алексей В. Друзяка осуществили сбор полевых образцов, сводный анализ данных и написали рукопись. Александра В. Глущенко проводила лабораторный анализ вирусологических проб. Людмила Л. Мацкало и Иван А. Соболев выполнили критический анализ, редактирование и доработку текста рукописи до подачи в редакцию. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Olga R. Druzyaka and Alexey V. Druzyaka conducted field sample collection, comprehensive data analysis and manuscript drafting. Alexandra V. Glushchenko conducted a laboratory analysis of virological samples. Lyudmila L. Matskalo and Ivan A. Sobolev performed critical analysis, editing, and refinement of the manuscript before submitting it to the Editor. All authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Ольга Р. Друзяка / Olga R. Druzyaka <https://orcid.org/0009-0005-8441-6939>
 Александра В. Глущенко / Alexandra V. Glushchenko <https://orcid.org/0000-0002-5784-0073>
 Иван А. Соболев / Ivan A. Sobolev <https://orcid.org/0000-0002-4561-6517>
 Людмила Л. Мацкало / Lyudmila L. Matskalo <https://orcid.org/0000-0001-7458-1416>
 Алексей В. Друзяка / Alexey V. Druzyaka <https://orcid.org/0000-0002-3597-1283>

Оригинальная статья / Original article
УДК 616.98 УДК 578.828 УДК 615.036.8
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-4



Резистентность ВИЧ-1 к АРВП среди инфицированных жителей Алтайского края с неудачей антиретровирусной терапии

Татьяна М. Налимова¹, Надежда П. Крикливая¹, Василий Е. Екушов¹, Валерий В. Шевченко²,
Елена А. Ильина², Наталья Г. Шульга², Ольга В. Белоусова², Алексей В. Тотменин¹,
Наталья М. Гашникова¹

¹ФБУН Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор» Роспотребнадзора, Новосибирск, Россия

²Краевое государственное бюджетное учреждение здравоохранения Алтайский краевой центр по профилактике и борьбе со СПИДом и инфекционными заболеваниями, Барнаул, Россия

Контактное лицо

Наталья М. Гашникова, кандидат биологических наук, ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора; 630559 Россия, рп. Кольцово, Новосибирская область. Тел. +79139405479
Email nmgashnikova@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0891-0880>

Формат цитирования

Налимова Т.М., Крикливая Н.П., Екушов В.Е., Шевченко В.В., Ильина Е.А., Шульга Н.Г., Белоусова О.В., Тотменин А.В., Гашникова Н.М. Резистентность ВИЧ-1 к АРВП среди инфицированных жителей Алтайского края с неудачей антиретровирусной терапии // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 43-56. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-4

Получена 12 августа 2025 г.

Прошла рецензирование 25 сентября 2025 г.

Принята 25 октября 2025 г.

Резюме

Цель: оценить развитие резистентности ВИЧ-1 у пациентов с вирусологической неэффективностью антиретровирусной терапии. Выполнен анализ резистентности ВИЧ-1 и клинико-эпидемиологических данных 367 инфицированных жителей Алтайского края. Нуклеиновые последовательности протеазы и ревертазы ВИЧ-1 получены путем ПЦР и секвенирования участков генома вируса. Генотипирование, филогенетический и мутационный анализы выполняли с помощью специализированных ресурсов. В изученной выборке выявлено преимущественное распространение ВИЧ-1 CRF63_02A6 (52,0 %) и субтипа A6 (42,5 %). Среди 367 образцов ЛУ ВИЧ-1 выявлена у 310 (84,5 %) пациентов. Наиболее часто применяемая комбинация препаратов НИОТ была TDF+3TC (60,8 %). Распространенность ЛУ ВИЧ-1 к TDF составила 46,9 %, к 3TC – 86,6 %. Препараты группы ННИОТ принимали 51,5 % человек, в 38,1 % в назначаемых схемах встречался EFV, распространенность резистентности вируса к которому составила 87,9 %. Препараты класса ИП принимали 25,8 % пациентов, чаще назначались комбинации LPV+RPV (36,8 %), ATV+RPV (43,2 %). Распространенность ЛУ ВИЧ-1 к LPV+RPV составила 33,3 %, к ATV+RPV – 35,9 %. Наиболее встречаемые мутации устойчивости среди ВИЧ-1: к НИОТ – M184V/I (62,2 %), K65R/E (17,5 %); к ННИОТ – K103N/S (47,8 %), E138G/A/K/Q (23,7 %); к ИП: V82A/G, M46I/L по 20,5 %. Исследование подчеркивает важность доступности анализа резистентности ВИЧ-1, так как своевременное выявление резистентных штаммов вируса и соответствующая коррекция терапии позволяют восстановить эффективность лечения, предотвратить появление новых мутаций и развитие перекрестной резистентности вирусам другим АРВП.

Ключевые слова

ВИЧ-1, ВИЧ-инфекция, АРТ, субтипы, мутации лекарственной устойчивости, резистентность ВИЧ, Алтайский край.

HIV-1 resistance to antiretroviral drugs among infected residents of Altai Krai with antiretroviral therapy failure

Tatyana M. Nalimova¹, Nadezhda P. Kriklivaya¹, Vasily E. Ekushov¹, Valery V. Shevchenko², Elena A. Ilina², Natalya G. Shulga², Olga V. Belousova², Alexey V. Totmenin¹ and Natalya M. Gashnikova¹

¹Vector State Research Centre of Virology and Biotechnology, Rospotrebnadzor, Novosibirsk, Russia

²Altai Krai Regional Centre for the Prevention and Control of AIDS and Infectious Diseases, Barnaul, Russia

Principal contact

Natalya M. Gashnikova, PhD in Biology, Vector State Research Centre of Virology and

Biotechnology, Rospotrebnadzor; Koltsovo, Novosibirsk region, Russia 630559

Tel. +79139405479

Email nmgashnikova@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0891-0880>

How to cite this article

Nalimova T.M., Kriklivaya N.P., Ekushov V.E., Shevchenko V.V., Ilina E.A., Shulga N.G., Belousova O.V., Totmenin A.V., Gashnikova N.M. HIV-1 resistance to antiretroviral drugs among infected residents of Altai Krai with antiretroviral therapy failure. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):43-56. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-4

Received 12 August 2025

Revised 25 September 2025

Accepted 25 October 2025

Abstract

Aim. The objective was to assess the development of HIV-1 resistance in patients with virological failure of antiretroviral therapy.

Resistance analysis of HIV-1 and clinico-epidemiological data was performed for 367 infected residents of Altai Krai. Nucleotide sequences of HIV-1 protease and reverse transcriptase were obtained by PCR and sequencing of viral genome regions. Genotyping, phylogenetic, and mutation analyses were performed using specialised resources.

In the sample studied, a predominance of HIV-1 CRF63_02A6 (52.0 %) and subtype A6 (42.5 %) was detected. Drug resistance of HIV-1 was found in 310 (84.5 %) of 367 samples. The most commonly used NRTI combination was TDF+3TC (60.8 %). The prevalence of HIV-1 resistance to TDF was 46.9 % and to 3TC was 86.6 %. Drugs of the NNRTI group were taken by 51.5 % of persons; EFV was included in 38.1 % of prescribed regimens and the prevalence of viral resistance to EFV was 87.9 %. Protease inhibitors were taken by 25.8 % of patients; combinations LPV+RPV (36.8 %) and ATV+RPV (43.2 %) were more frequently prescribed. The prevalence of HIV-1 resistance to LPV+RPV was 33.3 % and to ATV+RPV was 35.9 %. The most frequent resistance mutations among HIV were: to NRTIs – M184V/I (62.2 %), K65R/E (17.5 %); to NNRTIs – K103N/S (47.8 %), E138G/A/K/Q (23.7 %); to PIs – V82A/G and M46I/L (20.5 % each).

The study underscores the importance of access to HIV-1 resistance testing, since timely detection of resistant viral strains and appropriate adjustment of therapy can restore treatment effectiveness, prevent the emergence of new mutations and limit the development of cross-resistance to other ARVs.

Key Words

HIV-1, HIV infection, ART, subtypes, drug resistance mutations, HIV resistance, Altai Krai.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня одной из серьёзных проблем здравоохранения является распространение вируса иммунодефицита человека (ВИЧ). По данным ЮНЭЙДС к концу 2023 года около 39 миллионов человек жили с ВИЧ, при этом 84 % из них знали свой статус, 89 % знающих о статусе получали АРТ и 93 %, получающих антиретровирусную терапию (АРТ), достигли вирусной супрессии [1]. Эффективная АРТ обеспечивает улучшение качества жизни и состояния здоровья людей, живущих с ВИЧ-1 [2–5]. Однако следствием большого охвата терапией ВИЧ-инфицированных жителей может являться развитие резистентности ВИЧ-1 к препаратам АРТ. Сохраняющаяся репликация вируса на фоне приема АРТ приводит к накоплению достаточного количества критических мутаций для преодоления противовирусной активности антиретровирусных препаратов (АРВП) [6–9]. Возникновение мутантных штаммов ВИЧ-1, устойчивых к применяемым антиретровирусным препаратам, приводит к формированию резистентных форм ВИЧ-1 в организме пациента. Мутации в геноме ВИЧ-1, способные вызывать лекарственную устойчивость к препаратам, влияют на вирусологический и иммунологический ответ на АРТ и являются частой причиной неуспеха лечения [10–13]. Своевременное выявление резистентных штаммов ВИЧ-1 и коррекция терапии с учетом выявленной лекарственной устойчивости не только помогают восстановить эффективность лечения, но и позволяют предотвратить появление новых мутаций вируса и развитие перекрестной резистентности к другим АРВП [12; 13].

В Российской Федерации статистические данные по охвату антиретровирусной терапией лиц, живущих с ВИЧ (ЛЖВ), демонстрируют высокие показатели в достижении целей 95-95-95. Несмотря на усилия по расширению доступа к тестированию и лечению, продолжается ежегодная регистрация новых случаев ВИЧ-инфекции и актуальной остаётся проблема формирования резистентности ВИЧ-1.

По данным исследований, выполняемых в отдельных регионах страны, устойчивость ВИЧ-1 к лекарственным препаратам в Российской Федерации колеблется от 4,5 % до 19,3 % среди пациентов, ранее не имевших опыта терапии [14–16], и достигает значения 80–96 % среди лиц, у которых антиретро-вирусная терапия оказалась неэффективной [11; 13; 17–20]. Показатель заболеваемости ВИЧ-инфекцией в I полугодии 2023 г. составил 20,4 на 100 тыс. населения, увеличившись на 2,3 % по сравнению с аналогичным значением 2022 г. Показатель заболеваемости, превышающий среднероссийское значение в I полугодии 2023 г. имели 33 субъекта Российской Федерации. Высокие показатели заболеваемости выявлены в следующих регионах: в Красноярском крае (44,0), Алтайском крае (42,8) и в областях – Кемеровская (40,5), Курганская (37,3), Тюменская (36,5), Новосибирская (35,6) [21–22]. В 2023 году в Алтайском крае (АК) лабораторными исследованиями на ВИЧ-инфекцию было охвачено 32,2 % жителей (в 2021 году – 27,1 %). По данным формы № 2 федерального статистического наблюдения «Сведения об инфекционных и паразитарных заболеваниях» за 2023 год в АК поставлено на диспансерный учёт 1529 лиц с установленным диагнозом «ВИЧ-инфекция». Согласно данным, представленным на сайте Алтайского краевого центра

СПИД, на 01.01.2024 г. охват антиретровирусной терапией (АРТ) составил 90,5 % от числа лиц, состоящих на диспансерном учете [23]. Несмотря на высокие показатели охвата терапией лиц, живущих с ВИЧ, АК имеет один из самых высоких значений заболеваемости среди субъектов Российской Федерации, поэтому мониторинг развития лекарственной устойчивости ВИЧ-1 в случаях неэффективности АРТ инфицированных ВИЧ жителей АК является крайне востребованным.

Цель исследования – провести анализ развития резистентности ВИЧ-1 в ответ на антиретровирусную терапию у ВИЧ-инфицированных пациентов Алтайского края, имеющих вирусологическую неэффективность лечения, и оценить генетическое разнообразие ВИЧ-1.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследование было вовлечено 367 ВИЧ-инфицированных жителей Алтайского края, состоящих на учете в КГБУЗ «Алтайский краевой центр по профилактике и борьбе со СПИДом и инфекционными заболеваниями». Исследование было одобрено комитетом по этике Государственного бюджетного учреждения здравоохранения Новосибирской области «Городская инфекционная клиническая больница № 1» (протокол № 2 от 27 января 2021 г.).

Забор крови пациентов осуществлялся с февраля 2021 г. по май 2023 г. Все пациенты, сдавшие кровь на исследование, получали антиретровирусную терапию (АРТ), находились на различных стадиях ВИЧ-инфекции и имели в анамнезе вирусологическую неэффективность АРТ. Эпидемиологические и клинические данные пациентов были собраны квалифицированным медицинским персоналом с последующей деидентификацией для удаления личной информации. Приверженность пациентов к АРТ анализировалась ретроспективно с использованием медицинских записей и данных, собранных медицинскими работниками со слов самих пациентами. Высокий уровень приверженности присваивался, если все необходимые дозы АРТ были приняты вовремя; если пациент сообщал о спорадических пропусках доз, уровень приверженности присваивался как средний, а если перерыв между дозами лечения составлял семь дней и более, уровень приверженности присваивался как низкий. Оценка приверженности в категории «Дети» основывалась на заполнении анкет родителями/опекунами.

Материалом для исследования резистентности ВИЧ-1 была плазма крови. Экстракцию нуклеиновых кислот (НК) проводили набором РибоПреп–100 (Амплисенс, Россия), реакцию обратной транскрипции (ОТ) – с использованием готового набора для проведения ОТ (ВекторБест, Россия), стадии 1 и 2 ПЦР – при помощи набора МастерМикс HS-Taq ПЦР (Biolabmix, Россия). Секвенирование амплифицированных фрагментов ДНК осуществляли с использованием набора реагентов «BigDye Terminator™ v 3.1» на автоматическом секвенаторе «ABI Prism 3130» (Applied Biosystems, США). Для всех образцов ВИЧ-1 был расшифрован фрагмент гена *pol* размером 1300 п.н., включающий области протеазы и обратной транскриптазы вируса.

Филогенетический анализ методом Maximum Likelihood выполнен с помощью «Mega», версия 10 (<https://www.megasoftware.net>). Выравнивание вирусных последовательностей осуществлено с помощью алгоритма Muffit с настройками по умолчанию. Структуры вирусной

рекомбинации были идентифицированы на основе данных анализов RIP и jvHMM. В качестве референс-последовательностей использовали ранее охарактеризованные последовательности субтипов и групп ВИЧ-1 из международной базы данных (GenBank) (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank>).

С использованием Стэнфордской базы данных (<https://hivdb.stanford.edu>) для последовательностей ВИЧ-1 проведен анализ наличия мутаций резистентности вируса к ингибиторам протеазы (ИП), нуклеозидным ингибиторам обратной транскриптазы (НИОТ) и ненуклеозидными ингибиторам обратной транскриптазы вируса (ННИОТ).

Обработка результатов проводилась с помощью Excel, RStudio (<https://www.r-project.org>).

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследовано 367 образцов ВИЧ-1, выделенных от пациентов с регистрируемой неэффективностью терапии в период с февраля 2021 г. по май 2023 г. Анализируемая выборка пациентов характеризовалась примерно равным соотношением мужчин и женщин – 198 (53,9 %) и 169 (46,0 %) соответственно. Средний возраст составил 35 лет (от 5 месяцев до 65 лет). При этом основная доля лиц (70,5 %) относилась к возрастной группе от 30 до 50 лет, то есть активного трудоспособного и репродуктивного возраста. В Алтайском крае, как и в России в целом, изменилось не только количество ВИЧ-позитивных лиц, но и «портрет» человека, живущего с ВИЧ. Увеличение возраста среднестатистического пациента привело к тому, что в группу риска попадают люди экономического и репродуктивно активного возраста [24–28].

Преобладающим путем заражения ВИЧ-1 в данной выборке являлся половой – 195 случаев, причем 5 из них пришлось на МСМ. 114 человек сообщили об употреблении инъекционных наркотиков (ЛУИН), и 58 – инфицированы перинатально. При анализе выборки пациентов установлено, что давность диагноза ВИЧ-инфекция варьировала от 1 до 23 лет (среднее значение 8 лет). Средний уровень ВН составил $3,3 \times 10^5$ копий/мл (ДИ95 $1,4 \times 10^5$ – $5,1 \times 10^5$), а концентрация клеток CD4 – 361 клетка/мкл (ДИ95 322,5 – 399,5). Большая часть пациентов находилась на поздних стадиях болезни – 4А, Б, В (65,9 %). Длительность приема АРТ варьировала от 5 месяцев до 27 лет (среднее значение 4,3 года).

Отличительной чертой ВИЧ-1 является его значительная генетическая вариабельность. На текущий момент времени основная доля (более 90 %) новых случаев заражения ВИЧ-инфекцией обусловлена ВИЧ-1, относящимися к группе М. Эта группа включает в себя десять подтипов (от А до D, а также F–H, J–L) и разнообразные рекомбинантные варианты вируса, как циркулирующие, так и уникальные (CRFs и URFs) [29]. На сегодняшний день идентифицировано свыше 173 различных типов CRFs ВИЧ-1 [31]. С 2005 г. в разных регионах страны увеличивается распространение новых рекомбинантных форм ВИЧ-1 [14; 15; 31–35]. Но несмотря на это субтип А6 ВИЧ-1 остается доминирующим генетическим вариантом в России [36]. После 2014 года в Алтайском крае произошла смена доминирующего штамма ВИЧ-1: если в 2007 году основным был вариант А6 ВИЧ-1, после 2020 года, согласно литературным данным, 61 % всех выявляемых форм относятся к CRF63_02A6 ВИЧ-1 [25; 26].

Филогенетический анализ исследованных нами ВИЧ-1 выявил следующее распределение геновариантов: CRF63_02A6 – 52,0 % случаев, субтип А6 – 42,5 %, URF A_63_02A ВИЧ-1 – 3,8 %, CRF 02_AG ВИЧ-1 – 1,0 % и субтип В – в 0,5 %. АК не отличается высоким генетическим разнообразием ВИЧ-1. Рекомбинантная форма CRF63_02A6 после 2010-х является типичной для Сибири, где до 2009 года был один доминирующий субтип – А6 ВИЧ-1 [32].

Новообразованные рекомбинантные формы URF ВИЧ-1 составили незначительную долю – всего 14 (3,8 %) случаев. Среди лиц, у которых выделены URF ВИЧ-1, 7 пациентов были инфицированы гетеросексуальным путем, один ребенок – вертикальным, 6 человек относились к группе ЛУИН. Рекомбинантный анализ, выполненный для найденных URF, доказал, что все данные ВИЧ-1 являются различными URF A6/63_02A6, то есть произошли в результате отдельных рекомбинационных событий между CRF63_02A6 и А6 ВИЧ-1. В исследовании 82 вариантов ВИЧ-1, выполненном ранее в АК, были получены аналогичные данные по регистрации уникальных рекомбинантных ВИЧ, что указывает на продолжающую практику повторного заражения ВИЧ жителями края [26].

Так как в исследование были вовлечены разные лица, инфицированные в АК на протяжении длительного промежутка времени, был проведен анализ выявления геновариантов ВИЧ-1 с учетом пути заражения в зависимости от даты постановки пациентом на учет в Алтайском центре СПИДа (рис. 1). Анализ показал, что до 2015 года CRF63_02A6 ВИЧ-1 распространялся преимущественно в среде потребителей инъекционных наркотиков (ЛУИН), в то время как для А6 ВИЧ-1 этот путь оставался доминирующим до 2005 года. Переход на преобладание полового пути передачи наблюдается для обоих геновариантов, однако для А6 ВИЧ-1 он начался до 2010-х, а для CRF63_02A6 ВИЧ-1 – после 2015 года. Наши данные согласуются с результатами других исследований, подтверждая тенденцию смены преобладающих путей передачи ВИЧ-1 [25–27]. Изменение «портрета» пациента, живущего с ВИЧ, тесно связано со сменой путей передачи вируса. Сегодня доминирующим способом распространения как для CRF63_02A6, так и для субтипа А6 ВИЧ-1 является инфицирование жителей края при половых контактах.

Все пациенты, вовлеченные в исследование, принимали текущие схемы АРТ в течение минимум 5 месяцев (табл. 1). Наиболее часто в АРТ использовались схемы с содержанием препаратов из группы нуклеозидных ингибиторов обратной транскриптазы ВИЧ-1 (НИОТ, принимали 364 пациента), из НИОТ комбинация тенофовира (TDF) и ламивудина (ЗТС) назначалась в 60,8 % (223 из 367) случаев. Вторая по частоте назначения была комбинация препаратов абакавир (ABC) и ЗТС, встретилась в 10,9 % (40 из 367) случаев, остальные варианты назначения лекарств не достигали 10 %.

Препараты из группы ненуклеозидных ингибиторов обратной транскриптазы вируса (ННИОТ) принимали 51,5 % (189 из 367) пациентов, наиболее часто встречался препарат эфавиренз (EFV), назначаемый в 38,1 % (140 из 367) случаев. Самыми часто назначаемыми препаратами среди 25,8 % (95 из 367) пациентов, принимающих ИП, стали комбинации из атаканавира с ритонавиром (ATV+RTV) – 11,2 % (41 из 367) и лопинавира с ритонавиром (LPV+RTV) – 9,5 % (35 из 367).

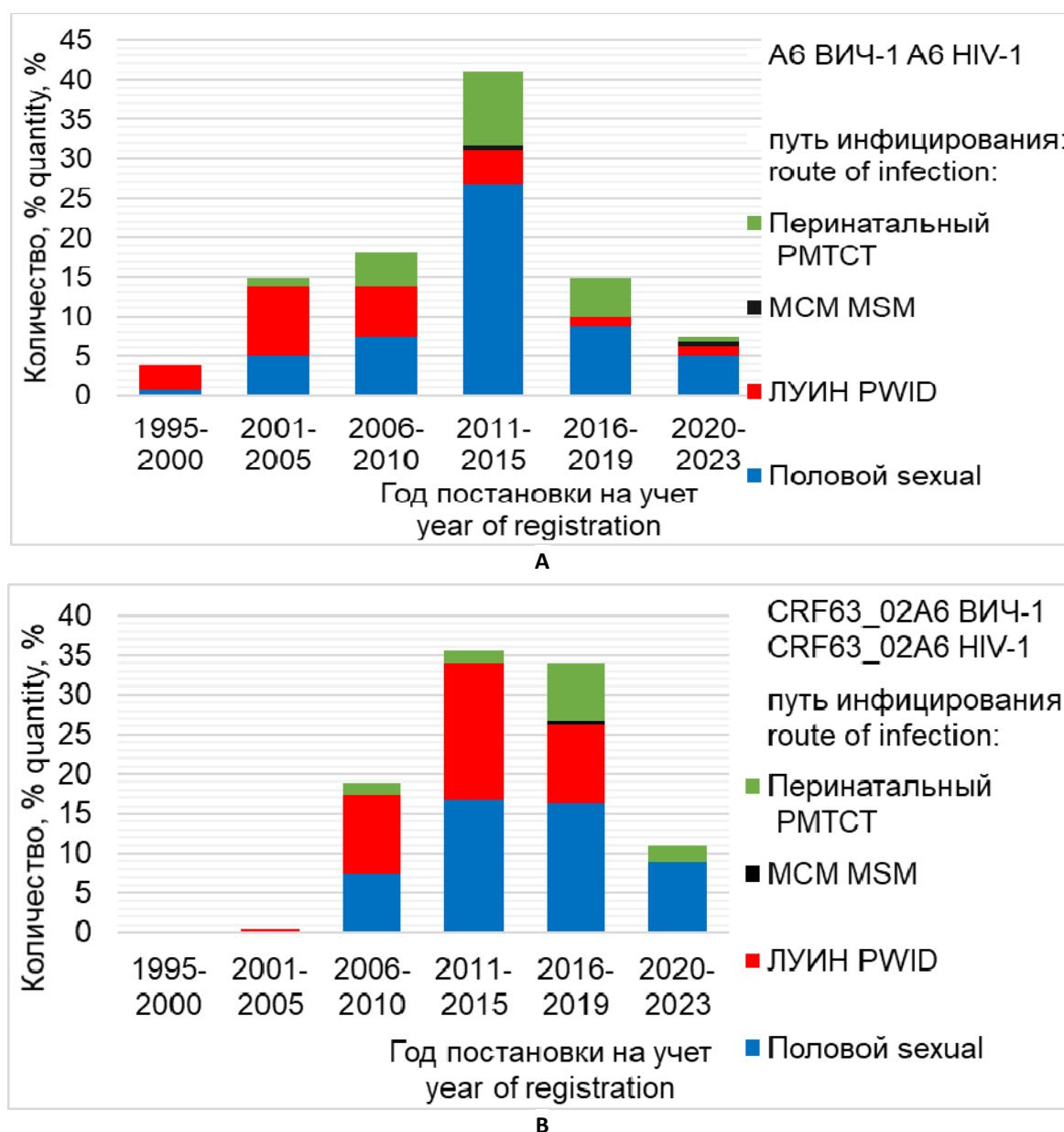


Рисунок 1. Выявление генетических вариантов А – А6 (n = 156) и В – CRF63_02A6 (n = 191) ВИЧ-1 у инфицированных жителей края с учетом года их постановки на диспансерный учет в центре СПИДа и в зависимости от пути их заражения.

Сокращения: ЛУИН – Лица, употребляющие инъекционные наркотики;

МСМ – мужчины, практикующие секс с мужчинами

Figure 1. Distribution of HIV-1 A6 (n = 156) and CRF63_02A6 (n = 191) genetic variants by year of registration at the AIDS centre, depending on the route of infection.

Abbreviations: PWID – people who inject drugs; MSM – men who have sex with men,

PMTCT: perinatal mother-to-child transmission

Для 367 образцов были расшифрованы нуклеотидные последовательности области гена *pol* ВИЧ-1, кодирующего протеазу и обратную транскриптазу вируса. Проведен анализ наличия мутаций лекарственной устойчивости (ЛУ) вируса. Для пациентов, имеющих ВИЧ-1 с мутациями резистентности, выполнен анализ уровня чувствительности к АРВП.

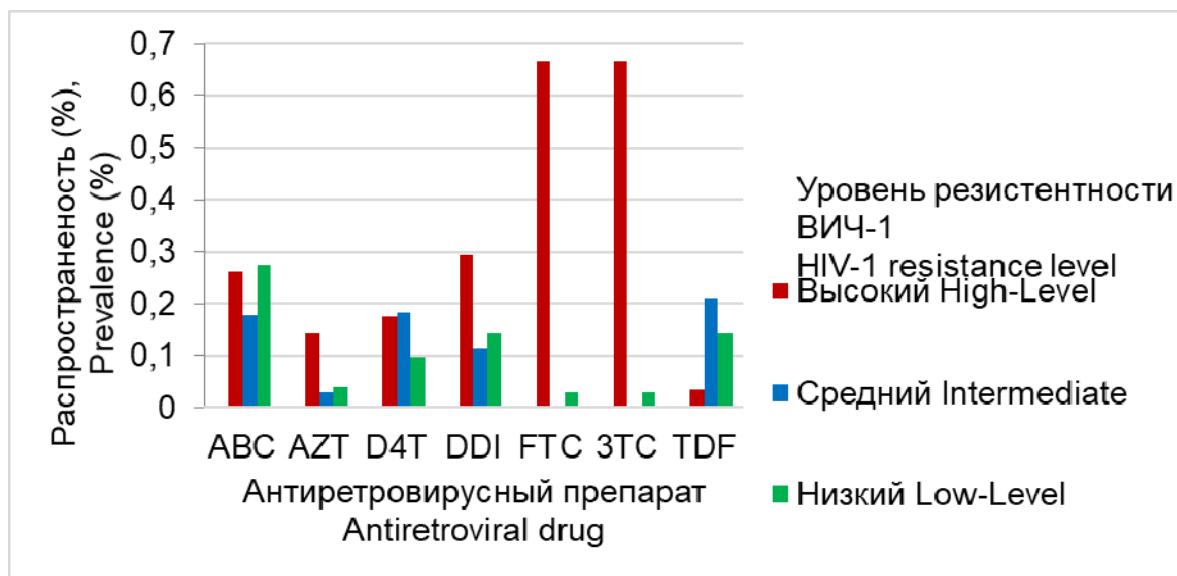
В исследуемой выборке ВИЧ-1 с наибольшей частотой встречались следующие мутации лекарственной устойчивости к НИОТ (рис. 2): M184V/I (в 62,2 % случаев), K65R/E (17,5 %), S68N/G (17,1 %), K219Q/E/R/N (16,0 %) и замены T215Y/F/S/N/I/A, K70T/E/R/N/G/Q по 15,6 % случаев.

Обобщение данных выявило, что резистентность высокого уровня ВИЧ-1 к препаратам группы НИОТ развивается чаще к FTC, 3TC (66,5 %), DDI (29,5%) и ABC (26,2 %). Для TDF, одного из наиболее часто назначаемых препаратов (68,1 %), распространенность резистентности высокого уровня составила 3,3 %, среднего уровня – 20,7 %. Важно отметить, что препараты DDI и D4T не принимал ни один пациент, а выявленная устойчивость к ним (67,4 % и 55,8 % соответственно) обусловлена развитием перекрестной резистентности в ходе приема других препаратов класса НИОТ.

Таблица 1. Использование препаратов разных классов ингибиторов ВИЧ-1 в схемах АРТ в исследованной выборке пациентов

Table 1. The usage of different HIV-1 drug classes among prescribed ART regimens

НИОТ NRTI (n = 364)	Абс.Аб s	%	ННИОТ NNRTI (n = 189)	Абс.Аб s	%	ИП PI (n = 95)	Абс.Аб s	%
3TC	343	94,2	EFV	140	74,0	ATV RTV	41	43,1
TDF	233	64,0	ETR	15	7,9	LPV RTV	35	36,8
ABC	50	13,7	ESV	14	7,4	DRV RTV	17	17,8
F-AZT	23	6,3	RPV	12	6,3	FPV RTV	2	2,1
AZT	56	15,4	NVR	8	4,2			
FTC	11	3,0						



A



B

Рисунок 2. А – Распределение прогнозируемого уровня лекарственной чувствительности ВИЧ-1 к препаратам класса НИОТ. В – Выявленные мутации резистентности ВИЧ-1 к НИОТ. Распространенность мутаций рассчитана среди 275 пациентов с обнаруженными мутациями резистентности вируса

Сокращения: НИОТ: нуклеозидный ингибитор обратной транскриптазы; ABC: абакавир; AZT: зидовудин; D4T: ставудин; DDI: диданозин; FTC: эмтрицитабин; 3TC: ламивудин; TDF: тенофовир

Figure 2. A – Distribution of predicted HIV-1 drug susceptibility to NRTIs. B – Detected secondary HIV-1 resistance mutations to NRTIs. Prevalence calculated among 275 patients with detected viral resistance mutations
Abbreviations: NRTI: nucleoside reverse transcriptase inhibitor; ABC: abacavir; AZT: zidovudine; D4T: stavudine; DDI: didanosine; FTC: emtricitabine; 3TC: lamivudine; TDF: tenofovir

Среди 367 образцов ВИЧ-1 резистентность к ННИОТ обнаружена у 224 (61,0 %) (рис. 3). Встретились следующие мутации устойчивости ВИЧ-1: K103N (47,8 %); E138G/A/K/Q (23,7 %); G190S/A/C/E (19,6 %); Y181C/S (19,2 %); K101E/P/H (17,4 %); P225H (15,6 %). Лекарственная устойчивость ВИЧ-1 высокого уровня к EFV выявлена у 76,3 % пациентов, для NVP и RPV данный показатель составил 85,3 % и 38,8 % соответственно. Эфавиренз – самый назначаемый препарат в группе ННИОТ (38,1 %), а невирапин и рилпивирин, напротив, встречаются в схемах реже

(2,1 и 3,2 %), что говорит о развитии к ним перекрестной резистентности. Препарат ESV принимали 14 (3,8 %) пациентов, выявляемость мутаций резистентности ВИЧ-1 к нему составила 6,2 %. Для формирования ЛУ вируса к NVP достаточно возникновения 1 мутации, данный препарат обладает низким генетическим барьером [37]. Описанный нами спектр наиболее распространенных мутаций развивающейся резистентности ВИЧ-1 у жителей АК с неэффективностью лечения совпадает с данными по выявляемому спектру мутаций первичной резистентности ВИЧ-1 в АК [25].

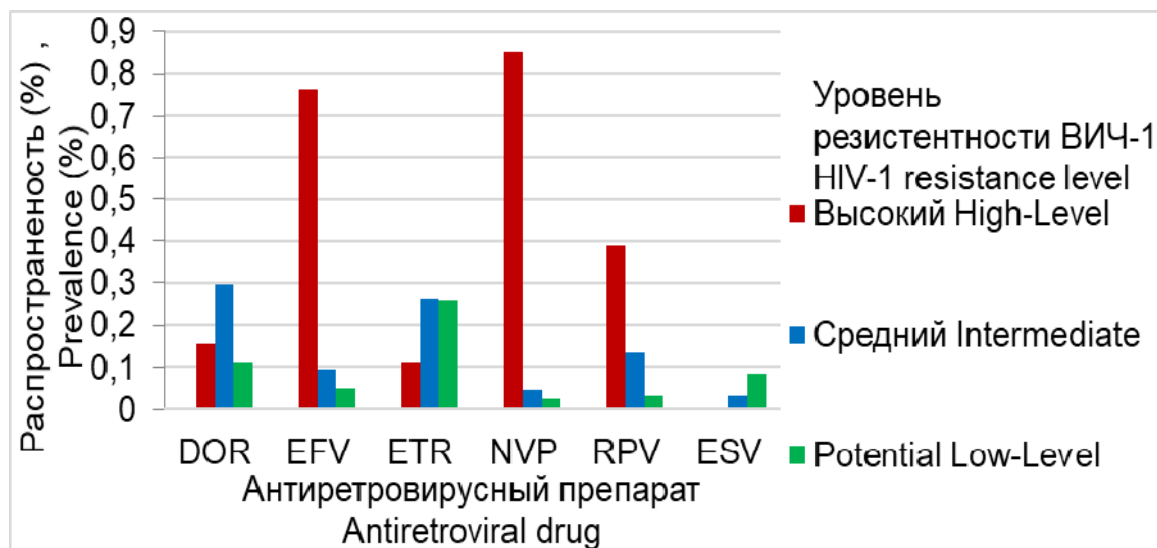


Рисунок 3. А – Распределение прогнозируемого уровня лекарственной чувствительности ВИЧ-1 к препаратам класса ННИОТ. В – Выявленные мутации резистентности ВИЧ-1 к ННИОТ. Распространенность рассчитана среди 224 пациентов с обнаруженными мутациями резистентности вируса

Сокращения: ННИОТ: ненуклеозидный ингибитор обратной транскриптазы; DOR: доравирин; EFV: эфавиренз; ETR: этравирин; NVP: невирапин; RPV: рилпивирин; ESV: элсульфавирин

Figure 3. A – Distribution of predicted HIV-1 drug susceptibility to NNRTIs. B – Detected secondary HIV-1 resistance mutations to NNRTIs. Prevalence was calculated among 224 patients with detected resistance mutations

Abbreviations: NNRTI: non-nucleoside reverse transcriptase inhibitor; DOR: doravirine; EFV: efavirenz; ETR: etravirine; NVP: nevirapine; RPV: rilpivirine; ESV: elvitegravir

Анализ мутаций, обуславливающих устойчивость ВИЧ-1 к ИП, показал следующее распределение (рис. 4): мутации V82A/G и M46I/L встречались в 20,5 % случаев каждая, T74P – в 17,5 % случаев, а I50V, Q58E и G73S/D – в 15,4 % случаев. В исследуемой группе устойчивость к NFV найдена в 79,5 % случаев среди обнаруженных резистентных к ИП ВИЧ-1, общая резистентность к SQV/r составила 48,7 % случаев, к IDV/r – 46,2 %, ATV/r – 35,9 %, FPV/r – 30,8 %. Из 95 (25,8 %) пациентов, принимающих препараты класса ИП, резистентность ВИЧ-1 наблюдалась у 39 (41,0 %) пациентов. У 5 пациентов ВИЧ-1 имел ЛУ к ИП при отсутствии их в текущей схеме: одна женщина заразилась половым путем (ИБ+ в 2001 г.), находится на терапии 10 лет при высокой приверженности и имеет мутацию V82A (низкий уровень резистентности к ATV/r и средний к – LPV/r); три пациента мужского пола (потребители инъекционных наркотиков (ПИН), ИБ поставлен в 2007–2010 гг., находятся на терапии 8–10 лет при

средней приверженности к АРТ) имели ВИЧ с мутациями, значительно влияющими на чувствительность к ИП. Пятый случай – ребенок, заразившийся перинатально, имел низкую приверженность, ранее принимал FPV+RTV+3TC+RAL, после неуспеха терапии переведен на F–AZT+3TC+RAL, после замены АРТ у вируса обнаружены мутации резистентности к ИП – G73S, I54V.

Суммарно у 310 (84,5 %) образцов ВИЧ-1 обнаружены мутации, связанные с развитием ЛУ. Наиболее часто встречались мутации, одновременно затрагивающие препараты групп НИОТ и ННИОТ, на втором месте – мутации, приводящие к устойчивости только к классу НИОТ.

Доля пациентов, у которых снижена чувствительность вируса к остальным классам препаратов, не превышала 10 %. Частота выявленной резистентности ВИЧ-1 к классам АРВП представлена в таблице 2.

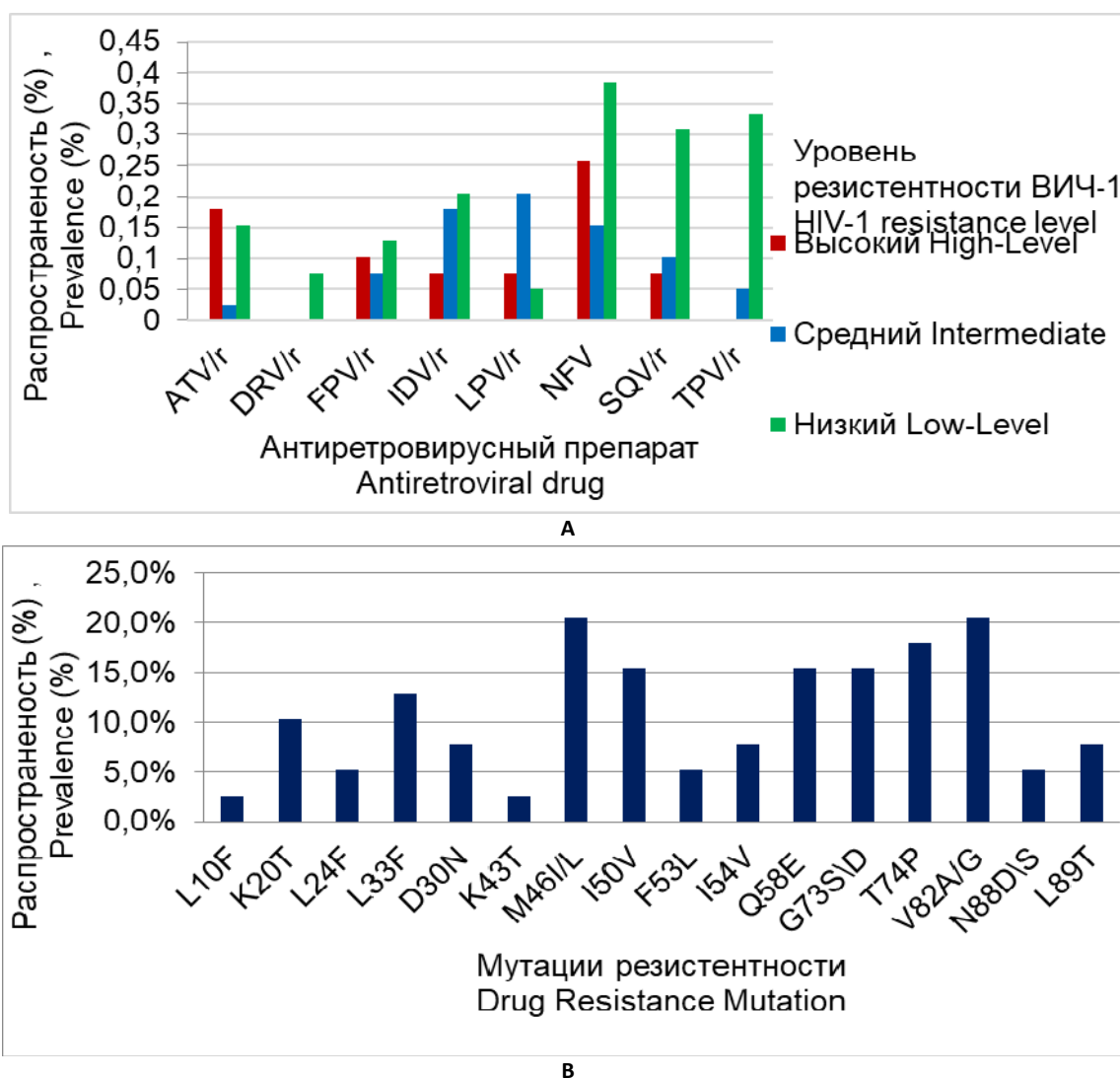


Рисунок 4. А – Распределение прогнозируемого уровня лекарственной чувствительности ВИЧ-1 к препаратам класса ИП. **Б** – Выявленные мутации резистентности ВИЧ-1 к ИП. Распространенность рассчитана среди 39 пациентов с обнаруженными мутациями резистентности вируса

Сокращения: ATV: атазанавир; DRV: дарунавир; LPV: лопинавир; RTV: ритонавир; SQV: сакинавир; TPV: типранавир; FPV: фосампренавир; NFV: нелфинавир; IDV: индинавир

Figure 4. А – Distribution of predicted HIV-1 drug susceptibility to PI drugs. **Б** – Identified secondary HIV-1

resistance mutations to PIs. Prevalence was calculated among 39 patients with detected viral resistance mutations

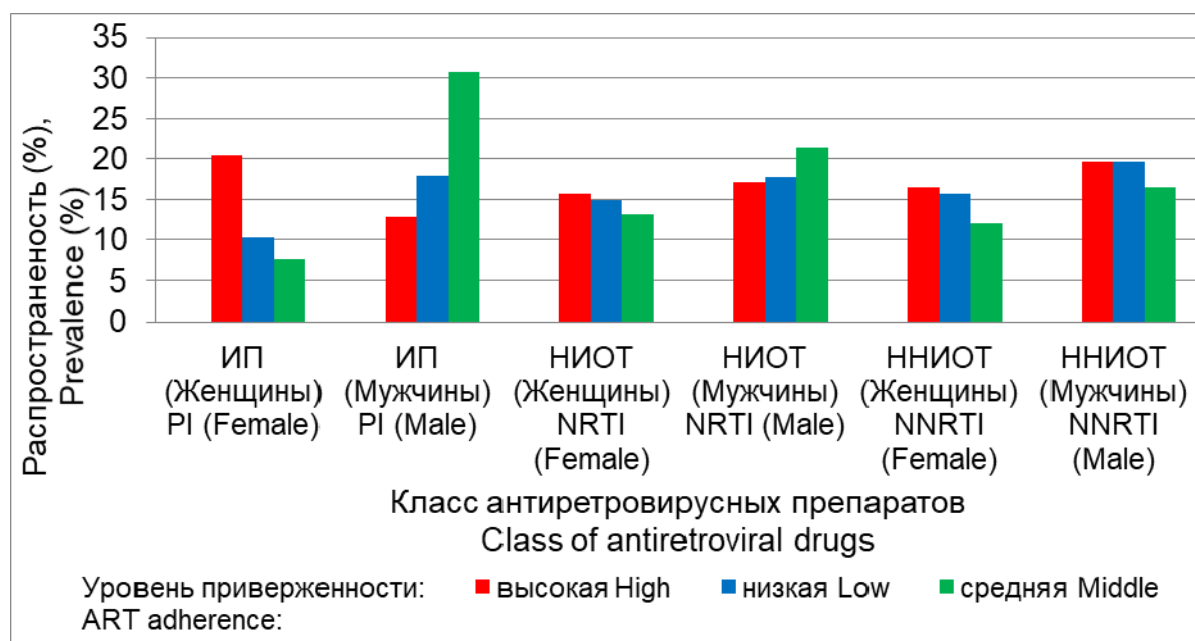
Abbreviations: PI: proteaseinhibitor; ATV: atazanavir; DRV: darunavir; LPV: lopinavir; RTV: Ritonavir; SQV: saquinavir; TPV: tipranavir; FPV: fosamprenavir; NFV: nelfinavir; IDV: indinavir

Таблица 2. Частота выявленных мутаций ЛУ ВИЧ-1 к конкретному классу ингибиторов вируса или к их комбинации**Table 2.** Frequency of drug resistance mutations to a specific ARV drug or combination of drugs

Классы АРВ-препаратов Classes of ARV drugs	Количество зарегистрированных резистентных вариантов ВИЧ-1 (N=340) The number of registered resistant variants of HIV-1 (N=340)	
	Абс. / Abs.	%
ИП + НИОТ + ННИОТ PI + NRTI + NNRTI	23	7,4
НИОТ + ННИОТ NRTI + NNRTI	171	55,2
НИОТ + ИП NRTI + PI	11	3,5
ННИОТ + ИП NNRTI + PI	-	-
НИОТ NRTI	70	22,6
ННИОТ NNRTI	30	9,7
ИП PI	5	1,6

Зависимости между количеством применяемых схем терапии пациентом и количеством мутаций резистентности выделенного у пациента ВИЧ найдено не было. Было предположено, что развитие резистентности вируса к препаратам терапии связано в первую очередь с неоптимальной приверженностью

ВИЧ-инфицированных лиц. Выполненный анализ встречаемости резистентных ВИЧ-1 между мужчинами и женщинами в категориях с высокой и низкой приверженностью не обнаружил статистически значимой связи (рис. 5).

**Рисунок 5.** Выявление резистентных ВИЧ-1 среди мужчин и женщин с разными уровнями приверженности лечению с учетом развившейся резистентности вируса к классу ингибиторов (ИП n = 39, НИОТ n = 275, ННИОТ n = 224)

Аббревиатуры: ИП – ингибиторы протеазы; НИОТ – нуклеозидные ингибиторы обратной транскриптазы; ННИОТ – ненуклеозидные ингибиторы обратной транскриптазы

Figure 5. Distribution of resistant HIV-1 depending on the level of patient adherence by ARV groups (PI n = 39, NRTI n = 275, NNRTI n = 224) among men and women

Abbreviations: PI – protease inhibitors; NRTI – nucleoside reverse transcriptase inhibitors; NNRTI – non-nucleoside reverse transcriptase inhibitor

Во всех трех группах пациентов, сформированных по уровню приверженности лечению, количество случаев выявляемой резистентности вируса к препаратам было незначимо выше среди мужчин (ИП $p = 0,31$; НИОТ $p = 0,11$; ННИОТ $p = 0,37$). Между лицами,

инфицированными разными путями, также не было значимых различий по регистрации случаев резистентных ВИЧ ($p = 0,24$). Возможно, для оценки реального уровня приверженности пациентов АРТ необходимо включить дополнительные критерии. Это

подчеркивает важность комплексного подхода в работе с пациентами по повышению мотивации и соблюдению режима приема лекарств.

Проведенное исследование резистентности ВИЧ-1 позволило специалистам Алтайского краевого центра скорректировать пациентам схемы АРТ в соответствии с выявленной ЛУ вируса. В результате для 64 % пациентов удалось добиться успеха терапии. Для 9 пациентов (2,4 %) смена терапии не привела к подавлению вирусной нагрузки. У 51,3 % пациентов из этой группы наблюдалась низкая приверженность к лечению. К сожалению, в ходе исследования 22 человека (5,9 %) прекратили посещение врача, 44 (11,9 %) пациента умерло.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ развития резистентности ВИЧ-1 среди жителей АК с неэффективностью АРТ зарегистрировал возникновение мутаций, связанных с резистентностью ВИЧ-1, в 84,5 % случаев, что указывает на корректное назначение пациентам анализа резистентности ВИЧ-1 и высокую частоту развития ЛУ вируса среди пациентов с неудачей терапии. Резистентность ВИЧ-1 выявлена среди жителей разного социально статуса, относящихся к разным ключевым группам, имеющих разную степень приверженности лечению.

Высокая распространенность лекарственной устойчивости ВИЧ-1 в анализируемой выборке свидетельствует о важности доступности выполнения теста на наличие мутаций резистентности ВИЧ-1 для лиц, столкнувшихся с вирусологической неудачей на фоне приема АРТ. Развитие резистентности ВИЧ-1 является комплексной и очень серьезной проблемой, требующей всё большего внимания, в связи с развитием высокого уровня перекрестной резистентности вируса к препаратам – ингибиторам одного класса, что может значительно сократить перечень эффективных схем АРТ. Своевременное выявление мутаций резистентности вируса и корректировка схем АРТ позволяют сохранить эффективность лечения, предотвратить формирование и закрепление мутаций резистентности вируса, распространение штаммов ВИЧ-1 с ЛУ к препаратам.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФБУН «Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор» Роспотребнадзора».

ACKNOWLEDGMENT

The work was carried out within the framework of the Vector State Research Centre of Virology and Biotechnology of Rospotrebnadzor.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. UNIIIDS (2024) Global AIDS Update 2024. Geneva. URL: <https://www.unaids.org/ru/resources/fact-sheet> (дата обращения: 10.07.2025)
2. Garland J.M., Mayan H., Kantor R. Treatment of Advanced HIV in the Modern Era // *Drugs*. 2025. V. 85. N 7. P. 883–909. <https://doi.org/10.1007/s40265-025-02181-1>
3. Соколова Е.В., Ладная Н.Н., Покровский В.В. и др. Влияние антиретровирусной терапии на развитие эпидемии ВИЧ-инфекции в Российской Федерации //

Эпидемиология и инфекционные болезни. Актуальные вопросы. 2023. Т. 13. N 3. С. 20–26.

<https://doi.org/10.18565/epidem.2023.13.3.20-6>

4. Rodríguez-Galet A., Ventosa-Cubillo J., Bendomo V., Eyene M., Mikue-Owono T., Nzang J., Ncogo P., Gonzalez-Alba J.M., Benito A., Holguín Á. High Drug Resistance Levels Compromise the Control of HIV Infection in Pediatric and Adult Populations in Bata, Equatorial Guinea // *Viruses*. 2022. V. 15. N 1. P. 27. <https://doi.org/10.3390/v15010027>
5. World Health Organization. HIV drug resistance: brief report 2024. Geneva, 2024. Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240086319> (accessed 31.07.2025)
6. Ожмерова Е.Н., Бобкова М.П. Лекарственная устойчивость ВИЧ: прежние и современные тенденции // *Вопросы вирусологии*. 2022. Т. 67. N 3. С. 193–205. <https://doi.org/10.36233/0507-4088-113>
7. Бобкова М.П. Лекарственная устойчивость ВИЧ. Москва: Человек, 2014. 288 с.
8. Boffito M., Waters L., Cahn P., Paredes R., Koteff J., Van Wyk J., Vincent T., Demarest J., Adkison K., Quercia R. Perspectives on the Barrier to Resistance for Dolutegravir + Lamivudine, a Two-Drug Antiretroviral Therapy for HIV-1 Infection // *AIDS Res Hum Retroviruses*. 2020. V. 36. N 1. P. 13–18. <https://doi.org/10.1089/AID.2019.0171>
9. Pang X., Lu H., He Q., Tang K., Ma J., Chen S., Huang J., Fang N., Xie H., Lan G., Liang S. Emergence of HIV-1 drug resistance mutations among children and adolescents undergoing prolonged antiretroviral therapy in Guangxi // *J Glob Antimicrob Resist*. 2024. V. 37. P. 208–213. <https://doi.org/10.1016/j.jgar.2024.03.013>
10. Sivay M.V., Maksimenko L.V., Nalimova T.M., Nefedova A.A., Osipova I.P., Krikliyaya N.P., Gashnikova M.P., Ekushov V.E., Totmenin A.V., Kapustin D.V., Pozdnyakova L.L., Skudarnov S.E., Ostapova T.S., Yaschenko S.V., Nazarova O.I., Shevchenko V.V., Ilyina E.A., Novikova O.A., Agafonov A.P., Gashnikova N.M. HIV drug resistance among patients experiencing antiretroviral therapy failure in Russia, 2019–2021 // *Int J Antimicrob Agents*. 2024. V. 63. N 2. Article ID: 107074. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2023.107074>
11. Кириченко А.А., Киреев Д.Е., Шлыкова А.В. Лекарственная устойчивость ВИЧ-1 у пациентов с вирусологической неэффективностью АРТ в России (2013–2021 гг.) // *Эпидемиология и инфекционные болезни. Актуальные вопросы*. 2021. Т. 11. N 3. С. 53–62. <https://doi.org/10.18565/epidem.2021.11.3.53-62>
12. Ankunda C., Emunyu J., Namasambi S., Sserunjogi C., Kyomuhangi B., Mumbere I., Nakaweesei J. Prevalence of drug resistance mutations and their association with time to virological failure in people living with HIV in Uganda // *BMC Infect Dis*. 2025. V. 25. N 1. Article ID: 1241. <https://doi.org/10.1186/s12879-025-11607-w>
13. Alonso S., Salazar E., Gálvez N., Navas J., Quintana C., Orózco N., Prieto L., Navarro M.L., Guillén S., Gómez-Alba J.M., Medina-Sánchez C., Juárez J., Holguín A. Prevalence of acquired resistance to antiretrovirals in children and adolescents living with HIV under clinical follow-up at the Roosevelt Hospital in Guatemala // *J Infect Public Health*. 2025. V. 18. N 9. Article ID: 102827. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2025.102827>
14. Kirichenko A., Kireev D., Lopatukhin A., Murzakova A., Lapovok I., Saleeva D., Lадная N., Gadirova A., Ibrahimova S., Safarova A., et al. Prevalence of HIV-1 drug resistance in Eastern European and Central Asian countries // *PLoS ONE*. 2022. V. 17. N 1. Article ID: e0257731. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257731>

15. Antonova A., Kazennova E., Lebedev A., Ozhmegova E., Kuznetsova A., Tumanov A., Bobkova M. Recombinant Forms of HIV-1 in the Last Decade of the Epidemic in the Russian Federation // *Viruses*. 2023. V. 15. N 12. Article ID: 2312. <https://doi.org/10.3390/v15122312>
16. Кириченко А.А., Киреев Д.Е., Лопатухин А.Э., Мурзакова А.В., Лаповок И.А., Ладная Н.Н., Покровский В.В. Уровень и структура лекарственной устойчивости ВИЧ-1 среди пациентов без опыта приема антиретровирусных препаратов с момента начала применения антиретровирусной терапии в Российской Федерации // *ВИЧ-инфекция и иммуносупрессии*. 2019. Т. 11. N 2. С. 75–83. <https://doi.org/10.22328/2077-9828-2019-11-2-75-83>
17. Brizzi M.B., Cable T.L., Patel D.C., Williams K., Adjei Z., Fichtenbaum C.J. Heavily treatment-experienced patients with HIV: are new mechanisms of action enough? // *J Int Med Res*. 2024. V. 52. N 12. Article ID: 3000605241301883. <https://doi.org/10.1177/03000605241301883>
18. Щемелев А.Н., Семенов А.В., Останкова Ю.В., Зуева Е.Б., Валутите Д.Э., Семенова Д.А., Давыденко В.С., Тотолян А.А. Генетическое разнообразие и мутации лекарственной устойчивости ВИЧ-1 в Ленинградской области // *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии*. 2022. Т. 99. N 1. С. 28–37. <https://doi.org/10.36233/0372-9311-216>
19. Питерский М.В., Гусев А.Г., Ходаков О.А., Захарова Ю.А., Семенов А.В. Разнообразие субтипов, филогенетический анализ и изучение лекарственной устойчивости штаммов ВИЧ-1, циркулирующих в Уральском федеральном округе // *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии*. 2022. Т. 99. N 1. С. 38–53. <https://doi.org/10.36233/0372-9311-178>
20. Kapustin D.V., Nalimova T.M., Ekushov V.E., Krikivaya N.P., Halikov M.R., Krasnova E.I., Khokhlova N.I., Demchenko S.V., Pozdnyakova L.L., Sivay M.V., Totmenin A.V., Gashnikova M.P., Gotfrid L.G., Maksutov R.A., Gashnikova N.M. Patterns of HIV-1 drug resistance among HIV-infected patients receiving first-line antiretroviral therapy in Novosibirsk Region, Russia // *J Glob Antimicrob Resist*. 2023. V. 35. P. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.jgar.2023.07.013>
21. Специализированный научно-исследовательский отдел по профилактике и борьбе со СПИДом ФБУН Центрального НИИ эпидемиологии Роспотребнадзора. ВИЧ-инфекция в Российской Федерации на 30 июня 2023 г. URL: <chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcglclefindmkaj/https://hivub.ru/wp-content/uploads/2024/04/vich2023.pdf> (дата обращения 20.12.2024).
22. Покровский В.В., Ладная Н.Н., Соколова Е.В. Федеральный научно-методический центр по профилактике и борьбе со СПИДом // *ВИЧ-ИНФЕКЦИЯ Информационный бюллетень* N 48. URL: <chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcglclefindmkaj/http://www.hivrussia.info/wp-content/uploads/2024/11/hiv-infection-info-bulletin-48.pdf> (дата обращения 20.05.2024)
23. Щевченко В.В. Статистика заболевания ВИЧ-инфекцией на территории Алтайского края. URL: <https://altaids22.ru/spetsialistam/statistika/> (дата обращения: 15.02.2025)
24. Поляков А.Н., Полякова А.В., Сафьянова Т.В. Заболеваемость ВИЧ-инфекцией на территории Алтайского края в 2006–2014 гг. // *Бюллетень медицинской науки*. 2016. Т. 1. N 5. P. 12–15. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zabolevaemost-vich-infektsiy-na-territorii-altayskogo-kрая-v-2006-2014-gg> (дата обращения: 15.07.2025)
25. Лукьяненко Н.В. и др. Анализ заболеваемости ВИЧ-инфекцией в Алтайском крае в 2022 г. // *Якутский медицинский журнал*. 2025. N 4. С. 80–84.
26. Казеннова Е.В., Антонова А.А., Ожмегова Е.Н., Демьяненко Э.Р., Минакова М.В., Белоусова О.В., Громов К.Б., Бобкова М.Р. Генетический анализ ВИЧ-1 в Алтайском крае: дальнейшее распространение варианта CRF63_02A1 по территории Западной Сибири // *ВИЧ-инфекция и иммуносупрессии*. 2020. Т. 12. N 1. С. 47–57. <https://doi.org/10.22328/2077-9828-2020-12-1-47-57>
27. Решетников А.В., Павлов С.В. Современный социальный портрет ВИЧ-инфицированного россиянина // *Иммунология*. 2018. Т. 39. N 2–3. С. 100–107. <https://doi.org/10.18821/0206-4952-2018-39-2-3-100-107>
28. Загдын З.М., Кобесов Н.В., Денюшенков В.Л., Стерликов С.А. Глобальное бремя ВИЧ/СПИД в аспекте общественного здоровья в России: DALY, вызванные ВИЧ-инфекцией. Часть 2. ВИЧ-инфекция и иммуносупрессии. 2025. Т. 17. N 2. С. 32–43. <https://doi.org/10.22328/2077-9828-2025-17-2-32-43>
29. Yamaguchi J. et al. Brief report: complete genome sequence of CG-0018a-01 establishes HIV-1 subtype L. // *JAIDS Journal of Acquired Immune Deficiency Syndromes*. 2020. V. 83. N 3. P. 319–322. <https://doi.org/10.1097/QAI.0000000000002246>
30. Bbosa N., Kaleebu P., Ssemwanga D. HIV subtype diversity worldwide // *Current Opinion in HIV and AIDS*. 2019. V. 14. N 3. P. 153–160. <https://doi.org/10.1097/COH.0000000000000534>
31. Ekushov V.E., Halikov M.R., Totmenin A.V., Antonets M.E., Tregubchak T.V., Murzin A.I., Pavlova M.N., Troianova A.M., Adusheva T.P., Beniova S.N. et al. Characterization of a New HIV-1 Second-Generation Circulating Recombinant Form CRF173_63A6 in the Jewish Autonomous Region of Russia // *Pathogens*. 2025. V. 14. no. 9. Article id: 836. <https://doi.org/10.3390/pathogens14090836>
32. Sivay M.V., Maksimenko L.V., Osipova I.P., Nefedova A.A., Gashnikova M.P., Zyryanova D.P., Ekushov V.E., Totmenin A.V., Nalimova T.M., Ivlev V.V., Kapustin D.V., Pozdnyakova L.L., Skudarnov S.E., Ostapova T.S., Yashchenko S.V., Nazarova O.I., Chernov A.S., Ismailova T.N., Maksutov R.A., Gashnikova N.M. Spatiotemporal dynamics of HIV-1 CRF63_02A6 sub-epidemic // *Front Microbiol*. 2022. V. 31. N 13. Article id: 946787. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.946787>
33. Halikov M.R., Ekushov V.E., Totmenin A.V., Gashnikova N.M., Antonets M.E., Tregubchak T.V., Beniova S.N. Identification of a novel HIV-1 circulating recombinant form CRF157_A6C in Primorsky Territory, Russia // *Journal of Infection*. 2024. V. 88. N 2. P. 180–182.
34. Maksimenko L.V., Sivay M.V., Antonets M.E., Tregubchak T.V., Totmenin A.V., Skudarnov S.E., Ostapova T.S., Yashchenko S.V., Agafonov A.P., Gashnikova N.M. Expanding HIV-1 diversity in Russia: Novel circulating recombinant form between subtypes A6 and B (CRF147_A6B) // *J Infect*. 2024. V. 89. N 5. Article ID: 106308. <https://doi.org/10.1016/j.jinf.2024.106308>
35. Халиков М.Р., Екушов В.Е., Тотменин А.В., Готфрид Л.Г., Скляр Л.Ф., Соловьева Н.П., Сердцева Е.Н., Шпортова М.И., Мартыненко Ж.А., Бениова С.Н., Ермолицкая С.А., Горелова И.С., Гашникова Н.М. Вклад рекомбинационной изменчивости ВИЧ в формирование популяции ВИЧ-1, циркулирующих в Приморском крае // *Юг России:*

экология, развитие. 2023. Т. 18. N 4. С. 125–133.

<https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-4-125-133>

36. Lebedev A. et al. The Molecular Epidemiology of HIV-1 in Russia, 1987–2023: Subtypes, Transmission Networks and Phylogenetic Story // *Pathogens*. 2025. V. 14. N 8. Article id: 738.

37. Usach I., Melis V., Peris J.E. Non-nucleoside reverse transcriptase inhibitors: a review on pharmacokinetics, pharmacodynamics, safety and tolerability // *Journal of the International AIDS Society*. 2013. V. 16. N 1. Article ID: 18567. <https://doi.org/10.7448/IAS.16.1.18567>

REFERENCES

1. UNAIDS (2024) Global AIDS Update 2024. Geneva. Available at: <https://www.unaids.org/ru/resources/fact-sheet>

2. Garland J.M., Mayan H., Kantor R. Treatment of Advanced HIV in the Modern Era. *Drugs*, 2025, vol. 85, no. 7, pp. 883–909. <https://doi.org/10.1007/s40265-025-02181-1>

3. Sokolova E.V., Ladnaya N.N., Pokrovsky V.V., Kravchenko A.V., Kozyrina N.V., Yurin O.G., Chekryzhova D.G. The influence of antiretroviral therapy on the development of the HIV epidemic in the Russian Federation Epidemiology and Infectious Diseases. *Current Items*, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 20–26. (In Russian) <https://doi.org/10.18565/epidem.2023.13.3.20-6>

4. Rodríguez-Galet A., Ventosa-Cubillo J., Bendomo V., Eyene M., Mikue-Owono T., Nzang J., Ncogo P., Gonzalez-Alba J.M., Benito A., Holguín A. High Drug Resistance Levels Compromise the Control of HIV Infection in Pediatric and Adult Populations in Bata, Equatorial Guinea. *Viruses*, 2022, vol. 15, no. 1, pp. 27. <https://doi.org/10.3390/v15010027>

5. World Health Organization. HIV drug resistance: brief report 2024. Geneva, 2024. Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240086319> (accessed 31.07.2025)

6. Ozhmegova E.N., Bobkova M.R. HIV drug resistance: past and current trends. *Problems of Virology* (Voprosy Virusologii), 2022, vol. 67, no. 3, pp. 193–205. (In Russian) <https://doi.org/10.36233/0507-4088-113>

7. Bobkova M.R. *Lekarstvennaya ustoychivost' VICH* [HIV drug resistance]. Moscow, Chelovek Publ., 2014, 288 p. (In Russian)

8. Boffito M., Waters L., Cahn P., Paredes R., Koteff J., Van Wyk J., Vincent T., Demarest J., Adkison K., Quercia R. Perspectives on the Barrier to Resistance for Dolutegravir + Lamivudine, a Two-Drug Antiretroviral Therapy for HIV-1 Infection. *AIDS Res Hum Retroviruses*, 2020, vol. 36, no. 1, pp. 13–18. <https://doi.org/10.1089/AID.2019.0171>

9. Pang X., Lu H., He Q., Tang K., Ma J., Chen S., Huang J., Fang N., Xie H., Lan G., Liang S. Emergence of HIV-1 drug resistance mutations among children and adolescents undergoing prolonged antiretroviral therapy in Guangxi. *J Glob Antimicrob Resist.*, 2024, vol. 37, pp. 208–213. <https://doi.org/10.1016/j.jgar.2024.03.013>

10. Sivay M.V., Maksimenko L.V., Nalimova T.M., Nefedova A.A., Osipova I.P., Krikliyaya N.P., Gashnikova M.P., Ekushov V.E., Totmenin A.V., Kapustin D.V., Pozdnyakova L.L., Skudarnov S.E., Ostapova T.S., Yaschenko S.V., Nazarova O.I., Shevchenko V.V., Ilyina E.A., Novikova O.A., Agafonov A.P., Gashnikova N.M. HIV drug resistance among patients experiencing antiretroviral therapy failure in Russia, 2019–2021. *Int J Antimicrob Agents*, 2024, vol. 63, no. 2, Article id: 107074. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2023.107074>

11. Kirichenko A.A., Kireev D.E., Shlykova A.V. HIV-1 drug resistance in patients with virological failure of ART in Russia (2013–2021). *Epidemiology and infectious diseases. Current*

issues, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 53–62.

<https://doi.org/10.18565/epidem.2021.11.3.53-62>

12. Ankunda C., Emunyu J., Namasambi S., Sserunjogi C., Kyomuhangi B., Mumbere I., Nakawezi J. Prevalence of drug resistance mutations and their association with time to virological failure in people living with HIV in Uganda. *BMC Infect Dis.*, 2025, vol. 25, no. 1, article id: 1241. <https://doi.org/10.1186/s12879-025-11607-w>

13. Alonso S., Salazar E., Gálvez N., Navas J., Quintana C., Orózco N., Prieto L., Navarro M.L., Guillén S., Gómez-Alba J.M., Medina-Sánchez C., Juárez J., Holguín A. Prevalence of acquired resistance to antiretrovirals in children and adolescents living with HIV under clinical follow-up at the Roosevelt Hospital in Guatemala. *J Infect Public Health*. 2025, vol. 18, no. 9, article id: 102827. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2025.102827>

14. Kirichenko A., Kireev D., Lopatukhin A., Murzakova A., Lapovok I., Saleeva D., Ladnaya N., Gadirova A., Ibrahimova S., Safarova A. et al. Prevalence of HIV-1 drug resistance in Eastern European and Central Asian countries. *PLoS ONE*, 2022, vol. 17, no. 1, article id: e0257731. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257731>

15. Antonova A., Kazennova E., Lebedev A., Ozhmegova E., Kuznetsova A., Tumanov A., Bobkova M. Recombinant Forms of HIV-1 in the Last Decade of the Epidemic in the Russian Federation. *Viruses*, 2023, vol. 15, no. 12, article id: 2312. <https://doi.org/10.3390/v15122312>

16. Kirichenko A.A., Kireev D.E., Lopatukhin A.E., Murzakova A.V., Lapovok I.A., Ladnaya N.N., Pokrovsky V.V. Prevalence and structure of HIV-1 drug resistance among treatment naive patients since the introduction of antiretroviral therapy in the Russian Federation. *HIV Infection and Immunosuppressive Disorders*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 75–83. (In Russian) <https://doi.org/10.22328/2077-9828-2019-11-2-75-83>

17. Brizzi M.B., Cable T.L., Patel D.C., Williams K., Adjei Z., Fichtenbaum C.J. Heavily treatment-experienced patients with HIV: are new mechanisms of action enough? *J Int Med Res*. 2024, vol. 52, no. 12, article id: 3000605241301883. <https://doi.org/10.1177/03000605241301883>

18. Shchemelev A.N., Semenov A.V., Ostankova Yu.V., et al. Genetic diversity and drug resistance mutations of HIV-1 in Leningrad Region. *Journal of microbiology, epidemiology and immunobiology*, 2022, vol. 99, no. 1, pp. 28–37. (In Russian) <https://doi.org/10.36233/0372-9311-216>

19. Piterkiy M.V., Gusev A.G., Khodakov O.A., et al. HIV-1 subtype diversity, phylogenetic analysis and study of drug resistance in strains circulating in the Ural Federal District. *Journal of microbiology, epidemiology and immunobiology*, 2022, vol. 99, no. 1, pp. 38–53. (In Russian) <https://doi.org/10.36233/0372-9311-178>

20. Kapustin D.V., Nalimova T.M., Ekushov V.E., Krikliyaya N.P., Halikov M.R., Krasnova E.I., Khokhlova N.I., Demchenko S.V., Pozdnyakova L.L., Sivay M.V., Totmenin A.V., Gashnikova M.P., Gotfrid L.G., Maksutov R.A., Gashnikova N.M. Patterns of HIV-1 drug resistance among HIV-infected patients receiving first-line antiretroviral therapy in Novosibirsk Region, Russia. *J Glob Antimicrob Resist.*, 2023, vol. 35, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.jgar.2023.07.013>

21. Specialized Research Department for AIDS Prevention and Control, Federal Budgetary Institution of Science, Central Research Institute of Epidemiology, Rospotrebnadzor. HIV infection in the Russian Federation as of June 30, 2023. (In Russian) Available at: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcjpcglclefindmkaj/https://hivh>

- ub.ru/wp-content/uploads/2024/04/vich2023.pdf (accessed on 20.12.2024).
22. Pokrovsky V.V., Ladnaya N.N., Sokolova E.V. Federal Scientific and Methodological Center for the Prevention and Control of AIDS. HIV INFECTION Information Bulletin no. 48 (In Russian) Available at: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.hivrussia.info/wp-content/uploads/2024/11/hiv-infection-info-bulletin-48.pdf (accessed 20.05.2024)
 23. Shchevchenko V.V. Statistics of HIV infection in the Altai Territory. (In Russian) Available at: <https://altaids22.ru/spetsialistam/statistika/> (accessed 15.02.2025)
 24. Polyakov A.N., Polyakova A.V., Saf'yanova T.V. Assessment of the epidemiological situation on the incidence of HIV infection in the Altai Territory in 2006–2014. *Byulleten' meditsinskoi nauki* [Medical Review. Science and Practice]. 2016, vol. 1, no. 5. pp. 12–15. (In Russian) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/zabolevaemost-vich-infektsiy-na-territorii-altayskogo-kрая-v-2006-2014-gg> (accessed: 15.10.2025).
 25. Lukyanenko N.V. et al. Analysis of HIV infection incidence in the Altai Territory in 2022. *Yakut Medical Journal*. 2025, no. 4, pp. 80–84. (In Russian)
 26. Kazennova E.V., Antonova A.A., Ozhmegova E.N., Demyanenko E.R., Minakova M.V., Belousova O.V., Gromov K.B., Bobkova M.R. Genetic analysis of HIV-1 in the Altai kray: the further spread of the CRF63_02A1 variant in Western Siberia. *HIV Infection and Immunosuppressive Disorders*, 2020, vol. 12, no. 1, pp. 47–57. (In Russian) <https://doi.org/10.22328/2077-9828-2020-12-1-47-57>
 27. Reshetnikov A.V., Pavlov S.V. Modern social portrait of HIV-infected Russia. *Immunology*, 2018, vol. 39, no. 2–3, pp. 100–107. (In Russian) <https://doi.org/10.18821/0206-4952-2018-39-2-3-100-107>
 28. Zagdyn Z.M., Kobesov N.V., Denyushenkov V.L., Sterlikov S.A. A public health perspective on global burden of HIV/AIDS in Russia: DALY due to HIV infection. Part 2. *HIV Infection and Immunosuppressive Disorders*, 2025, vol. 17, no. 2, pp. 32–43. (In Russian) <https://doi.org/10.22328/2077-9828-2025-17-2-32-43>
 29. Yamaguchi J. et al. Brief report: complete genome sequence of CG-0018a-01 establishes HIV-1 subtype L. *JAIDS Journal of Acquired Immune Deficiency Syndromes*, 2020, vol. 83, no. 3, pp. 319–322. <https://doi.org/10.1097/QAI.0000000000002246>
 30. Bbosa N., Kaleebu P., Ssemwanga D. HIV subtype diversity worldwide. *Current Opinion in HIV and AIDS*, 2019, vol. 14, no. 3, pp. 153–160. <https://doi.org/10.1097/COH.0000000000000534>
 31. Ekushov V.E., Halikov M.R., Totmenin A.V., Antonets M.E., Tregubchak T.V., Murzin A.I., Pavlova M.N., Troianova A.M., Adusheva T.P., Beniova S.N. et al. Characterization of a New HIV-1 Second-Generation Circulating Recombinant Form CRF173_63A6 in the Jewish Autonomous Region of Russia. *Pathogens*, 2025, vol. 14, no. 9, article id: 836. <https://doi.org/10.3390/pathogens14090836>
 32. Sivay M.V., Maksimenko L.V., Osipova I.P., Nefedova A.A., Gashnikova M.P., Zyryanova D.P., Ekushov V.E., Totmenin A.V., Nalimova T.M., Ivlev V.V., Kapustin D.V., Pozdnyakova L.L., Skudarnov S.E., Ostapova T.S., Yashchenko S.V., Nazarova O.I., Chernov A.S., Ismailova T.N., Maksutov R.A., Gashnikova N.M. Spatiotemporal dynamics of HIV-1 CRF63_02A6 sub-epidemic. *Front Microbiol.*, 2022, vol. 31, no. 13, article id: 946787. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.946787>
 33. Halikov M.R., Ekushov V.E., Totmenin A.V., Gashnikova N.M., Antonets M.E., Tregubchak T.V., Beniova S.N. Identification of a novel HIV-1 circulating recombinant form CRF157_A6C in Primorsky Territory, Russia. *Journal of Infection*. 2024, vol. 88, no. 2, pp. 180–182.
 34. Maksimenko L.V., Sivay M.V., Antonets M.E., Tregubchak T.V., Totmenin A.V., Skudarnov S.E., Ostapova T.S., Yashchenko S.V., Agafonov A.P., Gashnikova N.M. Expanding HIV-1 diversity in Russia: Novel circulating recombinant form between subtypes A6 and B (CRF147_A6B). *J Infect.*, 2024, vol. 89, no. 5, article id: 106308. <https://doi.org/10.1016/j.jinf.2024.106308>
 35. Halikov M.R., Ekushov V.E., Totmenin A.V., Gotfrid L.G., Sklyar L.F., Soloveva N.P., Serdtseva E.N., Shportova M.I., MartynchenkoZh.A., Beniova S.N., Ermolickaja S.A., Gorelova I.S., Gashnikova N.M. The role of recombination variability to the formation of the population the HIV-1 population circulating in the Primorsky Krai, Russia. *South of Russia: ecology, development*, 2023, vol. 18, no. 4, pp. 125–133. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-4-125-133>
 36. Lebedev A. et al. The Molecular Epidemiology of HIV-1 in Russia, 1987–2023: Subtypes, Transmission Networks and Phylogenetic Story. *Pathogens*. 2025, vol. 14. no. 8, article id: 738.
 37. Usach I., Melis V., Peris J.E. Non-nucleoside reverse transcriptase inhibitors: a review on pharmacokinetics, pharmacodynamics, safety and tolerability. *Journal of the International AIDS Society*, 2013, vol. 16, no. 1, article id: 18567. <https://doi.org/10.7448/IAS.16.1.18567>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Наталья М. Гашникова составила концепцию и дизайн исследования, осуществляла редактирование текста рукописи. Валерий В. Шевченко, Елена А. Ильина, Наталья Г. Шульга, Ольга В. Белоусова осуществляли сбор материала и сбор эпидемиологических данных. Татьяна М. Налимова, Надежда П. Крикливая и Василий Е. Екушов выполняли генотипирование ВИЧ. Алексей В. Тотменин выполнил филогенетический анализ. Татьяна М. Налимова подготовила рукопись, провела анализ полученных данных. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Natalya M. Gashnikova developed the concept and design of the study and edited the text. Valery V. Shevchenko, Elena A. Ilina, Natalya G. Shulga and Olga V. Belousova collected the material and assembled the epidemiological data. Tatyana M. Nalimova, Nadezhda P. Kriklyaya and Vasily E. Ekushov performed HIV genotyping. Alexey V. Totmenin performed the phylogenetic analysis. Tatyana M. Nalimova prepared the manuscript and analysed the data. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Татьяна М. Налимова / Tatyana M. Nalimova <https://orcid.org/0000-0001-8408-0930>
Надежда П. Крикливая / Nadezhda P. Kriklivaya <https://orcid.org/0000-0003-1534-3391>
Василий Е. Екушов / Vasily E. Ekushov <https://orcid.org/0000-0002-0465-1260>
Валерий В. Шевченко / Valery V. Shevchenko <https://orcid.org/0000-0001-6282-5495>
Елена А. Ильина / Elena A. Ilina <https://orcid.org/0000-0002-0480-9136>
Наталья Г. Шульга / Natalya G. Shulga <https://orcid.org/0009-0006-3184-4400>
Ольга В. Белоусова / Olga V. Belousova <https://orcid.org/0009-0007-1266-5591>
Алексей В. Тотменин / Alexey V. Totmenin <https://orcid.org/0000-0002-7418-4872>
Наталья М. Гашникова / Natalya M. Gashnikova <https://orcid.org/0000-0002-0891-0880>

Оригинальная статья / Original article

УДК: 577.13, 615.322

DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-5



Изучение внутрипопуляционной изменчивости семян *Silybum marianum* (L.) Gaertn

Маина М. Мамалиева¹, Асият Н. Алибегова¹, Зарема И. Солтанмурадова²¹Горный ботанический сад Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, Россия²Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

Контактное лицо

Маина М. Мамалиева, младший научный сотрудник, лаборатория фитохимии и медицинской ботаники, Горный ботанический сад ДФИЦ РАН; 365000 Россия, г. Махачкала, ул. Ярагского, 75.

Тел. +79298671009

Email mamalieva19@mail.ruORCID <https://orcid.org/0000-0001-6235-3248>

Формат цитирования

Мамалиева М.М., Алибегова А.Н., Солтанмурадова З.И. Изучение внутрипопуляционной изменчивости семян *Silybum marianum* (L.) Gaertn. // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 57-64. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-5

Получена 29 мая 2025 г.

Прошла рецензирование 7 октября 2025 г.

Принята 25 октября 2025 г.

Резюме

Цель – сравнительное изучение особенностей семян (*Silybum marianum* (L.) Gaertn), произрастающих в природных условиях, и оценка влияния фенотипа и года произрастания на качество семян. Исследования проведены путем измерений морфометрических признаков (длина, ширина, толщина семени) и весовых признаков (масса 1 семени, масса тысячи семян) образцов расторопши пятнистой, собранных в фазу полного созревания корзинок в течение нескольких лет (2015–2018 гг.) в природной популяции.

По результатам изучения морфологических признаков семян образцов расторопши пятнистой выявлены различия по фенотипам в разные годы. Наибольший размах значений отмечается по ширине, толщине и массе 1 семени, что связано с выполненностью семян.

Выявлена внутрипопуляционная изменчивость изучаемых параметров, обусловленная влиянием фенотипа семян по окраске семенных оболочек и года сбора образцов, и динамика массы 1000 семян в зависимости от учитываемых факторов. Результаты исследования имеют важное значение для понимания биоморфологических особенностей вида *S. marianum*, а также для решения вопросов семеноводства лекарственных растений.

Ключевые слова

Silybum marianum (L.) Gaertn L, плоды, семена, фенотипы, размеры семян, масса семян, изменчивость, морфологические признаки, природные образцы.

Study of intrapopulation variability of *Silybum marianum* (L.) Gaertn seeds

Maina M. Mamaliev¹, Asiyat N. Alibegova¹ and Zarema I. Soltanmuradova²

¹Mountain Botanical Garden, Dagestan Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia

²Dagestan State University, Makhachkala, Russia

Principal contact

Maina M. Mamaliev, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Phytochemistry and Medical Botany, Mountain Botanical Garden, Dagestan Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences; 75 Yaragsky St, Makhachkala, Russia 365000.

Tel. +79288334151

Email mamaliev19@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6235-3248>

How to cite this article

Mamaliev M.M., Alibegova A.N., Soltanmuradova Z.I. Study of intrapopulation variability of *Silybum marianum* (L.) Gaertn seeds. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):57-64. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-5

Received 29 May 2025

Revised 7 October 2025

Accepted 25 October 2025

Abstract

The aim of this study was to comparatively examine the characteristics of *Silybum marianum* (L.) Gaertn seeds grown in natural conditions and to assess the influence of phenotype and year of growth on seed quality.

The study was conducted by measuring morphometric traits (seed length, width, and thickness) and weight traits (seed weight, thousand-seed weight) of natural milk thistle accessions collected at the full-maturity stage of their heads over several years (2015–2018) in a natural population.

A study of the morphological traits of milk thistle accessions revealed phenotypic differences between years. The greatest differences were observed in seed width, thickness, and seed weight, which are related to seed fullness.

Intrapopulation variability in the studied parameters was identified, driven by the influence of seed coat color and year of sample collection. The dynamics of 1,000-seed weight were also determined depending on the factors considered. The study's results are important for understanding the biomorphological characteristics of *S. marianum*, as well as for addressing issues in medicinal plant seed production.

Key Words

Silybum marianum (L.), fruits, seeds, phenotypes, seed sizes, seed weight, variability, morphological features, natural samples.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных направлений современной ботаники является изучение и сохранение биоразнообразия растений, как на видовом, так и на популяционном уровнях. Исследования внутривидовой и межвидовой изменчивости морфологических признаков дают объективную оценку состояния ценопопуляций, их стратегий выживания [1].

Жизнеспособность цветковых растений, их воспроизводство, распространение и положение в биоценозе находятся в прямой зависимости от репродуктивной биологии видов, в том числе от количества, размеров и массы семян [2; 3].

Интересным объектом изучения популяционного разнообразия является расторопша пятнистая *Silybum marianum* (L.) Gaertn – одно или двулетнее травянистое растение из семейства Asteraceae с широким ареалом произрастания, охватывающим регионы от Западной Европы до Южной части Австралии (Кавказ, Средняя Азия, Западная Сибирь, Северная Америка, Африка, Австралия) [4–8].

В Дагестане этот вид встречается на полях и сухих склонах, простирающихся от севера к югу, достигая нижнего горного пояса и образуя непрерывную полосу зарослей [9]. Относится к пустынным, или рудеральным видам, предпочитающим почвы с высоким плодородием и отличающимся способностью быстро занимать территории повсеместно: на обочинах дорог, на сухих склонах и пустырях, а также в посевах зерновых культур [6; 10; 11].

Вид отличается высокой плодовитостью в образовании семян и наличием приспособлений к распространению ветром (летучки), что характерно для R-истинных эксплерентов. Семена расторопши, попадая в почву, достаточно долго сохраняются благодаря высокой жизнеспособности (до 94 %) и образуют таким образом «банк семян». Как показывают наблюдения, через 9 лет отмечается снижение числа жизнеспособных семян на 85 % [12].

Для семян *S. marianum* характерен неглубокий физиологический покой, который нарушается при повреждении покровов, перепадах температур, воздействии света, отсутствии ингибиторов прорастания, то есть полевая всхожесть низкая, неравномерно растянутая на несколько лет. При благоприятных условиях семена начинают прорастать и на протяжении многих лет дают новое потомство [7].

В результате наших многолетних наблюдений выявлено, что в дагестанских популяциях *S. marianum* семена прорастают осенью и растения зимуют в виде укороченного побега с розеткой прикорневых листьев, а цветение и плодоношение наблюдается в следующем году, то есть жизненный цикл озимых однолетников [7; 13].

Количество завязываемых семян определяется размером растения в момент цветения и продолжительностью цветения: в главной верхушечной корзинке до 190 семян, и 114 для остальных корзиночек. За весь период цветения, который длится около 2 месяцев, на отдельных растениях может образоваться до 55 корзиночек, формирующие до 6350 семян с одного растения [10; 14; 15].

Семянки расторопши эллиптической, обратнояйцевидной формы, 8х (2–4) мм, слегка сплюснутые, голые, блестящие, с папусом (белые волоски, размером до 2–3-х длин семянки). Окраска семян

различается, и может быть, как однотонной, так и с рисунком в виде полосок и пятен [16–20].

В связи с этим целью данного исследования было сравнительное изучение размерных и весовых признаков семян расторопши пятнистой (*Silybum marianum* (L.) Gaertn), оценка влияния фенотипа и года произрастания на качество семян.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом для наших исследований послужили природные образцы семян (плоды) расторопши пятнистой *S. marianum* (L.) Gaertn. Материал собирался ежегодно с 2015 по 2018 годы в фазу полного созревания корзиночек (во второй декаде мая) в окрестностях села Совхоз имени Герейханова, первое отделение (Республика Дагестан, Сулейман – Стальский район, h=315 м над уровнем моря).

После камеральной обработки семена сортировали по окраске семенной кожуры на фенотипы. Хранились высушенные семена в «крафт-пакетах» в холодильнике.

Для сравнительного изучения линейных и весовых признаков отбирали по 50 полноценных семян с каждого фенотипа. Общее число семян составило более 1200 шт. Были учтены: длина, ширина, толщина семени (мм), масса 1 семени и 1000 семян (мг).

Морфометрические параметры измеряли с помощью электронного штангенциркуля в миллиметрах. Массу семян определяли путем взвешивания на аналитических весах (ОКБ ВЕСТА) с точностью 0,001 мг/г.

Вариация признаков определялась методами математической статистики и оценивалась по шкале Зайцева [21]. Обработка полученных данных проведена при помощи лицензионной программы обработки данных «Statistica 5.5» (StatSoft, Inc., США), «Microsoft Excel».

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведено сравнительное изучение размерных и весовых признаков семян, массы тысячи семян. Результаты анализа представлены на рисунке 1 и в таблице 1.

Фенотипы. При сборе материала семян расторопши пятнистой было отмечено разнообразие по окраске семенной оболочки. В связи с этим изучаемые образцы были разделены на 6 фенотипов: белые, черные, кремовые, шоколадно-коричневые, оливковые, коричневые в крапинку (рис. 1).

Частота встречаемости фенотипов в исследуемой природной популяции различается в зависимости от года исследований. Нужно отметить, фенотипическое разнообразие по окраске семенной кожуры является уникальностью для дагестанских образцов [7].

Морфологические признаки семян. Результаты исследований по размерным и весовым признакам семян, собранных в разные годы в одной и той же популяции представлены в таблице 1.

Средние значения длины семени по фенотипам и по годам различаются, но незначительно. Различий больше по ширине, толщине и массе 1 семени, что связано с выполненностью семян. Значения всех признаков снижены в 2017 году.

По результатам исследований размерных и весовых признаков семян расторопши можно отметить, что изученные природные образцы демонстрируют внутривидовую изменчивость признаков. Вариативность исследуемых признаков (CV, %) по годам

и фенотипам для линейных размеров семян оценивается по шкале Зайцева как низкая – от 1,7 до 10% [21], а по массе 1 семени – как низкая и средняя (от 3,6 до 13 %). При этом какой-либо закономерности в характере вариации этих признаков не прослеживается.

Проведенный дисперсионный анализ позволил оценить вклад изучаемых факторов «Фенотип» и «Год» во внутривидовую изменчивость признаков семян (результаты значимы на достоверном уровне $p < 0,05$) (табл. 2).



Рисунок 1. Фенотипы семян *S. marianum* (L.) Gaertn по окраске семенных оболочек: 1 – белые, 2 – черные, 3 – кремовые, 4 – шоколадно-коричневые, 5 – оливковые, 6 – коричневые в крапинку

Figure 1. Phenotypes of *S. marianum* (L.) Gaertn seeds by seed coat color: 1 – white, 2 – black, 3 – cream, 4 – chocolate brown, 5 – olive, 6 – brown speckled

Таблица 1. Сравнительная характеристика семян (плодов) *S. marianum*, 2015–2018 гг.

Table 1. Comparative characteristics of seeds (fruits) of *S. marianum* (L.) Gaertn, 2015–2018

Фенотип семян Seed phenotype	Год Year	N	Длина семени, мм Seed length, mm		Ширина семени, мм Seed width, mm		Толщина семени, мм Thickness of seed, mm		Масса 1 семени, г Weight of 1 seed, g	
			$\bar{x} \pm Sx$	CV, %	$\bar{x} \pm Sx$	CV, %	$\bar{x} \pm Sx$	CV, %	$\bar{x} \pm Sx$	CV, %
Белые White	2015	50	7,00± 0,026	2,60	3,24± 0,012	2,69	2,01± 0,009	3,04	0,028± 0,00	6,50
	2016	50	6,88± 0,025	2,53	3,21± 0,014	2,96	1,97± 0,010	3,51	0,026± 0,00	7,38
	2017	50	6,84± 0,028	2,91	3,26± 0,014	3,12	1,97± 0,010	3,63	0,027± 0,00	6,80
	2018	50	6,95± 0,025	2,58	3,23± 0,011	2,47	1,98± 0,006	2,06	0,030± 0,00	7,61
Черные Black	2015	50	6,97± 0,017	1,74	3,41± 0,018	3,72	2,09± 0,008	2,86	0,030± 0,00	5,69
	2016	50	6,88± 0,041	4,21	3,34± 0,016	3,40	1,99± 0,013	4,54	0,027± 0,00	6,47
	2017	50	6,69± 0,033	3,45	3,17± 0,012	2,65	2,08± 0,006	1,97	0,027± 0,00	3,90
	2018	50	6,93± 0,041	4,17	3,33± 0,022	4,65	2,00± 0,009	3,22	0,03± 0,00	8,15

Кремовые Cream	2015	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	2016	50	6,89± 0,030	3,06	3,47± 0,014	2,77	2,13± 0,015	5,10	0,028± 0,00	6,36
	2017	50	5,90± 0,077	9,21	2,81± 0,027	6,80	1,79± 0,012	4,87	0,018± 0,00	12,34
	2018	50	6,86± 0,032	3,33	3,47± 0,019	3,78	2,11± 0,012	3,85	0,03± 0,00	5,70
Оливковые Olive	2015	50	6,35± 0,051	5,71	3,08± 0,021	4,82	1,86± 0,014	5,16	0,02± 0,00	11,21
	2016	50	6,40± 0,088	9,67	2,97± 0,019	4,54	1,84± 0,013	5,06	0,02± 0,00	9,30
	2017	50	6,33± 0,029	3,25	2,93± 0,024	5,74	1,87± 0,015	5,54	0,02± 0,00	10,39
	2018	50	6,67± 0,018	1,92	2,98± 0,012	2,93	1,82± 0,007	2,82	0,02± 0,00	5,89
Коричневые в крапинку Brown speckled	2015	50	6,83± 0,029	2,96	3,19± 0,018	3,97	1,96± 0,014	5,17	0,025± 0,00	10,00
	2016	50	6,96± 0,029	2,95	3,20± 0,022	4,74	1,90± 0,014	5,32	0,025± 0,00	9,60
	2017	50	6,97± 0,028	2,81	3,32± 0,011	2,25	1,97± 0,008	2,77	0,026± 0,00	4,38
	2018	50	6,89± 0,032	3,31	3,19± 0,015	3,32	1,90± 0,012	4,52	0,02± 0,00	8,77
Шоколадно- коричневые Chocolate brown	2015	50	6,83± 0,029	2,95	3,23± 0,014	3,03	2,01± 0,012	4,18	0,026± 0,00	8,84
	2016	50	6,84± 0,033	3,45	3,25± 0,014	3,04	1,98± 0,011	3,89	0,026± 0,00	7,71
	2017	50	6,56± 0,033	3,57	3,23± 0,012	2,69	2,06± 0,010	3,35	0,026± 0,00	3,60
	2018	50	6,83± 0,024	2,53	3,28± 0,015	3,16	2,09± 0,010	3,53	0,03± 0,00	6,71
Всего Total	Σ	1150	6,75± 0,011	5,60	3,21± 0,006	6,22	1,97± 0,004	6,22	0,03± 0,00	13,52

Примечание: $\bar{x}$ – среднее, $\pm Sx$ – стандартная ошибка, CV – коэффициент вариации

Note: $\bar{x}$ is the average, $\pm Sx$ is the standard error, and CV is the coefficient of variation

Таблица 2. Итоги двухфакторного дисперсионного анализа *S. marianum* ($p < 0,05$)

Table 2. Results of two-way analysis of variance of *S. marianum* ($p < 0,05$)

Признак / Sign	Фактор / The factor	F	p
Длина семени, мм Seed length, mm	1 Фенотип / Phenotype	11,7735	0,0123
	2 Год / Year	73,4681	0,0000
Ширина семени, мм Seed width, mm	1 Фенотип / Phenotype	15,8951	0,0045
	2 Год / Year	55,6434	0,0000
Толщина семени, мм Thickness of seed, mm	1 Фенотип / Phenotype	45,2706	0,0000
	2 Год / Year	12,1483	0,0000
Масса семени, г Seed weight, g	1 Фенотип / Phenotype	22,3999	0,0023
	2 Год / Year	58,5105	0,0000

Анализ компонентов дисперсии позволил оценить долю влияния факторов на учетные признаки семян (рис. 2).

Влияние фенотипа на длину семени составило 24,9 %, а влияние года – 16,9 %, на ширину семени – 27,9 и 12,9 %, на толщину семени – 33,9 и 2,8 %, соответственно. На массу 1 семени – 36,4 и 11,9 %. Таким образом, влияние фактора «фенотип» больше, чем доля фактора «год».

Масса тысячи семян. На рисунке 3 представлены значения массы тысячи семян каждого фенотипа по годам изучения (рис. 3).

Внутрипопуляционная изменчивость массы тысячи семян объясняется вариабельностью выполненности, или полнозернистости семян, которая

зависит от ряда факторов: условия произрастания в период вегетации и цветения, влагообеспеченность (количество осадков), количество солнечных дней в течение года, содержание гумуса в почве и другие. Например, в условиях засушливого климата при высокой температуре воздуха завязывается меньше цветков расторопши, что приводит к снижению урожая из-за подавления ростовых процессов и уменьшению размеров растения, как в целом, так и его репродуктивных органов в частности.

Развитие семени у цветковых растений является отражением адаптационных стратегий, направленных на успешную адаптацию к изменениям условий окружающей среды и увеличение ареала распространения.

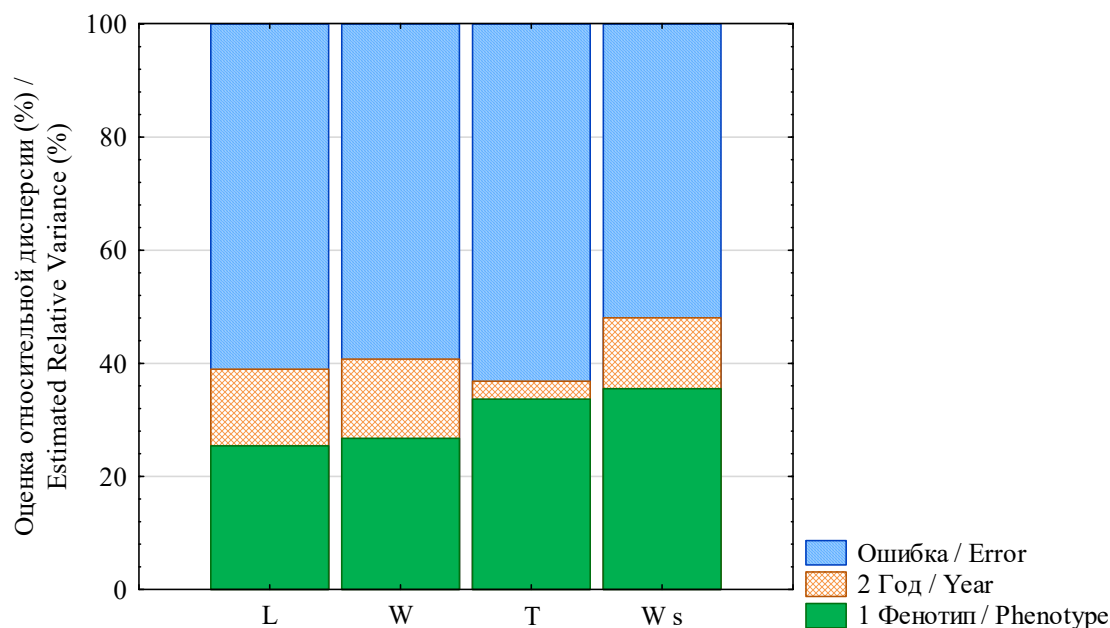


Рисунок 2. Оценка относительной дисперсии (%)

Figure 2. Estimated Relative Variance (%)

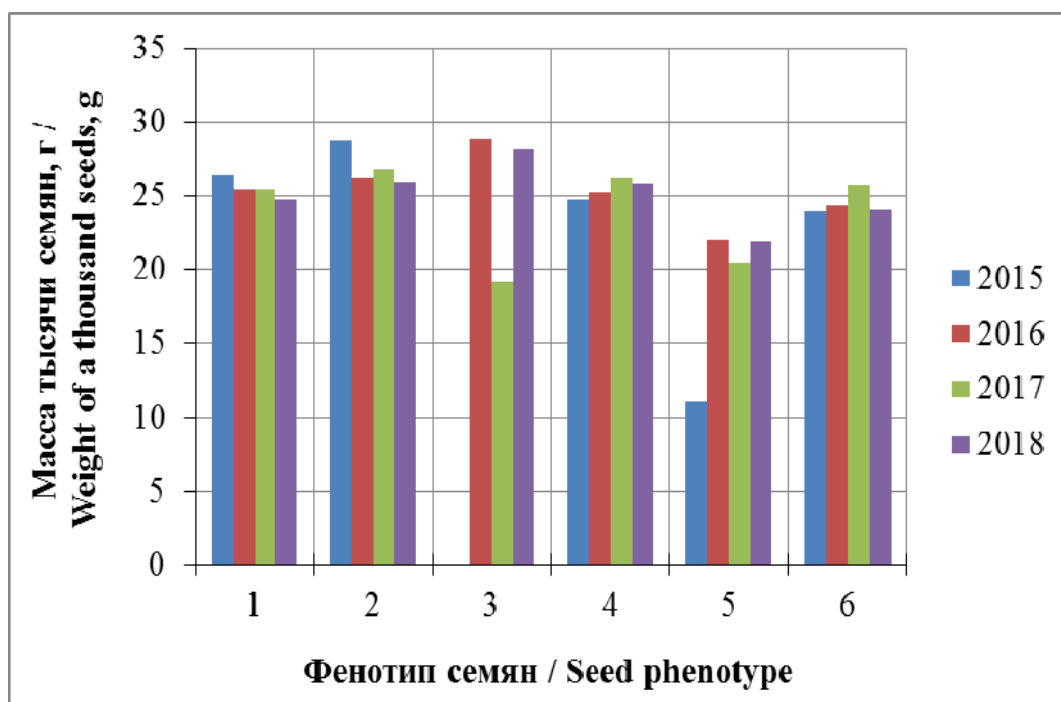


Рисунок 3. Изменчивость массы тысячи семян природных образцов

S. marianum, 2015–2018 гг.Figure 3. Variability of the mass of a thousand seeds of natural *S. marianum* samples, 2015–2018

Морфометрические характеристики выступают как показатели качества семян, определяющих их посевные свойства (масса 1000 семян, всхожесть, энергия прорастания, сила роста) и устойчивость вида в неблагоприятных условиях окружающей среды. Исследование морфометрии имеет практическое значение для оценки значимости и перспективности отдельных признаков для селекции, а также для выявления признаков более чувствительных к изменениям окружающей среды, выяснения закономерностей динамики видов. При этом, важное значение имеют размеры семян расторопши пятнистой для увеличения выхода силимарина и других

биологически активных веществ. В свою очередь, посевные свойства семян в большой степени влияют на величину и качество получаемого урожая [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате сравнительного изучения признаков семени расторопши пятнистой выявлена внутрипопуляционная изменчивость, обусловленная влиянием фенотипа семян по окраске семенных оболочек и года сбора образцов.

Также выявлена динамика массы 1000 штук семян в зависимости от учитываемых факторов, которая является важным показателем посевных качеств,

связанным с питанием зародыша на начальных этапах онтогенеза. Полученные результаты свидетельствуют о зависимости созревания семян от благоприятности факторов окружающей среды в период цветения и завязывания семян, плодоношения.

Изучение особенностей семян растений, имеющих лекарственное значение, необходимо для отбора наиболее продуктивных образцов по морфологическим и биохимическим характеристикам растений как один из наиболее эффективных методов сохранения их генетического материала и биологического разнообразия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Ивановский В.В. Биологическое разнообразие. Витебск: Витебский государственный университет имени П.М. Машерова, 2012. 150 с.
- Алибегова А.Н., Мусаев А.М. Межпопуляционная изменчивость по размерам и массе семян некоторых видов *Allium* L. (Alliaceae) в условиях интродукции // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2011. N 2. С. 124–126.
- Хабиров А.Д., Магомедов А.М., Дибиров М.Д., Магомедов М.А., Зубаирова Ш.М. Структура изменчивости признаков семян зернобобовых культур // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2004. N 2. С. 73–78.
- Беленовская Л.М. Растительные ресурсы СССР: Цветковые растения, их химический состав, использование; Семейство Asteraceae (Compositae). Санкт Петербург: Наука, 1993.
- Куркин В.А. Расторопша пятнистая – источник лекарственных средств (обзор) // Химико-фармацевтический журнал. 2003. Т. 37. N 4. С. 27–41.
- Montemurro P., Fracchiolla M., Lonigro A. Effects of some environmental factors on seed germination and spreading potential of *Silybum marianum* Gaertner // Italian Journal of Agronomy. 2007. V. 2. N 3. P. 315–320. <https://doi.org/10.4081/ija.2007.315>
- Варабова Ф.А., Мамалиева М.М., Мусаев А.М., Чубарова А.С., Раджабов, Г.К. Изменчивость содержания флаволигнанов в плодах *Silybum marianum* Gaertn. из природных популяций Дагестана // Вопросы биологической, фармакологической, медицинской химии. 2018. Т. 21. N 11. С. 24–29. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-4-13
- Hetz E., Liersch R., Schieder O. Genetic investigations on *Silybum marianum* and *S. eburneum* with respect to leaf colour, outcrossing ratio and flavonolignan composition // Planta Med. 1995. V. 61. N 1. С. 54–57. DOI: 10.1055/s-2006-957999
- Муртазалиев Р.А. Конспект флоры Дагестана / Отв. ред. чл.-корр. РАН Р.В. Камелин. Махачкала: Эпоха, 2009. Т. III. 304 с.
- Sindel B.M. A review of the ecology and control of thistles in Australia // Weed Research. 1991. V. 31. N 4. С. 189–201. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1991.tb01758.x>
- Питкевич Э.С., Лызинов А.Н., Цаприлова С.В. Расторопша пятнистая – *Silybum marianum* (L.) // Проблемы здоровья и экологии. 2008. Т. 4. N 18. С. 119–126.
- Асташов А.Н., Бочкарева Ю.В., Родина Т.В., Киреева О.В. Перспективы селекции расторопши пятнистой (*Silybum marianum* L.) // АгроЭкоИнфо. 2023. N 5. http://agroecoinfo.ru/STATYI/2023/5/st_509. <https://doi.org/10.51419/202135509>.
- Варабова Ф.А., Алиев А.М., Мамалиева М.М., Раджабов Г.К., Мусаев, А.М. Химический состав СК CO₂-экстракта травы *Silybum marianum* (L.) Gaertn. из природной популяции флоры Дагестана // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2015. Т. 9. С. 35–38.
- Dodd J. Phenology and seed production of variegated thistle, *Silybum marianum* (L.) Gaertn., in Australia in relation to mechanical and biological control // Weed research. 1989. V. 29. N. 4. С. 255–263. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1989.tb00910.x>
- Karkanis A., Bilalis D., Efthimiadou A. Cultivation of milk thistle (*Silybum marianum* L. Gaertn.), a medicinal weed // Industrial Crops and Products. 2011. V. 1. N 34. С. 825–830. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.03.027>
- Лифантьева Н.А. Морфо-биологические особенности Расторопши пятнистой в условиях Предбайкалья // ББК. 40 М. 2013. Т. 3. N 41. С. 73.
- Ишмуратова М.Ю., Тлеукенова С.У., Гаврилькова Е.А., Додонова А.Ш. Исследование морфологии и биологии прорастания семенного материала расторопши пятнистой (*Silybum marianum*) // Вестник Карагандинского университета. Серия «Биология. Медицина. География». 2013. Т. 2. N 70. С. 54–58.
- Джашеев А.М.С., Джашеева З.А.-М., Акбаева Ф.А., Гочияева З.У., Токова Ф.М. Характеристика семян расторопши пятнистой (*Silybum marianum* (L.), выращенных в условиях предгорной зоны Северного Кавказа // Успехи современного естествознания. 2018. Т. 12. N 1. С. 36–41.
- Свистунова Н.Ю. Никифорова О.И., Сетин В.Н. Морфологические особенности и посевные качества плодов расторопши пятнистой (*Silybum marianum* (L.) Gaertn.) // Научный журнал КубГАУ. 2018. Т. 6. N 140. С. 1–9. DOI: 10.21515/1990-4665-140-029
- Кильянова Т.В., Немцев С.Н. Влияние агротехники возделывания на качество плодов расторопши пятнистой // Овощи России. 2021. N 1. С. 74–78. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2021-1-74-78>
- Зайцев Г.Н. Методика биометрических расчетов. Москва: Наука, 1983. 256 с.

REFERENCES

- Ivanovskii V.V. *Biologicheskoe raznoobrazie* [Biological diversity]. Vitebsk, Vitebsk State University named after P.M. Masherov Publ., 2012, 150 p. (In Russian)
- Alibegova A.N., Musaev A.M. Interpopulation variability in seed size and weight of some *Allium* L. (Alliaceae) species under introduction conditions. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoeckologiya [Bulletin of Voronezh State University. Series: Geography. Geoeology]. 2011, no. 2, pp. 124–126. (In Russian)
- Khabibov A.D., Magomedov A.M., Dibirov M.D., Magomedov M.A., Zubairova SH.M. The structure of variability in the characteristics of leguminous seeds. Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Estestvennye nauki [Universities News. North Caucasus Region. Series: Natural Sciences]. 2004, no. 2, pp. 73–78. (In Russian)
- Belenovskaya L.M. *Rastitel'nye resursy SSSR: Cvetkovye rasteniya, ikh khimicheskij sostav, ispol'zovanie; Semeystvo Asteraceae (Compositae)* [Plant resources of the USSR: Flowering plants, their chemical composition, use; Family Asteraceae (Compositae)]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1993. (In Russian)
- Kurkin V.A. Milk Thistle – A Source of Medicines (Review). Khimiko-farmatsevticheskii zhurnal [Chemical and pharmaceutical journal]. 2003, vol. 37, no. 4, pp. 27–41. (In Russian)
- Montemurro P., Fracchiolla M., Lonigro A. Effects of some environmental factors on seed germination and spreading potential of *Silybum marianum* Gaertner. *Italian Journal of Agronomy*, 2007, vol. 2, no. 3, pp. 315–320. <https://doi.org/10.4081/ija.2007.315>
- Vagabova F.A., Mamaliev M.M., Musaev A.M., Chubarova A.S., Radzhabov G.K. Variability of flavonolignan content in *Silybum marianum* Gaertn. fruits from natural populations of Dagestan. *Issues of biological, medical and pharmaceutical chemistry*, 2018, vol. 21, no. 11, pp. 35–38. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-4-13
- Hetz E., Liersch R., Schieder O. Genetic investigations on *Silybum marianum* and *S. eburneum* with respect to leaf colour, outcrossing ratio, and flavonolignan composition. *Planta medica*, 1995, vol. 61, no. 1, pp. 54–57. DOI: 10.1055/s-2006-957999
- Murtazaliev R.A. *Konspekt flory Dagestana* [Abstract of the flora of Dagestan]. Makhachkala, Epokha Publ., 2009, vol. 3, pp. 304. (In Russian)
- Sindel B.M. A review of the ecology and control of thistles in Australia. *Weed Research*, 1991, vol. 31, no. 4, pp. 189–201. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1991.tb01758.x>

11. Pitkevich Eh. S., Lyzikov A.N., Caprilova S.V. Milk Thistle – *Silybum Marianum* (L). Problemy zdorov'ya i ehkologii [Health and Environmental Issues]. 2008, vol. 4, no. 18, pp. 119–126. (In Russian)
12. Astashov A.N., Bochkareva Yu.V., Rodina T.V., Kireeva O.V. [Prospects for breeding milk thistle (*Silybum marianum* L.)]. *AgroEkoInfo*, 2023, no. 5. (In Russian). <https://doi.org/10.51419/202135509>
13. Vagabova F.A., Aliev A.M., Mamaliev M.M., Radzhabov G.K., Musaev, A.M. Chemical composition of the SC CO₂ extract of the herb *Silybum marianum* (L.) Gaertn. from the natural population of the flora of Dagestan. Voprosy biologicheskoi, meditsinskoi i farmatsevticheskoi khimii [Issues of biological, medical and pharmaceutical chemistry]. 2015, vol. 9, pp. 35–38. (In Russian)
14. Dodd J. Phenology and seed production of variegated thistle, *Silybum marianum* (L.) Gaertn., in Australia in relation to mechanical and biological control. *Weed research*, 1989, vol. 29, no. 4, pp. 255–263. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1989.tb00910.x>
15. Karkanis A., Bilalis D., Efthimiadou A. Cultivation of milk thistle (*Silybum marianum* L. Gaertn.), a medicinal weed. *Industrial Crops and Products*, 2011, vol. 1, no. 34, pp. 825–830. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.03.027>
16. Lifant'eva N.A. Morphological and biological characteristics of milk thistle in the conditions of the Cis-Baikal region. BIK [BBK40 M]. 2013, vol. 3, no. 41, pp. 73. (In Russian)
17. Ishmuratova M.Yu., Tleukenova S.U., Gavrilkova E.A., Dodonova A.Sh. Investigation of morphology and biology of germination of seed material of milk thistle (*Silybum marianum*). Vestnik Karagandinskogo universiteta. Seriya «Biologiya. Meditsina. Geografiya. [Bulletin of the Karaganda University. The series "Biology. Medicine. Geography]. 2013, vol. 2, no. 70, pp. 54–58. (In Russian)
18. Dzhaseev A-M.S., Dzhaseeva Z.A-M., Akbaeva F.A., Gochijeva Z.U., Tokova F.M. Characteristics of milk thistle seeds (*Silybum marianum* (L.) Gaertn.) grown in the foothills of the Northern Caucasus. Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya [Achievements of modern natural science]. 2018, vol. 12, no. 1, pp. 36–41. (In Russian)
19. Svistunova N.Yu. Nikiforova O.I. Setin V.N. Morphological features and sowing qualities of milk thistle fruits (*Silybum marianum* (L.) Gaertn.) *Scientific journal of KubSAU*, 2018, vol. 6, no. 140, pp. 1–9. DOI: 10.21515/1990-4665-140-029
20. Kil'yanova T.V., Nemcev S.N. The influence of cultivation techniques on the quality of milk thistle fruits. *Vegetables of Russia*, 2021, no. 1, pp. 74–78. (In Russian) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2021-1-74-78>
21. Zaitsev G.N. *Metodika biometricheskikh raschetov* [Methodology of biometric calculations]. Moscow, Nauka Publ., 1983, 256 p. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Маина М. Мамалиева, Асият Н. Алибегова и Зарема И. Солтанмуратова разработали концепцию статьи, подготовили ее текст, составляли рисунки и таблицы, обработали и проанализировали результаты, подбирали научную литературу по тематике статьи. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Maina M. Mamaliev, Asiyat N. Alibegova and Zarema I. Soltanmuratova developed the article's concept, prepared the text, compiled the figures and tables, processed and analyzed the results, and selected relevant scientific literature. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Маина М.Мамалиева / Maina M. Mamaliev <https://orcid.org/0000-0001-6235-3248>

Асият Н. Алибегова / Asiyat N. Alibegova <https://orcid.org/0000-0002-8977-4728>

Зарема И. Солтанмуратова / Zarema I. Soltanmuratova <https://orcid.org/0000-0003-3018-9097>



Анализ липофильного комплекса из корней *Eremostachys laciniata* (Lamiaceae) флоры Дагестана методом хромато-масс-спектрологии

Ифрат Н. Зилфикаров^{1,2,3}, Зиярат А. Гусейнова⁴, Татьяна К. Рязанова⁵, Ильнур Х. Шайхутдинов⁵, Гаджи К. Раджабов⁴, Тимур А. Ибрагимов⁶, Елена Ю. Бабаева¹

¹ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений (ВИЛАР), Москва, Россия

²ЗАО «ВИФИТЕХ», Московская область, Оболенск, Россия

³ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет», Майкоп, Россия

⁴Горный ботанический сад Дагестанского Федерального Исследовательского центра Российской Академии Наук, Махачкала, Россия

⁵ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» МЗ РФ, Самара, Россия

⁶ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет», Махачкала, Россия

Контактное лицо

Зиярат А. Гусейнова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Горный ботанический сад Дагестанского федерального исследовательского центра РАН; 367000 Россия, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 75.

Тел. +79886443771

Email guseinovaz@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0355-4132>

Формат цитирования

Зилфикаров И.Н., Гусейнова З.А., Рязанова Т.К., Шайхутдинов И.Х., Раджабов Г.К., Ибрагимов Т.А., Бабаева Е.Ю. Анализ липофильного комплекса из корней *Eremostachys laciniata* (Lamiaceae) флоры Дагестана методом хромато-масс-спектрологии // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 65-76.
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-6

Получена 21 февраля 2025 г.

Прошла рецензирование 14 мая 2025 г.

Принята 25 июня 2025 г.

Резюме

Цель: изучение компонентного состава липофильного комплекса, полученного из высушенных корней *Eremostachys laciniata* флоры Республики Дагестан методом газовой хроматографии с масс-селективным детектированием (ГХ-МС).

Объектом исследования являются корни *Eremostachys laciniata*, заготовленные от дикорастущих растений флоры Республики Дагестан в окрестностях г. Дербент. С применением газового хроматографа «МАЭСТРО 7820» с масс-спектрометром модели «Agilent 5975» и автоинжектором определён компонентный состав гексановой и хлороформной фракций липофильного комплекса, полученного экстракцией высушенных корней спиртом этиловым 96 %. Анализ проводили с использованием капиллярной кварцевой колонки HP-5, 30 м × 0,25 мм × 0,25 мкм, газ-носитель гелий. Идентификацию компонентов определяли с помощью библиотек масс-спектров NIST 2.4 и литературными данными.

Результаты анализов компонентного состава гексановой и хлороформной фракций липофильного комплекса продемонстрировали широкий спектр структурно разнообразных компонентов. Содержание экстрактивных веществ, извлекаемых из корней спиртом 96 %, составило 3,25 % в пересчете на сухое сырье. В исследуемых липофильных фракциях было идентифицировано 42 соединения – в основном терпенов, фитостеринов, жирных кислот и их эфиров, ароматических соединений. Установлено, что исследуемые группы веществ извлекаются из корней различными растворителями неравномерно, характер их распределения зависит, в том числе, и от полярности.

Представленные фитохимические данные дополняют наши знания о компонентном составе подземных органов *Eremostachys laciniata*. Дальнейшее изучение этого перспективного лекарственного растения может расширить применение препаратов из его сырья в медицинской и фармацевтической практике.

Ключевые слова

Eremostachys laciniata, газовая хроматография, масс-спектральная детекция, липофильный комплекс, компонентный состав, Дагестан.

Analysis of the lipophilic complex obtained from the roots *Eremostachys laciniata* (Lamiaceae) flora of Dagestan, Russia by chromatography-mass spectroscopy

Ifrat N. Zilfikarov^{1,2,3}, Ziyarat A. Guseynova⁴, Tatyana K. Ryazanova⁵, Ilnur Kh. Shaykhutdinov⁵, Gadzhi K. Radzhabov⁴, Timur A. Ibragimov⁶ and Elena Yu. Babaeva¹

¹All-Russian Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants, Moscow, Russia

²VIFITEKH closed joint stock company, Obolensk, Moscow Region, Russia

³Maikop State Technological University, Maykop, Russia

⁴Mountain Botanical Garden, Dagestan Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia

⁵Samara State Medical University, Samara, Russia

⁶Dagestan State University, Makhachkala, Russia

Principal contact

Ziyarat A. Guseynova, PhD (Biology), Senior Researcher, Mountain Botanical Garden, Dagestan Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences; 75 M. Yaragsky Sr, Makhachkala, Russia 367000.

Tel. +79886443771

Email guseynovaz@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0355-4132>

How to cite this article

Zilfikarov I.N., Guseynova Z.A., Ryazanova T.K., Shaykhutdinov I.Kh., Radzhabov G.K., Ibragimov T.A., Babaeva E.Yu. Analysis of the lipophilic complex obtained from the roots *Eremostachys laciniata* (Lamiaceae) flora of Dagestan, Russia by chromatography-mass spectroscopy. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):65-76. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-6

Received 21 February 2025

Revised 14 May 2025

Accepted 25 July 2025

Abstract

The objective was to determine the component composition of the lipophilic complex obtained from dried roots of *Eremostachys laciniata* flora of the Republic of Dagestan by gas chromatography with mass-selective detection (GC-MS).

The object of the study are the roots of *Eremostachys laciniata*, harvested from wild plants of the flora of the Republic of Dagestan in the vicinity of Derbent. Using MAESTRO 7820 gas chromatograph with an Agilent 5975 mass spectrometer and an autoinjector, the component composition of the hexane and chloroform fractions of the lipophilic complex obtained by extracting dried roots with 96 % ethyl alcohol was determined. The analysis was performed using an HP-5 capillary quartz column, 30 m x 0,25 mm x 0,25 µm, helium carrier gas. The components were identified using NIST 2.4 mass spectral libraries and literature data.

The results of component analysis of the hexane and chloroform fractions of the lipophilic complex demonstrated a wide range of structurally diverse components. The content of extractive substances extracted from the roots with 96 % alcogol was 3,25 % based on dry raw material. In the lipophilic fractions studied, 42 compounds were identified – mainly terpenes, phytosterols, fatty acids and their esters and aromatic compounds. It was established that the groups of substances studied are extracted from the roots by various solvents unevenly; the nature of their distribution depends, among other things, on polarity.

The phytochemical data presented supplement our knowledge of the component composition of the subterranean organs of *Eremostachys laciniata*. Further study of this promising medicinal plant could expand the use of preparations from its raw materials in medical and pharmaceutical practice.

Key Words

Eremostachys laciniata, gas chromatography, mass spectral detection, lipophilic complex, component composition, Dagestan.

ВВЕДЕНИЕ

Разработке новых и высокоэффективных лекарственных препаратов (ЛП) из лекарственного растительного сырья (ЛРС) придается все большее значение, так как современная медицина в рамках комплексной терапии острых и хронических заболеваний стремится снизить лекарственную нагрузку ксенобиотиками синтетической природы на организм человека. Особенно важную роль относительно безопасные растительные ЛП приобретают при воспалительных заболеваниях, которые требуют, как правило, длительного применения стероидных и нестероидных противовоспалительных средств.

На территории нашей страны произрастает более 15 тысяч видов растений, многие из которых являются потенциальным источником сырья для производства лекарственных препаратов. В то же время официальными являются лишь несколько сотен видов дикорастущих и культивируемых растений [1–2]. Расширение списка видов лекарственных растений, произрастающих на территории Российской Федерации в природных условиях, является актуальной и важной научной проблемой в фундаментальном и практическом аспекте [3].

Исследователей всегда привлекали богатейшая флора Кавказа и многолетний опыт применения извлечений из лекарственных растений в традиционной медицине. Одним из видов лекарственных растений народной медицины, представляющих научный интерес, является *Eremostachys laciniata* (L.) Bunge из семейства губоцветных (Lamiaceae).

Род *Eremostachys* Bunge включает около 140 видов травянистых растений, произрастающих в Восточной Европе и умеренных регионах Средней Азии [4]. На Кавказе встречается четыре вида *Eremostachys*, из них только один (*Eremostachys laciniata*) – в Дагестане.

В научной литературе имеется относительно немного информации о химическом составе надземных и подземных органов пустынноколосника и свойствах фитопрепаратов из него. В исследовании Nisar M., Khan S., Dar A. et al. [5] описан химический состав водно-спиртового извлечения из надземной части, в котором были идентифицированы флавоноиды апигенин, 5,7-дигидрокси-6,8-диметоксифлавонон, 5,8-дигидрокси-6,7-диметоксифлавонон, лютеолин, лютеолин 7-O- β -глюкозид. Данные вещества обладают седативным и нейротропным действием. В водном извлечении также были обнаружены производные апигенина, обуславливающие антидепрессантное действие [6–8].

В эфирном масле из травы *E. laciniata* обнаружены п-цимен, α -пинен, додеканол, виллоксипол, гермакрин В, туйопсен и линалоол [9–11].

В корнях *E. laciniata*, заготовленных в Иране, были идентифицированы иридоидные, в т.ч. дитерпеновые, гликозиды (эремостахин, фломиол, 9-эпи-фломиол, 5,9-эпи-фломиол, фломиозид II, β -D-глюкопиранозидовый эфир фломизоевой кислоты, пульчеллозид I, 9-эпи-пульчеллозид II, 6- β -гидрокси-7-эпи-логанин, ламальбид, сесамозид, 6'-O- β -D-глюкопиранозил-сесамозид, шанжисид метиловый эфир, флоизид I, флойозид II, 5,9-эпи-пенстемозид, 6,9-эпи-8-O-ацетил-шанжисид метиловый эфир), фенольные гликозиды (форситозид В, вербаскозид) и фитостерины (стигмастерол, β -ситостерол) [10; 12–13].

В Иране отвар из корней *E. laciniata* используют в качестве анальгезирующего средства при растяжениях, ушибах, вывихах и смещениях [14–20].

Установлено также, что экстракты корней *E. laciniata* обладают противовоспалительными [21–22], антибактериальными [23–26] и антиоксидантными свойствами [10; 27], отмечена их эффективность против двух видов патогенных для человека грибов (*Microsporum canis* и *Trichophyton rubrum*) [28].

Целью нашего исследования является изучение компонентного состава подземных органов *E. laciniata*, заготовленных от дикорастущих растений флоры Республики Дагестан. Одной из задач при этом явилось определение химического состава липофильного комплекса методом ГХ-МС гексановой и хлороформной фракций, полученных от спиртового (96 %) извлечения. Ранее нами также исследовались анатомо-морфологические и диагностические признаки надземных и подземных частей растений *E. laciniata* флоры Республики Дагестан [29].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Заготовка материала для исследования – корни и корневища растений *E. laciniata* генеративного возраста, произрастающего в природных условиях, в окрестностях г. Дербент (Республика Дагестан), производилась в самом начале вегетации, в 2021 году. Собранное сырье отряхивали от земли, промывали в проточной воде, нарезали на кусочки размером не более 20 мм, затем высушивали воздушно-теневым способом до остаточной влажности не более 10 %. Высушенное сырье представляет собой кусочки корней с грубой морщинистой перидермой светло-коричневого цвета, на поперечном срезе почти белого с желтоватым оттенком цвета. При растирании имеют слабый характерный пряный запах. С целью получения суммы малополярных веществ корни измельчали на ножевой лабораторной мельнице непосредственно перед экстракцией.

Приготовление спиртового извлечения

Навеску высушенных корней сырья массой около 100 г, измельченных до размера частиц, проходящих сквозь сито с отверстиями 2 мм, помещали в коническую колбу вместимостью 500 мл и исчерпывающе экстрагировали спиртом 96 % методом дробной мацерации при комнатной температуре в 6 стадий. Первое настаивание проводили в течение 12 часов, остальные – не менее 4, при периодическом взбалтывании. Объединенные спиртовые извлечения фильтровали через бумажный фильтр марки «белая лента» и упаривали под вакуумом на ротационном испарителе при температуре 70 °C до полного удаления органического растворителя. Круглодонную колбу с извлечением охлаждали до комнатной температуры, к остатку прибавляли 5 мл спирта 96 % и взбалтывали, добываясь максимально полного растворения экстрактивных веществ. Раствор фильтровали в мерную колбу вместимостью 10 мл. Круглодонную колбу и фильтр промывали спиртом еще 2 раза порциями по 2 мл, фильтраты объединяли. Объем фильтрата доводили спиртом 96 % до метки и перемешивали (спиртовая фракция).

Приготовление гексановой фракции

5,0 мл спиртовой фракции помещали в коническую делительную воронку, вместимостью 150 мл,

добавляли 50 мл воды, 3 мл *n*-гексана, взбалтывали в течение 2 мин, затем выдерживали до полного расслоения фаз. Верхнюю гексановую фракцию отделяли в мерную колбу вместимостью 10 мл. Экстракцию *n*-гексаном повторяли еще 2 раза порциями по 3 мл, все фракции объединяли. Объем раствора в мерной колбе доводили *n*-гексаном до метки и перемешивали.

Приготовление хлороформной фракции

5,0 мл спиртовой фракции помещали в коническую делительную воронку, вместимостью 150 мл, добавляли 50 мл воды, 3 мл хлороформа, взбалтывали в течение 2 мин, затем выдерживали до полного расслоения фаз. Нижнюю хлороформную фракцию отделяли в мерную колбу вместимостью 10 мл. Экстракцию хлороформом повторяли еще 2 раза порциями по 3 мл, все фракции объединяли. Объем раствора в мерной колбе доводили хлороформом до метки и перемешивали.

Компонентный состав летучих извлечений был определен с помощью газового хроматографа «МАЭСТРО 7820» с масс-спектрометром модели Agilent 5975 и автоинжектором. Анализ проводили с использованием капиллярной кварцевой колонки HP-5, 30 м×0,25 мм×0,25 мкм (неподвижная фаза: 5 %-дифенил-95 %-диметилсилоксан).

Условия хроматографирования

Газ-носитель гелий, скорость потока 1 мл/мин. Программирование температуры термостата колонок: изотерма 40 °С в течение 5 мин, нагрев до 80 °С со скоростью 2 °С/мин, нагрев до 150 °С со скоростью 7 °С/мин, нагрев до 280 °С со скоростью 10 °С/мин,

изотерма 280 °С в течение 20 мин. Температура испарителя 270 °С; температура источника ионов 150 °С; температура квадруполя 230 °С; температура переходной камеры 280 °С. Ввод пробы без деления потока. Объем вводимой жидкой пробы 1 мкл.

Для идентификации компонентов определяли линейные индексы удерживания, сопоставляли полученные результаты и полные масс-спектры с библиотечными (библиотеки масс-спектров «NIST 2.4») и литературными данными.

В ходе идентификации рассматривались только компоненты, определяемые по библиотеке с вероятностью более 90 %. Долю каждого компонента от суммы всех компонентов рассчитывали методом внутренней нормализации по площадям соответствующих пиков на хроматограмме, построенной по полному ионному току.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Eremostachys laciniata (пустынноколосник надрезанный) – травянистый многолетник, с клубневидно утолщенными корнями. Прикорневая шейка беловолосистая. Стебли прямые, или изогнутые, высотой 50–100 см. Листья зеленоватые, снизу сероватопушистые, перисто раздельные, прикорневые на длинных черешках, стеблевые менее крупные, на коротких, прицветные – сидячие. Черешки листьев и стебли опушены длинными и железистыми волосками. Молочно-белые цветки, собраны в продолговатое, колосовидное соцветие из многоцветковых ложных мутовок (рис. 1А). Орешки на верхушке сильно опушенные. Vegetация с апреля по август, цветение в мае–июне, плодоношение в июле–августе [30–31].

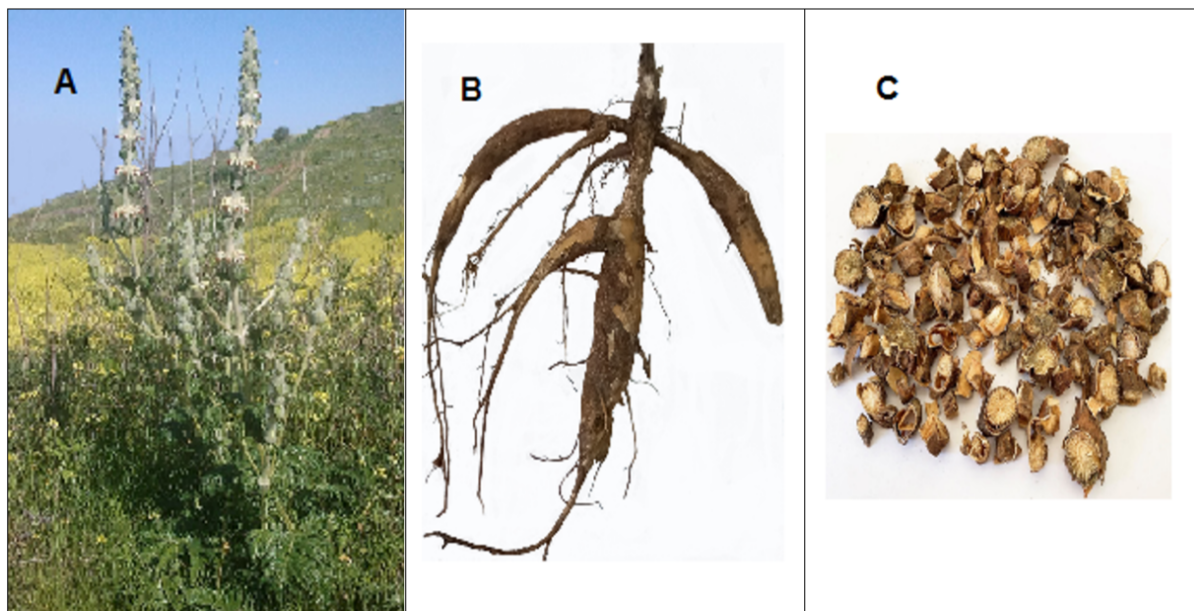


Рисунок 1. *Eremostachys laciniata*: А – внешний вид растения; В – корень растения; С – высушенные корни

Figure 1. *Eremostachys laciniata*: A – external appearance of plant; B – root of plant; C – dried roots

Ксеромезофит. Широко распространен на Кавказе. По данным Зернова, Абиловой в условиях Восточного Закавказья *E. laciniata* встречается на высотах 500–1500 м над ур. моря, в арчевниках, дубовых редколесьях (из *Quercus macranthera*), шибляках с

доминированием *Paliurus spina-christi*, а также в сухих степях [32]. В Дагестане вид произрастает на сухих склонах с разреженной растительностью, в нижнем горном поясе, в Казбековском и Предгорном флористических районах [33] (рис. 2).

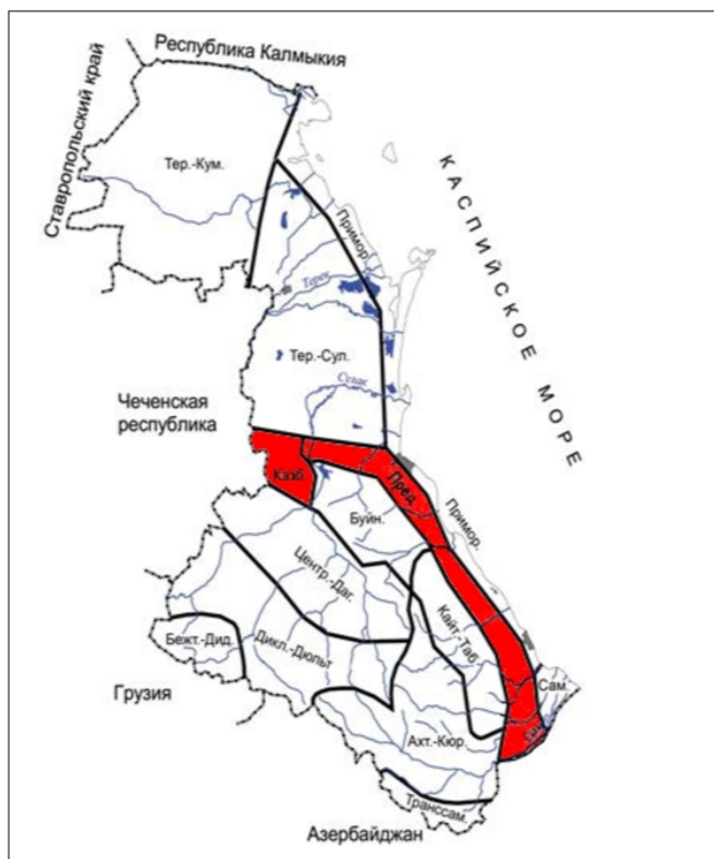


Рисунок 2. Ареал *Eremostachys laciniata* в Дагестане. Карта флористических районов Дагестана
Figure 2. The range of *Eremostachys laciniata* in Dagestan. Map of floristic regions of Dagestan

На второй год жизни, в имматурном состоянии, у растений *E. laciniata* на главном корне образуется от одного до трёх боковых корней первого порядка, которые начинают утолщаться в средней части, превращаясь в корневые клубни (рис. 1В). Главный корень при этом продолжает рост и тоже утолщается. Имматурное состояние продолжается 3–5 лет, в течение которых корни продолжают расти и утолщаться. В генеративную фазу растения *E. laciniata* вступают на 4–6 год жизни [32].

Содержание экстрактивных веществ, извлекаемых из корней (рис. 1С) спиртом 96 %, составило 3,25 % в пересчете на сухое сырье. В ходе пробоподготовки с применением *n*-гексана и хлороформа спиртовое извлечение подвергалось фракционированию, так как данные растворители позволяют извлекать неполярные вещества, т.н. липидный комплекс.

На рис. 3 представлены хроматограммы, полученные в результате ГХ-МС анализа гексановой и хлороформной фракций.

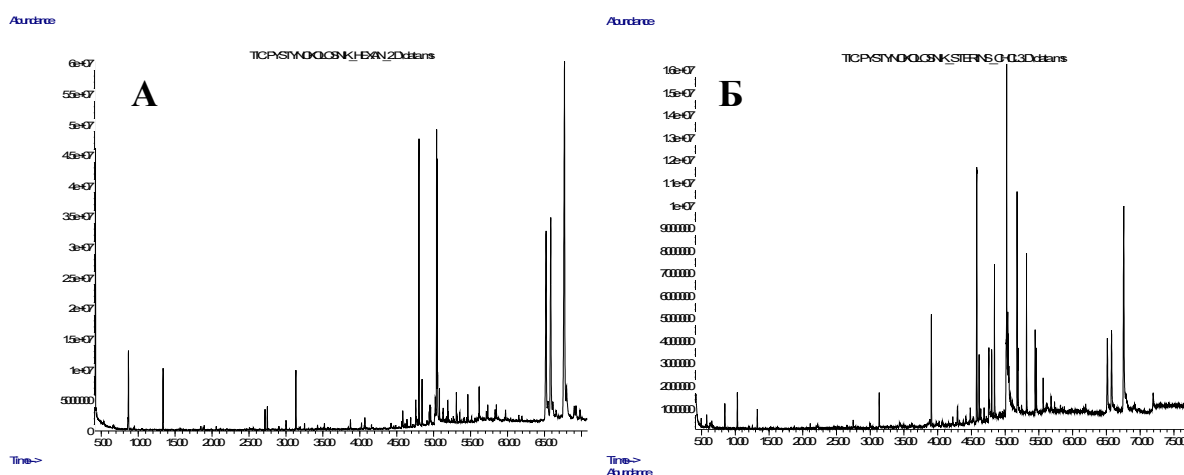


Рисунок 3. Хроматограммы ГХ-МС гексановой (А) и хлороформной (Б) фракций спиртового извлечения из корней *Eremostachys laciniata*

Figure 3. GC-MS chromatograms of hexane (A) and chloroform (B) fractions of the alcohol extract from the roots of *Eremostachys laciniata*

В табл. 1 и на рис. 4 представлены вещества, обнаруженные и идентифицированные в составе исследуемых фракций.

Одинаковая пробоподготовка, реализованная нами при получении гексановой и хлороформной фракций, явилась основанием для объединения результатов анализа, полученных для каждой фракции, с тем, чтобы полнее охарактеризовать компоненты и массовые доли классов соединений в химическом составе

спиртового извлечения и, соответственно, корней *E. laciniata*.

Результаты, отраженные в табл. 2, носят предварительный характер, так как не учитывают влияния структуры индивидуального соединения на площадь пика на хроматограмме, но вместе с тем позволяют оценить соотношение между различными классами идентифицированных веществ, распределенными в соответствии с химической классификацией БАВ.

Таблица 1. Компонентный состав гексановой и хлороформной фракций спиртового извлечения из корней *Eremostachys laciniata*

Table 1. Component composition of hexane and chloroform fractions of alcohol extract from *Eremostachys laciniata* roots

N п/п	Время удерживания, мин Retention time, min	Компонент Component	Обнаружено во фракции, % от общей площади всех компонентов Detected in fraction, % of total area of all components	
			гексановой hexane	хлороформной chloroform
1.	17,667	Лимонен (1-метил-4-изопропенилциклогексен-1), моноциклический монотерпен Limonene (1-methyl-4-isopropenylcyclohexene-1), a monocyclic monoterpene	0,03	-
2.	18,758	Фенилацетальдегид (фенилэтаналь, фенилуксусный альдегид), ароматический альдегид, производное арена Phenylacetaldehyde (phenylethanal, phenylacetic aldehyde), an aromatic aldehyde, an arene derivative	0,06	0,14
3.	21,178	Линалоол (3,7-диметил-1,6-октадиен-3-ол), ациклический монотерпеновый спирт Linalool (3,7-dimethyl-1,6-octadien-3-ol), an acyclic monoterpene alcohol	0,04	-
4.	21,993	Фенилэтиловый спирт (2-фенилэтанол), ароматический спирт, производное арена Phenylethyl alcohol (2-phenylethanol), an aromatic alcohol, an arene derivative	0,05	0,15
5.	24,696	Ментол, моноциклический монотерпеновый спирт Menthol, a monocyclic monoterpene alcohol	0,04	-
6.	25,073	Азулен (бицикло-[5.3.0]-дека-1,3,5,7,9-пентаен), небензоидное ароматическое соединение, бициклический ароматический сесквитерпен Azulene (bicyclo-[5.3.0]-deca-1,3,5,7,9-pentaene), a non-benzenoid aromatic compound, a bicyclic aromatic sesquiterpene	0,08	-
7.	25,600	Эстрагол (метилхавикол, <i>p</i> -аллиланизол), ароматический монотерпен Estragole (methyl chavicol, <i>p</i> -allylanisole), an aromatic monoterpene	0,06	-
8.	26,551	2-Феноксизтанол (2-фенокси-1-этанол, монофениловый эфир этиленгликоля), производное арена 2-Phenoxyethanol (2-phenoxy-1-ethanol, ethylene glycol monophenyl ether), an arene derivative	0,02	-
9.	27,487	Карвон (<i>p</i> -мента-6,8(9)-диен-2-он), моноциклический монотерпен Carvone (<i>p</i> -mentha-6,8(9)-dien-2-one), monocyclic monoterpene	0,53	0,36
10.	27,658	1(7)- <i>p</i> -Ментен-2-он (1-метилен-4- изопропилциклогексан-2-он, сантолиненол), моноциклический монотерпен 1(7)- <i>p</i> -Menten-2-one (1-methylene-4- isopropylcyclohexan-2-one, santolinenol), monocyclic monoterpene	0,02	-

11.	27,742	Тимохинон (2-изопропил-5-метил-1,4-бензохинон), моноциклический монотерпен Thymoquinone (2-isopropyl-5-methyl-1,4-benzoquinone), monocyclic monoterpene	0,03	-
12.	28,129	<i>п</i> -Анисальдегид (<i>п</i> -метоксибензальдегид), ароматический альдегид, производное арена p-Anisaldehyde (p-methoxybenzaldehyde), aromatic aldehyde, arene derivative	0,05	-
13.	29,058	Анетол (<i>п</i> -метоксипропенилбензол, изоэстрагол), ароматический монотерпен Anethole (p-methoxypropenylbenzene, isoestrangle), aromatic monoterpene	0,10	-
14.	29,463	Тимол (2-изопропил-5-метилфенол), ароматический монотерпен Thymol (2-isopropyl-5-methylphenol), aromatic monoterpene	0,03	-
15.	31,349	Эвгенол (4-аллил-2-метоксифенол), ароматический монотерпен Eugenol (4-allyl-2-methoxyphenol), aromatic monoterpene	1,31	1,45
16.	33,345	β -Кариофиллен, бициклический сесквитерпен β -Caryophyllene, bicyclic sesquiterpene	0,03	-
17.	34,281	Метилловый эфир 2-гидрокси-4-метоксибензойной кислоты, ароматическое соединение, производное арена Methyl ester of 2-hydroxy-4-methoxybenzoic acid, aromatic compound, arene derivative	0,18	0,31
18.	40,688	Гвайол (гваяцен), бициклический сесквитерпен Guaiol (guaiacene), a bicyclic sesquiterpene	0,28	-
19.	41,295	Кадален (4-изопропил-1,6-диметилнафталин), бициклическое ароматическое соединение, производное арена Cadale (4-isopropyl-1,6-dimethylnaphthalene), a bicyclic aromatic compound, an arene derivative	0,03	-
20.	44,229	Миристиновой кислоты этиловый эфир, сложный эфир высшей жирной кислоты Myristic acid ethyl ester, a higher fatty acid ester	0,16	0,14
21.	44,835	Миристиновой кислоты изопропиловый эфир, сложный эфир высшей жирной кислоты Myristic acid isopropyl ester, a higher fatty acid ester	0,08	1,47
22.	45,578	Пентадекановой кислоты этиловый эфир, сложный эфир высшей жирной кислоты Pentadecanoic acid ethyl ester, a higher fatty acid ester	0,03	-
23.	47,592	Пальмитиновая кислота, высшая жирная кислота Palmitic acid, a higher fatty acid	-	5,00
24.	48,010	Пальмитиновой кислоты этиловый эфир, сложный эфир высшей жирной кислоты Palmitic acid ethyl ester, a higher fatty acid ester	4,87	3,00
25.	50,151	Линолевая кислота, высшая жирная кислота Linoleic acid, a higher fatty acid	-	3,46
26.	50,395	Линолевой кислоты этиловый эфир, сложный эфир высшей жирной кислоты Linoleic acid ethyl ester, a higher fatty acid ester	4,98	5,40
27.	50,468	Олеиновой кислоты этиловый эфир, сложный эфир высшей жирной кислоты Ethyl oleic acid, ester of higher fatty acid	5,50	4,55
28.	50,780	Стеариновой кислоты этиловый эфир, высшая жирная кислота Stearic acid ethyl ester, a higher fatty acid	1,02	1,69
29.	51,290	(Z)-5,11,14,17-Эйкозатетраеновой кислоты этиловый эфир, сложный эфир высшей жирной кислоты (Z)-5,11,14,17-Eicosatetraenoic acid ethyl ester, a higher fatty acid acids	0,55	-
30.	51,461	1-Гидрокси-2-метилантрахинон, производное антрацена	0,16	-

		1-Hydroxy-2-methylanthraquinone, an anthracene derivative		
31.	51,628	11,14-Эйкозодиеновой кислоты этиловый эфир, сложный эфир высшей жирной кислоты 11,14-Eicosadienoic acid ethyl ester, a higher fatty acid ester	0,19	-
32.	51,905	2,3,6,7-Тетраметилантрахинон, производное антрацена 2,3,6,7-Tetramethylantraquinone, an anthracene derivative	0,43	2,80
33.	56,160	Бегеновый спирт (докозиловый спирт, докозан-1-ол), высший жирный спирт Behenic alcohol (docosyl alcohol, docosan-1-ol), a higher fatty alcohol	0,85	0,53
34.	57,125	Этилтетракозаноат (этиловый эфир тетракозановой [лигноцериновой] кислоты), сложный эфир высшей жирной кислоты Ethyl tetracosanoate (ethyl ester of tetracosanoic [lignoceric] acid), a higher fatty acid ester	0,20	-
35.	57,322	Сквален (2,6,10,15,19,23-гексаметилтетракоза-2,6,10,14,18,22-гексаен), алифатический ациклический тритерпен Squalene (2,6,10,15,19,23-hexamethyltetracos-2,6,10,14,18,22-hexaene), an aliphatic acyclic triterpene	0,54	0,55
36.	59,593	Стигмаст-4-ен-3-он (ситостенон; Δ^4 -ситостерол-3-он), тетрациклический тритерпен, фитостерин Stigmast-4-en-3-one (sitostenone; Δ^4 -sitosterol-3-one), tetracyclic triterpene, phytosterol	0,14	0,12
37.	61,935	β -Ситостерола ацетат (стигмаст-5-ен-3-ола ацетат) тетрациклический тритерпен, фитостерин β -Sitosterol acetate (stigmast-5-en-3-ol acetate), tetracyclic triterpene, phytosterol	0,22	0,44
38.	65,217	Кампестерол (кампестерол-5-ен-3 β -ол), тетрациклический тритерпен, фитостерин Campesterol (campesterol-5-en-3 β -ol), tetracyclic triterpene, phytosterol	10,75	7,65
39.	65,849	Стигмастерол (стигмаста-5,22-диен-3 β -ол, стигмастерин), тетрациклический тритерпен, фитостерин Stigmasterol (stigmast-5,22-dien-3 β -ol, stigmasterol), tetracyclic triterpene, phytosterol	10,86	7,68
40.	67,710	β -Ситостерол (β -ситостерин, 22,23-дигидростигмастерин), тетрациклический тритерпен, фитостерин β -Sitosterol (β -sitosterol, 22,23-dihydrostigmasterol), tetracyclic triterpene, phytosterol	23,23	22,82
41.	67,989	Стигмастанол (5 α -стигмастан-3 β -ол, β -ситостанол, дигидро- β -ситостерин, фукостанол, спинастанол, 24 α -этилхолестанол), тетрациклический тритерпен, фитостерин Stigmastanol (5 α -stigmastan-3 β -ol, β -sitostanol, dihydro- β -sitosterol, fucostanol, spinastanol, 24 α -ethylcholestanol), tetracyclic triterpene, phytosterol	2,38	-
42.	69,807	Спинастерон (5 α -стигмаста-7,22-диен-3-он), тетрациклический тритерпен, фитостерин Spinasterone (5 α -stigmasta-7,22-dien-3-one), tetracyclic triterpene, phytosterol	0,58	0,03
Не идентифицировано во фракции, суммарно Not identified in fraction, total			28,31	30,26

Как видно из данных, представленных в табл. 1 и 2, в липофильном комплексе, полученном этиловым спиртом 96 % из корней *E. laciniata*, значительная доля, около 60 %, принадлежит тетрациклическим тритерпенам (фитостеринам), в их числе основные

компоненты – β -ситостерол, стигмастерол и кампестерол составляют суммарно около 80 % стеринальной фракции. Липидная фракция составляет более 30 % от суммы веществ и состоит из высших жирных кислот и их сложных эфиров. Исследуемое

извлечение характеризуется относительно высоким, более 3 %, содержанием суммы антраценпроизводных и суммы моно- и сесквитерпенов, которые относятся к природным БАВ. Большинство идентифицированных

соединений обладают фармакологической активностью и вносят вклад в суммарный эффект липофильного комплекса из подземных органов *E. laciniata*.

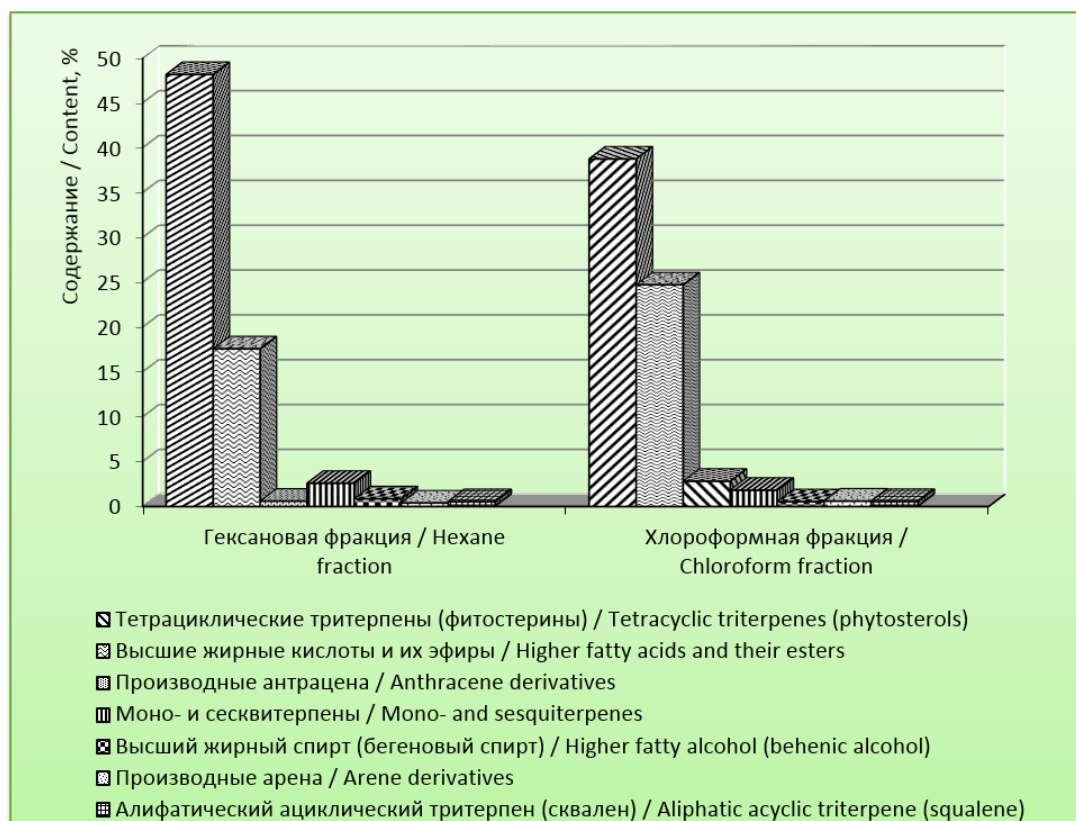


Рисунок 4. Содержание (%) основных классов БАВ в гексановых и хлороформных фракциях липофильного комплекса из корней *Eremostachys laciniata*

Figure 4. Content (%) of the main classes of biologically active substances in the hexane and chloroform fractions of the lipophilic complex from roots of *Eremostachys laciniata*

Таблица 2. Состав спиртового извлечения из корней *Eremostachys laciniata* по классам идентифицированных соединений

Table 2. Composition of the alcoholic extract from the roots of *Eremostachys laciniata* by classes of identified compounds

Классы идентифицированных соединений Classes of identified compounds	Доля, % Fraction, %
Тетрациклические тритерпены (фитостерины) / Tetracyclic triterpenes (phytosterols)	57,13
Высшие жирные кислоты и их эфиры / Higher fatty acids and their esters	33,68
Производные антрацена / Anthracene derivatives	3,50
Моно- и сесквитерпены (терпеновые углеводороды, спирты, кетоны, хиноны, фенолы, альдегиды, сложные эфиры) Mono- and sesquiterpenes (terpene hydrocarbons, alcohols, ketones, quinones, phenols, aldehydes, esters)	3,31
Высший жирный спирт (бегеновый спирт) / Higher fatty alcohol (behenic alcohol)	1,00
Производные арена (фенольные спирты, кислоты, альдегиды, сложные эфиры) Arene derivatives (phenolic alcohols, acids, aldehydes, esters)	0,73
Алифатический ациклический тритерпен (скален) / Aliphatic acyclic triterpene (squalene)	0,65

В ходе клинических исследований, проведенных с применением мази с метанольным экстрактом корней *E. laciniata*, было установлено, что исследуемый препарат оказывал выраженное противовоспалительное действие у пациентов с артритом, ревматоидным артритом и синдромом Рейтера, сопоставимое с таковым лекарственного препарата, содержащего пироксикам. При этом начальный терапевтический эффект у мази с экстрактом корней *E. laciniata* был выше. Авторы связывают противовоспалительную активность экстракта

с иридоидными гликозидами и сопутствующими им фенольными соединениями [21; 34]. В другом исследовании иранские разработчики предлагают использовать суппозитории с экстрактом корней *E. laciniata* для облегчения боли и стресса после кесарева сечения [35].

Одним из способов медицинского применения подземных органов *E. laciniata* является аппликация кашицей травмированного участка опорно-двигательного аппарата, например сустава, подвергшегося вывиху

или растяжению без глубокого повреждения кожи (описано со слов местного жителя южного Дагестана). Для этого около 100 г корней *E. laciniata* (лезг.: «чладагъар»), свежесобранных и тщательно вымытых, мелко измельченных или пропущенных через мясорубку, помещают в эмалированную посуду, прибавляют около 1 л молока, доводят до кипения и упаривают, при постоянном перемешивании, до густой консистенции. Кашицу остужают, наносят на неповрежденную кожу равномерно в области травмы, покрывают марлей и неплотно перевязывают. Процедуру проводят 2 раза в день, осуществляя тем самым непрерывную аппликацию, в течение 10 дней. По истечении указанного срока лечащий врач контролирует и, при необходимости, корректирует положение сустава, которое далее фиксирует гипсовой повязкой еще на 10 дней. По оценке пациентов, получавших такое лечение, и местных лекарей, аппликации описанным способом позволяют избежать болезненных процедур, включая оперативное вмешательство, обезболивают и тем самым облегчают вправление сустава (цит.: «делают ткани сустава мягкими и податливыми»), позволяют быстрее восстановить работу поврежденных тканей. Особенностью описанного способа приготовления лечебного средства является применение молока в качестве экстрагента, способного извлекать из ЛРС БАВ гидрофильной и липофильной природы. Не исключено также прямое влияние компонентов молока на проницаемость и биодоступность суммы БАВ из корней и корневых клубней *E. laciniata* и участие в суммарном фармакологическом эффекте.

Данные, полученные нами при изучении компонентного состава липофильного этанольного (96 %) извлечения из корней *E. laciniata*, позволяют предположить участие терпеноидного комплекса, включающего моно-, сескви-, ди- и тритерпеновые производные, в ранее выявленной и описанной в научной литературе фармакологической активности и полезных терапевтических эффектах исследуемого ЛРС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определен химический состав липофильного этанольного (96 %) извлечения из высушенных корней *Eremostachys laciniata* флоры Республики Дагестан методом ГХ-МС. Для более полного анализа спиртовое извлечение фракционировали с получением хлороформной и гексановой фракций. В исследуемых фракциях идентифицировано суммарно 42 соединения, в основном терпеноидной природы. Распределение по классам, осуществленное в соответствии с химической классификацией природных БАВ, показывает, что липофильный комплекс из корней *Eremostachys laciniata* состоит преимущественно из тетрациклических тритерпенов (фитостеринов). Он также содержит сумму моно- и сесквитерпенов, антраценпроизводные, высшие жирные кислоты, их сложные эфиры, производные арена, высший жирный спирт (бегеновый спирт) и алифатический ациклический тритерпен (сквален).

Комплексное изучение химического состава, фитотехнологических и фармакологических свойств извлечений из корней *Eremostachys laciniata* позволит разработать на их основе новые высокоэффективные фитопрепараты, расширить ассортимент противовоспалительных средств и внедрить их в медицинскую и фармацевтическую практику с учетом опыта

традиционной народной медицины Дагестана и стран Ближнего Востока.

Перспективное лекарственное растение *Eremostachys laciniata* может пополнить коллекцию участка флоры Крыма и Кавказа ботанического сада ФГБНУ ВИЛАР.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ильина Т.А. Большая иллюстрированная энциклопедия лекарственных растений. Москва: Эксмо, 2014. 304 с.
2. Государственная Фармакопея Российской Федерации. XIV издание. В 4-х томах. Москва. 2018.
3. Растительные ресурсы России: Дикорастущие цветковые растения, их компонентный состав и биологическая активность. Т. 4. Семейства *Caprifoliaceae* – *Lobeliaceae* / Отв. ред. А.Л. Буданцев. Санкт-Петербург: Москва: КМК, 2011. 630 с.
4. The Plant List. Version 1.1. 2013. URL: <http://www.theplantlist.org/> (дата обращения: 15.01.2015)
5. Nisar M., Khan S., Dar A., Rehman W., Khan R., Jan I. Antidepressant screening and flavonoids isolation from *Eremostachys laciniata* (L) Bunge // African Journal of Biotechnology. 2011. V. 10. N 9. P. 1696–1699. <http://dx.doi.org/10.5897/AJB10.1254>
6. Çaliş I., Guvenç A., Armagan M., Koyuncu M., Gotfredsen C.H., Jensen S.R. Secondary metabolites from *Eremostachys laciniata* // Natural Product Communications. 2008. V. 3. N 2. P. 117–124. <http://dx.doi.org/10.1177/1934578X0800300202>
7. Звездина Е.В., Дайронас Ж.В., Бочкарева И.И., Зилфикаров И.Н., Бабаева Е.Ю., Ферубко Е.В., Гусейнова З.А., Серебряная Ф.К., Каибова С.Р., Ибрагимов Т.А. Представители семейства Lamiaceae Lindl. как источники лекарственного растительного сырья для получения нейротропных средств (обзор) // Фармация и фармакология. 2020. Т. 8. N 1. С. 4–28. <http://dx.doi.org/10.19163/2307-9266-2020-8-1-4-28>
8. Asgharian P., Delazar A., Asnaashari S. Chemical Constituents of *Eremostachys macrophylla* Montbr. and Auch. Aerial Parts // Pharmaceutical Sciences. 2020. V. 26. N 2. P. 203–208. <http://dx.doi.org/10.34172/PS.2019.65>
9. Navaei M.N., Mirza M. Chemical composition of the oil of *Eremostachys laciniata* (L.) Bunge from Iran // Flavour and fragrance journal. 2006. V. 21. N 4. P. 645–646. <http://dx.doi.org/10.1002/ffj.1635>
10. Bajalan I., Zand M., Goodarzi M., Darabi M. Antioxidant activity and total phenolic and flavonoid content of the extract and chemical composition of the essential oil of *Eremostachys laciniata* collected from Zagros // Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine. 2017. V. 7. N 2. P. 144–146. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apjtb.2016.11.022>
11. Khan A.M., Agnihotri N.K., Singh V.K., Joshi M.C., Kumar K. Conventional Medicinal Uses and Chemical Structure of Important Secondary Metabolites in the Genus *Eremostachys*: A Literature Review // An International Peer Reviewed Open Access Journal. 2022. V. 15. N 1. P. 35–44. <http://dx.doi.org/10.21786/bbrj/15.1.5>
12. Delazar A., Modarresi M., Nazemiyeh H., Fathi-Azad F., Nahar L., Sarker S.D. Furanolabdane diterpene glycosides from *Eremostachys laciniata* // Natural Product Communications. 2008. V. 3. N 6. P. 873–876. <http://dx.doi.org/10.1177/1934578X0800300609>
13. Çaliş I., Baser K.H.C. Review of Studies on *Phlomis* and *Eremostachys* Species (Lamiaceae) with emphasis on iridoids, phenylethanoid glycosides, and essential oils // Planta Medica. 2021. V. 87. N 14. P. 1128–1151. <http://dx.doi.org/10.1055/a-1527-4238>
14. Delazar A., Asl B.H., Mohammadi O., Afshar F.H., Nahar L., Modarresi M., Nazemiyeh H., Sarker S.D. Evaluation of analgesic activity of *Eremostachys laciniata* in mice // Journal of Natural Remedies. 2009. V. 9. N 1. P. 1–7. <http://dx.doi.org/10.18311/jnr/2009/213>
15. Lindler B.N., Long K.E., Taylor N.A., Lei W. Use of herbal medications for treatment of osteoarthritis and rheumatoid arthritis // Medicines. 2020. V. 7. N. 11. P. 67. <http://dx.doi.org/10.3390/medicines7110067>
16. Mahmood S., Agrawal A. Utility of Herbal plants for treating osteoarthritis and rheumatoid arthritis // Indian Journal of Integrative Medicine. 2022. V. 2. N 2. P. 30–34.

17. Aliev A.M., Murtazaliev R.A., Vagabova F.A., Guseynova Z.A., Ramazanov B.A., Islamova F.I., Alibegova A.N., Osmanov R.M., Mallaliev M.M., Mamaliev M.M., Radzhabov G.K., Anatov D.M., Busmann R.W. Ethnobotany of Dagestan // *Ethnobotany Research and Applications*. 2023. V. 26. P. 1–63. <http://dx.doi.org/10.32859/era.26.66.1-63>
18. Saha P., Biswas D., Roy P., Majumdar M., Roy S., Manna R., Chanda A., Das S., Mukherjee M., Dey S., Das D. Herbs Having Analgesic Activity // *Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology*. 2023. V. 2. N 5. P. 1–11. <https://doi.org/10.55544/jrasb.2.5.1>
19. Samarrita S., Rasool M. Majoon chobchini reinstates PDL-1 expression and blocks dendritic cell-T helper 17 pathogenic axis in rheumatoid arthritis animal model // *Cytokine*. 2023. V. 163. Article ID: 156136. <https://doi.org/10.1016/j.cyto.2023.156136>
20. Talukdar A.J., Mani R.K., Malli R., Shree S., Md F. The role of medicinal plants in rheumatoid arthritis-an updated review // *International Journal of Indigenous Herbs and Drugs*. 2023. V. 8. N 3. P. 16–20. <https://doi.org/10.46956/ijihd.v8i3.459>
21. Delazar A., Sarker S.D., Nahar L., Jalali S.B., Modaresi M., Hamedeyazdan S., Babaei H., Javadzadeh Y., Asnaashari S., Moghadam S.B. Rhizomes of *Eremostachys laciniata*: isolation and structure elucidation of chemical constituents and a clinical trial on inflammatory diseases // *Advanced pharmaceutical bulletin*. 2013. V. 3. N 2. P. 385–393. <http://dx.doi.org/10.5681/apb.2013.062>
22. Hariri A.S., Shayesteh S., Asgharian P., Chamanara M., Sadrazadeh-Afshar M.S. *Eremostachys binalodensis*, a potential therapeutic choice for gingival inflammatory wounds // *Journal of Contemporary Medical Sciences*. 2021. V. 7. N 3. P. 140–144. <https://doi.org/10.22317/jcms.v7i3.976>
23. Modaresi M., Delazar A., Nazemiyeh H., Fathi-Azad F., Smih E., Rahman M.M., Sarker S.D. Antibacterial iridoid glucosides from *Eremostachys laciniata* // *Phytotherapy Research*. 2009. V. 23. N 1. P. 99–103. <http://dx.doi.org/10.1002/ptr.2568>
24. Al Kateeb A.I., Tufekci E.F., Baloglu M.C., Zengin G., Yildiztugay E., Altunoglu Y.C. Antibacterial Effects of Phlomisoides molucelloides (Bunge) Salmaki // *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*. 2022. V. 25. N Ek Sayı 2. P. 402–410. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.v25i73358.107798>
25. Ahmadian P., Nourafcan H., Assadi A., Faramarzi A. *Eremostachys laevigata* Bunge responses to different extraction solvents and methods: physiological, biochemical, and antibacterial attributes // *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2024. V. 52. N 2. P. 13232–13232. <https://doi.org/10.15835/nbha52213232>
26. Talebi M., Oskouie A.A., Mahboubi A., Khani M., Mojab F. Analysis of *Eremostachys hyoscyamoides* essential oil composition and assessing the antibacterial and antioxidant properties of the ethanol extract // *Heliyon*. 2024. V. 10. N 21. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38389>
27. Faryabi E., Noori M., Mousavi A., Jafari A. Chemotaxonomy of Wild Lamiaceae Taxa Based on Their Flavonoids Profiles // *Journal of Rangeland Science*. 2021. V. 11. N 3. P. 269–282.
28. Star D.M., Salih S.H., Mustafa R.A., Fiaq K. Phytochemical Screening and Antifungal Efficacy of *Eremostachys laciniata* (L.) Bunge. Plant Extract and Potential healthy attribute of Active compounds // *Clinical Research and Clinical Reports*. 2024. V. 3. N 6. <http://dx.doi.org/10.31579/2835-8325/100>
29. Рамазанова З.Р., Зилфикаров И.Н., Асадулаев З.М., Гусейнова З.А. Анатомическое строение вегетативных и генеративных органов *Eremostachys laciniata* (Lamiaceae) // *Ботанический вестник Северного Кавказа*. 2024. N 1. С. 28–43. http://dx.doi.org/10.33580/24092444_2024_1_28
30. Флора СССР. Москва-Ленинград: Изд-во АН СССР, 1954. Т. 21. 704 с.
31. Гроссгейм А.А. Флора Кавказа. Ленинград: Изд-во АН СССР, 1967. Т. 7. 894 с.
32. Зернов А.С., Абилова И.Э. Особенности биоморфологии *Eremostachys laciniata* (L.) Bunge (Labiatae) // *Материалы X международной конференции по экологической морфологии растений, посвященной памяти И.Г. и Т.И. Серебряковых*. Москва, Изд-во МГУ, 2019. Т. 2. С. 3–8.
33. Муртазалиев Р.А. Конспект флоры Дагестана. Махачкала: Изд. дом «Эпоха», 2009. Т. 3. 304 с.
34. Khan S., Nisar M., Rehman W., Khan R., Nasir F. Anti-inflammatory study on crude methanol extract and different fractions of *Eremostachys laciniata* // *Pharmaceutical biology*. 2010. V. 48. N 10. P. 1115–1118. <http://dx.doi.org/10.3109/13880200903517950>
35. Mohammad Pour S., Hakimi S., Delazar A., Javad Zadeh Y., Mallah F. *Eremostachys laciniata* as effective as rectal diclofenac suppository in cesarean section pain relief: A triple-blind controlled clinical trial // *Journal of Endometriosis and Pelvic Pain Disorders*. 2020. V. 12. N 1. P. 26–34. <https://doi.org/10.1177/2284026519899010>

REFERENCES

1. Ilyina T.A. *Bol'shaya illyustrirovannaya entsiklopediya lekarstvennykh rastenii* [The Great Illustrated Encyclopedia of Medicinal Plants]. Moscow, Eksmo Publ., 2014, 304 p. (In Russian)
2. *Gosudarstvennaya Farmakopeya Rossiiskoi Federatsii* [State Pharmacopoeia of the Russian Federation]. XIV edition. In 4 volumes. Moscow, 2018. (In Russian)
3. *Rastitel'nye resursy Rossii: Dikorastushchie tsvetkovye rasteniya, ikh komponentnyi sostav i biologicheskaya aktivnost'. T. 4. Semeistva Caprifoliaceae – Lobeliaceae* [Plant resources of Russia: Wild flowering plants, their component composition and biological activity. Vol. 4. Families Caprifoliaceae – Lobeliaceae]. St. Petersburg, Moscow, KMK Publ., 2011, 630 p. (In Russian)
4. The Plant List. Version 1.1. 2013. Available at: <http://www.theplantlist.org/> (accessed 15.01.2015)
5. Nisar M., Khan S., Dar A., Rehman W., Khan R., Jan I. Antidepressant screening and flavonoids isolation from *Eremostachys laciniata* (L.) Bunge. *African Journal of Biotechnology*, 2011, vol. 10, no. 9, pp. 1696–1699. <http://dx.doi.org/10.5897/AJB10.1254>
6. Çalıř I., Guvenç A., Armagan M., Koyuncu M., Gotfredsen C.H., Jensen S.R. Secondary metabolites from *Eremostachys laciniata*. *Natural Product Communications*, 2008, vol. 3, no. 2, pp. 117–124. <http://dx.doi.org/10.1177/1934578X0800300202>
7. Zvezdina E.V., Dayronas J.V., Bochkareva I.I., Zilfikarov I.N., Babaeva E.Yu., Ferubko E.V., Guseynova Z.A., Serebryanaya F.K., Kaibova S.R., Ibragimov T.A. Members of the family Lamiaceae Lindl. as sources of medicinal plant raw materials to obtain neurotropic drugs. *Pharmacy and Pharmacology*, 2020, vol. 8, no. 1, pp. 4–28. (In Russian) <http://dx.doi.org/10.19163/2307-9266-2020-8-1-4-28>
8. Asgharian P., Delazar A., Asnaashari S. Chemical Constituents of *Eremostachys macrophylla* Montbr. and Auch. Aerial Parts. *Pharmaceutical Sciences*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 203–208. <http://dx.doi.org/10.34172/PS.2019.65>
9. Navaei M.N., Mirza M. Chemical composition of the oil of *Eremostachys laciniata* (L.) Bunge from Iran. *Flavour and fragrance journal*, 2006, vol. 21, no. 4, pp. 645–646. <http://dx.doi.org/10.1002/ffj.1635>
10. Bajalan I., Zand M., Goodarzi M., Darabi M. Antioxidant activity and total phenolic and flavonoid content of the extract and chemical composition of the essential oil of *Eremostachys laciniata* collected from Zagros. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 144–146. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apjtb.2016.11.022>
11. Khan A.M., Agnihotri N.K., Singh V.K., Joshi M.C., Kumar K. Conventional Medicinal Uses and Chemical Structure of Important Secondary Metabolites in the Genus *Eremostachys*: A Literature Review. *An International Peer Reviewed Open Access Journal*, 2022, vol. 15, no. 1, pp. 35–44. <http://dx.doi.org/10.21786/bbrc/15.1.5>
12. Delazar A., Modarresi M., Nazemiyeh H., Fathi-Azad F., Nahar L., Sarker S.D. Furanolabdane diterpene glycosides from *Eremostachys laciniata*. *Natural Product Communications*, 2008, vol. 3, no. 6, pp. 873–876. <http://dx.doi.org/10.1177/1934578X0800300609>
13. Çalıř I., Baser K.H.C. Review of Studies on Phlomis and *Eremostachys* Species (Lamiaceae) with emphasis on iridoids, phenylethanoid glycosides, and essential oils. *Planta Medica*, 2021, vol. 87, no. 14, pp. 1128–1151. <http://dx.doi.org/10.1055/a-1527-4238>
14. Delazar A., Asl B.H., Mohammadi O., Afshar F.H., Nahar L., Modarresi M., Nazemiyeh H., Sarker S.D. Evaluation of analgesic activity of *Eremostachys laciniata* in mice. *Journal of Natural Remedies*, 2009, vol. 9, no. 1, pp. 1–7. <http://dx.doi.org/10.18311/jnr/2009/213>
15. Lindler B.N., Long K.E., Taylor N.A., Lei W. Use of herbal medications for treatment of osteoarthritis and rheumatoid arthritis. *Medicines*, 2020, vol. 7, no. 11, pp. pp. 67. <http://dx.doi.org/10.3390/medicines7110067>
16. Mahmood S., Agrawal A. Utility of Herbal plants for treating osteoarthritis and rheumatoid arthritis. *Indian Journal of Integrative Medicine*, 2022, vol. 2, no. 2, pp. 30–34.

17. Aliev A.M., Murtazaliev R.A., Vagabova F.A., Guseynova Z.A., Ramazanov B.A., Islamova F.I., Alibegova A.N., Osmanov R.M., Mallaliev M.M., Mamaliev M.M., Radzhabov G.K., Anatov D.M., Busmann R.W. Ethnobotany of Dagestan. *Ethnobotany Research and Applications*, 2023, vol. 26, pp. 1–63. <http://dx.doi.org/10.32859/era.26.66.1-63>
18. Saha P., Biswas D., Roy P., Majumdar M., Roy S., Manna R., Chanda A., Das S., Mukherjee M., Dey S., Das D. Herbs Having Analgesic Activity. *Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology*, 2023, vol. 2, no. 5, pp. 1–11. <https://doi.org/10.55544/jrasb.2.5.1>
19. Samarrita S., Rasool M. Majoan chobchini reinstates PDL-1 expression and blocks dendritic cell-T helper 17 pathogenic axis in rheumatoid arthritis animal model. *Cytokine*, 2023, vol. 163, article id: 156136. <https://doi.org/10.1016/j.cyto.2023.156136>
20. Talukdar A.J., Mani R.K., Malli R., Shree S., Md F. The role of medicinal plants in rheumatoid arthritis-an updated review. *International Journal of Indigenous Herbs and Drugs*, 2023, vol. 8, no. 3, pp. 16–20. <https://doi.org/10.46956/ijihd.v8i3.459>
21. Delazar A., Sarker S.D., Nahar L., Jalali S.B., Modaresi M., Hamedeyazdan S., Babaei H., Javadzadeh Y., Asnaashari S., Moghadam S.B. Rhizomes of *Eremostachys laciniata*: isolation and structure elucidation of chemical constituents and a clinical trial on inflammatory diseases. *Advanced pharmaceutical bulletin*, 2013, vol. 3, no. 2, pp. 385–393. <http://dx.doi.org/10.5681/apb.2013.062>
22. Hariri A.S., Shayesteh S., Asgharian P., Chamanara M., Sadrzadeh-Afshar M.S. *Eremostachys binalodensis*, a potential therapeutic choice for gingival inflammatory wounds. *Journal of Contemporary Medical Sciences*, 2021, vol. 7, no 3, pp. 140–144. <https://doi.org/10.22317/jcms.v7i3.976>
23. Modaresi M., Delazar A., Nazemiyeh H., Fathi-Azad F., Smih E., Rahman M.M., Sarker S.D. Antibacterial iridoid glucosides from *Eremostachys laciniata*. *Phytotherapy Research*, 2009, vol. 23, no 1, pp. 99–103. <http://dx.doi.org/10.1002/ptr.2568>
24. Al Kateeb A.I., Tufekci E.F., Baloglu M.C., Zengin G., Yildiztugay E., Altunoglu Y.C. Antibacterial Effects of Phlomis molucelloides (Bunge) Salmaki. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 2022, vol. 25, no. Ek Sayı 2, pp. 402–410. <https://doi.org/10.18016/ksttarimdogan.v25i73358.107798>
25. Ahmadnia P., Nourafcan H., Assadi A., Faramarzi A. *Eremostachys laevigata* Bunge responses to different extraction solvents and methods: physiological, biochemical, and antibacterial attributes. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2024, vol. 52, no. 2, pp. 13232–13232. <https://doi.org/10.15835/nbha52213232>
26. Talebi M., Oskouie A.A., Mahboubi A., Khani M., Mojab F. Analysis of *Eremostachys hyoscyamoides* essential oil composition and assessing the antibacterial and antioxidant properties of the ethanol extract. *Heliyon*, 2024, vol. 10, no. 21. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38389>
27. Faryabi E., Noori M., Mousavi A., Jafari A. Chemotaxonomy of Wild Lamiaceae Taxa Based on Their Flavonoids Profiles. *Journal of Rangeland Science*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 269–282.
28. Star D.M., Salih S.H., Mustafa R.A., Fiaq K. Phytochemical Screening and Antifungal Efficacy of *Eremostachys laciniata* (L.) Bunge. Plant Extract and Potential healthy attribute of Active compounds. *Clinical Research and Clinical Reports*, 2024, vol. 3, no. 6. <http://dx.doi.org/10.31579/2835-8325/100>
29. Ramazanov Z.R., Zilfikarov I.N., Asadulaev Z.M., Guseynova Z.A. Anatomical structure of vegetative and generative organs of *Eremostachys laciniata* (Lamiaceae). *Botanical Journal of the North Caucasus*, 2024, no. 1, pp. 28–43. (In Russian) http://dx.doi.org/10.33580/24092444_2024_1_28
30. *Flora SSSR* [Flora of the USSR]. Moscow, Leningrad, USSR Academy of Sciences Publ., 1954, vol. 21, 704 p. (In Russian)
31. Grossheim A.A. *Flora Kavkaza* [Flora of the Caucasus]. Leningrad, USSR Academy of Sciences Publ., 1967, vol. 7, 894 p. (In Russian)
32. Zernov A.S., Abilova I.E. Osobennosti biomorfologii *Eremostachys laciniata* (L.) Bunge (Labiatae) [Features of biomorphology of *Eremostachys laciniata* (L.) Bunge (Labiatae)]. *Materialy X mezhdunarodnoj konferencii po ekologicheskoy morfologii rastenij, posvyashchennoj pamyati I.G. i T.I. Serebryakovyh, T. 2, Moskva, 27–30 noyabrya*, 2019. [Proceedings of the X International Conference on Ecological Morphology of Plants, dedicated to the memory of I.G. and T.I. Serebryakov, V. 2, Moscow, 27–30 November, 2019]. Moscow, 2019, pp. 3–8. (In Russian)
33. Murtazaliev R.A. *Konspekt flory Dagestana* [Conspectus of the flora of Dagestan]. Makhachkala, Epoha Publ., 2009, vol. 3, 304 p. (In Russian)
34. Khan S., Nisar M., Rehman W., Khan R., Nasir F. Anti-inflammatory study on crude methanol extract and different fractions of *Eremostachys laciniata*. *Pharmaceutical biology*, 2010, vol. 48, no. 10, pp. 1115–1118. <http://dx.doi.org/10.3109/13880200903517950>
35. Mohammad Pour S., Hakimi S., Delazar A., Javad Zadeh Y., Mallah F. *Eremostachys laciniata* as effective as rectal diclofenac suppository in cesarean section pain relief: A triple-blind controlled clinical trial. *Journal of Endometriosis and Pelvic Pain Disorders*, 2020, vol. 12, no. 1, pp. 26–34. <https://doi.org/10.1177/2284026519899010>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Ифрат Н. Зилфикаров осуществлял общее руководство исследованием. Зиярат А. Гусейнова и Гаджи К. Раджабов заготовили ЛРС, подготовили объект исследования и отредактировали статью. Татьяна К. Рязанова, Ильнур Х. Шайхутдинов и Тимур А. Ибрагимов провели анализ и отредактировали статью. Елена Ю. Бабаева отредактировала статью до подачи в редакцию. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Ifrat N. Zilfikarov undertook general supervision of the study. Ziyarat A. Guseynova and Gadzhi K. Radzhabov procured medicinal plant materials, prepared the research object and editing of the article. Tatyana K. Ryazanova, Ilnur Kh. Shaykhutdinov and Timur A. Ibragimov undertook analysis and editing of the article. Elena Yu. Babaeva edited the article before submitting it to the Editor. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Ифрат Н. Зилфикаров / Ifrat N. Zilfikarov <https://orcid.org/0000-0002-8638-9963>
 Зиярат А. Гусейнова / Ziyarat A. Guseynova <https://orcid.org/0000-0003-0355-4132>
 Татьяна К. Рязанова / Tatyana K. Ryazanova <https://orcid.org/0000-0002-4581-8610>
 Ильнур Х. Шайхутдинов / Ilnur Kh. Shaykhutdinov <https://orcid.org/0000-0001-8784-0464>
 Гаджи К. Раджабов / Gadzhi K. Radzhabov <https://orcid.org/0000-0001-9263-5684>
 Тимур А. Ибрагимов / Timur A. Ibragimov <https://orcid.org/0000-0001-9809-1120>
 Елена Ю. Бабаева / Elena Yu. Babaeva <https://orcid.org/0000-0002-4992-6926>



Основные направления трансформации биоразнообразия насекомых и клещей Каспийского региона в контексте изменения климата и их влияние на природно-очаговые заболевания

Гульнара М. Мухтарова¹, Гульнара М. Нахибашева^{1,2}, Азиза Г. Гасангаджиева¹, Зоя А. Федотова³

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

²Прикаспийский институт биологических ресурсов ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Санкт-Петербург-Пушкин, Россия

Контактное лицо

Гульнара М. Мухтарова, кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии и биоразнообразия Дагестанского государственного университета; 367000 Россия, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. Дахадаева, 21.
Тел. +79883008408
Email gulnara-muhtarova@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8232-2115>

Формат цитирования

Мухтарова Г.М., Нахибашева Г.М., Гасангаджиева А.Г., Федотова З.А. Основные направления трансформации биоразнообразия насекомых и клещей Каспийского региона в контексте изменения климата и их влияние на природно-очаговые заболевания // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 77-87.
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-7

Получена 18 августа 2025 г.

Прошла рецензирование 14 октября 2025 г.

Принята 25 октября 2025 г.

Резюме

Цель: рассмотреть основные направления трансформации биоразнообразия насекомых и клещей Каспийского региона в контексте изменения климата и оценить их влияние на эпидемиологическую ситуацию по природно-очаговым заболеваниям.

В связи с глобальным изменением климата и повышением средних годовых температур в Каспийском регионе наблюдаются деструктивные изменения, которые влекут за собой биоэкологические, медико-биологические, социально-экономические последствия. Быстрые темпы изменения климата не позволяют запустить механизмы адаптации организмов и ведут к сокращению биоразнообразия, к нарушению структуры и устойчивости сообществ. В последние годы наблюдается резкое увеличение числа чужеродных видов насекомых и клещей, расширяющих свои ареалы и создающих новые популяции, в том числе на Юге России и Кавказе. Наблюдается изменение состава и структуры фауны, экологии фоновых видов, сокращение доли автохтонных видов, вытеснение оригинальных кавказских эндемиков, увеличение численности мигрантов и вредителей культурных растений. Биологические инвазии являются глобальной проблемой и представляют серьезную угрозу здоровью населения, так как происходит расширение ареалов кровососущих насекомых и клещей, которые могут быть природными резервуарами и переносчиками трансмиссивных заболеваний.

В связи с повышением средних годовых температур в Каспийском регионе наблюдается снижение биоразнообразия, изменение состава, структуры и устойчивости экосистем, выпадение редких и эндемичных видов, инвазии чужеродных видов и вредителей. При сохранении темпов изменения климата ожидается распространение переносчиков и возбудителей трансмиссивных инфекций и образование новых природных очагов заболеваний.

Ключевые слова

Каспийский, изменение климата, насекомые, клещи, переносчики, ареал, инвазии, природно-очаговые заболевания.

The main directions of transformation of the biodiversity of insects and ticks in the Caspian region in the context of climate change and their impact on natural focal diseases

Gulnara M. Mukhtarova¹, Gyulnara M. Nakhibasheva^{1,2}, Aziza G. Gasangadzhieva¹ and Zoya A. Fedotova³

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia

²Caspian Institute of Biological Research, Dagestan Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia

³All-Russian Institute for Plant Protection, Pushkin, Saint Petersburg, Russia

Principal contact

Gulnara M. Mukhtarova, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Department of Biology and Biodiversity, Dagestan State University; 21 Dakhadaeva St, Makhachkala, Russia 367000. Tel. +79883008408
Email gulnara-mukhtarova@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8232-2115>

How to cite this article

Mukhtarova G.M., Nakhibasheva G.M., Gasangadzhieva A.G., Fedotova Z.A. The main directions of transformation of the biodiversity of insects and ticks in the Caspian region in the context of climate change and their impact on natural focal diseases. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):77-87. (In Russ.)
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-7

Received 18 August 2025

Revised 14 October 2025

Accepted 25 October 2025

Abstract

The objective was to consider the main directions of transformation of the biodiversity of insects and ticks in the Caspian region in the context of climate change and to assess their impact on the epidemiological situation of natural focal diseases.

Due to global climate change and an increase in average annual temperatures, destructive changes are being observed in the Caspian region, which entail bioecological, biomedical, and socio-economic consequences. The rapid pace of climate change prevents the mechanisms of adaptation of organisms from being triggered and leads to a reduction in biodiversity, disruption of the structure and sustainability of communities. In recent years, there has been a sharp increase in the number of alien insect and tick species expanding their ranges and creating new populations, including in southern Russia and the Caucasus. There is a change in the composition and structure of the fauna, the ecology of background species, a decrease in the proportion of autochthonous species, the displacement of the original Caucasian endemics, and an increase in the number of migrants and pests of cultivated plants. Biological invasions are a global problem and pose a serious threat to public health, as there is an expansion of the ranges of blood-sucking insects and ticks, which can be natural reservoirs and vectors of vector-borne diseases.

Due to the increase in average annual temperatures in the Caspian region, there is a decrease in biodiversity, changes in the composition, structure and stability of ecosystems, loss of rare and endemic species, invasion of alien species and pests. If the pace of climate change continues, the spread of vectors and pathogens of vector-borne infections and the formation of new natural foci of diseases are expected.

Key Words

Caspian, climate change, insects, ticks, vectors, habitat, invasions, natural focal diseases.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее актуальной угрозой, стоящей сейчас перед человечеством, является глобальное изменение климата. Запускаются процессы, которые оказывают разрушающее влияние на всю биосферу Земли и приводят к нарушению баланса сил в экосистемах. Если рассматривать Каспийский регион, то отчетливо видно, что вектор и степень количественной и качественной изменчивости элементов сообществ носят разнонаправленный, неоднозначный характер и в большей степени зависят от физико-географических особенностей конкретной территории и параметров доминирующих факторов.

С повышением средних годовых температур на низменных территориях наблюдается опустынивание земель, уменьшение площадей плавней, обмеление, эвтрофирование и заболачивание озер, в предгорных районах – некоторое повышение влажности, во внутриворонных – остепнение и аридизация, в горных и высокогорных – таяние ледников, деградация земель, деградация горных лугов, изменение границы произрастания леса.

Например, З.В. Атаев и В.В. Братков [1], оценивая реакцию ландшафтов Дагестана на современные климатические изменения, отмечают, что если в равнинной части республики процессы протекают активнее и в целом совпадают с глобальными и региональными трендами, то в горной части влияние рельефа значительно осложняет общую картину. Особенно нестабильна высокогорная зона, где отмечены негативное влияние роста температуры на процессы оледенения, и выраженная тенденция сокращения количества осадков. При этом для предгорных ландшафтов характерно достоверное увеличение температуры в сочетании с повышением количества осадков, что наиболее ярко проявляется на верхней границе леса, расширении площадей древесно-кустарниковых комплексов, приозерных, прирусловых и пойменных заболоченностей, луж, воронок и канав [2].

Деструктивные изменения в различных ландшафтах и высотных поясах влекут за собой биоэкологические, медико-биологические, социально-экономические и иные последствия для всей территории Каспийского региона.

Целью работы явилось рассмотрение основных направлений трансформации биоразнообразия насекомых и клещей Каспийского региона в контексте изменения климата и оценка их влияния на эпидемиологическую ситуацию по природно-очаговым заболеваниям. В связи с этим решались следующие задачи: собрать всю возможную информацию по выбранной проблеме из научных трудов, публикаций в журналах, материалов конференций, Государственных архивов, ресурсов интернет, телевидения, а также собственных эмпирических наблюдений, полученных за период 1995 по 2025 годы, и провести комплексный анализ.

ОБСУЖДЕНИЕ

Одними из биоиндикаторов трансформации природных сообществ из-за изменения климатических условий являются беспозвоночные животные, в частности энтомофауна. Повышение средних температур приводит к затяжной осени, зимним оттепелям и ранней весне. Насекомые и клещи, в ускоренные сроки набрав

необходимую сумму эффективных температур, достигают своих термальных констант. Это оказывает непосредственное влияние на фенологические даты, темпы и сроки развития, смертность, миграционную активность, скорость онтогенеза и другие аспекты их жизнедеятельности.

Изучение вековой динамики регионального климата, микроклимата и изменения ареалов насекомых свидетельствует о том, что границы распространения более 40 видов, ранее относимых к «южным», сместились к северу, из зоны центральной степи в южную лесостепь на 300–400 км, т.е. с 48° с.ш. на 51° [3].

Если акцентировать внимание конкретно на биоте региона, то такие быстрые темпы трансформации климата не позволяют в полной мере запустить механизмы приспособления организмов и задействовать их адаптационный потенциал, что ведет к сокращению биоразнообразия, к нарушению структуры и устойчивости сообществ.

В литературе имеется много указаний на то, что экологически пластичные виды, благодаря активной вагильности и высоким темпам размножения, расширили свои нативные ареалы до поли-, мультирегиональных, и даже космополитных масштабов. Подобные процессы достаточно часто способствуют биологической инвазии, причем экспансия чужеродных видов, ведущих себя на новых территориях как вредители, представляет серьезную угрозу для местных энтомокомплексов, и особенно аборигенных видов [4–11].

В ряде работ, посвященных моделированию ареалов на основе климатических предикторов [12–15], отмечается, что в условиях наблюдаемого и прогнозируемого изменения климата, расширение ареалов вредителей сельскохозяйственных культур, а также переносчиков трансмиссивных заболеваний на территории России и сопредельных стран происходит преимущественно в северном и восточном направлении.

С.М. Семенов, И.О. Попов, В.В. Ясюкевич [14] на основе многолетних данных создали статистическую модель формирования климатогенной угрозы распространения опасных болезней человека переносимых клещом *Ixodes ricinus* (Linnaeus), которая возникает в случае, когда несколько лет подряд переменные, или прикладные климатические индексы одновременно выходят за пределы своих безопасных диапазонов.

В последние годы наблюдается резкое увеличение числа чужеродных видов насекомых, расширяющих свои ареалы и создающих новые популяции по всей Палеарктике. Биологические инвазии являются глобальной экологической проблемой, в том числе для Юга России и Кавказа. Например, по данным ряда авторов, сравнительно недавно в фауну Кавказского региона проникли такие виды насекомых как: *Statilia maculata* Thunberg, [16], *Harmonia axyridis* (Pallas) [17], *Asphondylia serpylli* Kieffer [18], *Aphytobius sphaerion* (Boheman) [19], *Monomorium pharaonis* (Linnaeus), *Cimex hemipterus* (Fabricius) [20], *Aproceros leucopoda* Takeuchi и *Cydalima perspectalis* (Walker) [21; 22].

В меняющихся погодных условиях в садовых ценозах Юга России и Краснодарского края наблюдаются инвазии новых видов вредителей, таких как: двуполосая огневка плодоярка, *Euzophera bigella* (Zeller), красная кровяная тля, *Eriosoma lanigerum* (Hausmann), коричнево-

мраморный клоп *Halyomorpha halys* Stål, яблонная стеклянница *Synanthedon myopaeformis* (Borkhausen), табачный трипс *Thrips tabaci* Lindeman, туранская щитовка, *Diaspidiotus prunorum* (Laing) [23–25]. Отмечается увеличение видового разнообразия вредителей, расширение области их распространения, смена доминирующих и второстепенных видов, смещение сроков развития и учащение эпизодов вспышек численности вредителей.

В связи с климатическими метаморфозами эврибионтные виды резко расширили области своего распространения и стали проникать на соседние, и даже отдаленные территории. В Каспийском регионе наблюдается увеличение численности аллохтонных мигрантов и вредителей культурных растений. Например, В.И. Щуров, А.С. Замотайлов, А.В. Щурова [26] отмечают, что кружевница дубовая *Corythucha arcuata* (Say), проникающая из Европы и повреждающая буковые, березовые растения, нигде в пределах ареала не проявляла такой миграционной активности, полифагии и вредоносности, как в Краснодарском крае.

Мониторинговые исследования фауны долгоносикообразных жуков полупустынь Северного Прикаспия за тридцатилетний период [27] указывают на явные изменения, происходящие в куркулиофауне региона. Отмечается, что основные направления преобразований под влиянием климатических изменений коснулись состава и структуры фауны, а также экологии фоновых видов: резко снизилось обилие специализированных фитофагов, большого разнообразия достигли многоядные виды, увеличилась доля степных мигрантов, угнетены ксерофильные элементы и прослеживаются заметные флуктуации численности.

Наблюдаются изменения в таксономических пропорциях комплексов жужелиц с доминированием видов, имеющих большой диапазон толерантности, фиксируются изменения сезонной динамики, проявление активного осеннего, позднего осеннего и даже зимнего периода жизни [28; 29].

В устойчивых климатических сообществах, длительное время развивающихся в относительно стабильных условиях, для эффективного использования энергии и вещества, основным эволюционным трендом является повышение специализации и использование узких экологических ниш. Эволюция идет непрерывно, но в спокойные периоды эволюции Земли экосистемы обретают наиболее сложную и многокомпонентную конфигурацию, это происходит за счет увеличения доли стенобионтных видов, специализированных к узким экологическим нишам. Сокращение обилия и численности стенобионтов свидетельствует о том, что планета сейчас находится в фазе активных изменений, носящих, к сожалению, негативный характер.

Энтомофауна Кавказа характеризуется богатством, самобытностью и оригинальностью, к примеру, в Дагестане, центрами таксономического разнообразия и очагами эндемизма являются внутригорные аридные котловины; немало эндемиков, в составе биот высокогорий, бархана Сарыкум, дельты Самура. В состав местных фаун входят виды с различной экологической валентностью. Среди современных эндемичных форм, как нео- так и палеоэндемиков, преобладают стенобионтные виды, ограниченные в своем распространении какими-либо географическими или экологическими барьерами.

Если рассматривать долгоносикообразных жуков,

то ареалы 14 видов ограничены небольшими локальными территориями и не выходят за пределы Дагестана: *Ceutorhynchus madinae* Korotyaev, *Melanobaris gulnarae* Korotyaev et Ismailova, *Otiorynchus avaricus* Davidian et Savitsky, *O. gamzatovi* Korotyaev et Davidian, *O. mikhaili* Davidian et Savitsky, *Pholicodes belousovi* Davidian, *Polydrusus obrieni* Korotyaev, Ismailova et Meleshko, *Pseudorchestes abdurakhmanovi* Korotyaev, *Ptochus avaricus* Ismailova, *P. daghestanicus* (Formanek), *P. davidiani* Ismailova, *P. gulnarae* Ismailova, *P. korotyaevi* Ismailova, *P. obrieni* Ismailova [30–33]. Изменения климата, инвазия чужеродных видов и вредителей, экспансия эврибионтных форм может вызвать деградацию сообществ, сокращение доли автохтонных видов, вытеснение и даже вымирание оригинальных кавказских эндемиков.

Недавно проведенный мета-анализ выявил сокращение численности насекомых примерно на 0,9 % в год [34], причем изменение климата – один из наиболее весомых факторов, сказывающихся на системах растение – опылитель. Кризис опыления чреват глобальными экологическими и продовольственными проблемами: сокращение численности опылителей может вызвать каскады вымирания в пищевых цепях, подрывая целостность экосистем [35], а также ухудшить глобальную ситуацию в области продовольственной безопасности [36]. Многолетние полевые исследования, проводимые ИЭУР ДГУ с конца 20 века, также выявили некоторую тенденцию снижения биомассы и численности насекомых в Дагестане, сокращения уловистости светоловушек, почвенных ловушек и энтомологического кошения.

Особую тревогу, в связи с потеплением, вызывает расширение ареалов и инвазия видов, являющихся переносчиками антропозоонозных заболеваний, представляющих угрозу здоровью населения. Обеспокоенность вызывает тот факт, что в пределах Каспийского региона обитает значительное число кровососущих насекомых и клещей, которые могут быть природными резервуарами и переносчиками трансмиссивных заболеваний. Факторы среды, создавая оптимальные условия для их жизнедеятельности, определяют распространение, интенсивность и степень проявления природного эпидемического очага.

Достоверно известно, что частота заражения инфекциями передающиеся кровососущими насекомыми и клещами, в первую очередь зависит от влияния природно-климатических факторов. Ряд зарубежных и отечественных исследователей отмечает, что наблюдаются сильные корреляционные связи числа случаев заболеваемости трансмиссивными болезнями с повышением температур конца зимы, ранней весны и поздней осени [37–44].

В последние годы, в связи с аридизацией степей Юга европейской части России, происходит расширение ареала клеща *Hyalomma marginatum* (Koch) в северном направлении, одновременно наблюдается увеличение эпизоотически активной территории природного очага конго-крымской геморрагической лихорадки, вовлечение в эпидемический процесс новых субъектов страны, появление случаев заражения на территориях, где они ранее не регистрировались [45; 46]. На территории Южного и Северо-Кавказского федеральных округов регистрируются множественные случаи заболевания конго-крымской геморрагической лихорадкой [39; 47; 48], причем важнейшим фактором, влияющим на

все стадии развития клеща является температура воздуха, которая воздействует на эмбриогенез, выживаемость личинок, начало периода активности, плотность популяций, количество инфицированных особей, а также численность клещей в следующем году [49–51].

По данным Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Республике Дагестан за 2025 год: «Об оперативной обстановке по инфекциям, передающимся клещами», в Дагестане на 25 июля 2025 года зарегистрировано пять случаев заболевания Крымской геморрагической лихорадкой и один случай инфицирования клещевым боррелиозом, причем наибольшее число укусов зафиксировано в Махачкале, Кизляре, Буйнакске, Хасавюрте, Хасавюртовском, Кизилюртовском, Кизлярском и Тарумовском районах [52].

По данным эпизоотологического мониторинга, проводимого с 2000 по 2018 гг. в Северном Прикаспии зарегистрирован резкий рост заболеваемости астраханской пятнистой лихорадкой и расширение ареала переносчика – клеща *Rhipicephalus pumilio* Schulze, 1935 [53].

В биоте Каспийского региона богато представлены кровососущие комары родов *Aedes* Meigen, *Anopheles* Meigen, *Culex* Linnaeus, *Culiseta* Felt, являющиеся переносчиками паразитарных, бактериальных и вирусных инфекций человека и животных [54].

Исторически эпидемические очаги малярии обуславливались природно-климатическими и социально-экономическими факторами. Обширные территории Прикаспийского региона были заняты озерами, плавнями и болотами, а периодические разливы Терека и других рек, после обильных осадков в горах, увеличивали заболоченность. Благоприятные местообитания для развития кровососущих комаров создавало строительство оросительных каналов, железных дорог, производство саманного кирпича, развитие прудовых хозяйств, интенсификация садоводства.

Анализ литературных источников указывает, что малярия в Дагестане имеет многовековую историю, за ней даже закрепилось название «кавказской местной болезни» [55]. В 1890 году от малярии умерли жители целого селения Белиджинского участка Дербентского района; время от времени, при неблагоприятном стечении обстоятельств болезнь проникала во внутривгорные и даже горные районы, например, 1900 г. отмечалось очень тяжелое течение малярии у жителей высокогорного Аварского округа [56].

Комплексные мероприятия по борьбе с малярией, проводимые в стране с сороковых годов прошлого века дали свои результаты, и в 1960 году в СССР была объявлена полная победа над малярией. Однако потепление климата, повышение числа генераций кровососущих насекомых, увеличение длительности сезона эффективной заражаемости, деструктивные процессы, происходящие в биоте региона, миграция населения из эндемичных местностей могут способствовать переходу потенциальных очагов в активные [57; 58].

В настоящее время на территории Каспийского региона выявлено семь видов малярийных комаров рода *Anopheles*, причем самым массовым видом является

A. maculipennis Meigen – наиболее злостный переносчик малярии. [59]. Радиус индивидуальной активности кровососущих двукрылых доходит до десятков километров, соответственно длительный теплый сезон, увеличение числа оптимальных микростадий для развития преимагинальных фаз, способствует расширению их ареала как в широтном, так в высотном диапазонах. Этому могут способствовать и современные природно-экономические условия Каспийского региона: территория изобилирует как естественными стациями оптимальными для гнуса, так и временными водоемами, оросительными каналами, водоемами для поливки риса, рисовыми чеками, прудовыми хозяйствами.

Л.Н. Потапова и Л.И. Скорик [60] отмечают, что в связи с глобальным изменением климата в Центральной Европе в популяциях малярийных комаров повышается доля эпидемиологически опасных самок и эффективных переносчиков малярии (*Anopheles atroparvus* Van Thiel – на 17,3 %, *An. maculipennis* Meigen – на 21 %), способных к кровососанию в зимнее время.

Н.В. Ермолова, Ю.С. Артюшина и Е.В. Лазаренко [61] за период с 2011 по 2021 годы зафиксировали резкое расширение ареала комаров *Aedes albopictus* (Skuse) в северном, восточном и северо-восточном направлении, активную и быструю экспансию вглубь территории Краснодарского края, Республики Адыгея, а также Кочубеевского и Новоалександровского районов Ставропольского края.

В конце сентября 2025 года в Дагестане прошли продолжительные обильные ливни. Города Махачкала, Каспийск и Избербаш оказались затоплены, движение было парализовано, на улицах образовались глубокие лужи, некоторые участки превратились в настоящие озера, которые создали благоприятную среду для развития комаров [62]. А через неделю пришла новая беда: началось нашествие тигровых комаров [63]. Ранее отмечалось, что Азиатский тигровый комар (*Aedes albopictus*) – это новый для региона вид, специалисты связывали его появление с изменением климата [64]. Управление Роспотребнадзора подготовило предложения в адрес глав муниципальных образований городов о необходимости проведения ларвицидных обработок подвалов жилых домов, заболоченных мест и территорий с целью снижения численности переносчиков [65].

Серьезную обеспокоенность вызывает эпидемиологическая ситуация по другой особо опасной трансмиссивной инфекции – лихорадке Западного Нила, которая в последнее время характеризующейся резким подъемом заболеваемости. В пробах от клещей и комаров, отобранных на юге европейской части России и Республике Дагестан, был выделен новый генотип вируса второго генотипа, имеющий, по всей видимости, африканское происхождение [66]. Природным резервуаром для возбудителя лихорадки Западного Нила являются птицы, которые дважды в год совершают миграционные перелеты через Каспийский регион с южных стран на север и обратно, а переносчиками – комары родов *Aedes*, *Anopheles*, *Culex*, а также иксодовые и аргасовые клещи. Интенсивность проявлений эпидемического процесса во многом определяется природно-климатическими условиями, действующими на численность переносчиков вируса Западного Нила. Установлено, что лимитирующим фактором лихорадки Западного Нила является температура воздуха, которая влияет не только на численность комаров и клещей, но и

на скорость репликации вируса [67; 68].

По прогнозам из-за расширения области распространения комаров, переносчиков лихорадки Западного Нила, территория нозоареала будет расширяться и к концу XXI века достигнет 62–64° с. ш. [12]. Ожидается значительное увеличение ареала в северном направлении и развитие новых эпидемических очагов на Европейской территории России.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно резюмировать, что в контексте изменений климата и повышения средних годовых температур биота планеты и в частности Каспийского региона находится в нестабильном состоянии. Наблюдается снижение биоразнообразия, изменение состава, структуры и устойчивости экосистем, выпадение редких и эндемичных видов, инвазия чужеродных видов и вредителей. Температура является основным фактором, лимитирующим распространение переносчиков и возбудителей трансмиссивных инфекций. При сохранении темпов изменения климата следует ожидать увеличение численности инфекционных и паразитарных заболеваний, расширение их ареала и образования новых природных очагов заболеваний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Атаев З.В., Братков В.В. Региональные ландшафтные особенности создания карбонового полигона в Республике Дагестан // Известия ДГПУ. Естественные и точные науки. 2022. Т. 16. N 1. С. 25–36. DOI: 10.31161/1995-0675-2022-16-1-25-36
- Братков В.В., Атаев З.В. Оценка влияния современных климатических условий на природно-территориальные комплексы Северо-Восточного Кавказа (по материалам дистанционного зондирования Земли) // Мониторинг. Наука и технологии. 2017. N 2 (31). С. 6–14. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2021-4-173-181>
- Присный А.В., Негин Е.В., Присный Ю.А. Вековая динамика регионального климата, микроклимат и изменение ареалов насекомых. 1. Температура и термопреферендум // Региональные геосистемы. 2013. N 3 (146).
- Аксененко Е.В., Корнев И.И., Будаева А.В., Кондратьева А.М. Синтез науки и образования в решении экологических проблем современности // Материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой Всемирному дню охраны окружающей среды. Воронеж, 3 июня 2022 года. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2022. С. 58–66.
- Голуб В.Б., Бережнова О.Н., Корнев И.И. Массовое размножение дубовой широколиственной моли (*Acrocercops bronniardella* F., Lepidoptera, Gracillariidae) в Воронежской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2009. N 187. С. 97–103.
- Корнев И.И., Аксёненко Е.В., Кондратьева А.М. Чужеродные и инвазионные виды насекомых в фауне Воронежской области // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2020. N 3 (50). С. 377–382.
- Справочник по чужеродным жесткокрылым европейской части России / Сост. М.Я. Орлова-Беньковская. Ливны: Издатель Мухаметов Г.В., 2019. URL: <https://www.zin.ru/Animalia/Coleoptera/Rus/invguide.htm> (дата обращения: 17.05.2025)
- Emets V.M. Detection of Ladybird *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) in Voronezhsky Reserve, Voronezh Oblast of Russia // Russian Journal of Biological Invasions. 2018. V. 9. N 2. P. 119–122.
- Golub V.B., Aksenenko E.V., Soboleva V.A., Kornev I.I. New Data on the Distribution of the Tropical Bed Bug *Cimex hemipterus* and the Western Conifer Seed Bug *Leptoglossus occidentalis* (Heteroptera: Cimicidae, Coreidae) in the European Part of Russia // Russian Journal of Biological Invasions. 2020. V. 11. N 2. P. 97–100. <https://doi.org/10.1134/S2075111720020046>
- Мусолин Д.Л., Саулич А.Х. Реакции насекомых на современное изменение климата: от физиологии и поведения до смещения ареалов // Энтомологическое обозрение. 2012. Т. 91. N 1. С. 3–35.
- Musolin D.L., Kirichenko N.I., Karpun N.N., Aksenenko E.V., Golub V.B., Kerchev I.A., Mandelshtam M.Y., Vasaitis R., Volkovitch M.G., Zhuravleva E.N., Selikhovkin A.V. Invasive Insect Pests of Forests and Urban Trees in Russia: Origin, Pathways, Damage and Management // Forests. 2022. V. 13. N 4. P. 521 (1–60) DOI: 10.3390/f13040521
- Ясюкевич В.В., Попов И.О., Титкина С.Н., Ясюкевич Н.В. Адвентивные виды *Aedes* на территории России – оценка риска новой биологической угрозы здоровью населения России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2017. Т. 28. N 3. С. 51–71. <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2017-3-51-71>
- Ясюкевич В.В., Попов И.О., Ясюкевич Н.В. Моделирование изменений нозоареала и зоны повышенного эпидемического риска лихорадки Западного Нила на территории России в условиях ожидаемого изменения климата // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2019. Т. 30. N 3-4. С. 28–37. <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2019-3-28-37>
- Ясюкевич В.В., Богданович А.Ю. Климатические предикторы для модельного описания климатических ареалов некоторых биологических видов и их изменений в условиях будущего климата // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. N 1. С. 117–137. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-1-117-137>
- Семенов С.М., Попов И.О., Ясюкевич В.В. Статистическая модель для оценки формирования климатогенных угроз по данным мониторинга климата // Метеорология и гидрология. 2020. N 5. С. 59–65.
- Shcherbakov E., Govorov V. *Statilia maculata* (Thunberg, 1784) – the first invasive praying mantis (Mantodea, Mantidae) in the fauna of Russia // International Journal of Entomology. 2020. V. 56. N 3. P. 189–202. <https://doi.org/10.1080/00379271.2020.1785941>
- Украинский А.С. Азиатская божья коровка *Harmonia axyridis* Pall. (Coleoptera, Coccinellidae) на Северном Кавказе // Евразийский энтомологический журнал. 2013. Т. 12. N 1. С. 35–38.
- Аникин В.В., Никельшпарг М.И. Первая находка в России галлицы-галлобразователя *Asphondylia serpylli* Kieffer (Diptera, Cecidomyiidae) с тимьяна *Thymus serpyllum* L. (Lamiaceae) // Бюллетень ботанического сада Саратовского государственного университета. 2017. Т. 15. N 4. С. 57–59. <https://doi.org/10.18500/1682-1637-2017-15-4-57-59>
- Arzanov Yu.G., Korotyaev B.A. *Aphytobius sphaerion* (Boheman, 1845), a new species to the fauna of Russia (Coleoptera: Curculionidae: Ceutorhynchinae) // Zoosystematica Rossica. 2013. V. 22. N 1. P. 80–81. <https://doi.org/10.31610/zsr/2013.22.1.80>
- Корнев И.И., Аксёненко Е.В., Кондратьева А.М. Чужеродные и инвазионные виды насекомых в фауне Воронежской области // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2020. N 3 (50). С. 377–382.
- Шуров В.И., Бондаренко А.С. Объекты государственного лесопатологического мониторинга на северо-западном Кавказе среди чужеродных видов насекомых в 2010–2015 годах // Биоразнообразие. Биоконсервация. Биомониторинг: Сборник материалов II Международной научно-практической конференции, посвящается 75-летию Адыгейского государственного университета, Майкоп, 14–16 октября 2015 года. – Майкоп: Адыгейский государственный университет. 2015. С. 89–94.
- Мартынов В.В., Никулина Т.В., Шохин И.В., Терсков Е.Н. Материалы к фауне инвазивных насекомых Предкавказья // Полевой журнал биолога. 2020. Т. 2. N 2. С. 99–122. <https://doi.org/10.18413/2658-3453-2020-2-2-99-122>
- Подгорная М.Е., Прах С.В., Якуба Г.В., Мищенко И.Г., Васильченко А.В. Современные тенденции формирования комплексов вредных организмов в агроценозах садовых культур на юге России // АгроФорум. 2022. N 5. С. 74–76.
- Подгорная М.Е., Васильченко А. В., Кашиц Ю.П. и др. Современное состояние энтомоценоза плодовых культур Краснодарского края // Научные труды Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия. 2021. Т. 31. С. 52–57. <https://doi.org/10.30679/2587-9847-2021-31-52-57>
- Подгорная М.Е., Кийк А.И., Кийк Д.А. Двуполосая огневка-

- плодожорка *Euzophera bigella* (Zell.) в плодовых насаждениях Краснодарского края // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2024. N 116. С. 116–122. <https://doi.org/10.21515/1999-1703-116-116-122>
26. Щуров В.И., Замотайлов А.С., Щурова А.В. Влияние климата и рельефа на популяции чужеродных видов насекомых-фитофагов (Insecta: Lepidoptera, Heteroptera) в горах северо-западного Кавказа // Биологическое разнообразие Кавказа и Юга России: Материалы XXII Международной научной конференции, Грозный, 04–06 ноября 2020 года. Махачкала: Типография Алеф, 2020. С. 399–408.
27. Хрулёва О.А., Чернов Ю.И., Коротяев Б.А., Питеркина Т.В. Жуки надсемейства Curculionoidea (Coleoptera) комплексной полупустыни в связи с изменением климата Северного Прикаспия // Зоологический журнал. 2011. Т. 90. N 3. С. 311–324.
28. Замотайлов А.С., Хомицкий Е.Е., Бондаренко А.С., Белый А.И. Многолетние изменения структурных характеристик карабидокомплекса (Coleoptera, Carabidae) Краснодарского края как реакция на глобальные изменения климата // Теория и практика адаптивной селекции растений (Жученковские чтения VI): Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции, Краснодар, 25 сентября 2020 года. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2021. С. 146–148.
29. Романкина М.Ю. Карабидофауна (Coleoptera, Carabidae) в центре Русской равнины // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т. 18. N 6–2. С. 3212–3215.
30. Абдурахманов Г.М., Набоженко М.В., Абдурахманов А.Г., Теймуров А.А., Даудова М.Г., Магомедова М.З., Гасангаджиева А.Г., Гаджиев А.А., Иванушенко Ю.Ю., Клычева С.М. Сравнительный анализ состава наземной фауны и флоры Тетийской пустынно-степной области Палеарктики и биогеографические границы Кавказа Сообщение 1. Наземная фауна // Юг России: экология, развитие. 2017. Т. 12. N 2. С. 9–45. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2017-2-9-45>
31. Исмаилова М.Ш. Обзор долгоносиков рода *Ptochus* Schoenh. (Coleoptera, Curculionidae) фауны Дагестана // Энтомологическое обозрение. 2006. Т. 85. N 3. С. 602–617.
32. Коротяев Б.А., Исмаилова М.Ш., Мележко Ж.А. Новый вид рода *Polydrusus* Germ. (Coleoptera: Curculionidae) из Внутригорного Дагестана // Энтомологическое обозрение. 2003. Т. 82. N 2. С. 437–443.
33. Мухтарова А.М., Исмаилова М.Ш., Мухтарова Г.М., Нахибашева Г.М. Состав, особенности экологии, хронологии, генезиса жуков-долгоносиков рода *Ptochus* Schoenh. Дагестана и картирование их ареалов // Юг России: экология, развитие. 2017. Т. 12. N 4. С. 57–70. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2017-4-57-70>
34. Van Klink R., Bowler D.E., Gongalsky K.B., Swengel A.B., Gentile A., Chase J.M. Meta-analysis reveals declines in terrestrial but increases in freshwater insect abundances // Science. 2020. V. 368. N 6489. P. 417–420. doi: 10.1126/science.aax9931
35. Biesmeijer J.C., Roberts S.P., Reemer M., Ohlemüller R., Edwards M., Peeters T., Settele J. Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands // Science. 2006. V. 313. N 5785. P. 351–354. doi: 10.1126/science.1127863
36. Klein A.M., Vaissiere B.E., Cane J.H., Steffan-Dewenter I., Cunningham S.A., Kremen C., Tscharntke T. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops // Proceedings of the royal society B: biological sciences. 2007. V. 274. N 1608. P. 303–313. DOI: 10.1098/rspb.2006.3721
37. Государственный доклад о состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2019 году: М.: Роспотребнадзор, 2020. 299 с. URL: <https://rpnkrov.ru/documents/gosregdoklad/publications/gosudarstvennyy-doklad-RF-2019.pdf?ysclid=mieb8b019y666583874> (дата обращения: 25.07.2025)
38. Филип Л.В., Бякова О.В. Роль комаров в возникновении антропоознозов // Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями. 2019. N 20. С. 469–474. DOI: 10.31016/978-5-9902340-8-6.2019.20.469-474
39. Дубянский В.М., Прислегина Д.А., Куличенко А.Н. Риск-ориентированная модель прогнозирования эпидемиологической ситуации по Крымской геморрагической лихорадке (на примере Ставропольского края) // Анализ риска здоровью. 2018. N 1. С. 13–21.
40. Прислегина Д.А., Малецкая О.В., Дубянский В.М., Таран Т.В., Платонов А.Е. Кleshchevye трансмиссивные инфекции на Юге России: современная эпидемиологическая ситуация, новый подход к построению прогнозных и объясняющих моделей заболеваемости (на примере Астраханской риккетсиозной и Крымской геморрагической лихорадки) // Инфекция и иммунитет. 2023. Т. 13. N 3. С. 535–548. <http://dx.doi.org/10.15789/2220-7619-TBI-2036>
41. Ansari H., Shahbaz B., Izadi S., Zeinali M., Tabatabaee S.M., Mahmoodi M., Holakouie Naieni K., Mansournia M.A. Crimean-Congo hemorrhagic fever and its relationship with climate factors in southeast Iran: a 13-year experience // Journal of infection in developing countries. 2014. V. 8. N 6. P. 749–757. <https://doi.org/10.3855/jidc.4020>
42. Mostafavi E., Chinikar S., Bokaei S., Haghdoust A. Temporal modeling of Crimean-Congo hemorrhagic fever in eastern Iran // International journal of infectious diseases. 2013. V. 17. N 7. P. 524–528. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2013.01.010>
43. Keyel A.C., Elson Timm O., Backenson P.B., Prussing C., Quinones S., McDonough K.A., Vuille M., Conn J.E., Armstrong P.M., Andreadis T.G., Kramer L.D. Seasonal temperatures and hydrological conditions improve the prediction of West Nile virus infection rates in Culex mosquitoes and human case counts in New York and Connecticut // PLoS One. 2019. V. 14. N 6. P. 1–32. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217854>
44. Hauser G., Rais O., Moran Cadenas F., Gonseth Y., Bouzelboudjen M., Gern L. Influence of climatic factors on Ixodes ricinus nymph abundance and phenology over a long-term monthly observation in Switzerland (2000–2014) // Parasites and Vectors. 2018. V. 11. N 1. Article number: 289. <https://doi.org/10.1186/s13071-018-2876-7>
45. Малецкая О.В., Таран Т.В., Прислегина Д.А., Дубянский В.М., Волынкина А.С., Семенко О.В., Василенко Н.Ф., Тарасов М.А., Цапко Н.В. Природно-очаговые вирусные лихорадки на юге европейской части России. Крымская геморрагическая лихорадка // Проблемы особо опасных инфекций. 2020. N 4. С. 75–80. <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2020-4-75-80>
46. Прислегина Д.А., Дубянский В.М., Платонов А.Е., Малецкая О.В. Влияние природно-климатических факторов на эпидемиологическую ситуацию по природно-очаговым инфекциям // Инфекция и иммунитет. 2021. Т. 11. N 5. С. 820–836. doi: 10.15789/2220-7619-EOT-1631
47. Куличенко А.Н., Прислегина Д.А. Крымская геморрагическая лихорадка: климатические предпосылки изменений активности природного очага на юге Российской Федерации // Инфекция и иммунитет. 2019. Т. 9. N 1. С. 162–172. doi: 10.15789/2220-7619-2019-1-162-172
48. Шестопалов Н.В., Шашина Н.И., Германт О.М., Пакскина Н.Д., Царенко В.А., Веригина Е.В., Бойко Л.С. Информационное письмо «Природно-очаговые инфекции, возбудителей которых передают иксодовые клещи, и их неспецифическая профилактика в Российской Федерации (по состоянию на 01.01.2019)» // Дезинфекционное дело. 2019. N 1 (107). С. 37–44.
49. Тохов Ю.М. Иксодовые клещи города Ставрополя и его окрестностей // Проблемы особо опасных инфекций на Северном Кавказе: материалы региональной научно-практической конференции с международным участием, посвящённой 70-летию со дня основания ФКУЗ Ставропольский противочумный институт Роспотребнадзора, Ставрополь, 17 мая 2022 года. Ставрополь: ООО «Экспо-Медиа», 2022. С. 133–134.
50. Трухачев В.И., Тохов Ю.М., Луцук С.Н., Дылев А.А., Толоконников В.П., Дьяченко Ю.В. Распространение и экологическая характеристика иксодовых клещей рода *Hyalomma* в экосистемах Ставропольского края // Юг России: экология, развитие. 2016. Т. 11. N 2. С. 59–69. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2016-2-59-69>
51. Yigit G.K. An example of tick-Crimean Congo hemorrhagic fever (CCHF) in Eflani district, Karabuk, Turkey // Scientific Research and Essays. 2011. V. 6. N 11. P. 2395–2402. <https://doi.org/10.5897/SRE11.574>
52. «Об оперативной обстановке по инфекциям, передающимся клещами» // Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по

- Республике Дагестан: офиц. сайт: Новости. 26 июля 2025. URL: https://05.rospotrebnadzor.ru/content/1/22462/?sphrase_id=144269 / (дата обращения: 05.08.2025)
53. Углева С.В. Астраханская пятнистая лихорадка: динамика, территориальное распределение, структура заболеваемости // Прикаспийский вестник медицины и фармации. 2020. N 1. С. 43–50. DOI: 10.17021/2020.1.1.43.50
54. Гаджиева С.С., Джамалутдинова Т.М., Джаруллаев Д.Г. Особенности биологии кровососущих комаров семейства Culicidae в условиях Дагестана // Естественные и технические науки. 2021. N 8 (159). С. 72–77. <https://doi.org/10.25633/ETN.2021.08.07>
55. Адухов М.Д. Малярия в Дагестане в конце XIX века // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Общественные и гуманитарные науки. 2008. N 4 (5). С. 5–8.
56. Центральный Государственный архив Республики Дагестан (ЦГАРД). Ф. 32. Медицинская часть при канцелярии военного губернатора Дагестанской области. Управление медицинской частью гражданского ведомства на Кавказе, г. Темир-Хан-Шура. О. 3. Материалы по судебно-медицинским исследованиям и борьбе с эпидемическими заболеваниями. Д. 8. Л. 241–258. URL: <http://www.cgard.ru/af/index.php?act=fund&fund=32> (дата обращения: 15.12.2024)
57. Токмалаев А.К., Баранова А.М., Малеев В.В. Эпидемиологические и клинические аспекты диагностики, лечения и профилактики завозных случаев малярии в Российской Федерации // Терапевтический архив. 2020. N 11. С. 77–81. DOI: 10.26442/00403660.2020.11.000812
58. Van de Vurst P., Escobar L.E. Climate change and infectious disease: a review of evidence and research trends // Infect Dis Poverty. 2023. V. 12(1). N 51. P. 1–10. <https://doi.org/10.1186/s40249-023-01102-2>
59. Гаджиева С.С. Эпидемиологическое значение малярийных комаров (Culicidae, Anopheles) в Дагестане // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2021. Т. 15. N 2. С. 14–19. <https://doi.org/10.31161/1995-0675-2021-15-2-14-19>
60. Потапова Л.Н., Скорик Л.И. Влияние глобального изменения климата на видовой состав, численность кровососущих двукрылых и клещей – переносчиков трансмиссивных паразитарных, арбовирусных заболеваний на территории Харьковской области // Актуальная инфектология. 2018. Т. 6. N 5. С. 284–285.
61. Ермолова Н.В., Артюшина Ю.С., Лазаренко Е.В. Находки кровососущих комаров *Aedes (Stegomyia) albopictus* (Skuse, 1895) на территории Краснодарского и Ставропольского краев Российской Федерации // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: Актуальные проблемы биоразнообразия. Ульяновск, 27 марта, 2024. Чебоксары: изд-во «Среда», 2024. С. 67–70.
62. Машины плыли: несколько городов в Дагестане подтопило из-за мощных ливней // РЕН ТВ (Российский федеральный телеканал): новости в России: 20 сентября 2025, 10:21. URL: <https://ren.tv/news/v-rossii/1368263-livni-zatopili-ulitsy-i-paralizovali-dvizhenie-v-dagestane> (дата обращения: 26.09.2025)
63. Азиатский тигровый комар распространился в Дагестане // РГВК Дагестан (Республиканская государственная вещательная компания Дагестана: Главная: Новости: Общество: 11.10.2025 URL: <https://rgvktv.ru/news/obshchestvo/aziatskiy-tigrovyy-komar-rasprostranilsya-v-dagestane11102025/> (дата обращения: 12.10.2025).
64. Роспотребнадзор: «В Дагестане появились опасные переносчики заболеваний – тигровые комары» // РИА «Дагестан» (Республиканское информационное агентство Дагестана): 18 мар. 2025, 15:01. URL: https://riadagestan.ru/news/society/rospotrebnadzor_v_dagestane_poyavilis_opasnye_perenoschiki_zabolevaniy_tigrovy_e_komary/ (дата обращения: 20.05.2025)
65. Азиатский тигровый комар стал дагестанским // Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Республике Дагестан: офиц. сайт. Главная: Новости. 19 марта 2025 URL: https://05.rospotrebnadzor.ru/content/1/22250/?sphrase_id=144462 (дата обращения: 20.05.2025)
66. Путинцева Е.В., Удовиченко С.К., Никитин Д.Н., Бородай Н.В., Шпак И.М., Фомина В.К., Несговорова А.В., Батулин А.А., Молчанова Е.В., Прилепская Д.Р., Пименова Е.В., Викторов Д.В., Топорков А.В. Лихорадка Западного Нила: результаты мониторинга за возбудителем в 2021 г. в Российской Федерации, прогноз заболеваемости на 2022 г. // Проблемы особо опасных инфекций. 2022. N 1. С. 43–53. <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2022-1-43-53>
67. Платонов А.Е. Влияние погодных условий на эпидемиологию трансмиссивных инфекций (на примере лихорадки Западного Нила в России) // Вестник ПАМН. 2006. N 2. С. 25–29.
68. Platonov A.E., Fedorova M.V., Karan L.S., Shopenskaya T.A., Platonova O.V., Zhuravlev V.I. Epidemiology of West Nile infection in Volgograd, Russia, in relation to climate change and mosquito (Diptera: Culicidae) bionomics // Parasitology Research. 2008. V. 103. N 1. P. 45–53. <https://doi.org/10.1007/s00436-008-1050-0>

REFERENCES

- Ataev Z.V., Bratkov V.V. Regional landscape features of creating a carbon polygon in the Republic of Dagestan. *Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact Sciences*, 2022, vol. 16, no. 1, pp. 25–36. (In Russian) DOI: 10.31161/1995-0675-2022-16-1-25-36
- Bratkov V.V., Ataev Z.V. Assessment of the Impact of Modern Climate Conditions on the Natural and Territorial Complexes of the North-Eastern Caucasus (Based on Remote Sensing Data). *Monitoring. Science and technology*, 2017, no. 2 (31), pp. 6–14. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2021-4-173-181>
- Prisnyy A.V., Negin E.V., Prisnyy Yu.A. Centennial dynamics of regional climate, microclimate, and changes in insect habitats. 1. Temperature and thermopreferendum. Regional'nye geosistemy [Regional geosystems]. 2013, no. 3 (146). (In Russian)
- Aksenenko E.V., Kornev I.I., Budaeva A.V., Kondrat'eva A.M. Sintez nauki i obrazovaniya v reshenii ekologicheskikh problem sovremennosti [The synthesis of science and education in solving modern environmental problems]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi Vsemirnomu dnyu okhrany okruzhayushchei sredy. Voronezh, 3 iyunya 2022 goda* [Materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to World Environment Day. Voronezh, June 3, 2022]. Voronezh, Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, 2022, pp. 58–66. (In Russian)
- Golub V.B., Berezhnova O.N., Kornev I.I. Mass reproduction of the oak broad-mining moth (*Acrocercops brongniardella* F., Lepidoptera, Gracillariidae) in the Voronezh region. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy]. 2009, no. 187, pp. 97–103. (In Russian)
- Kornev I.I., Aksyonenko E.V., Kondrat'eva A.M. Alien and invasive insect species in the fauna of the Voronezh Region. Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika [Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice]. 2020, no. 3 (50), pp. 377–382. (In Russian)
- Spravochnik po chuzherodnym zhestkokrylym evropeiskoi chasti Rossii* [Guide to Alien Coleoptera of the European Part of Russia]. Livny, Muhametov G.V. Publ., 2019. (In Russian) Available at: <https://www.zin.ru/Animalia/Coleoptera/Rus/invguide.htm> (accessed 17.05.2025)
- Emets V.M. Detection of Ladybird *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) in Voronezhsky Reserve, Voronezh Oblast of Russia. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 119–122.
- Golub V.B., Aksenenko E.V., Soboleva V.A., Kornev I.I. New Data on the Distribution of the Tropical Bed Bug *Cimex hemipterus* and the Western Conifer Seed Bug *Leptoglossus occidentalis* (Heteroptera: Cimicidae, Coreidae) in the European Part of Russia. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 97–100.
- Musolin D.L., Saulich A.H. Insect Responses to Modern Climate Change: From Physiology and Behavior to Dispersal. *Entomologicheskoe obozrenie* [Entomological review]. 2012, vol. 91, no. 1, pp. 3–35. (In Russian)
- Musolin D.L., Kirichenko N.I., Karpun N.N., Aksenenko E.V., Golub V.B., Kerchev I.A., Mandelshtam M.Y., Vasaitis R., Volkovitch M.G., Zhuravleva E.N., Selikhovkin A.V. Invasive Insect Pests of Forests and Urban Trees in Russia: Origin, Pathways, Damage and Management. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 4, pp. 521 (1–60). DOI: 10.3390/f13040521
- Yasyukevich V.V., Popov I.O., Titkina S.N., Yasyukevich N.V. Adventive *Aedes* species in Russia: assessing the risk of a new biological

- threat to Russian public health. *Problems of environmental monitoring and ecosystem modeling*, 2017, vol. 28, no. 3, pp. 51–71. (In Russian) <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2017-3-51-71>
13. Yasyukevich V.V., Popov I.O., Yasyukevich N.V. Modeling of changes in the nozoarela and the area of increased epidemic risk of West Nile fever in Russia in the context of expected climate change. *Problems of environmental monitoring and ecosystem modeling*, 2019, vol. 30, no. 3–4, pp. 28–37. (In Russian) <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2019-3-28-37>
14. Yasyukevich V.V., Bogdanovich A.Yu. Climate predictors for modeling the climate ranges of certain biological species and their changes under future climate conditions. *Fundamental and Applied Climatology*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 117–137. (In Russian) <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-1-117-137>
15. Semenov S.M., Popov I.O., Yasyukevich V.V. Statistical model for assessing the formation of climate-related threats based on climate monitoring data. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology]. 2020, no. 5, pp. 59–65. (In Russian)
16. Shcherbakov E., Govorov V. *Statilia maculata* (Thunberg, 1784) – the first invasive praying mantis (Mantodea, Mantidae) in the fauna of Russia. *International Journal of Entomology*, 2020, vol. 56, no. 3, pp. 189–202. <https://doi.org/10.1080/00379271.2020.1785941>
17. Ukrainskiy A.S. Asian ladybug *Harmonia axyridis* pall. (Coleoptera, Coccinellidae) in the North Caucasus. *Evratskiy entomologicheskij zhurnal* [Euroasian Entomological Journal]. 2013, vol. 12, no. 1. pp. 35–38. (In Russian)
18. Anikin V.V., Nikel'shparg M.I. The first discovery in Russia of the gall-forming gall *Asphondylia serpylli* Kieffer (Diptera, Cecidomyiidae) from thyme *Thymus serpyllum* L. (Lamiaceae). *Bulletin of the Botanical Garden of Saratov State University*, 2017, vol. 15, no. 4, pp. 57–59. (In Russian) <https://doi.org/10.18500/1682-1637-2017-15-4-57-59>
19. Arzanov Yu.G., Korotyaev B.A. *Aphytobius sphaerion* (Boheman, 1845), a new species to the fauna of Russia (Coleoptera: Curculionidae: Ceutorhynchinae). *Zoosystematica Rossica*, 2013, vol. 22, no. 1, pp. 80–81. <https://doi.org/10.31610/zsr/2013.22.1.80>
20. Kornev I.I., Aksyonenko E.V., Kondrat'eva A.M. Alien and invasive insect species in the fauna of the Voronezh Region. Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika [Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice]. 2020, no. 3 (50), pp. 377–382. (In Russian)
21. Shchurov V.I., Bondarenko A.S. Ob"ekty gosudarstvennogo lesopatologicheskogo monitoringa na severo-zapadnom Kavkaze sredi chuzherodnykh vidov nasekomykh v 2010–2015 godakh [Objects of state forest pathology monitoring in the North-Western Caucasus among alien insect species in 2010–2015]. *Bioraznoobrazie. Biokonservatsiya. Biomonitoring: Sbornik materialov II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchaetsya 75-letiyu Adygeiskogo gosudarstvennogo universiteta, Maikop, 14–16 oktyabrya 2015 goda* [Biodiversity. Bioconservation. Biomonitoring: Collection of materials of the II International Scientific and Practical Conference dedicated to the 75th anniversary of Adygea State University, Maikop, October 14–16, 2015]. *Majkop, Adygeyskiy gosudarstvenniy universitet Publ.*, 2015, pp. 89–94. (In Russian)
22. Martynov V.V., Nikulina T.V., Shohin I.V., Terskov E.N. Materials on the Fauna of Invasive Insects in the Ciscaucasia. *Biologist's field journal*, 2020, vol. 2, no. 2, pp. 99–122. (In Russian) <https://doi.org/10.18413/2658-3453-2020-2-2-99-122>
23. Podgornaya M.E., Prah S.V., Yakuba G.V., Mishchenko I.G., Vasil'chenko A.V. Modern trends in the formation of pest complexes in the agrocenoses of garden crops in the south of Russia. *AgroForum*. 2022, no. 5, pp. 74–76. (In Russian)
24. Podgornaya M.E., Vasilchenko A.V., Kashchits Yu.P. [et al.] Current state of entomocenosis of fruit crops in the Krasnodar Territory. *Scientific works of the North Caucasus Federal Scientific Center for Horticulture, Viticulture, and Winemaking*, 2021, vol. 31, pp. 52–57. (In Russian) <https://doi.org/10.30679/2587-9847-2021-31-52-57>
25. Podgornaya M.E., Kiek A.I., Kiek D.A. Two-striped codling moth *Euzophera bigella* (Zell.) in fruit plantations of the Krasnodar Territory. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*, 2024, no. 116, pp. 116–122. (In Russian) <https://doi.org/10.21515/1999-1703-116-116-122>
26. Shchurov V.I., Zamotajlov A.S., Shchurova A.V. Vliyaniye klimata i rel'efa na populyatsii chuzherodnykh vidov nasekomykh-fitofagov (Insecta: Lepidoptera, Heteroptera) v gorakh severo-zapadnogo Kavkaza [The influence of climate and topography on the populations of alien phytophagous insect species (Insecta: Lepidoptera, Heteroptera) in the mountains of the North-Western Caucasus]. *Biologicheskoe raznoobrazie Kavkaza i Yuga Rossii: Materialy XXII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Grozny, 04–06 noyabrya 2020 goda* [Biological Diversity of the Caucasus and Southern Russia: Materials of the XXII international scientific conference, Grozny, November 04–06, 2020]. *Makhachkala, Alef Publ.*, 2020, pp. 399–408. (In Russian)
27. Hrulyova O.A., Chernov Yu.I., Korotyaev B.A., Piterkina T.V. Beetles of the Curculionoidea superfamily (Coleoptera) of the complex semi-desert in connection with climate change in the Northern Caspian region. *Zoologicheskij zhurnal* [Zoological Journal]. 2011, vol. 90, no. 3, pp. 311–324. (In Russian)
28. Zamotajlov A.S., Khomickiy E.E., Bondarenko A.S., Belyy A.I. Mnogoletnie izmeneniya strukturnykh kharakteristik karabidokompleksa (Coleoptera, Carabidae) Krasnodarskogo kraya kak reaktsiya na global'nye izmeneniya klimata [Long-term changes in the structural characteristics of the Carabid complex (Coleoptera, Carabidae) in the Krasnodar Territory as a reaction to global climate change]. *Teoriya i praktika adaptivnoi selektsii rastenii (Zhuchenkovskie chteniya VI): Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Krasnodar, 25 sentyabrya 2020 goda* [Theory and Practice of Adaptive Plant Breeding (Zhuchenkov Readings VI): Collection of Scientific Papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference, Krasnodar, September 25, 2020]. *Krasnodar, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin Publ.*, 2021, pp. 146–148. (In Russian)
29. Romankina M.Yu. Carabid fauna (Coleoptera, Carabidae) in the center of the Russian Plain. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tambov University. Series: Natural and Technical Sciences]. 2013, vol. 18, no. 6–2, pp. 3212–3215. (In Russian)
30. Abdurakhmanov G.M., Nabozhenko M.V., Abdurakhmanov A.G., Teymurov A.A., Daudova M.G., Magomedova M.Z., Gasangadzhieva A.G., Gadzhiev A.A., Ivanushenko Yu.Yu., Klycheva S.M. Comparative Analysis of the Terrestrial Fauna and Flora of the Tethyan Desert-Steppe Region of the Palearctic and the Biogeographical Borders of the Caucasus. Part 1. Terrestrial Fauna. *South of Russia: ecology, development*, 2017, vol. 12, no. 2, pp. 9–45. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2017-2-9-45>
31. Ismailova M.Sh. Review of weevils of the genus *Ptochus* Schoenh. (Coleoptera, Curculionidae) of the fauna of Dagestan. *Entomologicheskoe obozrenie* [Entomological review]. 2006, vol. 85, no. 3, pp. 602–617. (In Russian)
32. Korotyaev B.A., Ismailova M.Sh., Melezhko Zh.A. A new species of the genus *Polydrusus* Germ. (Coleoptera: Curculionidae) from Inland Dagestan. *Entomologicheskoe obozrenie* [Entomological review]. 2003, vol. 82, no. 2, pp. 437–443. (In Russian)
33. Mukhtarova A.M., Ismailova M.Sh., Mukhtarova G.M., Nakhibasheva G.M. Composition, ecology, chorology, and genesis of the weevils of the genus *Ptochus* Schoenh. in Dagestan, and mapping of their habitats. *South of Russia: ecology, development*, 2017, vol. 12 no. 4, pp. 57–70. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2017-4-57-70>
34. Van Klink R., Bowler D.E., Gongalsky K.B., Swengel A.B., Gentile A., Chase J.M. Meta-analysis reveals declines in terrestrial but increases in freshwater insect abundances. *Science*, 2020, vol. 368, no. 6489, pp. 417–420. doi: 10.1126/science.aax9931
35. Biesmeijer J.C., Roberts S.P., Reemer M., Ohlemüller R., Edwards M., Peeters T., Settele J. Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands. *Science*, 2006, vol. 313, no. 5785, pp. 351–354. doi: 10.1126/science.1127863
36. Klein A.M., Vaissiere B.E., Cane J.H., Steffan-Dewenter I., Cunningham S.A., Kremen C., Tscharntke, T. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the royal society B: biological sciences*, 2007, vol. 274, no. 1608, pp. 303–313. DOI: 10.1098/rspb.2006.3721
37. State Report on the State of Sanitary and Epidemiological Welfare of the Population in the Russian Federation in 2019. Moscow, Rospotrebnadzor, 2020. 299 p. (In Russian) Available at: <https://rpnkirov.ru/documents/gosregdoklad/publications/gosudarstv>

- enny-doklad-RF-2019.pdf?ysclid=mieb8b019y666583874 (accessed 25.07.2025)
38. Pilip L.V., Byakova O.V. The Role of Mosquitoes in the Occurrence of Anthrospoooses. *Theory and practice of combating parasitic diseases*, 2019, no. 20, pp. 469–474. (In Russian) DOI: 10.31016/978-5-9902340-8-6.2019.20.469-474
 39. Dubyanskiy V.M., Prislegina D.A., Kulichenko A.N. Risk-oriented model for predicting the epidemiological situation of Crimean hemorrhagic fever (using the example of the Stavropol Territory). *Analiz riska zdorov'yu* [Health risk analysis]. 2018, no. 1, pp. 13–21. (In Russian)
 40. Prislegina D.A., Maletskaya O.V., Dubyanskiy V.M., Taran T.V., Platonov A.E. Tick-borne infections in the South of Russia: modern epidemiological situation, new approach to create “forecasting” and “explaining” morbidity models (in Astrakhan rickettsiosis fever and Crimean-congo hemorrhagic fever). *Russian Journal of Infection and Immunity*, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 535–548. (In Russian) <http://dx.doi.org/10.15789/2220-7619-TBI-2036>
 41. Ansari H., Shahbaz B., Izadi S., Zeinali M., Tabatabaee S.M., Mahmoodi M., Holakouie Naieni K., Mansournia M.A. Crimean-Congo hemorrhagic fever and its relationship with climate factors in southeast Iran: a 13-year experience. *Journal of infection in developing countries*, 2014, vol. 8, no. 6, pp. 749–757. <https://doi.org/10.3855/jidc.4020>
 42. Mostafavi E., Chinikar S., Bokaei S., Haghdoust A. Temporal modeling of Crimean-Congo hemorrhagic fever in eastern Iran. *International journal of infectious diseases*, 2013, vol. 17, no. 7, pp. 524–528. PMID: 23474177. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2013.01.010>
 43. Keyel A.C., Elison Timm O., Backenson P.B., Prussing C., Quinones S., McDonough K.A., Vuille M., Conn J.E., Armstrong P.M., Andreadis T.G., Kramer L.D. Seasonal temperatures and hydrological conditions improve the prediction of West Nile virus infection rates in Culex mosquitoes and human case counts in New York and Connecticut. *PLoS One*, 2019, vol. 14, no. 6, pp. 1–32. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217854>
 44. Hauser G., Rais O., Moran Cadenas F., Gonseth Y., Bouzelboudjen M., Gern L. Influence of climatic factors on Ixodes ricinus nymph abundance and phenology over a long-term monthly observation in Switzerland (2000–2014). *Parasites and Vectors*, 2018, vol. 11, no. 1: 289, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1186/s13071-018-2876-7>
 45. Maletskaya O.V., Taran T.V., Prislegina D.A., Dubyanskiy V.M., Volynkina A.S., Semenko O.V., Vasilenko N.F., Tarasov M.A., Tsapko N.V. Natural-Focal Viral Fevers in the South of the European Part of Russia. Crimean-Congo Hemorrhagic Fever. *Problemy Osobo Opasnykh Infektsii* [Problems of Particularly Dangerous Infections]. 2020, no. 4, pp. 75–80. (In Russian) <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2020-4-75-80>
 46. Prislegina D.A., Dubyanskiy V.M., Platonov A.E., Maletskaya O.V. Effect of the natural and climatic factors on epidemiological situation related to natural focal infections. *Infektsiya i immunitet* [Russian Journal of Infection and Immunity]. 2021, vol. 11, no. 5, pp. 820–836. (In Russian) doi: 10.15789/2220-7619-EOT-1631
 47. Kulichenko A.N., Prislegina D.A. Climatic prerequisites for changing activity in the natural crimean-congo hemorrhagic fever focus in the south of the Russian Federation. *Infektsiya i immunitet* [Russian Journal of Infection and Immunity]. 2019, vol. 9, no. 1, pp. 162–172. (In Russian) doi: 10.15789/2220-7619-2019-1-162-172
 48. Shestopalov N.V., Shashina N.I., Germant O.M., Paksina N.D., Tsarenko V.A., Verigina E.V., Boyko L.S. Information letter «natural and focal infections, which agents are passed by Ixodic ticks, and their nonspecific preventive measures in the Russian Federation (according to 01.01.2019)». *Dezinfektsionnoe delo* [Disinfection affairs]. 2019, no. 1 (107), pp. 37–44. (In Russian)
 49. Tohov Yu.M. Iksodovye kleshchi goroda Stavropol'ya i ego okrestnostei [Ixodic ticks in the city of Stavropol and its surroundings]. *Problemy osobo opasnykh infektsii na Severnom Kavkaze: materialy regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 70-letiyu so dnya osnovaniya FKUZ Stavropol'skii protivochumnyi institut Rospotrebnadzora, Stavropol', 17 maya 2022 goda* [Problems of Particularly Dangerous Infections in the North Caucasus: Proceedings of the Regional Scientific and Practical Conference with International Participation Dedicated to the 70th Anniversary of the Stavropol Anti-Plague Institute of Rospotrebnadzor, Stavropol, May 17, 2022]. Stavropol, Expo-Media LLC, 2022, pp. 133–134. (In Russian)
 50. Trukhachev V.I., Tokhov Yu.M., Lutsuk S.N., Dylev A.A., Tolokonnikov V.P., Dyachenko Yu.V. Distribution And Ecological Characteristics Of Hyalomma Ixodid Ticks In The Ecosystems Of The Stavropol Region. *South of Russia: ecology, development. South of Russia: ecology, development*, 2016, vol. 11, no. 2, pp. 59–69. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2016-2-59-69>
 51. Yigit G.K. An example of tick-Crimean Congo hemorrhagic fever (CCHF) in Eflani district, Karabuk, Turkey. *Scientific Research and Essays*, 2011, vol. 6, no. 11, pp. 2395–2402. <https://doi.org/10.5897/SRE11.574>
 52. «Ob operativnoi obstanovke po infektsiyam, peredayushchimsya kleshchami». *Upravlenie Federal'noi sluzhby po nadzoru v sfere zashchity prav potrebitel'ei i blagopoluchiya cheloveka po Respublike Dagestan: ofits. sait: Novosti. 26 iyulya 2025* [«On the operational situation for tick-borne infections». Department of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare in the Republic of Dagestan: official website. Website, News. July 26, 2025]. (In Russian)
 53. Ugleva S.V. Astrakhan Spotty Fever: Dynamics, Territorial Distribution, And Morbidity Structure. *Caspian Bulletin of Medicine and Pharmacy*, 2020, no. 1, pp. 43–50. (In Russian) DOI: 10.17021/2020.1.1.43.50
 54. Gadzhieva S.S., Dzhamalutdinova T.M., Charulaev D.G. Peculiarities of the biology of blood-sucking mosquitoes of the Culicidae family in the conditions of Dagestan. *Natural and technical sciences*, 2021, no. 8 (159), pp. 72–77. (In Russian) <https://doi.org/10.25633/ETN.2021.08.07>
 55. Aduhov M.D. Malaria in Dagestan in the late 19th century. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Obshchestvennyye i humanitarnyye nauki*. [Dagestan State Pedagogical University Journal. Social sciences and humanities]. 2008, no. 4 (5), pp. 5–8. (In Russian)
 56. Central State Archive of the Republic of Dagestan (CSARD). Fund 32. Medical Department of the Office of the Military Governor of the Dagestan Region. Department of Medical Affairs of the Civil Department in the Caucasus, Temir-Khan-Shura. Inventory 3. Materials on Forensic Medical Research and the Control of Epidemic Diseases. Case 8. pp. 241–258 (In Russian)
 57. Tokmalaev A.K., Baranova A.M., Maleev V.V. Epidemiological and clinical aspects of diagnosis, treatment and prophylaxis of imported malaria cases in Russian Federation. *Therapeutic archive*, 2020, no. 11, pp. 77–81. (In Russian) DOI: 10.26442/00403660.2020.11.000812
 58. Van de Vuurst P., Escobar L.E. Climate change and infectious disease: a review of evidence and research trends. *Infect Dis Poverty*, 2023, vol. 12(1), no. 51, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1186/s40249-023-01102-2>
 59. Gadzhieva S.S. Epidemiological significance of malaria mosquitoes (Culicidae, Anopheles) in Dagestan. *Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact Sciences*, 2021, vol. 15, no. 2, pp. 14–19. (In Russian) <https://doi.org/10.31161/1995-0675-2021-15-2-14-19>
 60. Potapova L.N., Skorik L.I. The impact of global climate change on the species composition and abundance of blood-sucking Diptera and ticks that carry transmissible parasitic and arboviral diseases in the Kharkiv region. *Aktual'naya infektologiya* [Actual infectology]. 2018, vol. 6, no. 5, pp. 284–285. (In Russian)
 61. Ermolova N.V., Artyushina Yu.S., Lazarenko E.V. Nakhodki krovososushchikh komarov Aedes (Stegomyia) albopictus (Skuse, 1895) na territorii Krasnodarskogo i Stavropol'skogo kraev Rossiiskoi Federatsii [Discoveries of blood-sucking mosquitoes Aedes (Stegomyia) albopictus (Skuse, 1895) in the Krasnodar and Stavropol Territories of the Russian Federation]. *Materialy II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem: Aktual'nye problemy bioraznoobraziya. Ulyanovsk, 27 marta, 2024* [Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation: Current Issues in Biodiversity. Ulyanovsk, March 27, 2024]. Cheboksary, Sreda Publ., 2024, pp. 67–70. (In Russian)
 62. Mashiny plyli: neskol'ko gorodov v Dagestane podtopilo iz-za moshchnykh livney. *REN TV (Rossiyskiy federal'nyi telekanal): novosti v Rossii* [Cars were floating: several cities in Dagestan were flooded due to heavy rains. REN TV (Russian federal TV channel): news in Russia]: September 20th 2025, 10:21. (In Russian) URL: <https://ren.tv/news/v-rossii/1368263-livni-zatopili-ulitsy-i-paralizovali-dvizhenie-v-dagestane>

(accessed 26.09.2025)

63. *Aziatskiy tigrovyy komar rasprostranilsya v Dagestane*. RGVK Dagestan (Respublikanskaya gosudarstvennaya veshchatel'naya kompaniya Dagestana: Glavnaya: Novosti: Obshchestvo [The Asian tiger mosquito has spread in Dagestan. RGVK Dagestan (Republican State Broadcasting Company of Dagestan: Home: News: Society): 11.10.2025 (In Russian) URL: <https://rgvktv.ru/news/obshchestvo/aziatskiy-tigrovyy-komar-rasprostranilsya-v-dagestane11102025/> (accessed 12.10.2025).
64. *Rospotrebnadzor: «V Dagestane poyavilis' opasnye perenoschiki zabolevaniy – tigrovye komary»*. RIA «Dagestan» (Respublikanskoe informacionnoe agenstvo Dagestana) [Rospotrebnadzor: «Dangerous disease vectors – tiger mosquitoes have appeared in Dagestan». RIA Dagestan (Dagestan Republican News Agency): 2025, 18th of March, 15:01. (In Russian)
65. *Aziatskiy tigrovyy komar stal dagestanskim. Upravlenie Federal'noj sluzhby po nadzoru v sfere zashchity prav potrebitel'ey i blagopoluchiya cheloveka po Respublike Dagestan: ofic. sayt. Glavnaya: Novosti. 19 marta 2025* [The Asian tiger mosquito has become Dagestani. Department of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare in the Republic of Dagestan: official

- website. Website. Home: News. March 19th, 2025] (In Russian) URL: https://05.rospotrebnadzor.ru/content/1/22250/?sphrase_id=144462 (accessed 20.05.2025)
66. Putintseva E.V., Udovichenko S.K., Nikitin D.N., Borodai N.V., Shpak I.M., Fomina V.K., Nesgovorova A.V., Baturin A.A., Molchanova E.V., Prilepskaya D.R., Pimenova E.V., Viktorov D.V., Toporkov A.V. West Nile Fever: Results of Monitoring over the Causative Agent in the Russian Federation in 2021, the Incidence Forecast for 2022. *Problems of Particularly Dangerous Infections*, 2022, no. 1, pp. 43–53. (In Russian) <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2022-1-43-53>
67. Platonov A.E. The impact of weather conditions on the epidemiology of vector-borne infections (using the example of West Nile fever in Russia). *Vestnik Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk* [Annals of the Russian academy of medical sciences]. 2006, no. 2, pp. 25–29. (In Russian)
68. Platonov A.E., Fedorova M.V., Karan L.S., Shopenskaya T.A., Platonova O.V., Zhuravlev V.I. Epidemiology of West Nile infection in Volgograd, Russia, in relation to climate change and mosquito (Diptera: Culicidae) bionomics. *Parasitology Research*, 2008, vol. 103, no. 1, pp. 45–53. <https://doi.org/10.1007/s00436-008-1050-0>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Гульнара М. Мухтарова, Гульнара М. Нахшибашева, Азиза Г. Гасангаджиева и Зоя А. Федотова собрали теоретический материал из научных трудов, публикаций, Государственных архивов, интернет ресурсов, телевидения, собственных эмпирических наблюдений, и провели комплексный анализ полученных данных. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Gulnara M. Mukhtarova, Gulnara M. Nakhibasheva, Aziza G. Gasangadzhieva and Zoya A. Fedotova participated in collecting theoretical material from scientific works, publications, State Archives, Internet resources, television, and our own empirical observations and conducted a comprehensive analysis of the data obtained. All authors equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Гульнара М. Мухтарова / Gulnara M. Mukhtarova <https://orcid.org/0000-0001-8232-2115>
 Гульнара М. Нахшибашева / Gulnara M. Nakhibasheva <https://orcid.org/0000-0001-9356-9033>
 Азиза Г. Гасангаджиева / Aziza G. Gasangadzhieva <https://orcid.org/0000-0002-7210-6571>
 Зоя А. Федотова / Zoya A. Fedotova <https://orcid.org/0000-0002-8888-5979>

Оригинальная статья / Original article

УДК: 639.128.3 (639.1.034: 470.63)

DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-8



Особенности гнездовой биологии и успешность размножения сойки *Garrulus glandarius krynicki* в Ставропольском крае

Любовь В. Маловичко¹, Александр Г. Резанов², Валерия В. Кузнецова¹, Андрей А. Резанов²¹Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия²Московский городской педагогический университет, Москва, Россия

Контактное лицо

Валерия В. Кузнецова, ассистент, кафедра зоологии, Институт зоотехнии и биологии Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550 Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 44, к. 16.

Тел. +79204962465

Email v.v.kuznetsova@rgau-msha.ruORCID <https://orcid.org/0000-0002-4327-2458>

Формат цитирования

Маловичко Л.В., Резанов А.Г., Кузнецова В.В., Резанов А.А. Особенности гнездовой биологии и успешность размножения сойки *Garrulus glandarius krynicki* в Ставропольском крае // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 88-101. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-8

Получена 9 марта 2025 г.

Прошла рецензирование 17 мая 2025 г.

Принята 25 октября 2025 г.

Резюме

Цель: оценка успешности гнездования сойки на территории Ставропольского края, а также выявление факторов, влияющих на репродуктивную экологию вида в условиях региона.

Наблюдения за успешностью размножения сойки проводились в гнездовой период 2010–2023 гг. на севере, востоке и северо-востоке Ставропольского края – на модельных участках. За весь период наших исследований было осмотрено 27 гнезд сойки. Из них 7 гнезд были контрольными, за которыми вели тщательные наблюдения.

В статье приведены данные об особенностях размещения гнезд сойки с учетом высоты, расположения гнезд в кроне деревьев и встречаемость гнезд на различных видах деревьев. Описаны основные метрические показатели и строительные материалы гнезд. Произведены замеры биометрических показателей яиц сойки и выявлены их корреляции.

В ходе исследования гнездового поведения соек установлено, что чаще всего гнезда расположены на доминирующих породах деревьев. Среди предпочитаемых видов деревьев можно выделить яблоню, тополь, ясень, дуб и гледичию. Средняя величина кладки сойки варьируется от 3 до 7 яиц. Для сойки, обитающей в Ставропольском крае, характерно значительное варьирование массы яиц в различных гнездах. Одним из ключевых факторов, определяющих успешность размножения этого вида, является выбор места для обустройства гнезда.

Ключевые слова

Сойка, гнездовая биология, успешность гнездования сойки, биология сойки, репродуктивная экология, особенности гнездования.

Features of nesting biology and nesting success of the jay *Garrulus glandarius krynicki* in Stavropol Territory

Lyubov V. Malovichko¹, Alexander G. Rezanov², Valeria V. Kuznetsova¹ and Andrey A. Rezanov²

¹Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

²Moscow City University, Moscow, Russia

Principal contact

Valeria V. Kuznetsova, Assistant, Department of Zoology, K.A. Timiryazev Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy; 44/16 Timiryazevskaya St, Moscow, Russia 127550. Tel. +79204962465
Email v.v.kuznetsova@rgau-msha.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4327-2458>

How to cite this article

Malovichko L.V., Rezanov A.G., Kuznetsova V.V., Rezanov A.A. Features of nesting biology and nesting success of the jay *Garrulus glandarius krynicki* in Stavropol Territory. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):88-101. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-8

Received 9 March 2025

Revised 17 May 2025

Accepted 25 October 2025

Abstract

The objective was the assessment of the nesting success of jays in the Stavropol Territory and to identify factors influencing the reproductive ecology of the species in the region.

Observations of the breeding success of the jay were carried out during the nesting period of 2010–2023 in the north, east and northeast of the Stavropol Territory, within modelled areas. Over the entire period of our research, 27 jay nests were examined. Of these, 7 nests were control nests, which were carefully observed.

The article presents data on the features of the placement of jay nests, taking into account the height, the location of nests in the crown of trees and the occurrence of nests on different types of trees. The text describes the main metric indicators and building materials of nests. We measured the biometric indicators of jay eggs and identified their correlations.

During the study of nesting behavior of jays, it was found that nests are located most often on dominant tree species. Among the preferred tree species, can be singled out apple, poplar, ash, oak and honey locust. The average jay clutch size varies from 3 to 7 eggs. The jay living in the Stavropol Territory is characterised by significant variation in the weight of eggs in different nests. One of the main factors determining the success of reproduction of this species is the choice of location for constructing a nest.

Key Words

Jay, breeding biology, jay breeding success, jay biology, reproductive ecology, nesting characteristics.

ВВЕДЕНИЕ

Обыкновенная сойка *Garrulus glandarius* занимает значительную часть евразийского ареала, включая Палеарктическую и Индо-Малайскую зоогеографические области — от Северо-Западной Африки, Пиренейского полуострова и Скандинавии до Сахалина и Юго-Восточной Азии. В пределах вида обычно выделяют порядка 32–35 подвидов, относящихся к 8 группам. Кавказская, или черноголовая сойка *Garrulus glandarius krynicki* Kaleniczenko, 1839, встречается на Кавказе и в северо-восточной Турции [1; 2]. Изучение кавказской сойки осуществлено нами на комплексной основе — помимо гнездовой биологии, мы исследовали различные аспекты трофической биологии кавказской сойки, что нашло своё отражение в соответствующих публикациях [3–6].

В данной публикации рассматривается гнездовая биология кавказской сойки (рис. 1). Сойки кавказского подвида гнездятся в лесах разного типа (хвойные, лиственные), предпочитая дубовые, а также мелколесье, пойменные леса, сады и рощи. Обычно сойка гнездится ближе к лесным опушкам [7]. Как известно, сойка в Центральном Предкавказье — оседлая птица. В местах гнездования сойки появляются сформированными парами довольно рано — в первой

половине марта [8], чему в значительной степени способствуют благоприятные климатические условия [9]. Основные места обитания сойки на территории Ставропольского края сосредоточены в лесной и степной зонах. Часто представители вида селятся в лесополосах, в садах и скверах, в парках [10]. Расстояние от гнезда или края посадки для сойки не является определяющим, поскольку птицы одинаково охотно селятся на удалении до 850 м от окраины массива. Главным условием для строительства гнезда является густая облиственность деревьев.

Цель исследования состоит в оценке эффективности успешности гнездования сойки на территории Ставропольского края, а также выявление факторов, влияющих на репродуктивную экологию вида в условиях региона.

Основные задачи исследования:

- 1) проанализировать выбор мест для гнезда и его структуру;
- 2) проанализировать величину кладок и биометрические показатели яиц;
- 3) оценить успешность размножения;
- 4) выявить влияние факторов смертности на успешность гнездования.



Рисунок 1. Сойка, кавказский подвид (*Garrulus glandarius krynicki* Kaleniczenko, 1839)

Фото Маловичко Л.В., г. Ставрополь, осень 2023 г.

Figure 1. Jay, Caucasian subspecies (*Garrulus glandarius krynicki* Kaleniczenko, 1839)

Photo by Malovichko L.V., Stavropol, autumn 2023

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наблюдения за успешностью размножения сойки проводили в гнездовой период 2010–2023 гг. на севере, востоке и северо-востоке Ставропольского края — на модельных участках: в заказнике «Иргаклинский» Степновского района, в с. Донское Труновского района, ст. Галюгаевская Курского района, пос. Рыздвянный и с. Московское Изобильненского района, г. Ставрополь,

с. Татарка, пос. Демино, с. Темнолесская и х. Липовчанский Шпаковского района, х. Средний Александровского района, пос. Новокумский Левокумского района, с. Киевка Апанасенковского района, с. Летняя ставка и пос. Ясный Туркменского района (рис. 2). В работе использованы неопубликованные данные за 2010–2024 г., авторства Л.В. Маловичко.

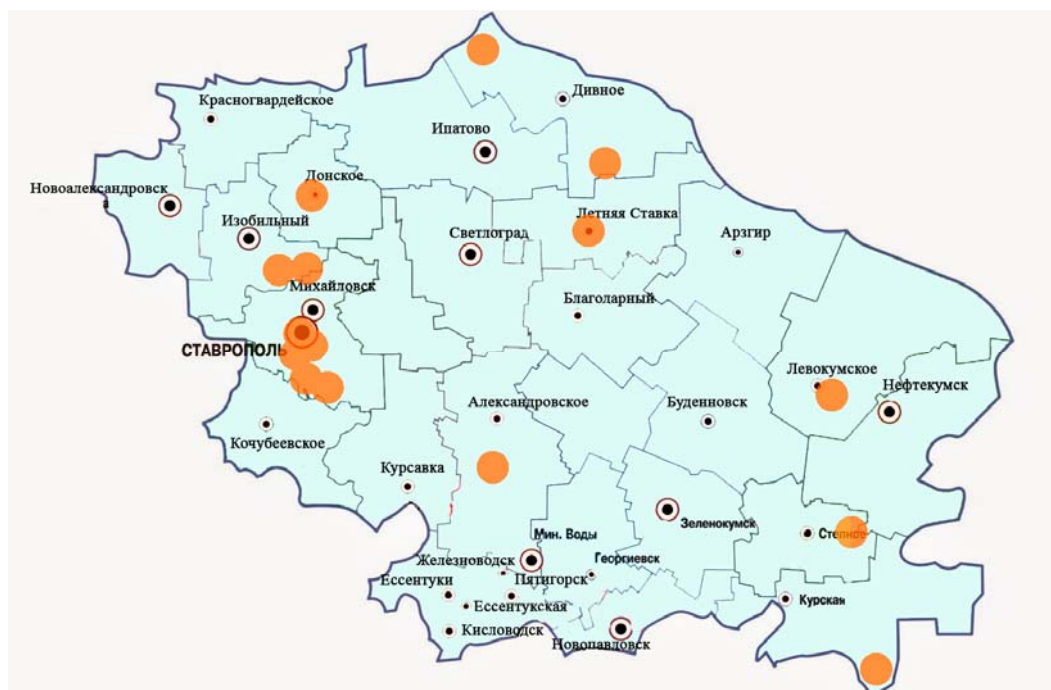


Рисунок 2. Места наблюдения за гнездами сойки

Figure 2. Locations of observation of jay nests

Гнезда проверяли один раз в неделю с периода откладки яиц, вылупления и вылета молодых. Определяли эмбриональную смертность – (% неразвившихся эмбрионов от общего числа отложенных яиц); постэмбриональную смертность – (% погибших птенцов от общего числа вылупившихся); общую смертность – (% неразвившихся яиц и погибших птенцов от общего числа отложенных яиц).

Замеры яиц и гнезд производились при помощи электронных весов и штангенциркуля. После изучения содержимое гнезд возвращено на место без повреждений. Разорение гнезда через некоторое время осмотра зафиксировано один раз и с другими гнездами не повторялось. Гнездо сойки с кладкой из трех яиц разорила серая ворона (*Corvus cornix*). Причина разорения гнезда достоверно не известна.

Статистическая обработка произведена посредством пакета программ Microsoft Office.

Гнездовые биотопы сойки в Ставропольском крае

На Ставрополье степное лесоразведение начато в конце XIX в., однако до середины XX столетия эти работы не носили массового характера. Подавляющее большинство защитных лесонасаждений в крае создано после принятия в 1948 г. «Сталинского плана преобразования природы». Особенно много лесополос было посажено с конца 1960-х г., когда наблюдались сильные пыльные бури [11].

Различают три конструкции полезащитных лесных полос: плотные, ажурные и продуваемые [12]. Две последние в значении для птиц принципиальных отличий не имеют, в связи с чем, мы их объединили в один тип.

Плотные лесные полосы обладают сомкнутым вертикальным профилем. Такие насаждения создавались преимущественно на начальной стадии системы полезащитных лесных полос. Их возраст в большинстве случаев от 50 до 70 лет. Состав древостоя в них разнообразен. Главными лесобразующими

породами являются робиния ложноакаиевая (*Robinia pseudoacacia*), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior*), гледичия обыкновенная, (*Gleditsia triacanthos*), дуб черешчатый (*Quercus robur*), вяз мелколистный (*Ulmus parvifolia*). Сопутствующими и второстепенными породами являются абрикос (*Prunus armeniaca*), груша (*Pyrus*), яблоня (*Malus*), алыча (*Prunus cerasifera* Ehrh.), лох узколистный (*Elaeagnus angustifolia*), клены татарский (*Acer tataricum*) и полевой (*Acer campestre*), тополь черный (*Populus nigra*), шелковица (*Morus*). Много в них и кустарников, которые создают высокую степень скрытости: скумпия (*Cotinus coggygria*), карагана древовидная (*Caragana arborescens*), аморфа кустарниковая (*Amorpha fruticosa*), смородина золотистая (*Ribes aureum*), жимолость татарская (*Lonicera tatarica*), шиповник (*Rosa*) [13–15].

В полосных насаждениях важнейшее значение для птиц имеет их ширина, ярусность древостоев и наличие кустарникового подлеска, что исследовано наиболее подробно [16; 17].

Расстояние между рядами в старовозрастных лесополосах сужено до 2,5–3,0 м, что усиливает их плотность. Ширина таких полос, как правило, превышает 20 м. В тяжелых почвенно-климатических условиях старые лесные полосы усыхают. Древостои содержат много фауных и сухих деревьев, интенсивный опад которых вызывает снижение полноты до 0,4–0,5 [14].

Средневозрастные и молодые полезащитные лесные полосы (посадки 1970-х и последующих годов) в большинстве своем имеют ажурную конструкцию, когда небольшие равномерные просветы имеются по всему их вертикальному профилю. С ними сходны продуваемые лесополосы. Для последней конструкции полос характерно наличие больших просветов в нижней части стволов. Ажурные и продуваемые лесные полосы наилучшим образом обеспечивают защиту полей от ветровой эрозии и суховея, что дало им приоритет в современных лесомелиоративных программах [13–15].

В последние 50 лет полезащитные лесные полосы создаются именно таких конструкций. Эти лесные насаждения состоят, как правило, из одной или двух древесных пород: преобладают белоакациевые и вязовые насаждения. Реже в состав таких лесополос

вводятся ясень, гледичия, абрикос и алыча. Подлесок в ажурных и продуваемых лесных полосах отсутствует (рис. 3). Лишь иногда встречаются редкие кусты смородины золотистой или шиповника [14].



Рисунок 3. Участок лесополосы без подлеска. Фото Кузнецовой В.В., Ставропольский край, Март 2024

Figure 3. Section of forest belt without undergrowth. Photo by Kuznetsova V.V., Stavropol Territory, March 2024

Ширина современных полезащитных лесополос составляет 12 м. В полупустынной и степной зонах это трехрядные полосы с промежутками между ними 4 м. На остальной территории края преобладают четырехрядные лесополосы. Ряды в них расположены через 3 м. Полнота средневозрастных насаждений этого типа в аридных зонах от 0,5 до 0,7, в центральных и южных районах 0,7–0,8. Молодняки более густые – в среднем их полнота 0,7–0,8 [14; 15].

Кроме полезащитных лесополос в крае на сельскохозяйственных и неудобных землях произрастает немало других искусственных защитных лесонасаждений. Такие насаждения высажены вокруг сел, полевых станов, ферм, у водоемов. Посадки выполнены на эрозионно-опасных песчаных участках в восточных районах. Особенность защитных лесных насаждений в отличие от предыдущей категории насаждений заключается, прежде всего, в конфигурации – контуры в форме многоугольника, ширина больше чем у лесополос. Лесообразующие породы, как правило, те же, но в их составе больше кустарников. В остальном же средние таксационные характеристики близки к таковым у лесных полос [18; 19].

В Ставропольском крае, площадь лесного фонда составляет 1,7 % от всей территории региона, из, которых площадь, непосредственно покрытая лесами, составляет 88,9 тыс. га [20]. Леса, несмотря на малый процент площади, который они занимают, являются обычным местом обитания вида, поскольку в лесных регионах, сойка является стенобионтным дендрофилом [21]. Основу древесной растительности лесов Ставрополя (рис. 4) составляют граб кавказский (*Carpinus betulus*),

ясень обыкновенный, клены остролистный (*Acer platanoides*) и полевой, дуб черешчатый и бук восточный (*Fagus orientalis*) [22].

В последние десятилетия сойки проявляют тенденцию к расширению района обитания активно заселяя, не только обычные для соек дубравы, но и различные городские биотопы [23]. В большинстве регионов сойки предпочитают гнездиться в полезащитных лесополосах, а также в городских парках и иных озелененных участках населённых пунктов [24].

Гнезда соек (n=70) обнаружены в шести биотопах из восьми возможных. Среди всех биотопов наиболее привлекательным для гнездования кавказской сойки являются лесополосы (21,4 %), леса и природные парки (18,6 %), парки, кладбища и заброшенные сады (17,1 %). Меньшее количество гнезд обнаружено на территориях приусадебных участков и хуторов (15,7 %), скверов, бульваров, озелененных улиц и дворов (15,7 %), а также действующих садов (11,4 %) (рис. 5). В таких биотопах как поля и кошары гнезд не обнаружено.

Особенности расположения гнёзд сойки

На гнездовом участке сойки из года в год гнездятся в одном и том же районе. Довольно часто занимает одно и то же гнездо несколько лет подряд.

К постройке гнезда приступают уже в середине марта. Гнезда располагаются на разных видах деревьев, но чаще всего на доминирующих породах. На долю лиственных пород приходится 89,9 %, на долю хвойных – 10,1 %. Из лиственных видов сойки выбирали дуб, каштан и грецкий орех (в сумме более 42 %), а также

плодово-ягодные породы (почти 29 %). По высоте гнездования: деревья верхнего яруса (59,4 %), кустарник и невысокие деревья (40,6 %). По видам деревьев предпочитали: яблоня (15,94 %), тополь

(13,04 %), ясень и дуб (по 8,7 %), гледичия (7,25 %). Всего же на Ставрополье отмечено 20 видов деревьев, на которых сойки строят гнезда (рис. 6).



Рисунок 4. Фрагмент Бештаугорского лесного массива. Фото Кузнецовой В.В., Ставропольский край, Сентябрь 2023
Figure 4. Part of the Beshtaugorsky forest massif. Photo by Kuznetsova V.V., Stavropol Territory, September 2023

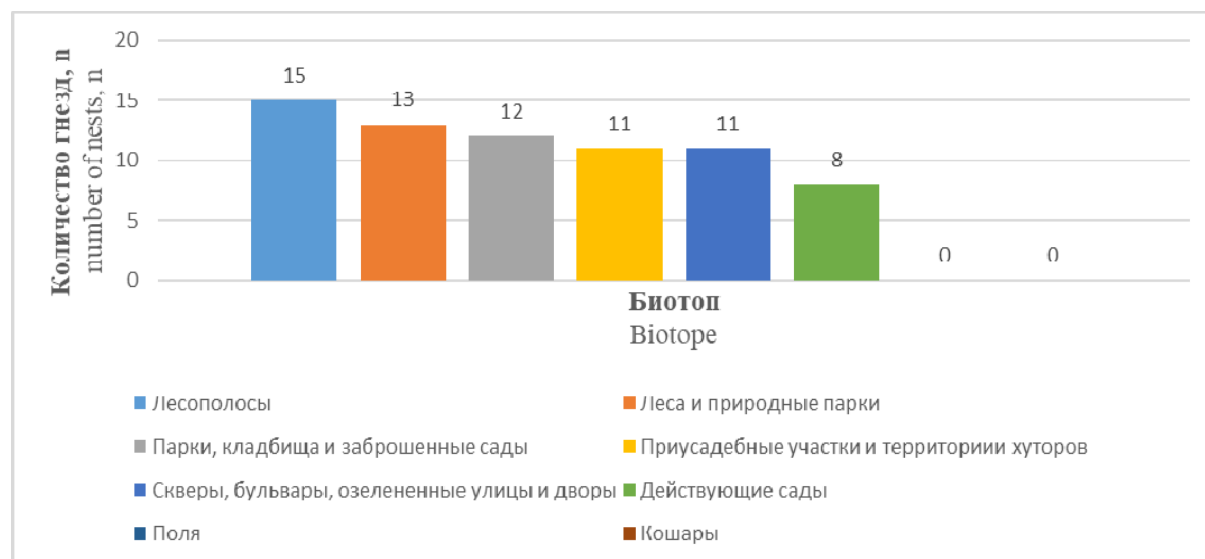


Рисунок 5. Предпочитаемые биотопы гнездования сойки. Ставропольский край 2010–2023
Figure 5. Preferred jay nesting habitats. Stavropol Territory, 2010–2023

В последние 10–15 лет в лесополосах и на улицах городов появилось множество омелы белой, в которых любит гнездиться сойка. Кусты омелы надежно скрывают гнездо и насиживающую самку [25].

Высота расположения гнезд сойки варьируется от 2,5–2,6 м (яблоня, туя) до 20 м (тополь) над землей и определяется характером станции и породой дерева. Расчётная средняя высота расположения гнезд на яблоне составила: $4,04 \pm 0,95$ м (Lim 2,5–6,0; SD = 0,96; Mediana = 3,6; P = 0,001; n = 11). Для тополя получены следующие результаты: $9,39 \pm 4,63$ м (Lim 6,6–20,0; SD = 4,22; Mediana = 7,9; P=0,001; n =9). Расчётная средняя высота гнезд над землёй (для всех видов деревьев) составила: $6,35 \pm 0,98$ м (Lim 2,5–20,0; SD = 2,48; Mediana = 5,95; P=0,001; n=70).

Подавляющее число гнезд сойки (67 из 70, для которых определена высота их над землёй) располагались на высоте от 2,5 до 10 м (рис. 7).

В Предкавказье сойки предпочитают строить гнезда, скрытые в густой кроне и недоступные для человека.

Чаще всего гнезда сойки располагаются в развилке главного ствола, в мутовке ветвей, но иногда на боковой ветви или у основания ствола (рис. 8).

В отличие от центральных районов Европейской части России, где распространен номинативный подвид *G. g. glandarius*, для которого отмечено гнездование в нише кирпичной стены бывшего стекольного завода (1985–1986 гг.) и 1994–1995 гг. в вентиляционном окне котельной [26] и даже на жилых постройках человека в 2006–2007 гг. [27–29], для кавказской сойки *G.g. krynicki* такие случаи нам неизвестны.

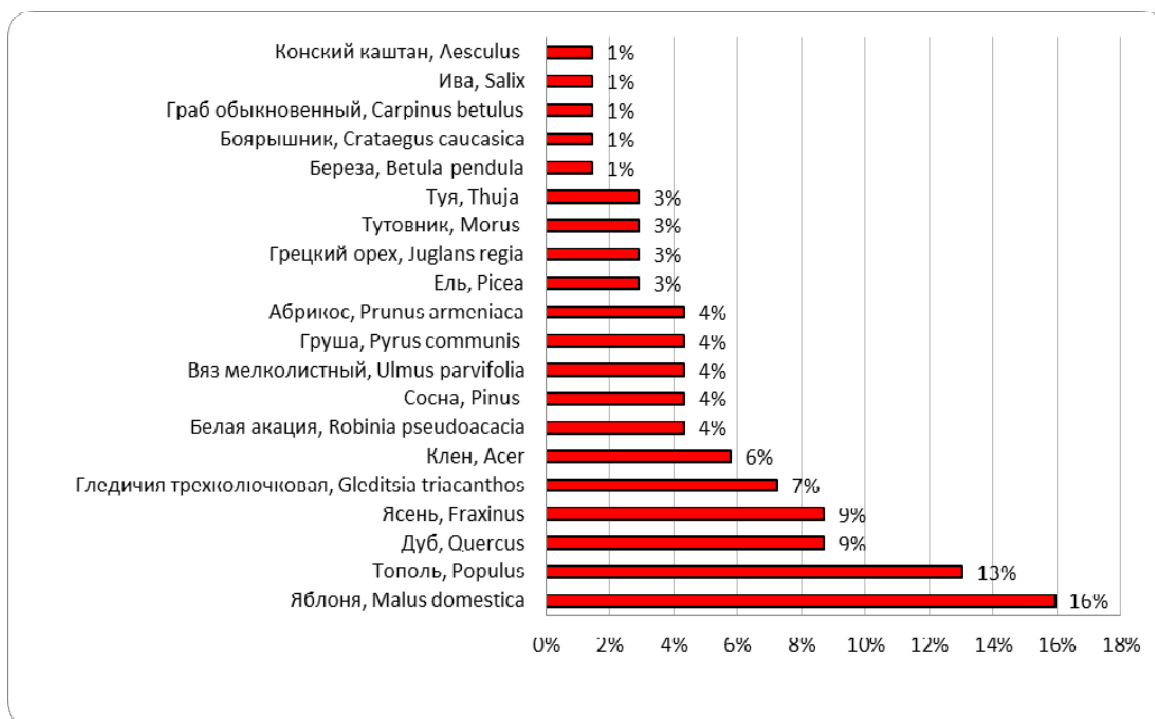


Рисунок 6. Встречаемость гнёзд соек на различных видах деревьев. Ставропольский край 2010–2023

Figure 6. Occurrence of jay nests on different tree species. Stavropol Territory, 2010–2023

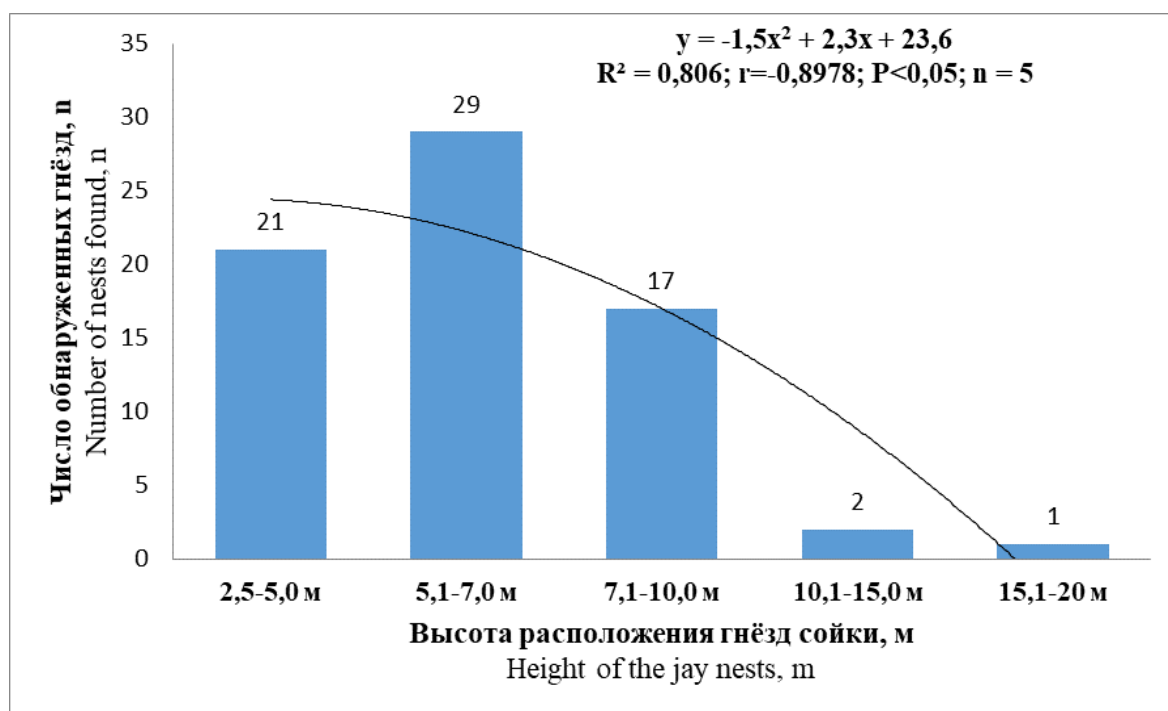


Рисунок 7. Высота расположения гнёзд сойки над землёй. Ставропольский край, 2010–2023 гг.

Figure 7. Height of jay nests above the ground. Stavropol Territory, 2010–2023

Описание гнёзд сойки

Лоток сойки выстилают тонкими корешками трав и обязательно элементами тонких полиэтиленовых волокон различного цвета. Так, при находке 5 гнезд в яблоневом саду пос. Рыздвянного Изобильненского района 3 лотка высланы розовым синтетическим шнуром; 2 гнезда – голубым (рис. 9). Найденные гнезда в брошенном саду около г. Ставрополя были высланы белыми веревочками.

В целом, гнездо сойки представляет собой небольшую, но довольно аккуратную постройку. Данные по обмеру гнёзд приведены в таблице (табл. 1).

Анализ таблицы 1 показывает, что из всех метрических характеристик гнезд сойки наиболее сильно варьируется высота гнезда. Самым стабильным показателем является диаметр лотка.

Строительный материал гнезда сойки довольно разнообразен и зависит от биотопического окружения. Основание гнезда состоит из веток пород преобладающих видов. В большинстве случаев в каркас

гнезда вплетается веревка толщиной до 6 мм в диаметре.

За весь период наших исследований было осмотрено 27 гнезд сойки. Из них 7 гнезд были

контрольными, за которыми вели тщательные наблюдения. Все они располагались на деревьях на высоте от 4,5 до 26 м.

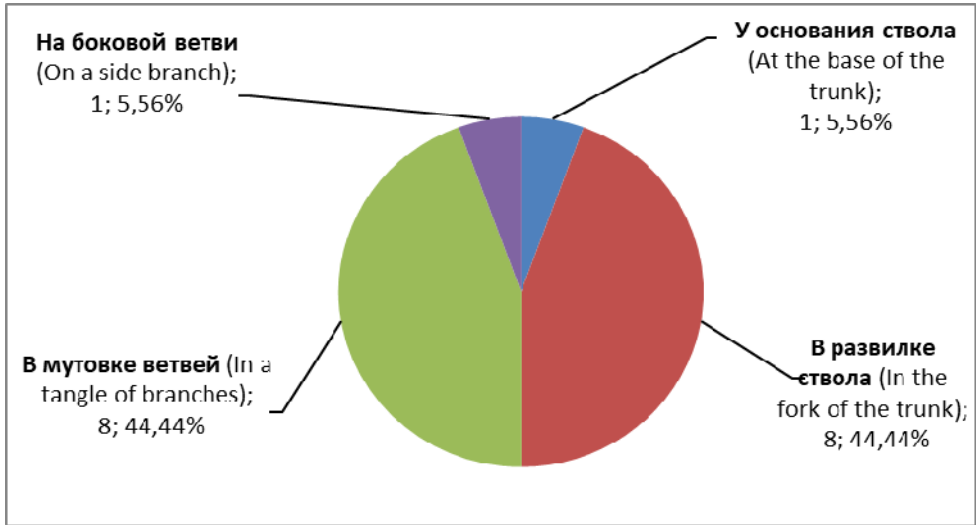


Рисунок 8. Расположение гнёзд сойки в кроне деревьев. Ставропольский край, 2010–2023
Figure 8. Location of Jay nests in tree crowns. Stavropol Territory, 2010–2023



Рисунок 9. Искусственные материалы в лотке гнезда сойки
Фото Маловичко Л.В., Ставропольский край, декабрь 2021
Figure 9. Artificial materials in a jay's nesting tray
Photo by Malovichko L.V., Stavropol Terriory, December 2021

Таблица 1. Основные метрические показатели гнезд сойки (n = 15; P =0,001). Ставропольский край
Table 1. Basic metric indicators of jay nests (n = 15; P = 0.001). Stavropol Territory

Показатели Indicators	M±m	Lim	SD	Mediana
Диаметр гнезда, см Nest diameter, cm	22,3 ± 1,39	20–26	1,64	22
Высота гнезда, см Nest height, cm	15,17 ± 4,53	12–34	5,33	14
Диаметр лотка, см Nesting hollow diameter, cm	13,77 ± 0,81	12–16	0,95	13,5
Высота лотка, см Nesting hollow tray height, cm	11,3 ± 1,98	8–14,5	2,33	12

Кладки сойки: биометрические показатели

Кладка сойки в Центральном Предкавказье обычно состоит из 3–7 яиц (наши данные) (рис. 10), по всему ареалу из 4–7 яиц, редко из – 3, 8 или 9 [7; 30–32].

Морфометрические показатели определены для яиц ($n = 51$) из 11 контрольных гнёзд сойки (табл. 2).

Выявлены следующие корреляции между биометрическими показателями яиц: 1) масса и длина

($r = 0,5125$; $P < 0,001$); масса и ширина ($r = 0,4466$; $P < 0,001$); ширина и длина ($r = 0,6194$; $P < 0,001$). Отмечены значительные колебания массы яиц (по средним показателям) из различных гнёзд (рис. 11).

По длине (рис. 12) и ширине яиц (рис. 13) разброс средних показателей не так велик.



Рисунок 10. Гнездо сойки с кладкой. Фото Маловичко Л.В., Ставропольский край, весна 2020

Figure 10. Jay nest with clutch. Photo by Malovichko L.V., Stavropol Territory, spring 2020

Таблица 2. Основные биометрические показатели яиц ($n=51$) сойки из 11 гнёзд ($P=0,001$)

Table 2. Basic biometric indicators of jay eggs ($n=51$) from 11 nests ($P=0.001$)

Показатели Indicators	$M \pm m$	Lim	SD	Mediana
Масса, г Mass, g	$9,11 \pm 0,28$	7,34–10,5	0,61	9,05
Длина, мм Length, mm	$31,67 \pm 0,35$	28,24–33,27	0,76	31,84
Ширина, мм Width, mm	$22,77 \pm 0,32$	20,11–23,9	0,70	22,91

Продолжительность насиживания

В местах гнездования сойки появляются сформированными парами в первой половине марта [33], чему способствуют благоприятные климатические условия. Для кавказского подвида сойки, строительство гнёзд начинается в начале апреля [34]. Сроки откладывания яиц растянуты. Первые кладки наблюдаются с конца апреля, что характерно для подвида [34], однако в долине реки Кубани сойки начинают откладывать яйца в первой половине второй декады апреля [35].

Насиживать кладку пара начинает с первого яйца. Примерная продолжительность насиживания составляет 16–17 дней. Вылет птенцов из гнезда происходит в возрасте 19–20 дней. Общая продолжительность гнездового периода составляет 35–37 дней, соответственно [34].

Пища и поведение при поиске корма

В гнездовой сезон в кормовом поведении сойки, как вида, преобладают кормовые методы, непосредственно

связанные с наземным поиском и добыванием различных форм беспозвоночных, в основном насекомых – гусениц бабочек, жесткокрылых, прямокрылых и др. [35–38]. Диета соек кавказского подвида в период выкармливания птенцов, в основном, состоит из насекомых, дождевых червей, яиц и птенцов [36]. В Англии (подвид *G. g. Rufitergum* E.J.O. Hartert, 1903) в питании птенцов преобладают гусеницы бабочек (в некоторых районах до 88–96 %) и жесткокрылые [39]. Сбор гусениц происходит на земле и на дубах.

Специальные публикации по кормовому поведению кавказской сойки, за исключением её поведения при запасаении пищевых объектов [40], отсутствуют. Мы проанализировали 134 встречи кормящихся соек. По нашим наблюдениям в кормовом поведении соек заметно преобладали (48,5 %) кормовые методы, связанные с поиском и добыванием корма в древесно-кустарниковом ярусе, а также кормёжка на земле (более 35 %; из них на долю дорог приходится 9,7 %).

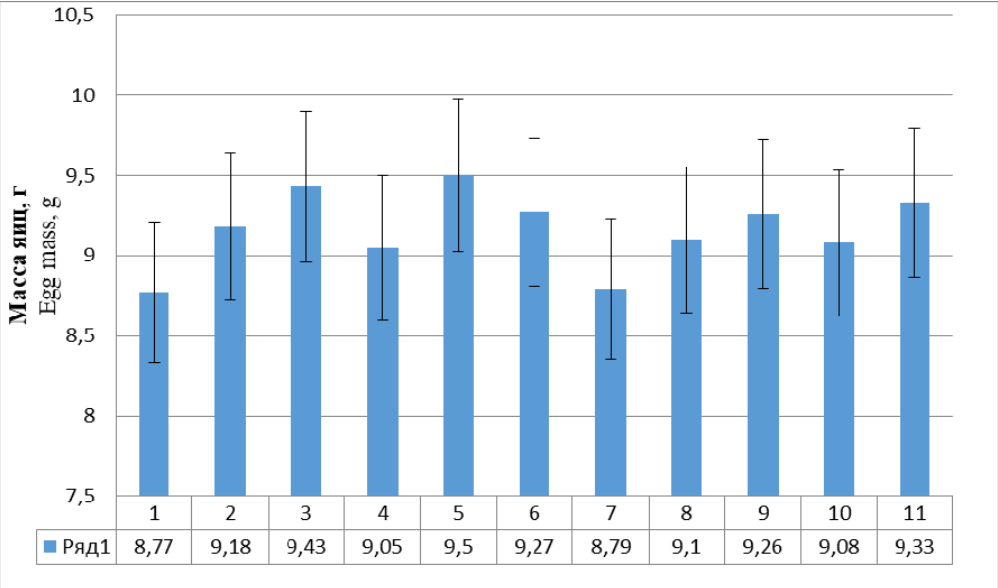


Рисунок 11. Масса яиц (по средним показателям) из 11 гнезд сойки

Figure 11. Egg mass (average) from 11 jay nests

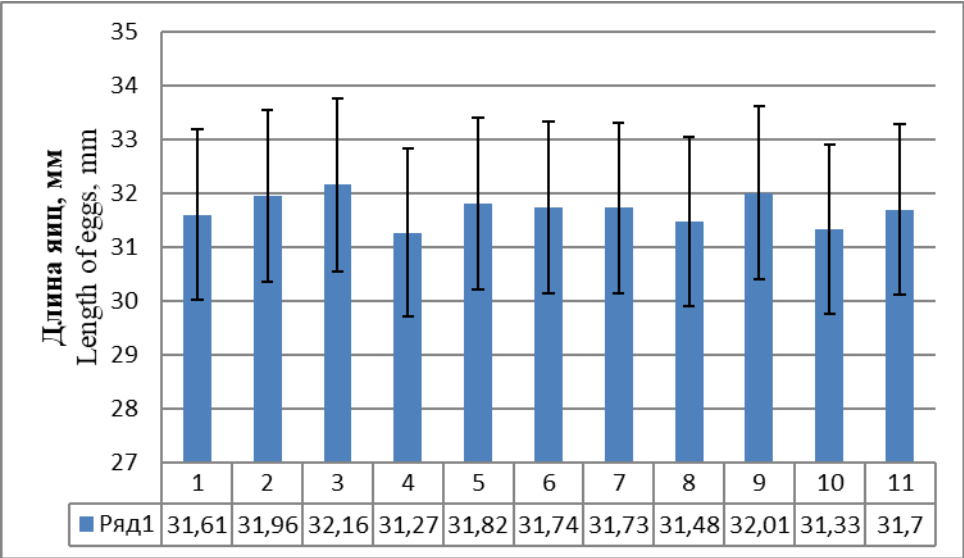


Рисунок 12. Длина яиц (по средним показателям) из 11 гнезд сойки

Figure 12. Length of eggs (average) from 11 jay nests

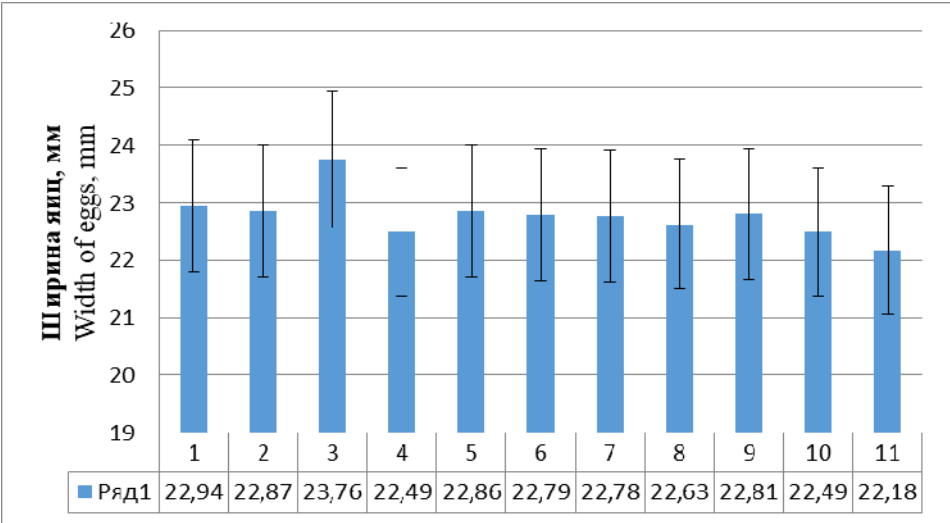


Рисунок 13. Ширина яиц (по средним показателям) из 11 гнезд сойки

Figure 13. Width of eggs (average) from 11 jay nests

При наземном поиске корма сойка использует различные варианты бипедальных локомоций: ходьбу и прыжки. При собирании неподвижных или малоподвижных пищевых объектов, сойки сближаются с добычей в варианте «пастьбы» («собираательства»), не используя форсированных локомоций (атакующих прыжков), как в случаях сближения с мобильной добычей (прыгающие, быстро бегающие или быстро взлетающие насекомые).

Открытоживущие беспозвоночные добываются (собираются, схватываются) при помощи клюва, как с

поверхности основного субстрата, так и с поверхности травянистой растительности.

Успешность размножения сойки

Успешность размножения сойки зависит от различных факторов. Один из них – это выбор места для гнезда. Общая успешность размножения у сойки составила 69,5 %. Доля неоплодотворённых яиц и гибели зародыша составила 4,9 % от общего числа отложенных яиц (табл. 3).

Таблица 3. Успешность размножения сойки в Ставропольском крае (2008–2022 гг.)

Table 3. Jay reproductive success in Stavropol Territory (2008–2022)

Показатели Indicators	Результаты Results
Количество гнезд Number of nests	27
Количество отложенных яиц Number of eggs laid	161
Количество яиц, в которых произошла гибель зародыша, или неоплодотворенные яйца Number of eggs in which embryo death occurred or there were unfertilized eggs	8
Количество яиц, уничтоженных хищниками Number of eggs destroyed by predators	12
Количество брошенных яиц Number of abandoned eggs	9
Количество пропавших яиц Number of missing eggs	5
Количество вылупившихся птенцов Number of hatched chicks	127
Количество вылетевших птенцов Number of chicks fledged	112
Успешность вылупления, % Hatching success, %	78,8
Успешность выкармливания, % Success of feeding, %	69,5
Общая успешность размножения, % Overall breeding success, %	69,5

В целом, успех размножения у сойки достаточно высокий – 69,5 %. Значительный урон гнездам наносят врановые птицы: серая ворона и сорока (*Pica pica*) [41], а также млекопитающие: куницы (каменная (*Martes foina*) и лесная (*Martes martes*) и бродячие кошки (*Felis catus domestica*).

Таким образом, успех размножения сойки зависит от сроков начала репродуктивного периода, характера погодных условий, а также пресса хищников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве предпочитаемых биотопов для строительства гнезд сойки, выбирают лесополосы (15 гнезд), леса и природные парки (14), а также парки, кладбища и заброшенные сады (12). Равную привлекательность для птиц представляют приусадебные участки и хутора (11), скверы, бульвары, озелененные улицы и дворы (11), и действующие сады (8).

Наблюдение за особенностями гнездования соек, показало, что чаще всего гнезда расположены на доминирующих породах деревьев. В качестве предпочитаемых деревьев можно выделить: яблоню, тополь, ясень, дуб и гледичию. Высота расположения гнезда колеблется от 2,5–2,6 м до 20 м над землей, преимущественно на высоте от 2,5 до 10 м. В

Предкавказье сойки обычно устраивают свои гнезда в густой кроне деревьев, делая их недоступными для человека, выбирая местом расположения развилки главного ствола или мутовки ветвей. Лоток птицы выстилают тонкими корешками трав, а также использует фрагменты полиэтиленовых волокон.

Средняя величина кладки сойки варьируется от 3 до 7 яиц. Для сойки на территории Ставропольского края характерно значительное колебание массы яиц в различных гнёздах.

Одним из факторов, влияющих на успешность размножения сойки является выбор места для гнезда. Общая успешность вылупления составляет 78,8 %, в то время как размножения – 69,5 %. Доля неоплодотворённых яиц и гибели зародыша составила 4,9 %, гибели от хищников подверглось 5,5 % от общего числа отложенных яиц.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Любовь В. Маловичко – Почетный работник РФ ВО, в прошлом: Вице-президент Союза охраны птиц России (СОПР), имеет нагрудный знак Отличник «Охраны природы» (Министерство природных ресурсов и

экологии РФ). К сожалению, Любовь Васильевна покинула нас в октябре 2024 года.

ACKNOWLEDGMENT

Lyubov V. Malovichko, Honoured Worker of Higher Education of the Russian Federation and formerly Vice President of the Russian Bird Conservation Union (RBCU). She was awarded the badge "Excellent Worker in Nature Conservation" by the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation). Sadly, Lyubov Vasilievna passed away in October 2024.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- BirdLife International. 2017. *Garrulus glandarius*. The IUCN Red List of Threatened Species 2017: e.T103723684A118779004. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017.3> (дата обращения: 27.10.2024)
- dos Anjos L., Bonan A. Crows (Corvidae) // del Hoyo J., Elliott A., Christie D. (Eds). *Handbook of the Birds of the World, Vol. 14: Bush-shrikes to Old World Sparrows*. Lynx Edicions, Barcelona, Spain. 2009. 893 p.
- Маловичко Л.В., Курбанбагамаев М.М. Особенности поведения и запасаение кормов сойкой в Ставропольском крае // X Международная конференция «Врановые птицы в антропогенных и естественных ландшафтах Северной Евразии». 17-21 сентября 2012 г. Якорная щель. М.-Казань, 2012. С. 146–148.
- Маловичко Л.В., Резанов А.Г., Кузнецова В.В., Резанов А.А. Роль сойки *Garrulus glandarius krynicki* в распространении культуры грецкого ореха *Juglans regia* в агроценозах Центрального Предкавказья // Птицы и сельское хозяйство: современное состояние, проблемы и перспективы изучения. Материалы III Международной орнитологической конференции. Кисловодск. 21-24 сентября 2023 г. Иваново: ПресСто, С. 91–96.
- Резанов А.Г., Маловичко Л.В., Кузнецова В.В., Резанов А.А. Кормовое поведение сойки *Garrulus glandarius krynicki* в Ставропольском крае // Экологический вестник Чувашской республики. 2024. Вып. 85. Мат-лы XIV Всероссийской научной конференции с международным участием «Экология врановых птиц в естественных и антропогенных ландшафтах Северной Евразии». Апрель 2024 г. Чебоксары. 2024. С. 24–26.
- Резанов А.Г., Маловичко Л.В., Кузнецова В.В. Резанов А.А. Анализ запасающей деятельности сойки в Ставропольском крае // Вестник Тверского государственного университета. Серия «Биология и экология». 2024. N 3(75). С. 95–112. <https://doi.org/10.26456/vtbio373>
- Рустамов А.К. Семейство Вороновые // Птицы Советского союза. Ред. Г.П. Деметьев, Н.А. Гладков. Т.5, М.: Сов. Наука, 1954. С. 1–103.
- Хохлов А.Н., Забелин В.И., Ильях М.П., Маловичко Л.В., Климашкин О.В. Весенний аспект фауны и экологии птиц Ставрополя // Кавказ. орнитол. вестн. 1997. Т. 9. С. 137–151.
- Бадахова Г.Х., Кнутас А.В. Ставропольский край: современные климатические условия. Ставрополь, ГУП СК "Краевые сети связи", 2007. 272 с.
- Ильях М.П. Размещение, численность и экология врановых птиц города Ставрополя // Образование и наука в современных реалиях: Сборник материалов XI Международной научно-практической конференции, Чебоксары, 20 декабря 2019 года. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью "Центр научного сотрудничества "Интерактив плюс", 2019. С. 12–16.
- Край наш Ставрополье очерки истории / науч. ред. Д. В. Кочура, В. П. Невская. Ставрополь: Шат-гора, 1999. 525 с.
- Костенко А.В. О структуре населения птиц различных лесных массивов Ставропольских высот // Кавказский орнитологический вестник. Вып. 23 Ставрополь, 2011 С. 47–57.
- Самсонова И.Д. Медопродуктивность растительных формаций на землях лесного фонда степного Придонья // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2017. N 4 (358). С. 69–83.
- Дудченко Л.В., Лапенко Н.Г., Дружинин В.А. Эколого-флористическая ситуация объектов лесомелиорации в агроландшафтах Ставропольского края // Лесотехнический журнал. 2017. Т. 7. N 2(26). С. 67–75. https://doi.org/10.12737/article_5967e9653fc089.77407015
- Барышникова Е.М. Сравнительная экология сорокопутов в Ставропольском крае: диссертация ... кандидата биологических наук : 03.02.14. Москва, 2013. 192 с.
- Таращук В.И. Птицы полевых насаждений степной зоны УССР и возможности использования их для борьбы с вредителями. Киев : Изд-во Акад. наук Укр. ССР, 1953. 124 с.
- Семаго Л.Л. Птицы. Москва: Мысль, 1994. 271 с.
- Маловичко Л.В., Федосов В.Н. Биотопическое распределение врановых на севере Ставропольского края // Экология врановых птиц антропогенных ландшафтов. Материалы Международной конференции. Саранск, 2002. С. 29–31.
- Маловичко Л.В., Федосов В.Н. Биотопическое распределение врановых на севере Ставропольского края // Русский орнитологический журнал. 2016. Т. 25. N 1385. С. 5081–5083.
- Лошаков А.В. Состояние и использование земельного фонда Ставропольского края // Экономика и экология территориальных образований. 2018. Т. 2. N 2. С. 114–123. <https://doi.org/10.23947/2413-1474-2-2-114-123>
- Блинова Т.К., Мухачева М.М., Структура орнитофауны южнотайжного Причулымья // Русский орнитологический журнал. 2003. Т. 12. N 244. С. 1312–1328.
- Годзевич Б.Л., Колесниченко А.Е. Геоэкологические особенности Ставропольских лесов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2008. N 3-2(13). С. 62–65.
- Турчанинова Е.В. Некоторые особенности сезонного питания сойки (*Garrulus Glandarius*) // Евразийский союз ученых. 2015. N 1-2(18). С. 124–125.
- Кулисева Ю.И., Мельников Е.Ю. Пространственное распределение гнезд врановых птиц (Corvidae) в компонентах урбанизированной среды (на примере Кировского района г. Саратова) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2023. Т. 23. N 2. С. 227–235. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-2-227-235>
- Маловичко Л.В., Курбанбагамаев М.М. Гнездование сойки на кустах ольхи белой в городе Ставрополе // Кавказский орнитологический вестник. 2011. Т. 23. С. 69–72.
- Иванчев В.П., Котюков Ю.В. Случаи нетипичного гнездования птиц в Юго-Восточной Мещере // Русский орнитологический журнал. 1997. N 6. С. 9–17.
- Резанов А.Г., Резанов А.А., Орнитологические наблюдения на Кипре в августе 2002 года // Русский орнитологический журнал. 2004. Т. 13. N 254. С. 189–198.
- Резанов А.Г., Резанов А.А., Гнездование сойки (*Garrulus glandarius*) на постройках человека и процесс урбанизации вида // Экология врановых в естественных и антропогенных ландшафтах. М.-Ставрополь: 2007. С. 139–141.
- Резанов А.Г., Резанов А.А., Сойка *Garrulus glandarius glasznieri* на Кипре: к вопросу о синантропизации подвида // Мат-лы 8-ой Международной научно-практической конференции «Сохранение разнообразия животных и охотничье хозяйство России», РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. 21–22 февраля 2019 г. М.: С. 371–373.
- Cramp S., Perrins C.M., Brooks D.J., Handbook of the Birds of Europe, the Middle East and North Africa. The Birds of the Western Palearctic. Vol. VIII. Crows to Finches. Oxford Univ. 1994. Press.: pp. 1–899.
- Кисленко Г.С., Леонович В.В. О размножении сойки *Garrulus glandarius* в долине реки Кубани // Русский орнитологический журнал. 2013. Т. 22. N 934. С. 2978–2980.
- Кныш Н.П., Грищенко В.Н., Статива А.И. Сойка *garrulus glandarius* в лесостепи северо-восточной Украины // Русский орнитологический журнал. 2015 Т. 24. N 1176. С. 2866–2869.
- Хохлов А.Н., Забелин В.И., Ильях М.П., Маловичко Л.В., Климашкин О.В. Весенний аспект фауны и экологии птиц Ставрополя // Кавказ. орнитол. вестн. 1997. Т. 9. С. 137–151.
- Деметьев Г.П., Гладков Н.А., Птушенко Е.С. Птицы Советского Союза / под общей редакцией [и с предисловием] Г.П. Деметьева, Н.А. Гладкова. Москва : Советская наука, 1951-1954. 6 т. 26 см. Т. 5. 1954. 803 с.

35. Формозов А.Н., Осмоловская В.И., Благосклонов К.Н. Птицы и вредители леса: Значение птиц в регулировании численности вредных насекомых леса и лесных посадок. М.: Московское общество испытателей природы, 1950. 182 с.
 36. Рустамов А.К. Семейство вороновые Corvidae // Птицы Советского Союза. М. 1954. N 5. С. 13–104.
 37. Птушенко Е.С., Иноземцев А.А. Биология и хозяйственное значение птиц Московской области и сопредельных территорий. МГУ, 1968. 462 с.
 38. Мальчевский А.С., Пукинский Ю.Б. Птицы Ленинградской области и сопредельных территорий. Л.: Из-во Ленинградского университета, 1983. 573 с.
 39. Owen D.F. The food of nestling jays and magpies. *BirdStudy* 3. 1956. P. 257–265.
 40. Маловичко Л.В., Резанов А.Г., Кузнецова В.В., Резанов А.А. Анализ запасующей деятельности сойки в Ставропольском крае // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Биология и экология. 2024. N 3(75). С. 95–112. <https://doi.org/10.26456/vtbio374>
 41. Маловичко Л.В., Кузнецова В.В. Факторы элиминации сойки в Центральном Предкавказье // Тимирязевский биологический журнал. 2023. N 3. С. 51–58. <https://doi.org/10.26897/2949-4710-2023-3-51-58>
- REFERENCES**
1. BirdLife International. *Garrulus glandarius*. [The IUCN Red List of Threatened Species 2017: e.T103723684A118779004]. Available at: <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-3.RLTS.T103723684A118779004.en> (accessed 27.10.2024).
 2. dos Anjos L., Bonan A. Crows (Corvidae). In: del Hoyo J., Elliott A., Christie D. (Eds). [Handbook of the Birds of the World. Vol. 14: Bush-shrikes to Old World Sparrows]. Barcelona, Spain, Lynx Edicions, 2009, 893 p.
 3. Malovichko L.V., Kurbanbagamaev M.M. Osobennosti povedeniya i zapasanie kormov soikoi v Stavropol'skom krae [Behavioral Features and Food Storage by the Jay in the Stavropol Region]. *X Mezhdunar.konfer. Vranovye ptitsy v antropogennykh i estestvennykh landshaftakh Severnoi Evrazii.17-21 sentyabrya 2012 g. Yakornaya shchel'* [Proceedings of the 10th international conference corvids in anthropogenic and natural landscapes of Northern Eurasia, Yakornaya Shchel, September 17–21, 2012]. Moscow, Kazan', 2012, pp.146–148. (In Russian)
 4. Malovichko L.V., Rezanov A.G., Kuznetsova V.V., Rezanov A.A. Rol' soiki Garrulus glandarius krynicki v rasprostraneni kul'tury gretskogo orekha Juglans regia v agrosenozakh Tsentral'nogo Predkavkaz'ya [The role of the Eurasian Jay *Garrulus glandarius krynickii* in the distribution of the Persian walnut *Juglans regia* in the agrocoenoses of the Central Ciscaucasia] *Ptitsy i sel'skoe khozyaistvo: sovremennoe sostoyanie, problemy i perspektivy izucheniya. Materialy III Mezhdunarodnoi ornitologicheskoi konferentsii. Kislovodsk. 21-24 sentyabrya 2023 g.* [Birds and agriculture: current state, problems and research prospects. proceedings of the III international ornithological conference. Kislovodsk, September 21–24, 2023]. Ivanovo, PresSto Publ., 2023, pp. 91–96. (In Russian)
 5. Rezanov A.G., Malovichko L.V., Kuznetsova V.V. Rezanov A.A. Kormovoe povedenie soiki Garrulus glandarius krynicki v Stavropol'skom krae [Feeding behavior of the Eurasian Jay *Garrulus glandarius krynickii* in the Stavropol Territory]. *Ekologicheskii vestnik Chuvashskoi respubliky*, 2024, vyp. 85. *Mat-ly XIV Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Ekologiya vranovykh ptits v estestvennykh i antropogennykh landshaftakh Severnoi Evrazii»* April' 2024 g. [Ecological Bulletin of the Chuvash Republic, 2024, Issue 85. Materials of the XIV All-Russian Scientific Conference with International Participation "Ecology of Corvid Birds in Natural and Anthropogenic Landscapes of Northern Eurasia"]. Cheboksary, 2024, pp. 24–26. (In Russian)
 6. Rezanov A.G., Malovichko L.V., Kuznetsova V.V. Rezanov A.A. Analysis of caching activity of the Eurasian Jay in the Stavropol Territory. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Biologiya i ekologiya»* [Tver State University Bulletin. Series: Biology and Ecology]. 2024, no. 3(75), pp. 95–112. (In Russian) <https://doi.org/10.26456/vtbio373>
 7. Rustamov A.K. [Family Corvidae]. In: *Ptitsy Sovetskogo soyuza* [Birds of the Soviet Union]. Moscow, Sov. Nauka Publ., 1954, vol. 5, pp. 13–103. (In Russian)
 8. Khokhlov A.N., Zabelin V.I., Il'yukh M.P., Malovichko L.V., Klimashkin O.V. Spring aspect of the fauna and ecology of birds in Stavropol region. *Kavkaz. ornitol. vestn* [Caucasian ornithological bulletin]. 1997, vol. 9, pp. 137–151. (In Russian)
 9. Badakhova G.Kh., Knutas A.V. *Stavropol'skii krai: sovremennye klimaticheskie usloviya* [Stavropol Territory: modern climatic conditions]. Stavropol', GUP SK "Kraevye seti svyazi" Publ., 2007, 272 p. (In Russian)
 10. Il'yukh M.P. Razmeshchenie, chislennost' i ekologiya vranovykh ptits goroda Stavropol'ya [Distribution, abundance and ecology of corvids in the city of Stavropol]. *Obrazovanie i nauka v sovremennykh realiyakh: Sbornik materialov XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Cheboksary, 20 dekabrya 2019 goda* [Education and science in the modern context: proceedings of the 11th International research and practice conference, Cheboksary, december 20, 2019]. Cheboksary, Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu "Tsentr nauchnogo sotrudnichestva "Interaktiv plyus" Publ., 2019, pp. 12–16. (In Russian)
 11. *Krai nash Stavropol'e ocherki istorii nauch* [Our Stavropol region: essays on history]. Stavropol', Shat-gora Publ., 1999, 525 p. (In Russian)
 12. Kostenko A.V. On the structure of bird communities in various forest areas of the Stavropol Upland. *Kavkazskii ornitologicheskii vestnik* [Caucasian ornithological bulletin]. Stavropol', 2011, vol. 23, pp. 47–57. (In Russian)
 13. Samsonova I.D. Honey production capacity of plant formations on forest fund lands in the steppe Don region. *Izvestiya VUZov. Lesnoi zhurnal* [University Proceedings. Forestry Journal]. 2017, no. 4 (358), pp. 69–83. (In Russian)
 14. Dudchenko L.V., Lapenko N.G., Druzhinin V.A. Ecological and floristic situation of forest reclamation objects in agricultural landscapes of the Stavropol Territory. *Journal of forestry engineering*, 2017, vol. 7, no. 2(26), pp. 67–75. (In Russian) https://doi.org/10.12737/article_5967e9653fc089.77407015
 15. Baryshnikova E.M. *Sravnitel'naya ekologiya sorokoputov v Stavropol'skom krae* [Comparative ecology of shrikes in the Stavropol Territory]. PhD Thesis. Moscow, 2013, 192 p. (In Russian)
 16. Tarashchuk V.I. *Ptitsy polezashchitnykh nasazhdenii stepnoi zony USSR i vozmozhnosti ispol'zovaniya ikh dlya bor'by s vreditelyami* [Birds of field-protective plantations in the steppe zone of the Ukrainian SSR and the possibility of their use for pest control] Kiev, ANU SSR Publ., 1953, 124 p. (In Russian)
 17. Semago L.L. *Ptitsy* [Birds]. Moscow, Mysl' Publ., 1994, 271 p. (In Russian)
 18. Malovichko L.V., Fedosov V.N. Biotopicheskoe raspredelenie vranovykh na severe Stavropol'skogo kraya [Biotopic distribution of corvids in the north of the Stavropol Territory]. *Ekologiya vranovykh ptits antropogennykh landshaftov. Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii* [Ecology of Corvid Birds in Anthropogenic Landscapes. Proceedings of the International Conference]. Saransk, 2002, pp. 29–31. (In Russian)
 19. Malovichko L.V. Biotopic distribution of corvids in the north of the Stavropol Territory. *Russkii ornitologicheskii zhurnal* [Russian ornithological journal]. 2016, vol. 25, no. 1385, pp. 5081–5083. (In Russian)
 20. Loshakov A.V. Condition and use of the land fund of the Stavropol Territory. Economics and Ecology of Territorial Formations, 2018, vol. 2, no. 2, pp. 114–123. (In Russian) <https://doi.org/10.23947/2413-1474-2-2-114-123>
 21. Blinova T.K., Mukhacheva M.M. Structure of the avifauna of the southern taiga Chulym region. *Russkii ornitologicheskii zhurnal* [Russian ornithological journal]. 2003, vol. 12, no. 244, pp. 1312–1328. (In Russian)
 22. Godzevich B.L., Kolesnichenko A.E. Geoecological features of the Stavropol forests. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Issues of Modern Science and Practice. Vernadsky University]. 2008, no. 3-2(13), pp. 62–65. (In Russian)
 23. Turchaninova E.V. Some features of the seasonal diet of the Eurasian Jay (*Garrulus glandarius*). *Evraziiskii soyuz uchenykh* [Eurasian union of scientists]. 2015, no. 1-2(18), pp. 124–125. (In Russian)

24. Kuliseva Yu.I., Mel'nikov E.Yu. Spatial distribution of corvid (Corvidae) nests in the components of the urban environment (a case study of the Kirovsky district of Saratov). *Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Chemistry. Biology. Ecology*, 2023, vol. 23, no. 2, pp. 227–235. (In Russian) <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-2-227-235>
25. Malovichko L.V., Kurbanbagamaev M.M. Nesting of the Eurasian Jay in the bushes of European mistletoe in the city of Stavropol. *Kavkazskii ornitologicheskii vestnik* [Caucasian Ornithological Bulletin]. 2011, vol. 23, pp. 69–72. (In Russian)
26. Ivanchev V.P., Kotyukov Yu.V. Cases of atypical nesting of birds in the South-Eastern Meshchera. *Russkii ornitologicheskii zhurnal* [Russian ornithological journal]. 1997, no. 6, pp. 9–17. (In Russian)
27. Rezanov A.G., Rezanov A.A. Ornithological observations in Cyprus in August 2002. *Russkii ornitologicheskii zhurnal* [Russian ornithological journal]. 2004, vol. 13, no. 254, pp. 189–198. (In Russian)
28. Rezanov A.G., Rezanov A.A. [Nesting of the Eurasian Jay (*Garrulus glandarius*) on human structures and the process of urbanization of the species]. In: *Ekologiya vranovykh i estestvennykh i antropogennykh landshaftakh* [The ecology of corvids in natural and anthropogenic landscapes]. Moscow, Stavropol', 2007, pp. 139–141. (In Russian)
29. Rezanov A.G., Rezanov A.A. Soika *Garrulus glandarius glasneri* na Kipre: k voprosu o sinantropizatsii podvida [The Eurasian Jay *Garrulus glandarius glasneri* in Cyprus: on the issue of synanthropization of the subspecies]. *Mat-ly 8-oi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sokhranenie raznoobraziya zhivotnykh i okhotnich'e khozyaistvo Rossii»* [Proceedings of the 8th international scientific and practical conference «Conservation of animal diversity and wildlife management in Russia»]. Moscow, RGAU-MSKhA imeni K.A. Timiryazeva Publ., pp. 371–373. (In Russian)
30. Cramp S., Perrins C.M., Brooks D.J. Handbook of the Birds of Europe, the Middle East and North Africa. The Birds of the Western Palearctic. Vol. VIII. Crows to Finches. Oxford Univ. 1994. Press., pp. 1–899.
31. Kislenco G.S., Leonovich V.V. On the reproduction of the Eurasian Jay *Garrulus glandarius* in the Kuban River valley. *Russkii ornitologicheskii zhurnal* [Russian ornithological journal]. 2013, vol. 22, no. 934, pp. 2978–2980. (In Russian)
32. Knysh N.P., Grishchenko V.N., Stativa A.I. The Eurasian Jay *Garrulus glandarius* in the forest-steppe of north-eastern Ukraine. *Russkii ornitologicheskii zhurnal* [Russian ornithological journal]. 2015, vol. 24, no. 1176, pp. 2866–2869. (In Russian)
33. Xoxlov A.N., Zabelin V.I., Il'yux M.P., Malovichko L.V., Klimashkin O.V. [Spring aspect of the fauna and ecology of birds in Stavropol region]. In: *Kavkaz. ornitol. vestn* [Caucasian ornithological bulletin]. 1997, vol. 9, pp. 137–151. (In Russian)
34. Dement'ev G.P., Gladkov N.A., Ptushenko E.S. Pticy Sovetskogo Soyuzha [Birds of the Soviet Union]. Moscow, Sovetskaya nauka Publ., 1951–1954. 6 vol.; 26 sm. vol 5. 1954. 803 p. (In Russian)
35. Formozov A.N., Osmolovskaya V.I., Blagosklonov K.N. Pticy i vrediteli lesa : Znachenie pticz v regulirovanii chislennosti vredny'x nasekomy'x lesa i lesny'x posadok [Birds and forest pests: The importance of birds in regulating the number of harmful insects in forests and forest plantations]. Moscow, Moskovskoe obshchestvo ispy'tatelej prirody Publ., 1950, 182 p. (In Russian)
36. Rustamov A.K. [The Corvidae family]. In: *Pticy Sovetskogo Soyuzha*. [Birds of the Soviet Union]. Moscow, 1954, vol. 5, pp. 13–104. (In Russian)
37. Ptushenko E.S., Inozemcev A.A. *Biologiya i khozyaistvennoe znachenie ptits Moskovskoi oblasti i sopredel'nykh territorii* [Biology and economic importance of birds in the Moscow region and adjacent territories]. Moscow, Moscow State University Publ., 1968. 462 p. (In Russian)
38. Mal'chevskiy A.S., Pukinskiy Yu.B. *Ptitsy Leningradskoi oblasti i sopredel'nykh territorii* [Birds of the Leningrad region and adjacent territories]. Leningrad, Leningrad University Publ., 1983, 573 p. (In Russian)
39. Owen D.F. The food of nestling jays and magpies. *BirdStudy* 3. 1956, pp. 257–265.
40. Malovichko L.V. Analysis of caching activity of the Eurasian Jay in the Stavropol Territory. *Bulletin of Tver state university. Series: biology and ecology*, 2024, no. 3(75), pp. 95–112. (In Russian) DOI: 10.26456/vtbio374.
41. Malovichko L.V., Kuznetsova V.V. Factors of elimination of the Eurasian Jay in the Central Ciscaucasia. *Timiryazev biological journal*, 2023, no. 3, pp. 51–58. (In Russian) <https://doi.org/10.26897/2949-4710-2023-3-51-58>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Любовь В. Маловичко, Александр Г. Резанов, Валерия В. Кузнецова, Андрей А. Резанов написали рукопись. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Lyubov V. Malovichko, Alexander G. Rezanov, Valeria V. Kuznetsova, Andrey A. Rezanov wrote the manuscript. All authors are equally responsible for plagiarism and self-plagiarism or other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Любовь В. Маловичко / Lyubov V. Malovichko <https://orcid.org/0000-0003-1040-2890>
 Александр Г. Резанов / Alexander G. Rezanov <https://orcid.org/0009-0002-3433-7624>
 Валерия В. Кузнецова / Valeria V. Kuznetsova <https://orcid.org/0000-0002-4327-2458>
 Андрей А. Резанов / Andrey A. Rezanov <https://orcid.org/0009-0002-8411-3450>

Новое техногенное убежище Остроухой ночницы *Myotis blythii* (Chiroptera: Vespertilionidae) на Северо-Восточном Кавказе

Алимурад А. Гаджиев¹, Батыргиши А. Муташев^{1,2}, Александр В. Жигалин^{1,3},
Александр Ю. Алексеев², Магомедали Г. Джалилов¹

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

²Федеральный исследовательский центр Фундаментальной и трансляционной медицины, Новосибирск, Россия

³Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

Контактное лицо

Батыргиши А. Муташев, преподаватель,
кафедра биологии и биоразнообразия,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Дагестанский государственный
университет»; младший научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
Фундаментальной и трансляционной
медицины; 367000 Россия, г. Махачкала,
ул. Гапцахская, 19.
Тел. +79898619694
Email mutashev2001@bk.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6078-9002>

Формат цитирования

Гаджиев А.А., Муташев Б.А., Жигалин А.В.,
Алексеев А.Ю., Джалилов М.Г. Новое
техногенное убежище Остроухой ночницы
Myotis blythii (Chiroptera: Vespertilionidae)
на Северо-Восточном Кавказе // Юг России:
экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 102-
107. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-9

Получена 10 сентября 2025 г.

Прошла рецензирование 15 ноября 2025 г.

Принята 20 ноября 2025 г.

Резюме

Цель: описать новое место формирования крупной выводковой колонии *M. blythii* в заброшенной Какамахской шахте (бетонное сооружение военного назначения, заброшено в начале 80-х годов прошлого века близ с. Какамахи, Республика Дагестан) и оценить роль техногенных объектов в поддержании популяций вида на Северо-Восточном Кавказе. Исследование проведено осенью 2025 г. в частично разрушенной Какамахской шахте в окрестностях с. Какамахи. Объект представлял собой двухэтажное железобетонное сооружение с подземными помещениями и системой шахт, сходное по конструкции с ранее обследованной шахтой близ с. Аданак (Аданакская шахта). Учёт рукокрылых выполнялся визуальным методом с фиксацией численности, распределения и наличия самок с детёнышами. Микроклиматические параметры (температура, влажность) регистрировались с использованием датчиков Tzone TZ-TempU02.

Впервые выявлено новое убежище *Myotis blythii* в заброшенной Какамахской шахте близ с. Какамахи. В подвальных помещениях обнаружена выводковая колония численностью около 200 особей, преимущественно в дальних от входа секциях с ограниченным доступом света и сквозняков. Температура составляла +15 – +16,6 °C, влажность 73–80 %. Зафиксированы самки с детёнышами; других видов рукокрылых не зарегистрировано. Колония аналогична по структуре и микроклимату ранее описанной нами в Аданакской шахте, что указывает на роль техногенных объектов как репродуктивных и, возможно, зимовочных убежищ. Основными угрозами остаются разрушение помещений и изменение микроклимата вследствие демонтажа. Подобные объекты следует рассматривать как приоритетные для мониторинга и включения в сеть охраняемых мест обитания редких видов.

Проведенный комплекс работ позволяет сказать, что техногенные убежища выполняют ключевую роль в размножении и, вероятно, зимовке вида, и требуют учёта при планировании хозяйственной и природоохранной деятельности. Пример Алтайского края показывает, что придание репродуктивным убежищам рукокрылых охранного статуса способствует сохранению колоний. Аналогичные меры целесообразно применять для техногенных объектов Северо-Восточного Кавказа.

Ключевые слова

Рукокрылые, Остроухая ночница, экология, охрана природы, Кавказ.

New man-made shelter for the Lesser Mouse-eared Bat *Myotis blythii* (Chiroptera: Vespertilionidae) in the north-eastern Caucasus

Alimurad A. Gadzhiev¹, Batyrgishi A. Mutashev^{1,2}, Alexander V. Zhigalin^{1,3},
Alexander Yu. Alekseev², Magomedali G. Dzhililov¹

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia

²Federal Research Centre for Fundamental and Translational Medicine, Novosibirsk, Russia

³National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Principal contact

Batyrgishi A. Mutashev, Lecturer, Department of Biology and Biodiversity, Dagestan State University; Junior Researcher, Federal Research Center for Fundamental and Translational Medicine; 19 Gaptysakhskaya St., Makhachkala, Russia 367000.

Tel. +79898619694

Email mutashev2001@bk.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6078-9002>

How to cite this article

Gadzhiev A.A., Mutashev B.A., Zhigalin A.V., Alekseev A.Yu., Dzhililov M.G. New man-made shelter for the Lesser Mouse-eared Bat *Myotis blythii* (Chiroptera: Vespertilionidae) in the North-Eastern Caucasus. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):102-107. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-9

Received 10 September 2025

Revised 15 November 2025

Accepted 20 November 2025

Abstract

To describe a new location of the formation of a large brood colony of *M. blythii* in the disused Kakamakh silo (a military concrete structure abandoned in the early 1980s near the village of Kakamakhi, Republic of Dagestan) and to assess the role of man-made objects in maintaining populations of the species in the north-eastern Caucasus.

The study was conducted in the autumn of 2025 at a partially destroyed silo near the village of Kakamakhi (Republic of Dagestan). The facility was a two-story reinforced concrete structure with underground rooms and a system of shafts, similar in design to a previously surveyed silo near the village of Adanak. A visual bat census was conducted, recording the abundance, distribution and presence of females with batlings. Microclimatic parameters (temperature, humidity) were recorded using Tzone TZ-TempU02 sensors.

A new *Myotis blythii* refuge has been identified for the first time in an abandoned silo near the village of Kakamakhi. A breeding colony of approximately 200 individuals was discovered in the basement, primarily in sections farthest from the entrance with limited access to light and drafts. The temperature recorded was 15–16.6 °C, humidity 73–80 %. Females with batlings were recorded; no other bat species were observed. The colony is similar in structure and microclimate to the previously described silo near the village of Adanak, indicating the role of man-made structures as reproductive and, possibly, overwintering shelters. The main threats to these populations would be the destruction of the structures and changes in the microclimate due to dismantling. Such structures should be considered a priority for monitoring and inclusion in the network of protected habitats for rare species.

The research conducted suggests that man-made refuges play a key role in the reproduction and, likely, wintering of the species, and require consideration when planning management and conservation activities. The example of Altai demonstrates that granting protected status to reproductive refuges contributes to the preservation of colonies; similar measures are advisable for man-made sites in the Northeast Caucasus.

Key Words

Bats, *Myotis* bat, ecology, conservation, Caucasus.

ВВЕДЕНИЕ

Рукокрылые Северо-Восточного Кавказа до настоящего времени остаются недостаточно изученной группой млекопитающих, особенно в отношении мест размножения и зимовки [1].

Остроухая ночница *Myotis blythii* (Tomes, 1857) – представитель семейства Vespertilionidae, ареал которого охватывает Южную и Центральную Европу, Переднюю и Среднюю Азию [2; 3]. Она внесена в федеральную и региональные Красные книги [4–6]. Следует отметить, что Черноморским побережьем (Крым, юг Краснодарского края), Ставрополем и Прикаспийскими территориями ограничивается распространение вида на север [1; 3]. На территории Дагестана *M. blythii* летом является одним из самых распространенных видов. Основными убежищами остроухой ночницы являются преимущественно пещеры и убежища антропогенного происхождения [7; 8; 9; 10]. Репродуктивные колонии формируются в местах с устойчивым микроклиматом и ограниченным доступом хищников [1; 11].

В обзорной статье [1] говорится о широкой регистрации вида *M. blythii* в Республике Дагестан. Самое крупное на момент научного обзора [1] скопление *M. blythii* в Аданакской шахте близ с. Аданак отмечено в 2013 г., и составило около 500 особей. Согласно мнению авторов, эта колония, как и колония численностью около 2000 особей в пещере Карабудахкентская (Живая), представляют собой части одной большой колонии [1].

Упоминается, что заброшенная Аданакская шахта (капитальное бетонное сооружение военного назначения, заброшенное в конце 80-х годов прошлого века)

использовалась летучими мышами нескольких видов в качестве убежища для зимовки [12]. Поскольку антропогенная трансформация ландшафтов региона продолжается [13], установление и охрана репродуктивных биотопов, включая искусственные убежища, имеет критическое значение для сохранения вида.

В ходе нашего осмотра Аданакской шахты летом 2020 года, в верхних подземных помещениях была зафиксирована выводковая колония *M. blythii* численностью более 1000 особей. К апрелю 2021 года в ходе интенсивных демонтажных работ заброшенные помещения и шахтные комплексы были полностью уничтожены.

Цель настоящего сообщения – описать новое место формирования крупной выводковой колонии *M. blythii* в заброшенной Какамахской шахте близ с. Какамахи (Республика Дагестан) и оценить роль техногенных объектов в поддержании популяций вида на Северо-Восточном Кавказе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проведены осенью 2025 г. в частично разрушенной Какамахской шахте, расположенной в окрестностях с. Какамахи, Республика Дагестан.

Объект представлял собой двухэтажное железобетонное сооружение с подвальными помещениями, частично обрушенными перекрытиями и системой шахт. Конструкция была идентична ранее исследованной нами заброшенной Аданакской шахте близ с. Аданак (рис. 1).

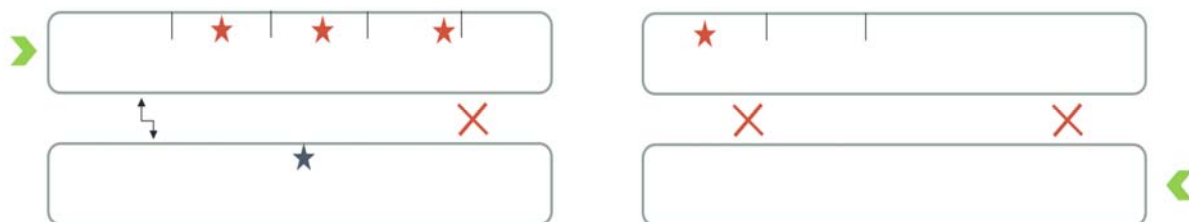


Рисунок 1. Поперечная карта-схема Аданакской шахты, 2020 год (слева) и Какамахской шахты, 2025 год (справа)

★ – выводковые колонии; ★ – зимующие зверьки [12]; ➡ – вход; ⇕ – лестница; ✗ – обвалы

Figure 1. Cross-sectional map of the abandoned Adanak silo, 2020 (left), and Kakamahi silo, 2025 (right)

★ – brood colonies; ★ – wintering bats [12]; ➡ – entrance; ⇕ – stairs; ✗ – blockages

Осмотр убежищ осуществлялся методом визуального учёта. Каждое помещение обходилось систематически, с фиксацией числа особей, их распределения по секциям и наличия самок с детёнышами. Для фиксирования данных микроклимата убежища использовались детекторы температуры и влажности Tzone TZ-TempU02. Всего проведено три учётных выхода (в период с 22 по 28 сентября 2025 г.).

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Впервые обнаруженное нами убежище *M. blythii* расположено в заброшенной Какамахской шахте в пределах лесного массива на расстоянии около 2.5 км от с. Какамахи и 6,3 км. от с. Какашура. Какамахская шахта представляет собой капитальное бетонное сооружение военного назначения, заброшенное в

конце 80-х годов прошлого века, по своей схеме идентичное Аданакской шахте. Шахтные комплексы двухуровневые.

В подвальных помещениях частично разрушенной подземной части Какамахской шахты выявлена выводковая колония остроухой ночницы *M. blythii* численностью около 200 особей. Наибольшая плотность животных отмечалась в дальних от входа помещениях с ограниченным доступом света и сквозняков (рис. 1). Температура в помещениях занимала диапазон от +15 °C до +16,6 °C, с влажностью воздуха в пределах 73–80 %.

В момент наблюдений были обнаружены самки с детёнышами (рис. 2). Присутствие других видов рукокрылых не зарегистрировано.



Рисунок 2. Самка остроухой ночницы *M. blythii* с детенышем, Какамахская шахта, 2025 год (фото М.Г. Джапилова)
Figure 2. Female *M. blythii* with a batling, Kakamah silo, 2025 (photo by M.G. Jalilov)

По характеру размещения особей, структуре убежища и микроклимату колония схожа с таковой в Аданакской шахте. Такие объекты, по нашему мнению, обладают более стабильным микроклиматом и выполняют роль репродуктивных убежищ для *M. blythii*. Формируемые условия, по всей видимости, позволяют образовывать не только выводковые колонии, но и гибернационные, что было ранее отмечено в Аданакской шахте [12].

При этом, угрозой для подобных колоний остается прямое влияние со стороны человека: полное разрушение и засыпка подземных помещений или изменение микроклимата вследствие частичного демонтажа конструкций.

Обнаруженные колонии на техногенных объектах демонстрируют схожую с природными убежищами по численности репродуктивную структуру [1; 11]. Например, П.П. Стрелков в 1968 описывал выводковую колонию *M. blythii* на Алтае численностью до 4 тыс. особей [14]. Впоследствии пещера была включена в систему охраняемых территорий, что обеспечило сохранение колонии [15; 16].

На территории Республики Дагестан ранее неоднократно фиксировались репродуктивные или зимующие колонии /отдельные особи летучих мышей разных видов в техногенных заброшенных сооружениях: заброшенная железнодорожная станция Кумторкала, давно недействующие и заброшенные водонапорные башни, разные штольни, заброшенные складские комплексы и овощехранилища санаториев и оздоровительных лагерей и т.п. [1; 9; 10; 12].

Учитывая использование рукотворными техногенными сооружениями для размножения, их следует рассматривать как приоритетные объекты мониторинга и потенциальные элементы региональной сети охраняемых мест обитания редких видов [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые для Республики Дагестан выявлена выводковая колония *M. blythii* в частично разрушенной Какамахской шахте, Республика Дагестан, численностью до 200 особей. Колония по структуре и условиям полностью аналогична ранее уничтоженной Аданакской шахте, что подтверждает способность вида повторно заселять техногенные убежища.

Подобные объекты, на наш взгляд, выполняют ключевую роль в размножении и, вероятно, зимовке вида, и требуют обязательного учёта при планировании хозяйственной и природоохранной деятельности. Необходимо продолжать исследования, связанные с поиском новых мест расположения выводковых колоний и мест зимовок летучих мышей на территории Северо-Восточного Кавказа с особым вниманием к заброшенным техногенным сооружениям.

Как показал опыт Алтайского края [14], придание репродуктивным убежищам охранного статуса способствует сохранению крупных выводковых колоний *M. blythii*. Аналогичные меры следует рассматривать для техногенных объектов Северо-Восточного Кавказа, что позволит сохранить численность популяции краснокнижного вида на периферии ареала.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-14-20072, <https://rscf.ru/project/25-14-20072/>

ACKNOWLEDGEMENT

The work was supported by the Russian Science Foundation project № 25-14-20072, <https://rscf.ru/project/25-14-20072/>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Смирнов Д.Г. и др. Рукокрылые (Chiroptera) Дагестана: обзор фауны по итогам исследований в 2017-2019 // *Plecotus*. 2019. N 22. С. 3–48.
- Juste J., Paunović M. *Myotis blythii*. The IUCN Red List of Threatened Species 2016: e.T14124A22053297. URL: <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-2.RLTS.T14124A22053297.en> (дата обращения: 19.08.2025)
- Иваницкий А.Н., Алексеев А.Ю. Распространение рукокрылых в субтропических районах Черноморья и прилегающих территориях // Юг России: экология, развитие. 2023. Т.18, N 4. С. 8-30. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-4-8-30>
- Красная книга Республики Дагестан. Махачкала: Типография ИП Джамалудинов М.А., 2020. 800 с.
- Красная книга Российской Федерации, том «Животные». 2-ое издание. Москва: ФГБУ «ВНИИ Экология», 2021. 1128 с.
- Красная книга Алтайского края. Т. 2: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды животных / науч. ред.: Н.Л. Ирисова, Е.В. Шапетько. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2016. 312 с.
- Гусендибиров Д.С. Крупные пещеры Предгорного Дагестана // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2012. N 1. С. 90–94.
- Амирханов З.М. Размещение рукокрылых в Дагестане // Рукокрылые (Chiroptera). Москва: Наука, 1980. С. 63–69.
- Газарян С.В., Джамирзоев Г.С. Итоги и перспективы изучения хироцерофауны Дагестана // Материалы международной конференции «Млекопитающие горных территорий», Москва, 4–9 сентября, 2005. С. 49–57.
- Газарян С. В. Остроухая ночница *Myotis blythii* (Vespertilionidae, Myotinae) на российском Кавказе // *Plecotus et al.* 2017. N 20. С. 30–53.
- Жигалин А.В., Муташев Б.А., Казаватова А.С., Абдулхаликова Д.М., Насрутдинов Б.У. Фауна позвоночных пещеры Кызыташ (Карабудахкентской / Живой) в Республике Дагестан // Юг России: экология, развитие. 2023. Т. 18. N 2. С. 6–14. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-2-6-14>
- Смирнов Д.Г., Вехник В.П., Джамирзоев Г.С. Предварительные данные о зимовках рукокрылых в Дагестане: места находок и экологические особенности // *Plecotus et al.* 2021. N 24. С. 3–17.
- Камалова Т.А., Магомедбеков Г.У., Нажмутдинова С.А., Абдуллаев Н.А. Проблемы и перспективы устойчивого развития туристско-рекреационного комплекса Республики Дагестан // Юг России: экология, развитие. 2017. N 2. С. 213–228. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2017-2-213-228>
- Стрелков П. П. Остроухие ночницы на Алтае: В защиту летучих мышей // Природа. 1968. N 2. С. 59–61.
- Андреева И.В. и др. Красная книга Алтайского края. Т. 3. Особо охраняемые природные территории. Барнаул: Администрация Алт. края, Упр. природ. ресурсов и охраны окружающей среды Алт. края, 2009. 272 с.
- Силантеева М.М. и др. Памятники природы Алтайского края. Барнаул: Упр. природ. ресурсов и охраны окружающей среды Алт. края, Алт. гос. ун-т, 2011. 121 с.
- Mitchell-Jones A.J., Bihari Z., Masing M., Rodrigues L. Protecting and managing underground sites for bats. Eurobat Publication Series N 2. UNEP/Eurobat secretariat, Bonn, Germany, 2007. 38 p.
- Juste J., Paunovic M. *Myotis blythii*. The IUCN Red List of Threatened Species. 2016: e.T14124A22053297. Available at: <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-2.RLTS.T14124A22053297.en>. (accessed 19.08.2025)
- Ivanitzky A.N., Alekseev A.Yu. Distribution of bats in the subtropical regions of the Black Sea coast and adjacent territories. *South of Russia: ecology, development*, 2023, vol. 18, no. 4, pp. 8–30. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-4-8-30>
- Krasnaya kniga Respubliki Dagestan* [Red Book of the Republic of Dagestan]. Makhachkala, Dzhamaudinov M.A. Publ., 2020, 800 p. (In Russian)
- Krasnaya kniga Rossiiskoi Federatsii, tom «Zhivotnye»* [Red Book of the Russian Federation. Vol. "Animals"]. Moscow, FGBU "VNIIEkologiya" Publ., 2021, 2nd ed., 1128 p. (In Russian)
- Krasnaya kniga Altaiskogo kraia. T. 2: Redkie i nakhodyashchiesya pod ugrozoi ischeznoveniia vidy zhivotnykh* [Red Book of the Altai Krai. Vol. 2: Rare and Endangered Animal Species]. Barnaul, AltSU Publ., 2016, 312 p. (In Russian)
- Gusendibirov D.S. Large caves of Piedmont Dagestan. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki* [Bulletin of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and Exact Sciences]. 2012, no. 1, pp. 90–94. (In Russian)
- Amirkhanov Z.M. Distribution of bats in Dagestan. In: *Rukokrylye (Chiroptera)* [Bats (Chiroptera)]. Moscow, Nauka Publ., 1980, pp. 63–69. (In Russian)
- Gazaryan S.V., Dzhmirzoev G.S. Itogi i perspektivy izucheniya khiropterofauny Dagestana [Results and prospects of the study of the chiroptero fauna of Dagestan]. *Materialy mezhdunarodnoi konferentsii «Mlekopitayushchie gornyykh territorii»*, Moskva, 4–9 sentyabrya, 2005 [Proceedings of the International Conference "Mammals of Mountain Areas", Moscow, 4–9 September 2005]. Moscow, 2005, pp. 49–57. (In Russian)
- Gazaryan S.V. The Lesser mouse-eared bat *Myotis blythii* (Vespertilionidae, Myotinae) in the Russian Caucasus. *Plecotus et al.* [Plecotus et al.]. 2017, no. 20, pp. 30–53. (In Russian)
- Zhigalin A.V., Mutashev B.A., Kazavatova A.S., Abdulkhalikova D.M., Nasrutdinov B.U. The vertebrate fauna of the Kyzdash Cave (Karabudakhkentskaya / Zhivoy) in the Republic of Dagestan, Russia. *South of Russia: ecology, development*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 6–14. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-2-6-14>
- Smirnov D.G., Vekhnik V.P., Dzhmirzoev G.S. Preliminary data on bat hibernation in Dagestan: finding sites and ecological features. *Plecotus et al.* [Plecotus et al.]. 2021, no. 24, pp. 3–17. (In Russian)
- Kamalova T.A., Magomedbekov G.U., Nazhmudinova S.A., Abdullaev N.A. Problems and prospects of sustainable development of the recreation complex in the Republic of Dagestan. *South of Russia: ecology, development*, 2017, vol. 12, no. 2, pp. 213–228. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2017-2-213-228>
- Strelkov P.P. Lesser mouse-eared bats in Altai: In defense of bats. *Priroda* [Nature]. 1968, no. 2, pp. 59–61. (In Russian)
- Andreeva I.V. et al. *Krasnaya kniga Altaiskogo kraia. T. 3. Osobo okhranyaemye prirodnye territorii* [Red Book of the Altai Krai. Vol. 3: Specially Protected Natural Territories]. Barnaul, Administration of the Altai Territory, Department of Natural Resources and Environmental Protection of the Altai Territory Publ., 2009, 272 p. (In Russian)
- Silanteva M.M. *Pamyatniki prirody Altaiskogo kraia* [Natural Monuments of the Altai Krai]. Barnaul, Department of Natural Resources and Environmental Protection of the Altai Territory, ASU Publ., 2011, 121 p. (In Russian)
- Mitchell-Jones A.J., Bihari Z., Masing M., Rodrigues L. Protecting and managing underground sites for bats. Eurobats Publication Series no. 2. Bonn, UNEP/Eurobats Secretariat Publ., 2007, 38 p.

REFERENCES

- Smirnov D.G., Vekhnik V.P., Dzhmirzoev G.S. et al. Bats (Chiroptera) of Dagestan: a review of the fauna based on research results in 2017-2019. *Plecotus* [Plecotus]. 2019, no. 22, pp. 3–48. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Батыргыши А. Муташев, Магомедали Г. Джалилов и Александр В. Жигалин проводили обследование убежищ. Алимурад А. Гаджиев и Александр Ю. Алексеев участвовали в организации экспедиционных работ и камеральной обработке данных. Все авторы в равной

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Batyrgishi A. Mutashev, Magomedali G. Dzhaliilov and Alexander V. Zhigalin conducted the shelter survey. Alimurad A. Gadzhiev and Alexander Yu. Alekseev participated in organizing the expedition work and processing the data. All authors contributed equally to the

степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Алимурад А. Гаджиев / Alimurad A. Gadzhiev <https://orcid.org/0000-0002-7359-1951>

Батыргиши А. Муташев / Batyrgishi A. Mutashev <https://orcid.org/0000-0002-6078-9002>

Александр В. Жигалин / Alexander V. Zhigalin <https://orcid.org/0000-0003-4661-0560>

Александр Ю. Алексеев / Alexander Yu. Alekseev <https://orcid.org/0000-0003-0015-9305>

Магомедали Г. Джалилов / Magomedali G. Dzhaliilov <https://orcid.org/0009-0001-4404-7308>

Оригинальная статья / Original article
УДК 619:556.114:504.45
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-10



Экологический мониторинг и анализ современного состояния водных ресурсов предгорной части Дагестана, используемых для орошения пастбищ и водопоя сельскохозяйственных животных

Джавгарат М. Рамазанова¹, Шахрудин А. Гунашев¹, Миясат А. Каспарова¹,
Умалат М. Сайпуллаев¹, Мадина Г. Даудова², Сайпула М. Абдулмаджидов²

¹Прикаспийский зональный научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал ФГБНУ «ФАНЦ РД»,
Махачкала, Россия

²Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

Контактное лицо

Джавгарат М. Рамазанова, старший научный сотрудник лаборатории ветеринарной санитарии, гигиены и экологии, Прикаспийский зональный научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал ФГБНУ «ФАНЦ РД»; 367000 Россия, г. Махачкала, ул. Дахадаева, 88.
Тел. +79637904590
Email ramazanovadm@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4928-1635>

Формат цитирования

Рамазанова Д.М., Гунашев Ш.А., Каспарова М.А., Сайпуллаев У.М., Даудова М.Г., Абдулмаджидов С.М. Экологический мониторинг и анализ современного состояния водных ресурсов предгорной части Дагестана, используемых для орошения пастбищ и водопоя сельскохозяйственных животных // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 108-115.
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-10

Получена 2 октября 2025 г.
Прошла рецензирование 18 октября 2025 г.
Принята 29 октября 2025 г.

Резюме

Цель: комплексно оценить гидрохимическое состояние водных объектов Буйнакского района Республики Дагестан, используемых для орошения пастбищ и водопоя сельскохозяйственных животных. Пробы воды, отобранные в характерных точках каждого объекта, гидрохимические показатели определяли стандартными методами. Ионный состав NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} анализировали методом капиллярного электрофореза; общую жесткость – титриметрически по суммарному содержанию Ca^{2+} и Mg^{2+} ; ХПК и БПК₅ – фотометрически; pH – pH-метром. Во всех объектах выявлены превышения по ряду показателей. Наиболее выражены концентрации биогенных элементов (аммоний, фосфаты) и показатели минерализации, особенно для р. Шура-Озень и оз. Буглен-2, что указывает на прогрессирование эвтрофикации и высокую антропогенную нагрузку. Для канала Капчугай выявлена внутриканальная динамика соединений азота, согласующаяся с процессами самоочищения. Новизна – сравнительный анализ химического состава 3 водных объектов региона по данным 2024–2025 гг. и выявление факторов антропогенного воздействия. Данные подтверждают необходимость регулярного экологического мониторинга и внедрения природоохранных мер для стабилизации состояния водных экосистем предгорной зоны Дагестана.

Ключевые слова

Природная вода, гидрохимические показатели, ПДК, загрязнение, мониторинг, жесткость воды, эвтрофикация.

Environmental monitoring and analysis of the current state of water resources of the foothills of Dagestan used to irrigate pastures and watering of agricultural animals

Dzhavgarat M. Ramazanova¹, Shakhruddin A. Gunashev¹, Miyasat A. Kasparova¹, Umalat M. Saipullaev¹, Madina G. Daudova² and Saipula M. Abdulmadzhidov²

¹Caspian Zonal Research Veterinary Institute, Branch of FANC RD, Makhachkala, Russia

²Dagestan State University, Makhachkala, Russia

Principal contact

Dzhavgarat M. Ramazanova, Senior Researcher, Laboratory of Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology, Caspian Zonal Research Veterinary Institute, Branch of FANC RD; 88 Dakhadaeva St, Makhachkala, Russia 367000.

Tel. +79637904590

Email ramazanovadm@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4928-1635>

How to cite this article

Ramazanova D.M., Gunashev Sh.A., Kasparova M.A., Saipullaev U.M., Daudova M.G., Abdulmadzhidov S.M. Environmental monitoring and analysis of the current state of water resources of the foothills of Dagestan used to irrigate pastures and watering of agricultural animals. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):108-115. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-10

Received 2 October 2025

Revised 18 October 2025

Accepted 29 October 2025

Abstract

The objective was to provide a comprehensive assessment of the hydrochemical status of water bodies in the Buynaksky District of the Republic of Dagestan, Russia, used for pasture irrigation and for watering farm animals.

Water samples were collected at representative points of each site; hydrochemical parameters were determined using standard methods. The ionic composition of NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} was analysed by capillary electrophoresis; total hardness was measured titrimetrically based on the combined Ca^{2+} and Mg^{2+} content; COD and BOD₅ were determined photometrically; and pH was measured using a pH meter.

Exceedances of permissible levels were recorded for several parameters at all sites. The most pronounced were concentrations of nutrients (ammonium and phosphates) and mineralisation indicators, especially in the Shura-Ozen River and Buglen-2 Lake, indicating progressing eutrophication and a high anthropogenic load. For the Kapchugay Canal, intra-channel dynamics of nitrogen compounds were identified, consistent with self-purification processes. Novelty lies in the comparative analysis of the chemical composition of 3 regional water bodies based on 2024–2025 data and in identifying anthropogenic factors shaping current environmental risks.

The findings confirm the need for regular environmental monitoring and the implementation of conservation measures to stabilise aquatic ecosystems in the foothill zone of Dagestan.

Key Words

Natural water, hydrochemical indicators, MPC, pollution, monitoring, water hardness, eutrophication.

ВВЕДЕНИЕ

Вода – ключевой природный ресурс, без которого невозможны устойчивое функционирование экосистем, здоровье населения и продуктивность животноводства. При этом загрязнение водных объектов остается одной из самых острых экологических проблем – промышленные сбросы, сельскохозяйственные стоки и бытовые отходы, поступая в реки и озера, ухудшают качество воды и провоцируют деградацию водных биоценозов [1; 2]. Особую опасность представляют тяжелые металлы и пестициды, так как они способны накапливаться в организмах, формируя хронические эффекты и повышая риски для животных и человека [3; 4]. Снижение экологического ущерба требует сочетания технических решений (очистка стоков), организационных мер и рационального водопользования в агросекторе и коммунальном хозяйстве. В последние десятилетия антропогенная деятельность стала ведущим фактором изменений природной среды, в том числе ее гидрогеологической составляющей. Для Республики Дагестан это выражается, прежде всего, в трансформации гидродинамических и гидрохимических характеристик подземных вод. Несмотря на наличие запасов пресных подземных вод, сохраняются проблемы их загрязнения биологически опасными веществами, нерационального водопользования, а также риска поступления высокоминерализованных вод из глубоких горизонтов, нередко содержащих токсичные элементы [5]. Гидрохимический анализ – один из базовых инструментов оценки состояния водных объектов, позволяющий количественно описывать состав воды и своевременно фиксировать отклонения от нормативов [6; 7]. Важными показателями являются общая жесткость (как отражение содержания солей Ca и Mg) и кислотность (pH), влияющие на физиологическое состояние гидробионтов и пригодность воды для хозяйственного использования [4; 8–12].

Республика Дагестан отличается большим числом малых рек и озер, испытывающих значительную антропогенную нагрузку. Для водоемов, используемых при орошении пастбищ и водопое сельскохозяйственных животных, мониторинг гидрохимических параметров приобретает практическое значение, позволяя выявлять источники загрязнения и обосновывать природоохранные мероприятия [13]. Настоящая работа посвящена сравнительному анализу химического состава воды трех водных объектов Буйнакского района – р. Шура-Озень, оз. Буглен-2 и ирригационного канала Капчугай – по данным 2024 и 2025 гг.

Цель исследования – комплексная оценка качества воды по гидрохимическим показателям с использованием нормативов для водоемов рыбохозяйственного значения и выявление факторов, определяющих текущее состояние водных экосистем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор, транспортировку и подготовку проб выполняли в 2024–2025 гг. по общепринятым методикам. Исследования по содержанию тяжелых металлов, перманганатной и бихроматной окисляемости, минерализации и другим показателям проводили в специализированных лабораториях Кропоткинской краевой ветеринарной лаборатории и Дагестанского

государственного университета. Пробы воды отбирали в следующих пунктах: среднее течение р. Шура-Озень, оз. Буглен-2, а также канал Капчугай (левый берег, начало и конец канала). Поскольку указанные водные объекты используются для орошения и водопоя, их гидрохимическое состояние имеет важное хозяйственное значение. Оценку качества воды проводили по показателям pH, ХПК, БПК₅, общей жесткости, сухому остатку и концентрациям основных ионов NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} .

Определение катионов и анионов выполняли методом капиллярного электрофореза (КЭФ), общую жесткость – титриметрически, ХПК и БПК₅ – фотометрически, pH – с использованием pH-метра. Полученные результаты сопоставляли с ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения, установленными действующими нормативными документами РФ. Для ключевых показателей использовали следующие значения ПДК (мг/л): NH_4^+ – 0,5; NO_2^- – 0,08; NO_3^- – 40; PO_4^{3-} – 0,2; SO_4^{2-} – 100; Cl^- – 300; сухой остаток – 1000; БПК₅ – 3; ХПК – 30; pH – 6,0–9,0; общая жесткость – 7–10 мг-экв/л (рекомендуемый диапазон для рыбохозяйственных водоемов).

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гидрохимический анализ показал, что качество воды во всех трех водоемах по ряду параметров не соответствует нормативам (табл. 1). Наиболее существенные превышения отмечены по соединениям биогенной группы (аммоний и фосфаты), а также по показателям минерализации (сульфаты, сухой остаток). Максимальные значения фосфатов достигали 43,9 мг/л в р. Шура-Озень (2025 г.), что соответствует 219,5-кратному превышению ПДК, а аммония – 23,9 мг/л (47,8 ПДК), что свидетельствует о выраженных предпосылках эвтрофикации.

По химическому составу воды исследованные объекты относятся к различным гидрохимическим типам. На рис. 1 представлено распределение основных ионов в воде р. Шура-Озень, оз. Буглен-2 и канала Капчугай, выраженное в массовых процентах от суммы основных солей. Для р. Шура-Озень характерна гидрокарбонатно-сульфатная вода кальциево-натриевого состава – значительная доля суммарной минерализации приходится на гидрокарбонаты и сульфаты при заметном вкладе ионов Ca^{2+} и Na^+ .

В воде оз. Буглен-2 доминируют сульфаты (до 58 % от суммы растворенных солей) и кальций, что соответствует минерализованному сульфатно-кальциевому типу воды. Вода канала Капчугай характеризуется сопоставимыми долями сульфатов и гидрокарбонатов при повышенных концентрациях Ca^{2+} и Mg^{2+} . Высокая суммарная минерализация оз. Буглен-2 и канала Капчугай подтверждается значениями сухого остатка. В озере Буглен-2 сухой остаток составляет 3087–3550 мг/л, что превышает допустимый уровень для рыбохозяйственных водоемов (1000 мг/л) примерно в 3,5 раза (рис. 2).

Для канала Капчугай сухой остаток составляет 1050 мг/л (выше ПДК), тогда как для р. Шура-Озень – 999 мг/л (на уровне нормативного значения). Таким образом, оз. Буглен-2 относится к минерализованным (солончатым) водоемам, канал Капчугай – к водам умеренной минерализации, а р. Шура-Озень – к пресным. Повышенная минерализация озера, вероятно,

обусловлена сочетанием геохимических особенностей (выщелачивание солей) и отсутствия выраженного стока при интенсивном испарении, что приводит к накоплению растворенных веществ. Высокие концентрации сульфатов (до 1,9 г/л) и значительные значения общей жесткости (до 40 мг-экв/л) подтверждают высокую насыщенность минеральными компонентами. Жесткость воды р. Шура-Озень составила 9,8–13,2 мг-экв/л, а в канале Капчугай – 9,4–25,3 мг-экв/л. Избыточная жесткость может неблагоприятно отражаться на пресноводных

организмах, затрудняя осморегуляцию и усиливая физиологический стресс в чувствительные периоды (нерест, развитие молоди), особенно у видов, не адаптированных к повышенной минерализации.

Показатели БПК₅ и ХПК характеризуют степень органического загрязнения и потенциальный риск дефицита растворенного кислорода. Во всех водоемах отмечены повышенные значения БПК₅: для р. Шура-Озень – 6,3 мг/л (2,1 ПДК), для оз. Буглен-2 – 5,78 мг/л, а для канала Капчугай – до 5,47 мг/л (рис. 3).

Таблица 1. Показатели гидрохимического анализа проб воды в водных объектах Буйнакского района
Table 1. Indicators of hydrochemical analysis of water samples in water bodies of the Buinaksk region

Показатель Indicator	Шура-Озень, 2024 Shura-Ozen, 2024	Шура-Озень, 2025 Shura-Ozen, 2025	Буглен-2, 2024 Buglen-2, 2024	Буглен-2, 2025 Buglen-2, 2025	Капчугай (левый берег), 2025 Kapchu-gay (left bank), 2025	Капчугай, 2024 Kapchu-gay, 2024	Капчугай, 2025 Kapchu-gay, 2025	ПДК, мг/л MAC, mg/l
pH	7,20	6,97	7,80	6,82	7,02	7,04	7,20	6,0-9,0
Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	1,000	1,002	1,003	1,003	1,002	1,001	1,001	-
ХПК, мг/л COD, mg/l	58*	-	104*	-	-	-	-	30
БПК ₅ , мг/л BOD ₅ , mg/l	4,4*	6,3*	3,0	5,78*	4,66*	5,47*	3,11*	3
Жесткость, мг-экв/л Hardness, mg-eq/l	13,2	9,8	40	35	25,3	9,4	11,6	-
NH ₄ ⁺ , мг/л NH ₄ ⁺ , mg/l	-	23,9*	-	-	12,3*	12,6*	0,86*	0,5
Na ⁺ , мг/л Na ⁺ , mg/l	83,7	115	209	193	198	109	93,0	-
K ⁺ , мг/л K ⁺ , mg/l	10,1	47,7	3,9	-	19,9	15,1	15,5	-
Mg ²⁺ , мг/л Mg ²⁺ , mg/l	43,1	55,2	195	182	128	39	49,9	-
Ca ²⁺ , мг/л Ca ²⁺ , mg/l	193	10,4	474	396	295	124	150	-
Cl ⁻ , мг/л Cl ⁻ , mg/l	44,5	45,5	28,4	88,1	67,0	56,7	65,7	300
HCO ₃ ⁻ , мг/л HCO ₃ ⁻ , mg/l	485	488	500	207	250	451	369	-
SO ₄ ²⁻ , мг/л SO ₄ ²⁻ , mg/l	379*	263*	1920*	1807*	1318*	269*	362*	100
NO ₂ ⁻ , мг/л NO ₂ ⁻ , mg/l	-	-	-	-	-	-	-	0,08
NO ₃ ⁻ , мг/л NO ₃ ⁻ , mg/l	-	36,2	-	-	-	35,5	41,2*	40
PO ₄ ³⁻ , мг/л PO ₄ ³⁻ , mg/l	3,2*	43,9*	6,2*	-	-	-	-	0,2
Сухой остаток, мг/л Total dissolved solids, mg/l	999	-	3087*	3550*	-	1050*	1050*	1000

Примечание: Превышения ПДК отмечены звездочкой (*)
Note: Exceedances of maximum allowable concentrations (MAC) are marked with an asterisk (*)

Повышение БПК₅ согласуется со значениями ХПК_{Cr}: в 2024 г. для оз. Буглен-2 ХПК составил 104 мг/л (3,5 ПДК), для р. Шура-Озень – 58 мг/л (1,9 ПДК), тогда как в пробах канала Капчугай ХПК находился в пределах

нормы. Такой профиль характерен для поступления органических веществ со стоками – как коммунальными, так и сельскохозяйственными (навоз, растительные остатки). Разложение органики

сопровождается потреблением кислорода, что повышает риск гипоксии, особенно в ночные часы и в придонных слоях. Для многих видов рыб стрессовые реакции начинаются при содержании O_2 ниже 4–5 мг/л. Вероятными источниками органического загрязнения в бассейне р. Шура-Озень могут быть населенные пункты при недостаточной очистке стоков. Для оз. Буглен-2 дополнительными факторами могут выступать выпас

скота и несанкционированное размещение органических отходов в прибрежной зоне. Наиболее выраженное биогенное загрязнение выявлено в воде р. Шура-Озень. В 2025 г. концентрация аммонийного азота достигла 23,9 мг/л (47,8 ПДК), а фосфатов – 43,9 мг/л (около 219 ПДК), что создает условия для ускоренной эвтрофикации (рис. 4).

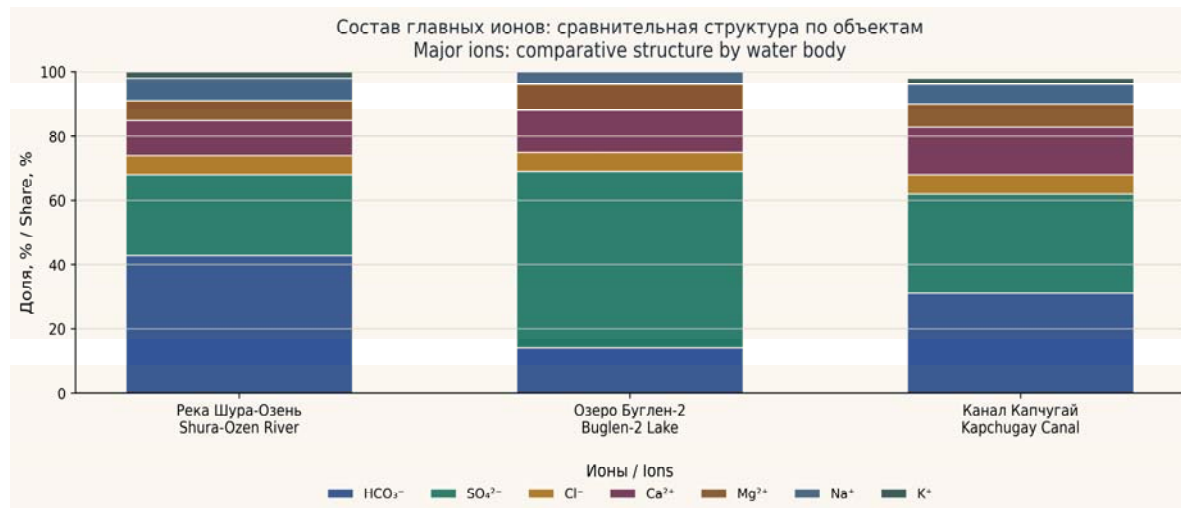


Рисунок 1. Распределение основных катионов и анионов в водных объектах Буйнакского района Республики Дагестан

Figure 1. Distribution of the main cations and anions in water bodies of the Buynaksk region of the Republic of Dagestan

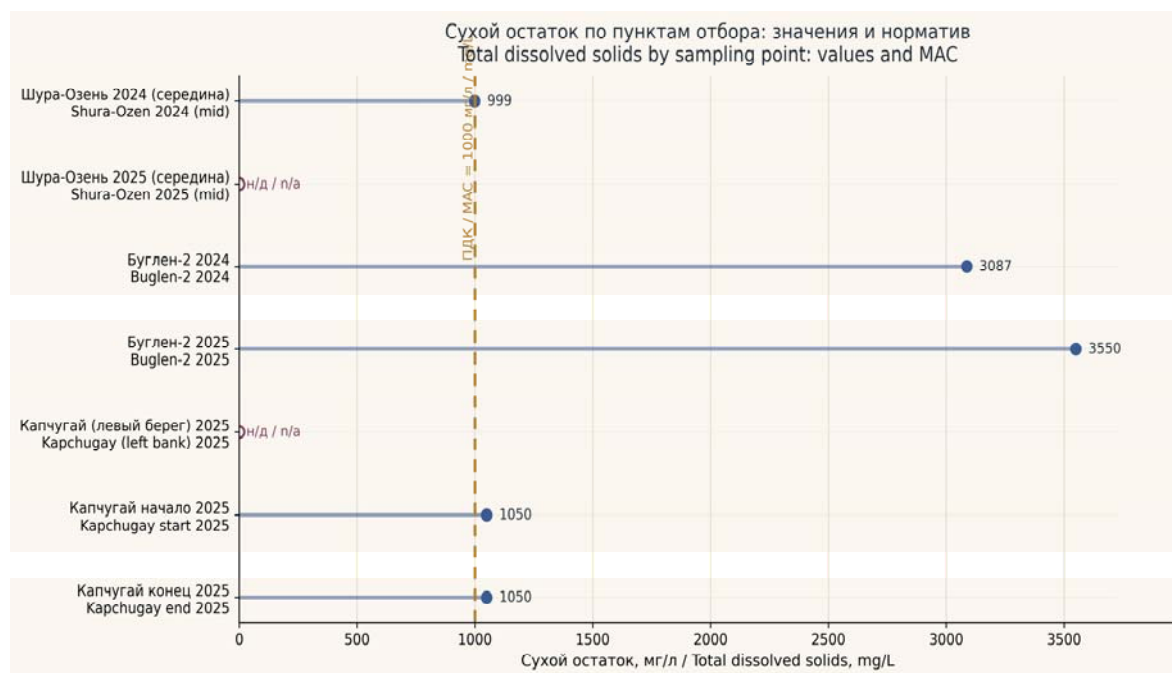


Рисунок 2. Сравнение значений сухого остатка воды в разных точках и годах с предельно допустимой концентрацией (ПДК)

Figure 2. Comparison of total dissolved solids at different sites and years with the maximum permissible concentration (MPC)

В 2024 г. концентрация фосфатов в р. Шура-Озень составила 3,2 мг/л (16 ПДК), а в оз. Буглен-2 – 6,2 мг/л (31 ПДК). В пробах воды из канала Капчугай фосфаты были ниже предела обнаружения, что указывает на крайне низкое содержание данного компонента в анализируемых точках.

Избыток соединений азота и фосфора обычно связан с точечным поступлением загрязнений – сельскохозяйственными стоками или неочищенными коммунальными стоками. Повышенные концентрации биогенов стимулируют рост водорослей, вызывая помутнение, неприятный запах и ночное падение кислорода вследствие дыхания фитопланктона, и

минерализации органики, что может приводить к заморам рыбы и деградации экосистемы. В канале Капчугай прослеживается трансформация форм азота по мере течения концентрация аммония снижалась с 12–13 до 0,86 мг/л, а концентрация нитратов возрастала с 35,5 до 41,2 мг/л. Такая динамика соответствует биологическому самоочищению. При этом близкие к предельным значения нитратов в конце канала требуют внимания, хотя они токсикологически менее опасны для рыб, чем высокие концентрации аммония,

особенно при повышенном pH, когда возрастает доля токсичной формы NH_3 . Сопоставление трех водоемов показывает, что наиболее неблагоприятные показатели характерны для оз. Буглен-2 (высокая минерализация, сульфаты, органическое загрязнение). Для р. Шура-Озень ведущей проблемой является биогенное загрязнение, а для канала Капчугай – сочетание повышенной минерализации и органической нагрузки при изменении состава по течению.

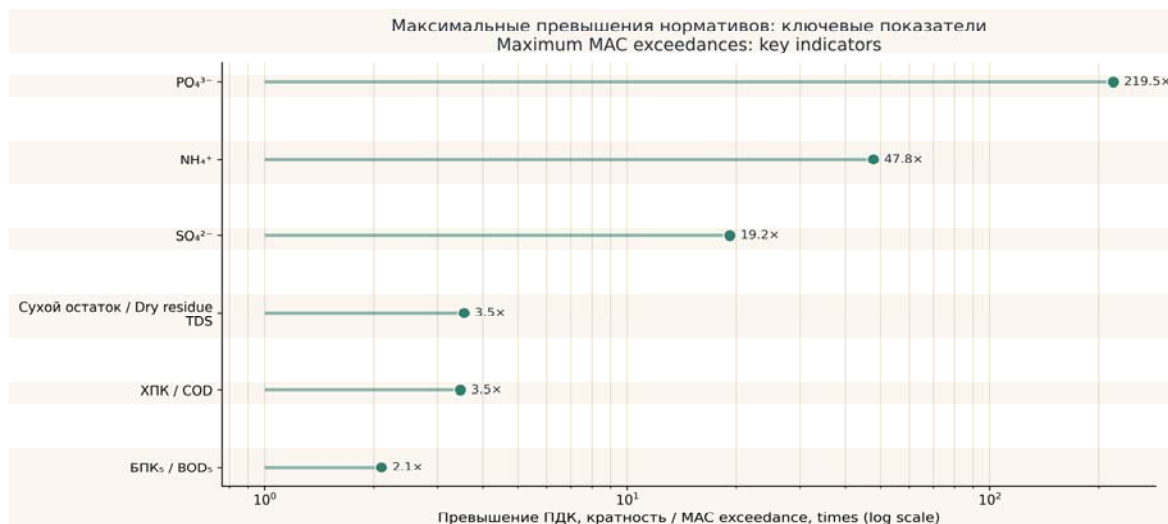


Рисунок 3. Содержание ключевых загрязнителей в воде в процентах от ПДК в водных объектах Буйнакского района
Figure 3. Content of key pollutants in water as a percentage of MAC in water bodies of the Buynaksk region



Рисунок 4. Кратность превышения предельно допустимых концентраций основных загрязняющих веществ в воде исследуемых водоемов

Figure 4. Ratio of exceeding the maximum permissible concentrations of the main pollutants in the water of the studied reservoirs

В целом ни один из исследованных водных объектов не соответствует полностью нормативам для рыбохозяйственных вод и требованиям к воде, используемой для водопоя животных, поскольку в каждом случае выявлены превышения по нескольким показателям. Это отражает совокупное влияние хозяйственной деятельности (скотоводство, земледелие, коммунальные стоки), особенно заметное

для замкнутых и слабопроточных систем, где загрязняющие вещества склонны к аккумуляции.

ВЫВОДЫ

Качество воды в изученных водоемах не соответствует рыбохозяйственным стандартам и не может рассматриваться как пригодное для водопоя животных. Во всех трех водных объектах установлены превышения ПДК по ряду ключевых показателей. Для оз. Буглен-2

зафиксирована максимальная минерализация (сухой остаток до 3550 мг/л; сульфаты до 1920 мг/л), тогда как для р. Шура-Озень характерны экстремальные концентрации биогенных элементов (PO_4^{3-} до 43,9 мг/л и NH_4^+ до 23,9 мг/л), превышающие нормативы в десятки и сотни раз.

Полученные результаты формируют основу для научно обоснованного сопровождения решений в области охраны и рационального использования водных ресурсов Республики Дагестан. Перспективным направлением дальнейших исследований является расширение мониторинга за счет гидробиологических и токсикологических показателей, что позволит глубже оценить влияние загрязнений на биоту и обосновать комплексные программы сохранения устойчивости водных экосистем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Раджабова Р.Т., Ахмедова Л.Ш. Оценка природно-антропогенного воздействия на эко- и геосистемы зоны водохранилища Ирганаской ГЭС по данным дистанционного зондирования // Юг России: экология, развитие. 2024. Т. 19. N 3. С. 193–203. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2024-3-19>
2. Тулепбергенова А.Р., Ершова Т.С., Куанова А.С., Литвинова Н.В., Чаплыгин В.А., Зайцев В.Ф. Содержание тяжелых металлов в некоторых видах растений дельты Волги // Астраханский вестник экологического образования. 2023. Т. 22. N 5 (77). С. 116–119. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2023-5-116-119>
3. Идзиев Г.И., Ахмедова Л.Ш., Атаев З.В., Бекшокова П.М. Новая региональная промышленная политика и проблемы экологии // Юг России: экология, развитие. 2023. N 3. С. 161–169. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-3-161-169>
4. Islam A., Hoque M.M., Ghosh S., et al. Hydro-chemical characterization and irrigation suitability assessment of a tropical decaying river in India // Scientific Reports. 2024. V. 14. Article number: 20096. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70851-3>
5. Рамазанова Д.М., Анохина А.З., Судакова Н.В. Оценка современного состояния Северного Аграхана по гидрохимическим и гидробиологическим показателям // Рыбное хозяйство. 2023. N 3. С. 67–71. <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2023-3-67-71>
6. Расулова М.М. Антропогенное загрязнение как фактор повышения трофического уровня малых водоемов на примере озера Ак-Гель // Известия Дагестанского гос. пед. университета. Естественные и точные науки. 2008. N 3. С. 89–95.
7. Сапожников В.В., Агатова А.И., Аржанова Н.В. и др. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: ВНИРО, 2008. 202 с.
8. Magritskii D.V., Samokhin M.A., Goncharov A.V., Erina O.N., Sokolov V.V., Surkov V.V., Tereshina V.D., Mikhaylenko O.A., Semenova A.A. Features and Factors of Hydrological and Morphological Changes in the Agrakhan Bay and Their Consideration in the Context of Adaptation Measures // Water Resources. 2022. <https://doi.org/10.1134/S0097807822050098>
9. Бухтояров О.И., Несговорова Н.П., Савельев В.Г., Иванцова Г.В. Методы экологического мониторинга качества сред жизни и оценки их экологической безопасности: учеб. пособие. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2015. 239 с.
10. Рамазанова Д.М., Каспарова М.А., Сайпулаев У.М. Экологическое состояние и гидрохимический анализ озера Аккёль // Актуальные проблемы лечения и профилактики болезней молодняка: матер. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию учреждения образования «Витебская ордена «Знак Почета» гос. академия ветеринарной медицины». Витебск, 2024. С. 325–330.
11. Титова К.В., Кокрятская Н.М., Попов С.С. и др. Гидрохимическая характеристика разнотипных озер Большого Соловецкого острова // Водные ресурсы. 2024. Т. 51. N 2. С. 214–224. <https://doi.org/10.31857/S0321059624002078>
12. Shao Y., Yan B., Liu L. et al. Hydrochemical characteristics and quality evaluation of irrigation and drinking water in Bangong Co Lake Watershed, NW Tibetan Plateau // Water. 2023. V. 15. N 14. Article number: 2655. <https://doi.org/10.3390/w15142655>
13. Хажеева З.И., Плюснин А.М., Дампилова Б.В. Изменение качества воды р. Модонкуль по комбинаторному индексу загрязнения // Водные ресурсы. 2024. Т. 51. N 4. С. 485–497. <https://doi.org/10.31857/S0321059624040092>

REFERENCES

1. Radzhabova R.T., Akhmedova L.Sh. Assessment of natural and anthropogenic impact on eco- and geosystems in the Irganai HPP reservoir area based on remote sensing data. *South of Russia: Ecology, Development*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 193–203. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2024-3-19>
2. Tulepbergenova A.R., Ershova T.S., Kuanova A.S., Litvinova N.V., Chaplygin V.A., Zaitsev V.F. Heavy metal content in some plant species of the Volga Delta. *Astrakhan Bulletin of Ecological Education*, 2023, vol. 22, no. 5(77), pp. 116–119. (In Russian) <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2023-5-116-119>
3. Idziev G.I., Akhmedova L.Sh., Ataev Z.V., Bekshokova P.M. New regional industrial policy and environmental problems. *South of Russia: Ecology, Development*, 2023, no. 3, pp. 161–169. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-3-161-169>
4. Islam A., Hoque M.M., Ghosh S., et al. Hydro-chemical characterization and irrigation suitability assessment of a tropical decaying river in India. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, article number: 20096. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70851-3>
5. Ramazanova D.M., Anokhina A.Z., Sudakova N.V. Assessment of the current state of Northern Agrakhan based on hydrochemical and hydrobiological indicators. *Fisheries*, 2023, no. 3, pp. 67–71. (In Russian) <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2023-3-67-71>
6. Rasulova M.M. Anthropogenic pollution as a factor of increasing the trophic level of small water bodies: the case of Lake Ak-Gel. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki* [Proceedings of Dagestan State Pedagogical University. Natural and Exact Sciences]. 2008, no. 3, pp. 89–95. (In Russian)
7. Sapozhnikov V.V., Agatova A.I., Arzhanova N.V., et al. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskom monitoringe rybokhozyaystvennykh vodoemov i perspektivnykh dlya promysla raionov Mirovogo okeana* [Guidelines for chemical analysis of marine and freshwater during environmental monitoring of fishery water bodies and promising fishing areas of the World Ocean]. Moscow, VNIRO Publ., 2008, 202 p. (In Russian)
8. Magritskii D.V., Samokhin M.A., Goncharov A.V., Erina O.N., Sokolov V.V., Surkov V.V., Tereshina V.D., Mikhaylenko O.A., Semenova A.A. Features and factors of hydrological and morphological changes in the Agrakhan Bay and their consideration in the context of adaptation measures. *Water Resources*, 2022. <https://doi.org/10.1134/S0097807822050098>
9. Bukhtoyarov O.I., Nesgovorova N.P., Savelyev V.G., Ivantsova G.V. *Metody ekologicheskogo monitoringa kachestva sred zhizni i otsenki ikh ekologicheskoi bezopasnosti* [Methods of environmental monitoring of environmental quality and assessment of its ecological safety]. Kurgan, Kurgan State University Publ., 2015, 239 p. (In Russian)
10. Ramazanova D.M., Kasparova M.A., Saipulaev U.M. *Ekologicheskoe sostoyaniye i gidrokhimicheskii analiz ozera Akkyol'* [Ecological status and hydrochemical analysis of Lake Akkyol']. In: *Aktual'nye problemy lecheniya i profilaktiki boleznei mladnyaka: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu uchrezhdeniya obrazovaniya "Vitebskaya ordena 'Znak Pocheta' gosudarstvennaya akademiya veterinarnoy meditsiny"* [Current problems of treatment and prevention of diseases in young animals: Proc. Int. Sci.-Pract. Conf. dedicated to the 100th anniversary of the Vitebsk Order of the Badge of Honor State Academy of Veterinary Medicine]. Vitebsk, 2024, pp. 325–330. (In Russian)
11. Titova K.V., Kokryatskaya N.M., Popov S.S., et al. Hydrochemical characteristics of lakes of different types on the Bolshoy Solovetsky Island. *Water Resources*, 2024, vol. 51, no. 2, pp. 214–224. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0321059624020078>

12. Shao Y., Yan B., Liu L., et al. Hydrochemical characteristics and quality evaluation of irrigation and drinking water in Bangong Co Lake Watershed, NW Tibetan Plateau. *Water*, 2023, vol. 15, no. 14, article number: 2655. <https://doi.org/10.3390/w15142655>

13. Khazheeva Z.I., Plyusnin A.M., Dampilova B.V. Changes in the water quality of the Modonkul River using a combinatorial pollution index. *Water Resources*, 2024, vol. 51, no. 4, pp. 485–497. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0321059624040092>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Джавгарат М. Рамазанова, Шахрудин А. Гунашев, Миясат А. Каспарова, Мадина Г. Даудова проанализировали данные, интерпретировали результаты, подготовили текст рукописи. Умалат М. Сайпуллаев, Сайпула М. Абдулмаджидов отобрали пробы, подготовили исходные материалы и провели лабораторные исследования. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Dzhavgarat M. Ramazanova, Shakhruudin A. Gunashev, Miyasat A. Kasparova and Madina G. Daudova undertook data analysis, interpretation of results and drafting of the manuscript. Umalat M. Saipullaev and Saipula M. Abdulmadzhidov undertook sampling, preparation of source materials and conducted laboratory work. All authors have equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Джавгарат М. Рамазанова / Dzhavgarat M. Ramazanova <https://orcid.org/0000-0003-4928-1635>

Шахрудин А. Гунашев / Shakhruudin A. Gunashev <https://orcid.org/0000-0003-4804-2755>

Миясат А. Каспарова / Miyasat A. Kasparova <https://orcid.org/0000-0002-3576-0865>

Умалат М. Сайпуллаев / Umalat M. Saipullaev <https://orcid.org/0000-0003-0354-2932>

Мадина Г. Даудова / Madina G. Daudova <https://orcid.org/0000-0002-3729-9224>

Сайпула М. Абдулмаджидов / Saipula M. Abdulmadzhidov <https://orcid.org/0009-0004-7614-2248>

Оригинальная статья / Original article

УДК 630.181.37

DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-11



Лесохозяйственные стратегии адаптации к изменениям климата: выбор пород и оптимизация технологий лесовосстановления

Светлана С. Морковина, Наталия В. Яковенко, Елена А. Колесниченко,

Дарья А. Литовченко, Андрей Н. Топчиев

Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия

Контактное лицо

Наталия В. Яковенко, доктор географических наук, профессор, НИИ ИТЛК, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова; 394087 Россия, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8.

Tel. +79191889232

Email n.v.yakovenko71@gmail.com,ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4203-0040>

Формат цитирования

Морковина С.С., Яковенко Н.В., Колесниченко Е.А., Литовченко Д.А., Топчиев А.Н. Лесохозяйственные стратегии адаптации к изменениям климата: выбор пород и оптимизация технологий лесовосстановления // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 116-128. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-11

Получена 12 мая 2025 г.

Прошла рецензирование 14 июля 2025 г.

Принята 25 октября 2025 г.

Резюме

Цель: определить наиболее эффективные технологии реализации лесоклиматических проектов по лесовосстановлению и лесоразведению, позволяющие максимизировать поглощение парниковых газов и повысить устойчивость лесных экосистем Центральной лесостепи Европейской части России.

В качестве объекта исследования выбраны леса лесного фонда шести субъектов РФ (Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая, Орловская и Тамбовская области). Для оценки эффективности технологий использовались лесотипологическая система П.С. Погребняка и эдафическая сетка типов лесорастительных условий, предусматривающие дифференциацию по четырём типам почвенного богатства и шести грациям увлажнения. Были проведены анализ и сопоставление лесных планов, оценены выбросы и поглощение парниковых газов по выбранным породным составам и схемам смешения древесных пород.

Выделены оптимальные типы лесорастительных условий для масштабной реализации лесоклиматических проектов. Наиболее эффективными признаны технологии искусственного лесовосстановления с использованием местных хозяйственно ценных пород, обеспечивающих сокращение выбросов CO₂ на 12–15 % и увеличение ежегодного поглощения парниковых газов до 2,8 т/га. Комбинирование породного состава и адаптация схем смешения позволили повысить устойчивость насаждений к климатическим стрессам на 18–22 %.

Разработанные проектные сценарии могут служить основой для масштабирования лесоклиматических проектов в Центральной лесостепи, обеспечивая как экологическую, так и экономическую эффективность мероприятий по секвестрации углерода.

Ключевые слова

Лесоклиматические проекты, устойчивое развитие, лесовосстановление, технологии.

Forest management strategies for adaptation to climate change: Species selection and optimisation of reforestation technologies

Svetlana S. Morkovina, Nataliya V. Yakovenko, Elena A. Kolesnichenko,
Daria A. Litovchenko and Andrey N. Topcheev

G.F. Morozov Voronezh State University of Forestry and Technologies, Voronezh, Russia

Principal contact

Nataliya V. Yakovenko, Doctor of Geography,
Professor, Research Institute of Innovative
Technologies and the Forestry Complex,
G.F. Morozov Voronezh State University Forestry
and Technologies; 8, Timiryazev St, Voronezh,
Russia 394087.

Tel. +79191889232

Email n.v.yakovenko71@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4203-0040>

How to cite this article

Morkovina S.S., Yakovenko N.V., Kolesnichenko
E.A., Litovchenko D.A., Topcheev A.N. Forest
management strategies for adaptation to climate
change: Species selection and optimisation of
reforestation technologies. *South of Russia:
ecology, development*. 2025; 20(4):116-128.
(In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-11

Received 12 May 2025

Revised 14 July 2025

Accepted 25 October 2025

Abstract

The aim is to identify the most effective technologies for implementing forest-climatic reforestation and afforestation projects that maximise the absorption of greenhouse gases and increase the sustainability of forest ecosystems in the central forest-steppe of the European part of Russia.

The forests of the forest fund of six regions of the Russian Federation (Belgorod, Voronezh, Kursk, Lipetsk, Orel and Tambov Regions) were selected as the object of the research. The forest typology system of P.S. Pogrebnyak and the edaphic grid of forest conditions types have been used to assess the effectiveness of technologies, providing for differentiation according to four types of soil richness and six moisture gradations. The forest plans were analysed and compared and greenhouse gas emissions and sequestration were estimated for selected species compositions and tree species mixing schemes.

Optimal types of forest conditions for large-scale implementation of forest-climatic projects have been identified. The most effective technologies of artificial reforestation with the use of local economically valuable species have been recognised, which would provide a 12–15 % reduction in CO₂ emissions and an increase in annual greenhouse gas absorption of up to 2.8 t/ha. The combination of species composition and adaptation of mixing schemes would allow the increase of resistance of plantations to climatic stresses by 18–22 %.

The project scenarios developed can serve as a basis for scaling up forest-climatic projects in the central forest-steppe, ensuring both ecological and economic efficiency of carbon sequestration measures.

Key Words

Forest-climatic projects, sustainable development, reforestation, technologies.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия глобальные изменения климата и рост антропогенного воздействия на окружающую среду признаются одними из наиболее острых вызовов для человечества [1]. Лесные экосистемы, обладая уникальной способностью аккумулировать и секвестрировать атмосферный углерод, играют фундаментальную роль в поддержании климатического баланса на планете [2]. Вместе с тем, по данным Masson-Delmotte и соавт. [3], современные климатические изменения оказывают существенное негативное влияние на состояние лесов: увеличивают частоту и масштабы лесных пожаров, способствуют вспышкам вредителей и болезней, ухудшают водный режим, что приводит к деградации насаждений и потере их экологических функций.

Снижение устойчивости лесов и снижение их хозяйственной и экологической ценности приводят к необходимости внедрения новых технологий ведения лесного хозяйства, соответствующих принципам адаптации и смягчения климатических изменений [4]. Особое значение приобретает разработка и реализация лесоклиматических проектов, направленных на восстановление и увеличение лесных площадей с целью повышения способности к поглощению парниковых газов и увеличения углеродных запасов в биомассе и почве [5–7]. Как отмечают зарубежные и российские исследователи, традиционные модели лесовосстановления должны быть адаптированы к конкретным региональным условиям и современным вызовам [8–10].

Согласно мнению авторов «Далеко не «все уже решено», и важно продолжить научную дискуссию, от которой во многом зависит совершенствование различных методологий и методик оценки климатических инициатив [11–13].

В российских условиях актуальность рассматриваемого вопроса определяется также значительными масштабами и разнообразием природных условий: леса занимают более 20 % территории РФ, где насчитывается около 300 видов деревьев и кустарников, из которых 20 пород являются основными лесообразующими. Согласно Приказу Минприроды РФ № 367 [14] леса России подразделяются на 8 лесорастительных зон и 41 лесной район, отличающихся по характеру почвы, увлажнённости и другим биотическим и абиотическим факторам. Поддержание высокой продуктивности и устойчивости лесных экосистем особенно сложно в регионах с высокой антропогенной нагрузкой и трансформированным ландшафтом, таких как Центральная лесостепь Русской равнины [15].

Согласно современным научным подходам, повышение эффективности реализации лесоклиматических проектов достигается за счёт подбора оптимального породного состава, применения схем смешения древесных пород, учитывающих тип лесорастительных условий, и внедрения современных технологий, минимизирующих углеродный след на всех этапах работ [16–18]. Практика реализации карбоновых полигонов, развитие системы мониторинга и адаптивного управления лесами позволяет вырабатывать дифференцированные сценарии лесовосстановления, соответствующие целям Стратегии научно-технического развития РФ [19; 20].

Таким образом, научное обоснование и внедрение адаптированных к региональным условиям технологий лесовосстановления является важнейшей задачей для

обеспечения эффективной реализации климатических стратегий России. В данной статье рассматривается опыт определения оптимальных проектных решений по восстановлению и разведению лесов Центральной лесостепи на основе оценки выбросов и поглощения парниковых газов, а также лесотипологических критериев.

Целью данной статьи является определение наиболее эффективных технологий реализации лесоклиматических проектов по лесовосстановлению и лесоразведению, позволяющих максимизировать поглощение парниковых газов и повысить устойчивость лесных экосистем Центральной лесостепи Европейской части России.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходя из необходимости интеграции лесных экосистем в современные лесоклиматические проекты, актуальной научной задачей выступает адаптация существующих моделей лесоразведения и лесовосстановления с учётом региональных природно-климатических и лесорастительных особенностей. Наряду с этим, требуется комплексное обоснование технико-экономических подходов к ведению лесного хозяйства, направленных на повышение уровня секвестрации углерода в условиях изменяющегося климата, а также разработка оптимальных сценариев и функциональных моделей реализации лесоклиматических проектов, дифференцированных по типам лесорастительных условий. В связи с этим объектом настоящего исследования являются леса государственного лесного фонда шести субъектов Российской Федерации, расположенных в пределах Центральной лесостепи Русской равнины.

С целью определения наилучших технологий реализации лесоклиматических проектов по лесовосстановлению и лесоразведению, отвечающих специфике Центральной лесостепи Европейской части РФ, проведена оценка выбросов и поглощения парниковых газов, возникающих в результате осуществления комплекса лесохозяйственных мероприятий. При анализе эффективности таких технологий особое значение придаётся следующим параметрам.

Во-первых, научно обоснованному подбору древесных пород, способных максимально снижать выбросы и увеличивать утилизацию парниковых газов. Данная задача рассматривалась при разработке и апробации проектов карбоновых полигонов [21; 22], а также при проведении анализа региональных лесных планов по исследуемым субъектам РФ (Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая, Орловская и Тамбовская области). Следует подчеркнуть, что лесоводственно-биологическое обоснование породного состава древостоев в условиях Центральной лесостепи возможно только при учёте комплексной региональной характеристики среды произрастания. Последняя, в свою очередь, формируется посредством применения базового для лесоводства понятия – типа лесорастительных условий (ТЛУ), под которым понимается классификационная единица, объединяющая лесные земли по сходству почвенно-гидрологических факторов, определяющих условия роста и развития древостоев [23].

В соответствии с лесотипологической системой П.С. Погребняка, выделение типов лесорастительных условий осуществляется по комплексу диагностических признаков, основными из которых выступают морфология рельефа и почвенно-грунтовые характеристики [24].

Данная система типологии представлена в виде эдафической сетки, отражающей структуру местообитаний в координатах четырех градаций по типу почвенного

богатства и шести уровней увлажнения (табл. 1), согласно модифицированной классификации Воробьева [25].

Таблица 1. Эдафическая сетка типов лесорастительных условий ([25], с изменениями)

Table 1. Edaphic grid of forest site types ([25], with rich)

Типы местообитаний Types of habitats			Подтипы богатства/ Wealth subtypes			
			Бедные (A) Poor (A)	Относительно бедные (B) Relatively poor (B)	Относительно богатые (C) Relatively rich (C)	Богатые (D) Rich (D)
Подтипы влажности Moisture subtypes	0	Очень сухие Very dry	A ₀	B ₀	C ₀	D ₀
	1	Сухие Dry	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁
	2	Свежие Fresh	A ₂	B ₂	C ₂	D ₂
	3	Влажные Humid	A ₃	B ₃	C ₃	D ₃
	4	Сырые Moist	A ₄	B ₄	C ₄	D ₄
	5	Мокрые Wet	A ₅	B ₅	C ₅	D ₅

Во-вторых, наряду с биологическим обоснованием породного состава, ключевое значение для реализации лесоклиматических проектов имеют технологические решения, определяющие методы и стадии проведения работ по лесовосстановлению и лесоразведению. Среди современных подходов к формированию лесных насаждений, способных к долговременному депонированию углерода, особое место занимает концепция «карбоновых ферм», предложенная А.А. Онучиным и И.М. Данилиным [26]. Данная методика, как правило, предполагает создание насаждений с преимущественным использованием рубок ухода, нацеленных на увеличение продуктивности и углеродоемкости древостоев.

В контексте настоящего исследования основное внимание уделено не столько этапу хозяйственных мероприятий по формированию высокоэффективных углерод-аккумулирующих древостоев, сколько началь-

ному периоду жизненного цикла лесных культур – от разработки проектной документации до их перевода в покрытую лесом площадь. Базовые технологические операции по лесовосстановлению и лесоразведению в природе Центральной лесостепи регламентируются Приказом №1024 [27], а эффективные способы облесения участков при привлечении различных средств механизации раскрыты в материалах ВНИИЛМ [28]. Проведение лесохозяйственных работ осуществляется в соответствии с требованиями Лесного кодекса РФ и иных нормативных актов.

Технологические регламенты по лесовосстановлению на гарях в лесостепных и степных районах Европейской части России предусматривают использование трех основных методов: содействие естественному лесовозобновлению, комбинированное и искусственное лесовосстановление (табл. 2).

Таблица 2. Технологические аспекты лесовосстановления на гарях

Table 2. Technological aspects of reforestation in burnt area

Лесные районы Европейской части РФ Forest areas of European part of the Russian Federation	Предельные сроки лесовосстановления Time limits for reforestation	Рекомендуемые способы лесовосстановления Recommended methods of reforestation	Основная порода Main species	Количество жизнеспособного подроства главных пород, тыс. шт./га Number of viable undergrowth of main species, thousand pcs./ha
Лесостепные и степные районы Forest-steppe and steppe regions	1	Содействие естественному лесовозобновлению Promotion of natural regeneration of forests	Сосна Pinus Дуб Quercus	> 4,0
	1	Комбинированное лесовосстановление Combined reforestation		1,5–4,0
	1	Искусственное лесовосстановление (лесные культуры) Artificial reforestation (forest crops)		< 2,5

Выбор метода определяется как природными условиями, так и долей жизнеспособного подроста главных пород (например, сосны или дуба), количественные параметры которых выдерживаются в соответствии с действующими нормативами.

Оценка динамики углеродных пулов, а, следовательно, и баланса выбросов и поглощения парниковых газов, осуществлялась с применением методов моделирования в рамках базового сценария лесохозяйственных мероприятий для различных типов лесорастительных условий исследуемых территорий. В основу моделирования положены таксационные и лесорастительные характеристики государственного лесного фонда, данные лесных планов шести субъектов Центральной лесостепи Русской равнины, параметры углеродного цикла, а также регламентированные нормативные требования к лесовосстановительным и лесоразведенческим работам.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках реализации адаптивных лесоклиматических проектов особое значение приобретает тщательный подбор целевого породного состава и учет структуры лесорастительных условий в региональном разрезе. Проведённый анализ породного состава и пространственной структуры лесных насаждений на территории шести субъектов Российской Федерации, охватывающих Центральную лесостепь Русской равнины, позволил выявить региональные особенности, обусловленные как экологическими, так и хозяйственными факторами.

Результаты исследования показали, что:

– В Белгородской области среди твердолиственных пород наиболее перспективным для внедрения в лесоклиматические проекты является дуб, используемый в смешанных насаждениях с ясенем, клёном, вязом, ильмом и липой. В хвойном ассортименте рекомендуются сосна, ель, а также лиственница в отдельных случаях. К мягколиственным породам, целесообразным для включения, относится тополь белый.

– В Воронежской области доминирующей хвойной породой является сосна, среди твердолиственных – дуб. Мягколиственные породы представлены тополем и чёрной ольхой, на сухих участках возможно использование караганы древовидной.

– В Курской области основными твердолиственными породами являются дуб и сосна. К мягколиственным породам с потенциалом хозяйственного использования относятся тополь, берёза и чёрная ольха.

– В Липецкой области при формировании породного состава насаждений как целевые рассматриваются дуб и сосна. В качестве сопутствующих мягколиственных включаются берёза, ольха и тополь.

– В Тамбовской области лесные насаждения преимущественно формируются на основе хвойных пород (сосна) в сочетании с берёзой и чёрной ольхой.

Анализ структуры типов лесорастительных условий (ТЛУ) показал преобладание свежих боров (ТЛУ А2), которые занимают свыше 43 % площади, занятой сосновыми насаждениями. Существенную долю занимают также лесорастительные условия свежей простой субори (ТЛУ В2) – порядка 37 %, менее распространены свежие сложные субори (ТЛУ С2) – около 7 %, доля сухих боров (ТЛУ А1) составляет приблизительно 6 %. Среди дубрав преобладает свежая дубрава (ТЛУ D2).

Леса естественного происхождения в условиях свежего бора, как правило, представлены чистыми сосняками второго класса бонитета, с незначительной долей берёзы и осины в составе. Добавление мягколиственных пород, как правило, приурочено к понижениям рельефа, и чаще всего формируется в результате вегетативного возобновления после рубок, что приводит к образованию недолговечных временных насаждений. Качественные показатели древесины берёзы в этих условиях, как правило, невысоки, возраст деревьев редко превышает 70 лет. При увеличении влажности доля сосны может снижаться до полного исчезновения, с формированием чистых берёзовых древостоев.

Структура древостоев свежих боров преимущественно одноярусная; во влажные годы может формироваться разреженный второй ярус из берёзы. В случае географической близости к дубравам возможно включение дуба в качестве второго яруса, отмечаются экземпляры высотой до 7 м и диаметром до 0,2 м. Подлесок представлен дроком, ракитником, бересклетом бородавчатым, рябиной и крушиной ломкой. Видовой состав напочвенного покрова сравнительно беден, включает ястребинку, лишайники, вейник, зелёный мох, ветреницу лютичную, а также занесённую в Красную книгу прострел раскрытый. Типичной особенностью свежих боров является постепенное формирование живого напочвенного покрова по мере возрастного снижения полноты древостоя.

Важное место в структуре лесных экосистем Центральной лесостепи занимает тип лесорастительных условий «свежая суборь», отличающийся характерными почвенно-гидрологическими и флористическими показателями, определяющими специфику формирования насаждений и их продуктивности. Анализ региональных особенностей формирования свежих суборей позволяет детально оценить их потенциал для реализации лесоклиматических проектов и долгосрочного регулирования углеродного баланса.

Свежая суборь формируется преимущественно на участках с глубиной залегания грунтовых вод 3–4 м, локализованных на лёгких всхолмлениях и слабовыраженных волнистых формах рельефа. Преобладающие почвы характеризуются супесчаным механическим составом и хорошей гумусированностью. В данных условиях сосновые древостои с незначительным участием дуба или берёзы занимают верхний ярус, при этом достаточное богатство почвы позволяет формировать полноценно развитый второй ярус, зачастую образованный дубом, а в отдельных случаях – осинкой. К возрасту около 70 лет отмечается интенсивное выпадение берёзы, в результате чего сосна реализует свой экотенциал, формируя высокопродуктивные древостои высших классов бонитета. Однако, вследствие высокой сомкнутости полога и, как следствие, ограничения светового режима, развитие подлеска затруднено и наблюдается лишь в виде отдельных экземпляров крушины, бузины или рябины. Проведение рубок может стимулировать вегетативное возобновление дуба, особенно при сохранении пней, что приводит к формированию низкоствольных порослевых дубняков невысокого качества. В данных фитоценозах дуб конкурирует преимущественно с осинкой и частично с берёзой. На вырубках быстро распространяется дерновинно-злаковый травостой. В составе напочвенного покрова преобладают травянистые виды: земляника, осоки, орляк, зелёные мхи.

Переходя к третьей надпойменной террасе левобережья, наблюдается постепенная трансформация рельефа в типичную чернозёмную равнину с расширенным гумусовым горизонтом, отличающимся не только глубиной, но и высокой степенью насыщенности органическим веществом. Механический состав почвы в этих условиях также супесчаный. Здесь доминируют свежие сложные субори, отличающиеся наибольшей продуктивностью среди суборей и формирующиеся, в том числе, на чернозёмах или черноземовидных супесях, на правобережье рек или междуречных пространствах.

Анализируя горизонтальное и вертикальное строение почвенного профиля, отмечается закономерное увеличение мощности гумусового горизонта в направлении от боровых к суборевым условиям – до 1,4 м против 0,3 м в борах. Увеличивается и содержание гумуса в верхней части профиля. Тем не менее, по содержанию зольных элементов и абсолютному уровню плодородия, суборевые почвы остаются менее продуктивными по сравнению с суглинками дубрав.

Парадоксально, но именно в условиях субори сосновые насаждения демонстрируют более высокие показатели бонитета (до Ia), чем дубняки на суглинистых почвах. Второй ярус здесь формируется, главным образом, липой, дубом черешчатым, а в последнее десятилетие – клёном остролистным. Иногда возможна организация третьего яруса, где развиваются молодые особи дуба, а также дикие плодовые породы (груша, режа яблоня). Подлесок представлен типичными для дубрав кустарниками: бересклет, лещина, чёрноклён. Травяной покров во многом аналогичен дубравному, что объясняется поступлением листового опада из второго и третьего яруса, преобладанием бактериальных процессов разложения и формированием специфических почвенных условий.

В настоящее время действующие нормативные документы для Центральной части лесостепной зоны Европейской России регламентируют преимущественное создание сосновых монокультурных насаждений (10С), при этом в отдельных случаях допускается введение в состав древостоев лиственных пород, преимущественно берёзы (7С3Б).

Однако подобная практика ведёт к формированию однородных по породному составу лесных насаждений, что существенно ограничивает уровень биологического разнообразия и снижает их способность к поддержанию экосистемного гомеостаза. Недостаточная структурная и видовая сложность лесных сообществ способствует ухудшению почвенного плодородия, интенсификации накопления горючих материалов, а также повышает уязвимость насаждений к воздействию различного рода патогенов. Кроме того, в рамках проведённого исследования было установлено, что среднегодовой уровень поглощения CO_2 в таких насаждениях на протяжении жизненного цикла не превышает 8,6 т $\text{CO}_2/\text{га}$, а суммарное накопление углерода к 40-летнему возрасту составляет порядка 56 т С/га.

Анализ распределения углерода между различными его пулами показал, что наибольший вклад в общей структуре углеродного баланса вносит фитомасса древостоя, однако по мере развития и старения лесных экосистем возрастает роль мёртвого органического вещества и органического углерода почв. Эти результаты подчёркивают необходимость перехода к комплексному управлению углеродным циклом, которое должно включать не только мероприятия по созданию

насаждений, но и поддержание высокого уровня почвенного плодородия и устойчивости экосистем.

В целях комплексной оценки вклада лесохозяйственных мероприятий в формирование баланса парниковых газов на землях лесного фонда, был проведён анализ динамики составляющих углеродного баланса и запасов углерода в лесах субъектов Российской Федерации. В результате расчетов установлено, что, наряду с выполнением плановых объёмов лесовосстановления в регионах Центральной лесостепи, целесообразно обеспечить дополнительное расширение площадей посадки леса с использованием саженцев с закрытой корневой системой (ЗКС). В частности, прогнозируемые площади такого увеличения составляют 101,64 га для Белгородской области, 3018,3 га – для Воронежской области, 100,56 га – для Курской области, 210 га – для Липецкой области, 89,4 га – для Орловской области и 1311 га – для Тамбовской области вплоть до 2028 года. Следует отметить, что повышение приживаемости саженцев, выращенных с закрытой корневой системой, возможно при условии внедрения комплекса агротехнических мероприятий по уходу за создаваемыми лесными культурами.

Более того, экономическая оценка дополнительных затрат на реализацию этих мероприятий показала следующее. При учёте расчетного периода финансирования семь лет, ежегодного планируемого объёма работ (доля посадки саженцами с ЗКС – 30 %), базовых норм и расходов (утвержденных Приказом № 607), а также уровня инфляции 4 % в конце года, интегральные расходы на выполнение данных мероприятий по лесовосстановлению и лесоразведению, направленных на сокращение выбросов и увеличение поглощения парниковых газов в 2024–2028 гг. составят 244 026,479 тыс. руб. для субъектов Центральной лесостепи.

Таким образом, обобщённые результаты анализа свидетельствуют о том, что в региональных системах лесного хозяйства, наряду с мероприятиями, направленными на адаптацию лесов к климатическим изменениям, существует значительный потенциал для реализации лесоклиматических проектов, фокусирующихся на сокращении выбросов и увеличении поглощения парниковых газов.

В свете современных климатических вызовов и в условиях реализации лесных климатических проектов, направленных на создание насаждений с высоким потенциалом депонирования углерода, возникает необходимость существенной модернизации традиционных технологий ведения лесного хозяйства. Особое значение приобретает внедрение инновационных лесохозяйственных подходов, ориентированных на ускоренное выращивание высокопродуктивных лесных насаждений, способных значительно увеличить поглотительную способность к парниковым газам.

В предлагаемом исследовании акцентируется внимание на совершенствовании базовых технологических комплексов лесохозяйственных работ на принципах:

- обязательного учёта района расположения, категории и транспортной доступности лесных участков;
- тщательного подбора древесных пород, соответствующих зонально-географическим особенностям, типу лесорастительных условий и обладающих высоким потенциалом углеродного депонирования;

- научного обоснования способов лесовосстановления, минимизирующих нарушение почвенного покрова и содействующих сохранению его структуры;

- организации ухода за насаждениями с приоритетом сохранения и аккумуляции органического углерода, как в почве, так и в древесной и кустарниковой биомассе;

- формирования древостоев, композиционно и структурно приближенных к естественным лесам региона.

Ключевым этапом создания насаждений с высоким потенциалом накопления углерода является подготовка почвы. В рамках традиционной (базовой) линии такая подготовка, как правило, включает расчистку территории с сжиганием древесных остатков, что сопровождается потерями органического вещества.

В качестве инновационной альтернативы в проектной линии предлагается внедрение метода измельчения древесных остатков и последующего смешивания их с гумусовым горизонтом почвы. Такой подход обеспечивает более экологически безопасное ведение работ, ускоряет разложение органических компонентов, способствует накоплению гумуса и улучшению почвенного плодородия, особенно на ранее вырубленных или гаревых участках.

Для реализации данной методики требуется полное удаление, измельчение и равномерное распределение древесно-кустарниковой растительности в пределах лесокультурной площади, включая надземные и подземные части растений. Смешивание измельченных остатков с гумусовым горизонтом почвы ведет к увеличению содержания гумуса, активизации почвенной микрофлоры, улучшению влагоудерживающей способности и стабилизации структуры почвы.

Применение специализированной механизированной техники на нерасчищенных вырубках и гарях способствует увеличению доли органического углерода в почве, что полностью соответствует задачам низкоуглеродного развития современного лесного хозяйства и обеспечивает долгосрочную устойчивость создаваемых лесных экосистем.

В рамках проведенного исследования нами была осуществлена систематизация наиболее эффективных типов специализированных машин для выполнения лесохозяйственных работ при подготовке почвы на вырубках и гарях, в частности – мульчеров и ротораторов (щепорубительные машины, а также навесные и самоходные мульчеры и роторные измельчители).

Мульчеры и ротораторы представляют собой современные агрегаты, основной принцип работы которых заключается в механическом измельчении и дроблении заросшей растительности (кустарники, мелкостой, подрост), порубочных остатков, а также в корчевании пней преимущественно на поверхности почвы. Роторные измельчители способны эффективно перерабатывать наземную часть растений диаметром до 10 см и осуществлять обработку грунта на глубину до 70 см, перемалывая корневую систему и остатки пней. Мелкофракционное измельчение древесных компонентов ускоряет процессы их биологического разложения, что способствует возврату питательных веществ и органического углерода в почвенный горизонт, повышая его плодородие.

Внедрение технологии очистки площадей для лесовосстановления с применением лесных мульчеров и ротораторов позволяет за один проход обеспечить полное

удаление и переработку всей древесно-кустарниковой растительности и порубочных остатков с последующим равномерным распределением измельченной массы по поверхности участка. Высокая производительность данных машин обуславливает их эффективность и экономическую целесообразность, особенно на участках, нарушенных лесными пожарами или подвергшихся значительным антропогенным воздействиям.

Комплексное использование мульчеров и ротораторов в составе парка лесохозяйственных машин обеспечивает не только качественную подготовку участка к последующему лесовосстановлению, но и способствует снижению выбросов парниковых газов за счёт минимизации сжигания древесных остатков. Более того, интеграция измельченной органики в почвенный слой способствует улучшению структуры и биологической активности почв, повышает их влагоёмкость, способствует восстановлению микробиологического баланса и дальнейшему приросту углеродных запасов в экосистеме.

Таким образом, внедрение данных технологий в лесохозяйственную практику является перспективным направлением обеспечения устойчивого лесо- и почвопользования, отвечающим задачам низкоуглеродного развития и адаптации лесного фонда к современным климатическим условиям.

Искусственное лесовосстановление позволяет существенно ускорить процесс формирования будущих лесов с участием хозяйственно ценных пород. Способы обработки почвы выбираются в зависимости от природно-климатических условий, типов почв, ТЛУ, рельефа, видового состава живого напочвенного покрова и степени задержания.

Создание углерод депонирующих насаждений в технологическом смысле требует не только очистки арены лесовосстановления и правильный подбор культур, но серьезной работы по подготовке почвы и улучшению технологий посадки сеянцев/саженцев.

Обеспечения благоприятных условий для роста древесных растений на лесокультурной площади невозможно без предварительной обработки почвы. Она обычно проводится сочетанием химический и механических методов. Химические направлены на устранение межвидовой конкуренции и повышение плодородия, механические – улучшают состав и структуру субстрата.

В целях сохранения углерода в почве целесообразна частичная обработка почвы без оборота пласта. При обработке почвы создаются ряды, в которых формируются наиболее благоприятные условия для роста и развития растений, соответственно посадка осуществляется тоже по бороздам.

Сроки посадки устанавливаются по многолетним климатическим данным.

В настоящее время необходимо учитывать, что весенний сезон очень сильно сократился (в некоторые годы до 2–3 недель). А осенняя посадка, осуществляемая в конце сентября-октябре, стала демонстрировать хорошие результаты по приживаемости и, в конечном счете, по сохранности лесных культур. Температурным оптимумом считается период от даты перехода средней суточной температуры через +5 °С до даты перехода +10 °С. И, соответственно в осенний период зеркально, в обратном порядке. Поэтому планирование посадочных работ необходимо осуществлять с учетом климатических изменений.

Для создания продуктивных и углеродоемких лесных насаждений необходима посадка саженцев и семян ручным, и в качестве исключения, механизированным способом. Предпочтительна посадка под меч Колесова либо (в случае наличия посадочного материала с ЗКС с использованием различных вариантов посадочной трубы).

Важный момент – транспортировка лесопосадочного материала к местам, на которых будет производиться высадка растений. Длительность перевозки должна быть минимальной, а условия хранения обеспечить увлажнение и хорошее жизненное состояние растений.

При любом способе посадки важным моментом является её «физиологичность». В условиях В₂ для повышения приживаемости и для борьбы с патогенными организмами, поражающими молодые растения, проводят полив водой и обработку бордоской жидкостью (меди сульфат + кальция гидроксид). В типах лесорастительных условий С₂, Д₂ рекомендуется использовать почвенный гербицид Бегин Турбо.

Проектной линией предусматривается посадка семян с первоначальной густотой не менее 3,3 тысячи шт./га. Однако, и с учётом почвенных условий (типа лесорастительных условий), следует создавать смешанные насаждения с участием не менее пяти древесных пород для Центральной лесостепи с густотой посадки от 2,7 до 4,2 тыс. шт./га.

В результате такого лесовосстановления формируется сложное по составу и форме насаждение, приближающееся по своим характеристикам к природному образцу. Многопородные насаждения способствуют повышению продуктивности в целом в первую очередь за счет повышения их устойчивости.

В предлагаемой технологии посадка древесных растений на лесокультурной площади будет осуществляться:

- двухлетними сеянцами сосны (ЗКС),
- двухлетними сеянцами березы,
- двухлетними сеянцами дуба,
- однолетними укорененными черенками тополя (ЗКС).

Рассматривая технологические аспекты создания лесных культур в различных ТЛУ необходимо более подробно остановиться на проектном варианте для каждого типа.

1. Создание лесных культур в сухих борах (ТЛУ – А₁).

Сосна в условиях сухого бора достигает только III–IV классов бонитета. Как приживаемость, так и дальнейшие сохранность и рост лесных культур сосны, в первые несколько лет в подобных условиях не отличаются благоприятностью. Создание монокультур сосны обыкновенной (10С) в типах лесорастительных условий А₁ имеют два серьезных недостатка: во-первых, рост пожароопасности с одной стороны, а с другой возрастающее закисление и деградация бедной почвы. В проектном варианте в качестве альтернативы предлагается чередование полос березы и сосны. Введение под пологом сосны обыкновенной кустарника (карагана древовидная) позволит древесным породам (береза) легче переносить закисление почвы. Лесные культуры в свежих борах (ТЛУ – А₂). В указанных условиях наибольшее развитие получают сосновые древостои II класса бонитета. Березе также хватает почвенного плодородия и влажности для формирования древостоев II бонитета, однако ресурсов для того, чтобы сразу выйти в I ярус насаждения недостаточно, в связи с чем сосна

продолжает лидировать по высоте. Культуры сосны необходимо создавать с примесью от 10 до 50 % березы.

Таким образом в бедных условиях (ТЛУ – А₁ и А₂) в проектном варианте возможно создание насаждений 5С3Вз2Кар.

2. Лесные культуры в свежих суборах (ТЛУ – В₂).

Здесь формируются насаждения, качество которых оценивается Ia–I классом бонитета. В качестве пород 2-го яруса могут выступать дуб, береза, тополь, сосна крымская. В качестве сопутствующих пород рекомендуются – дуб черешчатый, дуб красный, береза повислая, тополь, сосна крымская. Схема проектируемых углерод депонирующих насаждений в этих условиях лесопроизрастания (ТЛУ – В₂) – 3С3Б2Т2Д.

3. Лесные культуры в свежей сложной субори (ТЛУ – С₂).

Здесь формируются насаждения, произрастающие по Ia классу бонитета. При этом второй ярус таких лесов составляют такие широколиственные породы как липа, дуб черешчатый. В последнее десятилетие распространение в качестве породы второго яруса сложных суборей получает клён остролистный. Интродуцированные и селекционно улучшенные древесные породы, такие как дуб красный и гибридный тополь ЭС-38 могут значительно улучшить как общую продуктивность насаждения, так и его углероддепонирующие свойства. Схема проектируемых углерод депонирующих насаждений в этих условиях лесопроизрастания – 4ДЗСЗТ.

4. Лесные культуры в свежих дубравах (ТЛУ – Д₂).

В этих условиях рекомендуется высаживать дуб черешчатый с примесью тополя. Дуб черешчатый является своеобразной породой, имеющей определенные особенности роста, развития и формирования вокруг себя сообщества консортов. Ему необходимы не только достаточное увлажнение, но и хороший уровень богатства лесной почвы, однако, скорость роста дубовых древостоев невысока. В тоже время высокие углерод депонирующие способности тополей (в частности тополя ЭС-38), имеющих большой потенциал по скорости роста и накопления биомассы, позволяют создавать высокопродуктивные и углеродоемкие насаждения уже на ранних стадиях онтогенеза насаждений. Прогнозируемый объём поглощения в отдельные периоды роста таких насаждений может превышать 31 т СО₂/га в год, а накопление к 40-летнему возрасту варьирует от 97 до 256 т С/га в зависимости от состава насаждений и типа лесорастительных условий. Схема проектируемых углерод депонирующих насаждений в этих условиях лесопроизрастания (ТЛУ – Д₂) – 5Д2КЛЗТ.

Обобщая приведенные выше данные, о преобладающих типах лесорастительных условий, а также базовых технологиях лесовосстановления и лесоразведения в Центральной лесостепи Европейской части РФ, а также актуальные тенденции смены климатических условий, представляется возможным сделать следующие рекомендации по составу и схемам смещения насаждений, создаваемых в целях реализации лесоклиматических проектов по лесовосстановлению и лесоразведению на землях лесного фонда, а также в целях воспроизводства лесов (табл. 3).

Теория объясняет и практика показывает, что успешность создания лесных культур напрямую зависит от качества дальнейших агротехнических и лесоводственных уходов за насаждениями. В соответствии с Лесным кодексом уход за лесами представляет собой осуществление мероприятий, направленных на

повышение продуктивности лесов, сохранение их полезных функций. Уходные работы стабилизируют тепловой режим почвы, активизируют микробиологические процессы в почве и разложение органических

остатков, устраняют сорняки – активных конкурентов высаженных растений за свет и питательные вещества, уменьшают испарение влаги из почвенного горизонта, аэрацию почвы и поглощение атмосферных осадков.

Таблица 3. Рекомендации по составу и схемам смещения насаждений, создаваемых в целях реализации лесоклиматических проектов по лесовосстановлению и лесоразведению на землях лесного фонда, а также в целях воспроизводства лесов

Table 3. Recommendations on the composition and schemes of displacement of plantings created for the implementation of forest-climatic projects for reforestation and afforestation on forest fund lands, as well as for the purpose of forest reproduction

№ п/п	Тип лесорастительных условий Type of forest conditions	Состав древесных пород Composition of tree species	Схема смещения Mixing scheme	Технологическая характеристика создаваемых культур Technological characteristics of trees created
1	2	3	4	5
Базовая линия / The base line				
1.	A ₁ , A ₂ , B ₂ , C ₂ , D ₂	Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i>); Береза повислая (<i>Betula pendula</i>)	10C, 7C3Б / 10 PS, 7PS3BP	Густота не менее 4 тыс. шт/га Planting density of at least 4 thousand pieces/ha
Проектная линия / Project line				
1.	A ₁	Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i>); Карагана древовидная (<i>Caragana arborescens</i>); Вяз гладкий, или обыкновенный (<i>Ulmus laevis</i>)	5C4 Караган1B / 5PS 4Caragana1UI	Густота – 3,3 тыс. шт/га Planting density of at least 3,3 thousand pieces/ha Размещение растений – 3 x 0,75 м Distance of plants – 3 x 0,75 m Расстояние между центрами борозд 3,0 м Distance between ridge centres, 3,0 m Длина гона 150 м Length of furrow 150 m Шаг посадки – 1 м Plant spacing 1 m Количество пней до 500 шт/га Number of stumps up to 500 pieces/ha
2.	A ₂	Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i>); Карагана древовидная (<i>Caragana arborescens</i>); Вяз гладкий или обыкновенный (<i>Ulmus laevis</i>)	5C3B2Караган/5PS3UI2Caragana	Густота – 3,3 тыс. шт/га Planting density of at least 3,3 thousand pieces/ha Размещение растений – 3x0,75 м Distance of plants – 3 x 0,75 m Расстояние между центрами борозд 3,0 м Distance between ridge centres, 3,0 m Длина гона 150 м, шаг посадки – 1 м Length of furrow 150 m, plant spacing 1 m Количество пней до 500 шт/га Number of stumps up to 500 pieces/ha Шаг посадки – 1 м Plant spacing 1 m
3.	B ₂	Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i>); Береза повислая (<i>Betula pendula</i>); Тополь ЭС 38 (<i>Populus L.</i>);	3C3Б2Т2Д / 3PS3BP2PL2QR	Густота – 3,3 тыс. шт/га Planting density of at least 3,3 thousand pieces/ha Размещение растений – 3x0,75 м Distance of plants – 3 x 0,75 m Расстояние между центрами борозд 3,0 м

		Дуб красный (<i>Quercus rubra</i>)		Distance between ridge centres, 3,0 m Длина гона 150 м, шаг посадки – 1 м Length of furrow 150 m, plant spacing 1 m Количество пней до 500 шт/га Number of block up to 500 pieces/ha Шаг посадки – 1 м Plant spacing 1 m
4.	C ₂	Дуб красный (<i>Quercus rubra</i>); Тополь ЭС 38 (<i>Populus L.</i>); Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i>)	4ДЗТЗС / 4QR3PL3PS	Густота – 3,3 тыс. шт/га Planting density of at least 3,3 thousand pieces/ha Размещение растений – 3х0,75 м Distance of plants – 3 x 0,75 m Расстояние между центрами борозд 3,0 м Distance between ridge centres, 3,0 m Длина гона 150 м, шаг посадки – 1 м Length of furrow 150 m, plant spacing 1 m Количество пней до 500 шт/га Number of block up to 500 pieces/ha Шаг посадки – 1 м Plant spacing 1 m
5.	D ₂	Дуб черешчатый (<i>Quercus robur</i>); Клен остролистный (<i>Acer platanoides</i>); Тополь (<i>Populus sp.</i>)	5Д2КлЗТ / 5QR2AP3PL	Густота – 3,3 тыс. шт/га Planting density of at least 3,3 thousand pieces/ha Размещение растений – 3х0,75 м Distance of plants – 3 x 0,75 m Расстояние между центрами борозд 3,0 м Distance between ridge centres, 3,0 m Длина гона 150 м, шаг посадки – 1 м Length of furrow 150 m, plant spacing 1 m Количество пней до 500 шт/га Number of block up to 500 pieces/ha Шаг посадки – 1 м Plant spacing 1 m

В число мероприятий по агротехническим уходам входят удаление травы в рядах культур, рыхление почвы с одновременным уничтожением травы, а при частичной обработке почвы – в полосах. В качестве технических средств применяются культиватор лесной дисковый навесной – ДЛКН-6/8, культиватор боковой лесной КЛБ-1А, культиватор ротационный лесной КРЛ-1А, дисковый культиватор КЛБ-1,7. Сами работы осуществляются как рядах, так и в междурядьях.

В типах условий местопроизрастания, соответствующих свежим дубравам и судубравам (ТЛУ – D₂, C₂) механизированный уход за лесными культурами в междурядье проводят культиватором КЛБ-1.7.

В типах условий местопроизрастания, соответствующих свежим суборям (ТЛУ – B₂) механизированный уход за лесными культурами в междурядье проводят дисковым лесным культиватором

ДЛКН-6/8, в рядах проводят механизированный уход культиватором КЛБ-1 седланием рядов.

В типах условий местопроизрастания, соответствующих сухим и свежим борам (ТЛУ – A₁, A₂) механизированный уход за лесными культурами в междурядье, проводят культиватором КЛБ-1.7, в рядах проводят механизированный уход культиватором КЛБ-1 седланием рядов.

При создании насаждений в районах с недостаточным увлажнением почв в сухих и свежих борах (ТЛУ – A₁, A₂) необходимы поливы. Полив проводится на участках один раз в неделю в течении поливочного сезона в сухих и свежих борах (ТЛУ – A₁, A₂). При проведении агротехнических уходов и поливов создаваемых лесных культур для условий Центральной лесостепи придерживаются следующего плана: в 1-й год осуществляют 3 агротехнические ухода, во 2-й – 3, в 3-й – 2 и в 4-й год – 1 уход. Для рыхления почвы и уничтожения

сорняков используют культиваторы. Осуществляется механизированный уход в междурядьях культиватором шириной 1,4 м по периметру. Для уничтожения сорняков в рядах культур, а также нежелательных листовых пород в ТЛУ В₂, С₂, D₂ могут быть использованы гербициды и арборициды.

После посадки древесных растений на лесокультурную площадь, проводятся противопожарные мероприятия путем устройства противопожарных минерализованных полос, с последующим уходом. Минерализованные полосы прокладываются обязательно с внешней стороны участка в случае примыкания его к сельскохозяйственным угодьям, на которых могут производиться палы. Протяженность минерализованных полос в среднем не менее 6 км на 100 га участка. Минерализованная полоса распаивается шириной 1,4 м плугом ПКЛ-70 или другим плугом в один след и с началом пожароопасного периода подновляется каждый год. Противопожарный разрыв распаивается шириной 10 м трактором МТЗ-82 в агрегате с бороной дисковой БД-2,2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования подтверждают критическую значимость целенаправленного совершенствования технологий лесовосстановления и лесоразведения для достижения задач низкоуглеродного развития и адаптации лесных экосистем Центральной лесостепи Европейской части России к современным климатическим вызовам. Установлено, что традиционные подходы к лесовосстановлению, ориентированные преимущественно на создание сосновых монокультур, не обеспечивают необходимого уровня биологического разнообразия, что приводит к снижению почвенного плодородия, росту количества горючих материалов и увеличению уязвимости насаждений к воздействию патогенов и неблагоприятных абиотических факторов. Кроме того, прогнозируемый уровень накопления и поглощения углерода в подобных насаждениях существенно уступает потенциалу естественно-типичных смешанных и разновозрастных лесов.

Анализ региональных особенностей лесорастительных условий позволил выявить оптимальные комбинации древесных пород с учетом трофности почв, гидрологического режима и структуры рельефа. Показано, что применение саженцев с закрытой корневой системой и расширение спектра уходовых агротехнических мероприятий может значительно повысить приживаемость и продуктивность создаваемых насаждений, а также способствовать дополнительному депонированию углерода как в фитомассе, так и в почве.

Предложенная и апробированная в работе технология по подготовке почвы с применением мульчеров и роторов, предусматривающая измельчение и интеграцию древесных остатков в гумусовый горизонт, обладает несомненными экологическими преимуществами по сравнению с практикой сжигания порубочных остатков. Такой подход способствует ускоренному вовлечению органического вещества в круговорот, поддержанию и восстановлению почвенного плодородия, интенсификации процессов образования гумуса и накопления почвенного органического углерода, что играет ключевую роль в обеспечении устойчивого функционирования лесных экосистем.

Экономическая оценка реализации дополнительных лесохозяйственных мероприятий с акцентом на

посадку саженцев с ЗКС и модернизацию технологии подготовки почвы свидетельствует о значительных затратах, однако эти инвестиции оправданы с точки зрения долгосрочных природоохранных и социально-экономических эффектов: увеличения баланса углерода, повышения устойчивости и продуктивности лесных ландшафтов, снижения климатических рисков и вовлеченности регионов в системы экологических платежей («углеродных кредитов»).

В итоге, интеграция научно-обоснованного подбора породного состава, инновационных методик почвоподготовки и комплекса агротехнических мер по уходу за лесными культурами в лесохозяйственную практику позволяет существенно повысить климатическую и экологическую эффективность лесоклиматических проектов. Данные выводы могут быть использованы для оптимизации программ развития регионального лесного хозяйства и совершенствования политик в области адаптации к изменению климата.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FZUR-2024-0001, № 124020100131-5).

ACKNOWLEDGEMENT

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FZUR-2024-0001, № 124020100131-5).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rocha J., Oliveira S., Viana C.M., Ribeiro A.I. Chapter 8 – Climate change and its impacts on health, environment and economy. Editor(s): Joana C. Prata, Ana Isabel Ribeiro, Teresa Rocha-Santos, One Health, Academic Press, 2022. P. 253–279. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822794-7.00009-5>
2. Hui D., Deng Q., Tian H., Luo Y. Climate Change and Carbon Sequestration in Forest Ecosystems. In: Chen, WY., Suzuki, T., Lackner, M. (eds) Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation. Springer, Cham. 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14409-2_13/
3. Yadav V.S., Yadav S.S., Gupta S.R., Meena R.S., Lal R., Sheoran N.S., Jharia M.K. Carbon sequestration potential and CO₂ fluxes in a tropical forest ecosystem // Ecological Engineering. 2022. V. 176. Article ID: 106541. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106541>
4. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.-O. Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva: World Meteorological Organization, 2018.
5. Psistaki K., Tsantopoulos G., Paschalidou A.K. An Overview of the Role of Forests in Climate Change Mitigation // Sustainability. 2024. N 16(14). Article ID: 6089. <https://doi.org/10.3390/su16146089>
6. MacKenzie W.H., Mahony C.R. An ecological approach to climate change-informed tree species selection for reforestation // Forest Ecology and Management. 2021. N 481. Article ID: 118705.
7. Standish R.J., Prober S.M. Potential benefits of biodiversity to Australian vegetation projects registered with the Emissions Reduction Fund – is there a carbon-biodiversity trade-off? // Ecological Management & Restoration. 2020. N 21(3). P. 65–172. <https://doi.org/10.1111/emr.12426>
8. Птичников А.В., Шварц Е.А., Кузнецова Д.А. О потенциале поглощения парниковых газов лесами России для снижения углеродного следа экспорта отечественной продукции // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. N 2. С. 181–184.
9. Кренке А.Н., Птичников А.В., Шварц Е.А., Петров И.К. Величина баланса углерода лесов в национальной климатической политике России и Канады // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. N 2. С. 231–236.

10. Dharmawan I.W.S., Lisnawati Y., Siahaan H., Premono B.T., Iqbal M., Junaedi A., Sakuntaladewi N., Baston Fauzi R., Ramawat Nugroho A.W., Undahart N.K.E., Achmadi A.S., Setyawati T., Siregar C.A., Pratiwi Suhartana S., Soenarno Dulsalam, Sukmana A. Use of an Adaptive-Vegetation Model to Restore Degraded Tropical Peat Swamp Forest to Support Climate Resilience // *Land*. 2024. N 13(9). Article ID: 1377. <https://doi.org/10.3390/land13091377>
11. Libert-Amico A., Larson A.M. Forestry Decentralization in the Context of Global Carbon Priorities: New Challenges for Subnational Governments // *Front. For. Glob. Change*. 2020. N 3. Article ID: 15. DOI: 10.3389/ffgc.2020.00015
12. Медведев С.О., Зырянов М.А. Моделирование деятельности предприятий лесной отрасли с учетом перспектив перехода на принципы устойчивого развития // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. 2024. Т. 17. N 2. С. 129–145. DOI: 10.15838/esc.2024.2.92.7
13. Ваганов Е.А., Пыжев А.И., Курбатова М.В. Перспективы реализации лесоклиматических проектов: потенциал регионов Енисейской Сибири: флагманский аналитический доклад. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. URL: <https://www.sfu-kras.ru/files/NOC-doklad.pdf> (дата обращения: 11.01.2025)
14. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 27 июня 2016 г. № 367 "Об утверждении Видов лесосечных работ, порядка и последовательности их проведения, Формы технологической карты лесосечных работ, Формы акта осмотра лесосеки и Порядка осмотра лесосеки" URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71480560/> (дата обращения: 11.01.2025)
15. Коломыц Э.Г., Шарая Л.С., Севостьянов С.М. Состояние и устойчивость лесов региона с экстремальной антропогенной трансформацией (на примере Окского бассейна) // *Растительные ресурсы*. 2023. Т. 59. N 3. С. 277–296. DOI: 10.31857/S0033994623020073
16. Морковина С.С., Шешнищан С.С., Иванова А.В. и др. Потенциал и инвестиционная привлекательность проектов по улучшенному лесному хозяйству в условиях возрастающих климатических вызовов // *Юг России: экология, развитие*. 2024. Т. 19. N 3(72). С. 180–192. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-3-18
17. Фоменко Г.А., Романовская А.А., Фоменко М.А. и др. Лесные климатические проекты: возможности и проблемы реализации ESG-подхода. Часть 1 // *Проблемы региональной экологии*. 2022. N 2. С. 91–106. DOI: 10.24412/1728-323X-2022-2-91-106
18. Шанин В.Н., Фролов П.В., Коротков В.Н. Всегда ли искусственное лесовосстановление может быть лесоклиматическим проектом? // *Вопросы лесной науки*. 2022. N 5(2). С. 103–139. DOI: 10.31509/2658-607x-202252-106
19. Дьяченко Ю.К., Литвинова А.В., Нестерова О.В. и др. Добровольный рынок углерода: российский институциональный контекст и перспективы развития // *Известия Дальневосточного федерального университета. Экономика и управление*. 2024. N 3(111). С. 60–105. DOI: 10.24866/2311-2271/2024-3/1064
20. Желдак В.И., Дорощенко Э.В., Прока И.Ю. и др. Вопросы лесоводственного совершенствования системы сохранения и использования лесов в рамках решения проблемы адаптации лесов и лесного комплекса к изменениям климата // *Лесохозяйственная информация*. 2023. N 2. С. 5–26. DOI: 10.24419/LNI.2304-3083.2023.2.01
21. Carbon landfills of the Russian Federation. URL: <https://carbon-polygons.ru/> (дата обращения: 10.03.2025)
22. Карбоновые полигоны России: настоящее и будущее. URL: <https://www.ecoindustry.ru/i/news/59836/doklad.pdf> (дата обращения: 11.04.2025)
23. Лазарев Ю.А., Желдак В.И., Завалова Т.А. Лесное хозяйство. Термины и определения. ГОСТ 18486-87. М., 1987. 18 с.
24. Погребняк П.С. Основы лесной типологии. 2-е изд. Киев: АН УССР, 1955. 456 с.
25. Воробьев Д.В. Типы лесов Европейской части СССР. Киев: Изд-во АН УССР, 1953. 452 с.
26. Онучин А.А., Данилова И.В. Патент № 2617452 Российская Федерация, МПК G01W 1/00, G06T 11/00. способ определения количества и характера пространственного распределения твердых атмосферных осадков: № 2015122639: заявл. 10.06.2015. опубл. 25.04.2017 / заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук".
27. Приказ Минприроды России от 29.12.2021 N 1024 (ред. от 03.08.2023) Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления. URL: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minprirody-rossii-ot-29122021-n-1024-ob-utverzhenii/> (дата обращения: 12.06.2025)
28. Родин С.А., Проказин Н.Е., Казаков В.И. и др. Рекомендации по планированию и проектированию фонда лесовосстановления на площадях, пройденных лесными пожарами и ветровалами. Пушкино: Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, 2019. 36 с.

REFERENCES

1. Rocha J., Oliveira S., Viana C.M., Ribeiro A.I. Chapter 8 – Climate change and its impacts on health, environment and economy. Editor(s): Joana C. Prata, Ana Isabel Ribeiro, Teresa Rocha-Santos, One Health, Academic Press, 2022, pp. 253–279. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822794-7.00009-5>
2. Hui D., Deng Q., Tian H., Luo Y. Climate Change and Carbon Sequestration in Forest Ecosystems. In: Chen WY., Suzuki T., Lackner M. (eds). *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation*. Springer, Cham. 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14409-2_13/
3. Yadav V.S., Yadav S.S., Gupta S.R., Meena R.S., Lal R., Sheoran N.S., Jhariya M.K. Carbon sequestration potential and CO₂ fluxes in a tropical forest ecosystem. *Ecological Engineering*, 2022, vol. 176, article id: 106541. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106541>
4. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.-O. Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva: World Meteorological Organization, 2018.
5. Psistaki K., Tsantopoulos G., Paschalidou A.K. An Overview of the Role of Forests in Climate Change Mitigation. *Sustainability*, 2024, no. 16(14), article id: 6089. <https://doi.org/10.3390/su16146089>
6. MacKenzie W.H., Mahony C.R. An ecological approach to climate change-informed tree species selection for reforestation. *Forest Ecology and Management*. 2021, no. 481, article id: 118705.
7. Standish R.J., Prober S.M. Potential benefits of biodiversity to Australian vegetation projects registered with the Emissions Reduction Fund – is there a carbon-biodiversity trade-off? *Ecological Management & Restoration*, 2020, no. 21(3), pp. 65–172. <https://doi.org/10.1111/emr.12426>
8. Ptichnikov A.V., Shvarts E.A., Kuznetsova D.A. On the potential of greenhouse gas absorption by Russian forests to reduce the carbon footprint of exports of domestic products. *Doklady RAN. Nauki o Zemle [RAS reports. Earth Sciences]*. 2021, no. 2, pp. 181–184. (In Russian)
9. Krenke A.N., Ptichnikov A.V., Schwartz E.A., Petrov I.K. The value of the forest carbon balance in the national climate policy of Russia and Canada. *Doklady RAN. Nauki o Zemle [Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences]*. 2021, no. 2, pp. 231–236. (In Russian)
10. Dharmawan I.W.S., Lisnawati Y., Siahaan H., Premono B.T., Iqbal M., Junaedi A., Sakuntaladewi N., Baston Fauzi R., Ramawat Nugroho A.W., Undahart N.K.E., Achmadi A.S., Setyawati T., Siregar C.A., Pratiwi Suhartana S., Soenarno Dulsalam, Sukmana A. Use of an Adaptive-Vegetation Model to Restore Degraded Tropical Peat Swamp Forest to Support Climate Resilience. *Land*, 2024, no. 13(9), article id: 1377. <https://doi.org/10.3390/land13091377>
11. Libert-Amico A., Larson A.M. Forestry Decentralization in the Context of Global Carbon Priorities: New Challenges for Subnational Governments. *Front. For. Glob. Change*, 2020, no. 3, article id: 15. DOI: 10.3389/ffgc.2020.00015
12. Medvedev S.O., Zyryanov M.A. Modeling the activities of enterprises in the forest industry, taking into account the prospects for the transition to the principles of sustainable development. *Economic and social changes: facts, trends, forecast*, 2024, vol. 17, no. 2, pp. 129–145. DOI: 10.15838/esc.2024.2.92.7
13. Vaganov E.A., Pyzhev A.I., Kurbatova M.V. Prospects for the implementation of forest-climatic projects: the potential of the regions

- of Yenisei Siberia: flagship analytical report. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2023. (In Russian) Available at: <https://www.sfu-kras.ru/files/NOC-doklad.pdf> (accessed 11.01.2025)
14. Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated June 27, 2016 No. 367 "On approval of the types of logging operations, the order and sequence of their implementation, the form of the technological map of logging operations, the Form of the act of inspection of the logging area and the Order of inspection of the logging area". (In Russian) Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71480560/> (accessed 11.01.2025)
15. Kolomyts E.G., Sharaya L.S., Sevostyanov S.M. The state and stability of forests in a region with extreme anthropogenic transformation (on the example of the Oka basin). *Plant resources*, 2023, vol. 59, no. 3, pp. 277–296. DOI: 10.31857/S0033994623020073
16. Morkovina S.S., Sheshnitsan S.S., Ivanova A.V. et al. Potential and investment attractiveness of improved forestry projects in the face of increasing climatic challenges. *South of Russia: ecology, development*, 2024, vol. 19, no. 3(72), pp. 180–192. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-3-18
17. Fomenko G.A., Romanovskaya A.A., Fomenko M.A. et al. Forest climate projects: opportunities and challenges of implementing the ESG approach. Part 1. *Problems of regional ecology*, 2022, no. 2, pp. 91–106. DOI: 10.24412/1728-323X-2022-2-91-106
18. Shanin V.N., Frolov P.V., Korotkov V.N. Can artificial reforestation always be a forest-climatic project? *Questions of Forest Science*, 2022, vol. 5, no. 2, pp. 103–139. DOI: 10.31509/2658-607x-202252-106
19. Dyachenko Yu.K., Litvinova A.V., Nesterova O.V. et al. The Voluntary Carbon Market: Russian Institutional Context and Development Prospects. *Bulletin of the Far Eastern Federal University. Economics and Management*, 2024, no. 3(111), pp. 60–105. DOI: 10.24866/2311-2271/2024-3/1064
20. Zheldak V.I., Doroshenkova E.V., Proka I.Yu. Issues of forestry improvement of the system of conservation and use of forests within the framework of solving the problem of adaptation of forests and the forest complex to climate change. *Forestry information*, 2023, no. 2, pp. 5–26. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2023.2.01
21. Carbon landfills in Russia: present and future. (In Russian) Available at: <https://carbon-polygons.ru/> (accessed: 10.03.2025)
22. *Karbonovye poligony Rossii: nastoyashchee i budushchee* [Carbon landfills of the Russian Federation]. (In Russian) Available at: <https://www.ecoindustry.ru/i/news/59836/doklad.pdf> (accessed: 11.04.2025)
23. Lazarev Yu.A., Zheldak V.I., Zavalova T.A. *Lesovodstvo. Terminy i opredeleniya* [Forestry. Terms and definitions]. Moscow, 1987, 18 p. (In Russian)
24. Pogrebnyak P.S. *Osnovy lesnoi tipologii* [Fundamentals of Forest Typology]. Kiev, AN USSR Publ., 1955, 2nd ed. 456 p. (In Russian)
25. Vorob'ev D.V. *Tipy lesov Evropeiskoi chasti SSSR* [Forest Types of the European Part of the USSR]. Kiev, AN USSR Publ., 1953, 452 p. (In Russian)
26. Onuchin A.A., Danilova I.V. *Patent No. 2617452 Russian Federation, MPK G01W 1/00, G06T 11/00. Sposob opredeleniya kolichestva i kharaktera prostranstvennogo raspredeleniya tverdykh atmosferynykh osadkov* [Method for determining the quantity and nature of the spatial distribution of solid atmospheric precipitation]: No. 2015122639: filed 10.06.2015: published 25.04.2017; applicant Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center "Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences". (In Russian)
27. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated December 29, 2021 No. 1024 (as amended on August 3, 2023) On approval of the Rules for reforestation, forms, composition, procedures for approval of the reforestation project, grounds for refusal of its approval, as well as requirements for the format in electronic form of the reforestation project. Available at: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minprirody-rossii-ot-29122021-n-1024-ob-utverzhenii/> (accessed: 12.06.2025)
28. Rodin S.A., Prokazin N.E., Kazakov V.I. et al. *Rekomendatsii po planirovaniyu i proektirovaniyu fonda lesovosstanovleniya na ploshchadyakh, poidennykh lesnymi pozharemi i vetrovalami* [Recommendations for planning and designing a reforestation fund in areas affected by forest fires and windfalls]. Pushkino, All-Russian Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization Publ., 2019, 36 p. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Светлана С. Морковина разработала концепцию и дизайн исследования, написала первую версию статьи. Наталия В. Яковенко дала экономическую оценку реализации дополнительных лесохозяйственных мероприятий. Елена А. Колесниченко несла ответственность за все аспекты исследования и гарантировала соответствующее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью всех частей работы. Дарья А. Литовченко одобрила окончательную версию статьи перед ее подачей для публикации, сформулировала результаты исследования и заключительные выводы. Андрей Н. Топчеев подготовил графический и картографический материал. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Svetlana S. Morkovina developed the concept and design of the research and wrote the first version of the article. Nataliya V. Yakovenko undertook economic assessment of the implementation of additional forestry measures. Elena A. Kolesnichenko participated through agreement to be responsible for all aspects of the research and to guarantee appropriate consideration and resolution of issues related to the accuracy and integrity of all parts of the work. Daria A. Litovchenko approved the final version of the article before its submission for publication, as well as formulation of research results and final conclusions. Andrey N. Topcheev prepared graphic and cartographic materials. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Светлана С. Морковина / Svetlana S. Morkovina <https://orcid.org/0000-0003-3776-5181>
 Наталия В. Яковенко / Nataliya V. Yakovenko <https://orcid.org/0000-0003-4203-0040>
 Елена А. Колесниченко / Elena A. Kolesnichenko <https://orcid.org/0000-0002-1213-3199>
 Дарья А. Литовченко / Daria A. Litovchenko <http://orcid.org/0000-0003-2973-7447>
 Андрей Н. Топчеев / Andrey N. Topcheev <https://orcid.org/0009-0000-2484-3844>

Оригинальная статья / Original article

УДК 619:616.995.1

DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-12



Аллелофонд гена DRB1 OLA у овец различных пород

Давудай А. Девришов¹, Саида Н. Марзанова¹, Владислав А. Жучков¹, Нурбий С. Марзанов¹,
Елизавета А. Николаева¹, Курбан Ф. Фатахов¹, Кайрлы Г. Есенгалиев², Айнуур М. Давлетова²,
Ерсаин С. Нысанов³

¹Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА имени К. И. Скрябина, Москва, Россия

²Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет, Уральск, Республика Казахстан

³Западно-Казахстанская научно-исследовательская ветеринарная станция – филиал Товарищества с ограниченной ответственностью «Казахский научно-исследовательский ветеринарный институт», Уральск, Республика Казахстан

Контактное лицо

Саида Н. Марзанова, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры иммунологии и биотехнологии ФГБОУ ВО МГАВМиБ-МВА имени К.И. Скрябина; 109472 Россия, г. Москва, ул. Академика Скрябина, 23.
Тел. +79268137147

Email s.marzanova@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9895-8046>

Формат цитирования

Девришов Д.А., Марзанова С.Н., Жучков В.А., Марзанов Н.С., Николаева Е.А., Фатахов К.Ф., Есенгалиев К.Г., Давлетова А.М., Нысанов Е.С. Аллелофонд гена DRB1 OLA у овец различных пород // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 129-137. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-12

Получена 22 августа 2025 г.

Прошла рецензирование 5 октября 2025 г.

Принята 25 октября 2025 г.

Резюме

Цель: проведение комплексного анализа вариабельности DRB1 локуса OLA, для установления уровня полиморфизма в исследуемых популяциях и породах овец, разводимых в различных условиях среды. Материал и методы включали оценку генетической дифференциации пород из России (дагестанская горная, дорпер, романовская, суффолк) и Казахстана (акжайская). Популяции овец романовской породы были из Ярославской области, помеси эдильбаевская х калмыцкая – из Калмыкии. Расшифровку нуклеотидной последовательности ДНК осуществляли у 246 животных. Секвенирование проводили по Сэнгеру с последующим биоинформационным анализом. Статистическую обработку данных выполняли при помощи программ Microsoft Excel 2023, GenAlEx.

Результаты показали, что межпопуляционная вариация ($F_{st} = 0,008$, $p = 0,005$) объясняла 0,76 % дисперсии, тогда как различия между группами ($F_{st} = 0,044$, $p = 0,001$) составляли 4,28 %. Отрицательное значение F_{is} ($-0,030$, $p = 0,997$) свидетельствовало об избытке гетерозигот. Оценка потока генов ($N_m = 4,58$) подтвердила умеренный уровень миграции. У исследуемых популяций сохранялась избыточность аллелей с высокими уровнями гетерозиготности. Был отмечен статистически значимый уровень дифференциации популяций ($F_{st}=5,2\%$, $p<0,001$).

Заключение: аллелофонд гена DRB1 OLA показал типичную структуру с доминированием индивидуальной изменчивости исследованных популяций овец (95 %). В каждой породе присутствовали аллели, не встречающиеся у других. Исключением были популяции 3 и 9 в силу их малой выборки ($n \leq 10$) ограничивающей возможность корректной статистической обработки и достоверного выделения уникальных аллелей.

Ключевые слова

Овцы, породы, генотип, ген, аллель, DRB1, OLA, паразитозы.

Allele pool of the DRB1 OLA gene in sheep of different breeds

Davuday A. Devrishov¹, Saida N. Marzanova¹, Vladislav A. Zhuchkov¹, Nurbiiy S. Marzanov¹, Elizaveta A. Nikolaeva¹, Kurban F. Fatakhov¹, Kairly G. Yesengaliev², Ainur M. Davletova² and Ersain S. Nysanov³

¹K.I. Skhryabin Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology – MVA by K.I. Skryabin, Moscow, Russia

²West Kazakhstan Innovation and Technology University, Uralsk, Republic of Kazakhstan

³West Kazakhstan Scientific Veterinary Station branch of the Kazakh Scientific Research Veterinary Institute LLP, Uralsk, Republic of Kazakhstan

Principal contact

Saida N. Marzanova, PhD (Biology), Associate Professor, Department of Immunology and Biotechnology, K.I. Skryabin Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology; 23 Akademika Skryabin St, Moscow, Russia 109472.

Tel. +79268137147

Email s.marzanova@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9895-8046>

How to cite this article

Devrishov D.A., Marzanova S.N., Zhuchkov V.A., Marzanov N.S., Nikolaeva E.A., Fatakhov K.F., Yesengaliev K.G., Davletova A.M., Nysanov E.S. Allele pool of the DRB1 OLA gene in sheep of different breeds. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):129-137. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-12

Received 22 August 2025

Revised 5 October 2025

Accepted 25 October 2025

Abstract

The objective was to conduct a comprehensive analysis of the variability of the DRB1 locus OLA, to establish the level of polymorphism in the populations and breeds of sheep studied bred in different environmental conditions.

Material and methods included an assessment of the genetic differentiation of breeds from Russia (Dagestan Mountain, Dorper, Romanov, Suffolk) and one from the Republic of Kazakhstan (Akzhaik). The Romanov sheep populations were from farms in the Yaroslavl region and the Edilbaevskaya x Kalmyk crossbreeds were from Kalmykia (Russia). The decoding of the nucleotide sequence of DNA was carried out in 246 animals. Sequencing was carried out according to Sanger, followed by the use of bioinformatics analysis procedures. Statistical data processing was carried out using Microsoft Excel 2023, GenAIEx programs. The results showed that the between-population variation ($F_{st} = 0.008$, $p = 0.005$) explained only 0.76 % of the variance, while the differences between the groups ($F_{sr} = 0.044$, $p = 0.001$) were 4.28 %. The negative F_{is} value (-0.030 , $p = 0.997$) indicated an excess of heterozygotes. The gene flow assessment ($N_m = 4.58$) confirmed a moderate level of migration. All the studied populations retained an excess of alleles with high levels of heterozygosity. A statistically significant level of population differentiation was noted ($F_{st} = 5.2$ %, $p < 0.001$).

The DRB1 OLA gene allele pool showed a typical structure with a predominance of individual variability in the sheep populations studied (95 %). Each breed contained alleles not found in others. Populations 3 and 9 were an exception owing to their small sample size ($n \leq 10$), which limited the possibility of accurate statistical analysis and reliable identification of unique alleles.

Key Words

Sheep, breeds, genotype, gene, allele, DRB1, OLA, parasitoses.

ВВЕДЕНИЕ

Гены главного комплекса гистосовместимости (OLA, Ovine leucocyte antigen) у овец регулируют иммунный ответ через презентацию антигенов. Молекулы класса I представляют внутриклеточные патогены цитотоксическим Т-лимфоцитам, обеспечивая клеточный иммунитет, тогда как гликопротеины класса II презентуют внеклеточные антигены хелперным Т-клеткам, инициируя гуморальные реакции [1–5]. Локусы класса II, отличаясь высокими уровнями полиморфизма, служат ключевыми мишенями для исследований ассоциаций OLA с иммунными фенотипами [6–9].

У овец (*Ovis aries*) OLA локализован на хромосоме 20q15-q23 и сохраняет консервативную для млекопитающих структуру [10]. Самым варибельным геном класса II является Ovar-DRB1, чей второй экзон (DRB1.2), кодирующий антиген-связывающую область, содержит >100 разнообразных вариантов аллелей у овец и диких баранов [11–13]. Такой полиморфизм определяет широту иммунного репертуара против патогенов. Многочисленные работы подтверждают связь аллельного разнообразия DRB1 с устойчивостью к инфекциям у овец, а также с продуктивными признаками [14–18]. Перспективность изучения аллелофонда гена DRB1 обусловлено поиском и выявлением закономерностей наследственной изменчивости в локальных адаптациях [12; 15; 19]. Кроме того, данный ген может быть перспективным маркером в области селекции животных по устойчивости к различным заболеваниям. Также, важным аспектом является сохранение генетического разнообразия пород в условиях меняющихся патогенных ландшафтов и условий содержания. Хотя селекция на основе OLA-маркеров перспективна для повышения резистентности, их эффекты породоспецифичны. Для обоснованного отбора требуется характеристика аллелофонда DRB1 и его ассоциаций с иммунным статусом в конкретных популяциях [20; 21].

Целью настоящего исследования являлся комплексный анализ варибельности DRB1 локуса OLA, для характеристики аллельного состава и уровня полиморфизма в исследуемых популяциях и породах овец, разводимых в различных условиях среды. Оценка их генетической дифференциации, а также выявления селективно-значимых аллелей-кандидатов, ранее описанных в литературе.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Животные, использованные в исследовании

Всего исследованиями было охвачено 4 породы из Российской Федерации (дагестанская горная (Популяция 1; n=20); дорпер (Популяция 6, n=25); суффолк (Популяция 9; n=4). Романовская порода была представлена 4-мя популяциями из различных хозяйств Ярославской области (Популяция 2, n=59; Популяция 3, n=10; Популяция 4, n=30; Популяция 5, n=39). Помеси эдильбаевская х калмыцкая были из Республики Калмыкия (Популяция 7; n=36); акжайкская из Республики Казахстан (Популяция 8, n=23). Все породы и помесные животные для исследований отбирали из различных экологических зон. Суммарно нуклеотидные последовательности были получены и расшифрованы от 246 животных.

Взятие образцов генетического материала

Образцы цельной крови получали из яремной вены. Кровь хранили в пробирках с 0,05 % раствором ЭДТА при -20 °C до момента использования.

Выделение геномной ДНК

Выделение геномной ДНК из клеток крови проводили сорбентным методом с использованием набора реагентов EX-516 компании «СИНТОЛ» (Москва, Россия) согласно инструкции производителя.

Идентификация аллелей гена DRB1

В качестве праймеров для амплификации гена DRB1 использовали ранее протестированные последовательности [22], позволяющие полностью захватить интересующую часть гена (экзон 2) без потери варибельности участков по концам экзона: 330F – 5'-ATTAGCCTCYCCCAGGAGKC-3', DRB1_E2_rev 5'-GCTCACCTCGCCGCT-3'. ПЦР проводили в течение 30 циклов с отжигом 58°C с длительностью 30 с на каждом этапе. Полученные ампликоны анализировали в 1,5 % агарозном геле, а затем выполняли очистку целевых полос при помощи набора CleanUp mini (Евроген, Россия). Очищенные препараты ДНК отправляли на секвенирование для уточнения нуклеотидной последовательности. Секвенирование проводили в компании Евроген (Россия). Идентификацию аллелей по результатам секвенирования осуществляли с использованием программного обеспечения SnapGene (США). В качестве референса нуклеотидных последовательностей и номенклатуры ориентировались на базу данных иммунополиморфизмов IPD MHC [23]. При амплификации экзона 2 гена DRB1 невозможно дифференцировать между собой аллели 09:01 и 09:02 из-за локализации их варибельных участков в области экзона 1. Обнаруженные в ходе работы соответствия нуклеотидных последовательностей данным аллелям приравнивались к обнаружению аллеля 09:01.

Статистическая обработка данных

Расчет частот аллелей и показателей гетерозиготности проводили при помощи Microsoft Excel 2023 руководствуясь формулами:

$$p = \frac{n_i}{2 \times N}$$
 где n_i – конкретный аллель, N – число особей в популяции, $2 \times N$ – общее число аллелей, так как каждая особь несёт пару аллелей; наблюдаемая гетерозиготность
$$(H_o) = \frac{\text{Число гетерозигот}}{N}$$
;

ожидаемая гетерозиготность
$$(H_e) = 1 - \sum p_i^2$$
, где p_i – частоты встречаемости конкретных аллелей в популяции;

эффективное число аллелей
$$(N_e) = \frac{1}{\sum p_i^2}$$
; индекс Шеннона
$$(H') = - \sum (p_i \times \ln p_i)$$
.

Для построения матрицы генетического расстояния Nei использовали программное обеспечение GenAlEx [24], функцию Genetic Distance by Population, параметр Codom-Genotypic. Для статистического анализа AMOVA было использовано программное обеспечение GenAlEx. Из-за малого размера Популяция 9 не учитывалась при проведении AMOVA. Выполняли обработку по 8 популяциям с дополнительной группировкой по породе. Выполняли функцию Distance based, input format – raw data, Codom-Allelic, 999 permutations.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Аллельное разнообразие

По результатам обработки данных секвенирования от 246 животных было идентифицировано 76 разнооб-

разных аллелей, различной частоты встречаемости (табл. 1).

Как было ранее указано в разделе Материалы и методы, в процессе работы возникали сложности в дифференциации аллелей 09:01 и 09:02, поэтому в процессе исследования мы решили относить обнаруженные аллели группы 09 к варианту 09:01 для упрощения интерпретации полученных результатов и статистической обработки. Данный вариант оказался одним из наиболее часто встречающихся в процессе исследования (6,098 %). Полиморфизм, определяющий различие собранного материала аллелей, находится в области экзона 1 DRB1 гена, который не

амплифицируется в процессе ПЦР. Эти аллели являются единственными представителями группы 09 из-за сильных структурных различий с другими вариантами, но их отличие друг от друга заключается в одном продукте, аминокислоте: глутамин 33 (09:01) и глутамат 33 (09:02) (Q33E). Замены, определяющие их различия могут влиять на вариации в иммунном ответе овец, сказываться на узнаваемости антигенов и устойчивости к инфекциям. Конкретные функциональные различия двух рассматриваемых аллелей требуют отдельного изучения и зависят от пород, условий содержания и внешних факторов.

Таблица 1. Общая таблица частот выявленных аллелей

Table 1. General table of frequencies of identified alleles

Аллель Allele	Частота встречаемости, % Frequency of occurrence, %	Аллель Allele	Частота встречаемости, % Frequency of occurrence, %	Аллель Allele	Частота встречаемости, % Frequency of occurrence, %	Аллель Allele	Частота встречаемости, % Frequency of occurrence, %
20:01	10,772	20:04	1,220	13:01	0,407	01:02	0,203
03:01	10,569	12:06	1,220	15:02	0,407	16:12	0,203
20:02	7,114	21:01	1,016	25:01	0,407	08:02	0,203
04:02	6,504	18:01	1,016	19:02	0,407	16:09	0,203
09:01	6,098	03:10	1,016	03:04	0,407	01:03:02	0,203
03:08	4,268	06:01	1,016	05:03	0,407	03:14	0,203
07:01	4,065	14:02	1,016	16:01	0,407	01:04	0,203
06:02	3,862	04:05	1,016	29:01	0,407	25:03	0,203
11:02	3,252	03:02	0,813	17:04	0,407	25:02	0,203
16:13	3,049	12:03	0,813	19:04	0,407	16:05	0,203
26:01	2,439	19:01	0,813	10:12	0,407	16:08	0,203
01:01	1,626	02:01	0,813	08:10	0,407	16:03	0,203
10:05	1,626	04:06	0,813	12:01	0,407	03:12	0,203
10:01	1,626	12:02	0,610	16:07	0,203	08:09	0,203
10:09	1,423	17:01	0,610	05:01	0,203	25:04	0,203
08:01	1,423	08:03	0,610	15:03	0,203	14:05	0,203
04:04	1,220	16:02:01	0,610	16:06	0,203	16:02:02	0,203
01:03	1,220	16:04	0,610	03:09	0,203	01:05	0,203
03:11	1,220	14:03	0,610	03:07	0,203	08:04	0,203

Гетерозиготность

После получения результатов аллельного состава и их частот были рассчитаны показатели гетерозиготности для каждой исследуемой популяции. Данные представлены в таблице 2. Результаты варьировали в зависимости от рассматриваемой группы и её размера. Значения наблюдаемой гетерозиготности практически для всех популяций близко к 1 из-за большого числа возможных аллелей. Из-за малого количества исследуемых животных в популяциях 3 и 9 в таблице 2 можно наблюдать низкие показатели ожидаемой гетерозиготности 0,630 и 0,688 соответственно.

Сравнение популяций

Анализ молекулярной дисперсии (AMOVA) выявил статистически значимую, но слабую генетическую дифференциацию популяций по локусу DRB1 ($F_{st} = 0,052$, $p < 0,001$). Основной вклад в изменчивость (94,97 %) вносили индивидуальные различия внутри популяций, что характерно для генов главного комплекса гистосовместимости из-за их высокого уровня вариабельности. Межпопуляционная вариация ($F_{rt} = 0,008$, $p = 0,005$) объясняла лишь 0,76 % дисперсии, тогда как различия между группами популяций (деление по группам производилось по породам овец) ($F_{sr} = 0,044$, $p = 0,001$) составляли 4,28 %. Отрицательное значение F_{is} ($-0,030$, $p = 0,997$) свидетельствовало об избытке гетерозигот.

Оценка потока генов ($Nm = 4,58$) подтвердила умеренный уровень миграции. То есть, обмен генами между

популяциями достаточно интенсивен, чтобы поддерживать их генетическое сходство.

Таблица 2. Показатели гетерозиготности для каждой популяции овец
Table 2. Heterozygosity rates for each sheep population

Популяция Population	Порода Breed	n	He	Ho	Na	Ne	H'
1	Дагестанская горная Dagestan Mountain	20	0,878	0,95	14	8,16	2,35122
2	Романовская Romanov	59	0,912	1,00	18	11,38	2,62808
3	Романовская Romanov	10	0,630	0,70	5	2,70	1,23484
4	Романовская Romanov	30	0,901	0,90	16	10,11	2,50496
5	Романовская Romanov	39	0,886	0,97	18	8,77	2,46242
6	Дорпер Dorper	25	0,874	0,96	14	7,91	2,29812
7	Помеси (эдилбаевская х калмыцкая) Crossbreeds (Edilbaev × Kalmyk)	36	0,963	1,00	42	27,28	3,53265
8	Акжайикская Akzhaik	23	0,957	0,96	32	23,00	3,31821
9	Суффолк Suffolk	4	0,688	1,00	4	3,20	1,25548

Примечание: n – количество особей в популяции. Ho – наблюдаемая гетерозиготность, He – ожидаемая гетерозиготность, Na – наблюдаемое число аллелей, Ne – эффективное число аллелей, H' – индекс Шеннона

Note: n – number of individuals in the population; Ho – observed heterozygosity; He – expected heterozygosity; Na – observed number of alleles; Ne – effective number of alleles; H' – Shannon index

Матрица генетических расстояний Nei

На основании расчётов стандартного генетического расстояния Nei между популяциями было выявлено, что генетическая дифференциация между отдельными группами домашних овец варьируется в достаточно широком диапазоне (табл. 3). Диагональные элементы матрицы, не равняются нулю, так как отражают уровень внутривидового генетического разнообразия (внутригрупповую гетерогенность) и варьируют от 1,244 (Популяция 3) до 1,695 (Популяция 1), что связано с

высоким внутривидовым полиморфизмом гена DRB1. Межпопуляционные расстояния находились в диапазоне от 1,794 (Популяция 2 – Популяция 4) до 2,300 (Популяция 1 – Популяция 3), отражая межгрупповую гетерогенность. Наибольшая дифференциация наблюдалась в отношении Популяции 3: её расстояния до остальных популяций превышали 2,100 (максимум: 2,300 с Популяцией 1). Наименьшие межпопуляционные расстояния зафиксированы между популяциями 2 – 4 (1,794), 2 – 6 (1,820) и 4 – 6 (1,913).

Таблица 3. Парная матрица среднего генотипического генетического расстояния между популяциями овец
Table 3. Pairwise matrix of average genotypic genetic distance between sheep populations

1	2	3	4	5	6	7	8	Популяция Population
1,695	1,953	2,300	2,060	2,056	2,032	1,971	2,011	1
	1,677	2,103	1,794	1,866	1,820	1,888	1,991	2
		1,244	2,267	1,918	2,140	2,225	2,291	3
			1,867	1,960	1,913	1,984	2,077	4
				1,848	1,982	2,037	2,075	5
					1,640	1,933	2,012	6
						1,906	1,996	7
							2,000	8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения показательности и репрезентативности данных, получаемых в процессе исследования аллелофонда популяций, необходимо поддерживать выборку исследуемых животных более 30 ($n \geq 30$). Кроме популяций 3 и 9 (из-за малого размера выборки ($n \leq 10$)) в каждой группе присутствовали уникальные аллели, не

встречающиеся у других исследуемых животных. Для популяции 1: 16:07, 16:09, 16:01, 01:03:02; для популяции 2: 20:04, 29:01, 17:04; для популяции 4: 12:03; для популяции 5: 03:14, 01:04; для популяции 6: 14:02; для популяции 7: 05:01, 15:03, 03:11, 15:02, 16:06, 19:02, 03:09, 03:07, 01:02, 19:04, 25:03, 25:02, 16:05, 16:08; для популяции 8: 16:02:01, 16:12, 08:02, 08:10, 12:01, 16:02:02, 01:05, 08:04.

Уникальными аллелями, обнаруженными у овец романовской породы в рамках проведенного исследования, стали 03:02, 03:10, 20:04, 29:01, 17:04, 12:03, 13:01, 03:14, 01:04. Наиболее распространенными аллелями среди популяций (частота встречаемости > 4 %) стали 20:01, 03:01, 20:02, 04:02, 09:01, 03:08, 07:01.

Часто встречающийся вариант аллеля 20:01 по данным литературы может быть ассоциирован с увеличением веса ягнят при отъеме и половозрелости, а также со среднесуточным приростом. Наличие у особей этого же гаплотипа показывало тенденцию высокой жизнеспособности, что выражалось увеличением общего количества рожденных ягнят и числом ягнят, родившихся живыми [25]. Также, распространенный среди исследуемых популяций аллель 21:01 ассоциируется с более низким уровнем интерлейкина-6 (IL-6) в сыворотке крови [25]. Генотипы DRB1 коррелируют с общим сывороточным белком, глобулинами: α 2-глобулинами, β -глобулинами и γ -глобулинами. Отсюда, овцы значительно отличаются друг от друга по устойчивости к нематодной инфекции, большая часть этих различий связана с генетическими различиями, особенно в иммунном ответе. Кроме того, по данным исследований, вариант аллеля 11:01 ассоциирован с повышенным уровнем резистентности к кишечным паразитам [26]. В ходе исследования данный аллель обнаружен не был, но часто был идентифицирован вариант 11:02, очень схожий по нуклеотидному составу. Возможно, данный вариант также может влиять на уровень паразитарной устойчивости у овец.

Анализ параметров генетического разнообразия локуса DRB1 выявил значительные межпопуляционные различия в структуре аллелофонда у исследованных пород овец (табл. 2). Популяция 7 (помеси эдильбаевская х калмыцкая) и Популяция 8 (акжаикская) продемонстрировали наиболее высокие значения ожидаемой гетерозиготности ($H_e = 0,963$ и $0,957$), эффективного числа аллелей ($N_e = 27,28$ и $23,00$) и индекса Шеннона ($H' = 3,53$ и $3,32$). Это подтверждает данные о гипервариабельности гена DRB1, характерной для неуправляемых скрещиваний и аборигенных пород, исторически адаптированных к разнообразным патогенным ландшафтам.

Романовская (Популяция 3, $N=10$) и суффолк (Популяция 9, $N=4$) показали минимальные значения H_e ($0,630$ и $0,688$) и N_a (5 и 4 аллеля). Столь резкое снижение объясняется эффектом бутылочного горлышка, инбридингом в изолированных хозяйствах и направленной селекцией на продуктивные признаки в ущерб иммуногенетическому разнообразию. Но также, на данные показатели непосредственно влияет и малый размер исследуемых популяций, что оказывает значительный эффект на рассчитываемые параметры. Снижение H_e и H' у малых выборок подчеркивает необходимость репрезентативного объема данных (>30 особей) для корректной оценки генетического разнообразия МНС.

Во всех популяциях, кроме Популяции 4 (романовская, $H_o=H_e=0,90$), наблюдался избыток гетерозигот. Это подтверждает действие балансирующего отбора на локус DRB1, поддерживающего гетерозиготность для усиления иммунного ответа. Высокое разнообразие у дагестанской горной ($H_e=0,878$), романовских ($H_e>0,886$) и дорпер ($H_e=0,874$) пород отражает их адаптационный потенциал. Повышенные значения помесной Популяции 7 объясняются интрогрессией аллелей от двух филогенетически

дивергентных групп (эдильбаевская х калмыцкая). Показатели Популяции 8 (акжаикская) согласуются с данными по другим аборигенным породам Казахстана, где многовековая кочевая система содержания способствовала накоплению аллельного разнообразия. Сохранение гетерозиготности у романовских и дорпер критически важно для селекции особей по устойчивости к болезням.

Ненулевые диагональные значения матрицы (1,244–1,695) указывают на значимое внутрипопуляционное генетическое разнообразие, характерное для адаптивных локусов иммунного ответа, таких как DRB1. Особенно высокая гетерогенность в Популяции 1 (1,695) может объясняться исторической интрогрессией или большей эффективной численностью, тогда как минимальное значение у Популяции 3 (1,244) предполагает эффект бутылочного горлышка или инбридинга. Резкая дифференциация Популяции 3 от всех популяций (расстояния >2,100) свидетельствует о её длительной изоляции, возможно, связанной с географическими барьерами или селективным давлением патогенов. Напротив, кластер Популяция 2 – 4 – 6 (расстояния <1,920) отражает активный генетический обмен, обусловленный общим происхождением или миграциями. Эти закономерности согласуются с ролью DRB1 в адаптации к локальным патогенным ландшафтам и подчеркивают влияние дрейфа генов на малочисленные популяции (например, Популяция 3). Для верификации гипотез необходимы дополнительные данные о географическом распределении, истории управления стадами и патогенной нагрузке в регионах происхождения популяций.

Дисперсионный анализ популяций продемонстрировал доминирование внутрииндивидуального разнообразия (95 %), что согласуется с гипервариабельным статусом локуса DRB1, где балансирующий отбор поддерживает аллельное разнообразие. Значимая, но слабая общая дифференциация ($F_{st} = 5,2$ %) характерна для адаптивных генов МНС у домашних животных, чья эволюция определяется селективным давлением патогенов, а не географической изоляцией. Минимальный вклад межрегиональных различий (0,76 %) при сохранении популяционной структуризации внутри регионов ($F_{sr} = 4,4$ %) предполагает историческую однородность генофонда по исследуемым регионам, локальные эффекты дрейфа генов или микроадаптацию.

Отрицательное значение F_{is} подтверждает отсутствие инбридинга и соответствует роли DRB1 в поддержании гетерозиготного преимущества против патогенов. Умеренный поток генов ($N_m = 4,6$) объясняет слабую дифференциацию, выявленную ранее в матрице генетических расстояний.

Таким образом, в настоящем исследовании были выявлены аллельные варианты гена DRB1 у овец различных пород, а также рассмотрены известные из литературы ассоциации некоторых аллелей с продуктивными и адаптивными признаками. Следует отметить, что настоящая работа опиралась только на генетические данные животных. В связи с этим, будущие исследования должны предусматривать комбинацию как генотипирования, так и полевых наблюдений и фенотипических измерений, включая устойчивость к заболеваниям и продуктивность в конкретных экологических условиях среды. Такой комплексный подход позволит подтвердить или уточнить выявленные ассоциации и повысить

практическую ценность данных для селекционных программ и оценки здоровья животных.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-00197 (<https://rscf.ru/project/24-26-00197/>).

ACKNOWLEDGMENT

The study was supported by Russian Science Foundation grant No. 24-26-00197 (<https://rscf.ru/project/24-26-00197/>).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Davies G., Stear M.J., Benothman M., Abuagob O., Kerr A., Mitchell S., Bishop S.C. Quantitative trait loci associated with parasitic infection in Scottish blackface sheep // *Heredity* (Edinb). 2006. V. 96. N 3. P. 252–258. <https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6800788>.
- Vasoya D., Oliveira P. S., Muriel L.A., Tzelos T., Vrettou Ch., Morrison W.I., Ferreira de Miranda Santos I.K., Connelley T. High throughput analysis of MHC-I and MHC-DR diversity of Brazilian cattle populations // *HLA*. 2021. V. 98. N 2. P. 93–113. <https://doi.org/10.1111/tan.14339>
- Vasoya D., Connelley T., Tzelos T., Todd H., Ballingall K.T. Large scale transcriptional analysis of MHC class I haplotype diversity in sheep // *HLA*. 2024. V. 103. N 2. Article id: e15356. <https://doi.org/10.1111/tan.15356>
- Марзанова С.Н., Фатахов К.Ф., Девришов Д.А., Марзанов Н.С. Связь локусов главного комплекса гистосовместимости у овец (OLA) с резистентностью и восприимчивостью их к паразитозам // *Ветеринария*. 2024. N 7. С. 28–33. <https://doi.org/10.30896/0042-4846.2024.27.7.28-33>
- Марзанова С.Н., Девришов Д.А., Фатахов К.Ф., Марзанов Н.С. Состояние исследований главного комплекса гистосовместимости (OLA) у овец // *Аграрная наука*. 2025. Т. 390. N 1. С. 93–99. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-390-01-93-99>
- Herrmann-Hoesing L.M., White S.N., Mousel M.R., Lewis G.S., Knowles D.P. Ovine progressive pneumonia provirus levels associate with breed and Ovar-DRB1 // *Immunogenetics*. 2008. V. 60. N 12. P. 749–758. <https://doi.org/10.1186/1297-9686-41-17>
- Gowane G.R., Sharma P., Kumar R., Misra S.S., Alex R., Vohra V., Chhotaray S., Dass G., Chopra A., Kandalkar Y., Vijay V., Choudhary A., Magotra A., Rajendran R. Cross-population genetic analysis revealed genetic variation and selection in the *Ovar-DRB1* gene of Indian sheep breeds // *Animal Biotechnology*. 2023. V. 34. N 7. P. 2928–2939. <https://doi.org/10.1080/10495398.2022.2125404>
- Gowane G.R., Sharma P., Kumar R., Misra S.S., Alex R., Vohra V., Chhotaray S., Sharma N., Chopra A., Kandalkar Y., Choudhary A., Magotra A. Population-wide genetic analysis of OvarDQA1 and DQA2 loci across sheep breeds in India revealed their evolutionary importance and fitness of sheep in a tropical climate // *Animal Biotechnology*. 2023. V. 34. N 9. P. 4645–4657. <https://doi.org/10.1080/10495398.2023.2180010>
- Salim B., Nakao R., Chatanga E., Marcuzzi O., Ahmed Eissawi M., Almathen F., Hanotte O., Giovambattista G. Exploring genetic diversity and variation of Ovar-DRB1 gene in Sudan Desert sheep using targeted next-generation sequencing // *BMC Genomics*. 2024. V. 25. N 1. P. 2–15. <https://doi.org/10.1186/s12864-024-10053-39>
- Mahdy E.A., Mäkinen A., Chowdhary B.P., Andersson L., Gustavsson I. Chromosomal localization of the ovine major histocompatibility complex (OLA) by in situ hybridization // *Heredity*. 1989. V. 111. N 1. P. 87–90. <https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.1989.tb00381.x>
- Ballingall K.T., Fardoe K., McKeever D.J. Genomic organisation and allelic diversity within coding and non-coding regions of the Ovar-DRB1 locus // *Immunogenetics*. 2008. V. 60. N 2. P. 95–103.
- Bay V., Keleş M., Aymaz R., Hatipoğlu E., Öner Y., Yaman Y. Documentation of extensive genetic diversity in the Ovar-DRB1 gene in native Turkish sheep // *Animal Biotechnology*. 2021. V. 32. N 4. P. 507–518.
- Buzan E., Pokorný B., Urzı F., Duniš L., Bončina A., Iacolina L., Šprem N., Stipoljev S., Mereu P., Leoni G., Pirastru M., Safner T. Genetic variation of European mouflon depends on admixture

- of introduced individuals // *Mammal Research*. 2023. N 69. P. 145–158. <https://doi.org/10.1007/s13364-023-00726-x>
- Ballingall K.T., Tassi R. Sequence-based genotyping of the sheep MHC class II DRB1 locus // *Immunogenetics*. 2010. V. 62. N 1. P. 31–39.
 - Polat M., Aida Y., Takeshima S.N., Aniwashi J., Halik M. The diversity of major histocompatibility complex class II DRB1 gene in sheep breeds from Xinjiang, China // *Tissue Antigens*. 2015. V. 85. N 1. P. 50–57. <https://doi.org/10.1111/tan.12480>
 - Yaman Y., Bay V., Aymaz R., Keleş M., Öner Y., Teferedegn E.Y., Ün C. A novel 2 bp deletion variant in Ovine-DRB1 gene is associated with increased Visna/maedi susceptibility in Turkish sheep // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. Article id: 14435. p. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93864-8>
 - Huang W., Dicks K.L., Hadfield J.D., Johnston S.E., Ballingall K.T., Pemberton J.M. Contemporary selection on MHC genes in a freeliving ruminant population // *Ecology Letters*. 2022. V. 25. N 4. P. 828–838. <https://doi.org/10.1111/ele.13957>
 - Stear M., Preston S., Piedrafita D., Donskow-Tysoniewska K. The Immune Response to Nematode Infection // *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. V. 24. Article id: 2283. pp. 1–18. <https://doi.org/10.3390/ijms24032283>
 - Омарова Ф.А., Дроков М.Ю., Хамаганова Е.Г. Главный комплекс гистосовместимости: история открытия, эволюция, строение, значение при трансплантации аллогенных гемопоэтических стволовых клеток // *Трансплантология*. 2023. Т. 15. N 2. С. 251–265. <https://doi.org/10.23873/2074-0506-2023-15-2-251-265>
 - Shen H., Han G., Jia B., Jiang S., Du Y. MHC-DRB1/DQB1 Gene Polymorphism and Its Association with Resistance/Susceptibility to Cystic Echinococcosis in Chinese Merino Sheep // *Journal Parasitology Research*. 2014. Article id: 272601. P. 1–7. <https://dx.doi.org/10.1155/2014/272601>
 - Esmailnejad A., Ganjani V., Hosseini-Nasab E., Nazifi S. Association of Ovar-DRB1 alleles with innate immune responses in sheep // *Veterinary Medicine and Science*. 2022. V. 8. N 2. P. 752–757. <https://doi.org/10.1002/vms3.683>
 - Марзанова С.Н., Девришов Д.А., Жучков В.А., Николаева Е.А., Марзанов Н.С. Сравнение аллелей гена DRB1 двух популяций овец романовской породы методами рестриционного картирования и секвенирования // *Биотехнология*. 2025. Т. 41. N 1. С. 21–33. <https://doi.org/10.56304/S0234275825010090>
 - Maccari G., Robinson J., Barker D.J., Yates A.D., Hammond J.A., Marsh S.G.E. The 2024 IPD-MHC database update: a comprehensive resource for major histocompatibility complex studies // *Nucleic Acids Research*. 2025. V. 53. N D1. P. D457–D461. <https://doi.org/10.1093/nar/gkae932.24>
 - Peakall R., Smouse P.E. GenAlEx 6.5: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research - an update // *Bioinformatics*. 2012. V. 28. N 19. P. 2537–2539. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bts460>
 - Cinar M.U., Mousel M.R., Herrmann-Hoesing L.M., Taylor J.B., White S.N. Ovar-DRB1 haplotypes *2001 and *0301 are associated with sheep growth and ewe lifetime prolificacy // *Gene*. 2016. V. 595. N 2. P. 187–192. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2016.10.004>
 - Hassan M., Good B., Hanrahan J.P., Campion D., Sayers G., Mulcahy G., Sweeney T. The dynamic influence of the DRB1*1101 allele on the resistance of sheep to experimental *Teladorsagia circumcincta* infection // *Veterinary Research*. 2011. V. 42. N 46. P. 1–10. <https://doi.org/10.1186/1297-9716-42-46>

REFERENCES

- Davies G., Stear M.J., Benothman M., Abuagob O., Kerr A., Mitchell S., Bishop S.C. Quantitative trait loci associated with parasitic infection in Scottish blackface sheep. *Heredity* (Edinb), 2006, vol. 96, no. 3, pp. 252–258. <https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6800788>
- Vasoya D., Oliveira P.S., Muriel L.A., Tzelos T., Vrettou Ch., Morrison W.I., Ferreira de Miranda Santos I.K., Connelley T. High throughput analysis of MHC-I and MHC-DR diversity of Brazilian cattle populations. *HLA*, 2021, vol. 98, no. 2, pp. 93–113. <https://doi.org/10.1111/tan.14339>
- Vasoya D., Connelley T., Tzelos T., Todd H., Ballingall K.T. Large scale transcriptional analysis of MHC class I haplotype diversity in sheep. *HLA*, 2024, vol. 103, no. 2, article id: e15356. <https://doi.org/10.1111/tan.15356>

4. Marzanova S.N., Fatakhov K.F., Devrishova D.A., Marzanov N.S. Relationship of loci of the major histocompatibility complex in sheep (OLA) with their resistance and susceptibility to parasitoses. *Veterinary science*, 2024, no. 7. pp. 28–33. (In Russian) <https://doi.org/10.30896/0042-4846.2024.27.7.28-33>
5. Marzanova S.N., Devrishova D.A., Fatakhov K.F., Marzanov N.S. Status of research on the major histocompatibility complex (OLA) in sheep. *Agricultural science*, 2025, vol. 390, no. 1, pp. 93–99. (In Russian) <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-390-01-93-99>
6. Herrmann-Hoesing L.M., White S.N., Mousel M.R., Lewis G.S., Knowles D.P. Ovine progressive pneumonia provirus levels associate with breed and Ovar-DRB1. *Immunogenetics*, 2008, vol. 60, no. 12, pp. 749–758. <https://doi.org/10.1086/1297-9686-41-17>
7. Gowane G.R., Sharma P., Kumar R., Misra S.S., Alex R., Vohra V., Chhotaray S., Dass G., Chopra A., Kandalkar Y., Vijay V., Choudhary A., Magotra A., Rajendran R. Cross-population genetic analysis revealed genetic variation and selection in the Ovar-DRB1 gene of Indian sheep breeds. *Animal Biotechnology*, 2023, vol. 34, no. 7, pp. 2928–2939. <https://doi.org/10.1080/10495398.2022.2125404>
8. Gowane G.R., Sharma P., Kumar R., Misra S.S., Alex R., Vohra V., Chhotaray S., Sharma N., Chopra A., Kandalkar Y., Choudhary A., Magotra A. Population-wide genetic analysis of OvarDQA1 and DQA2 loci across sheep breeds in India revealed their evolutionary importance and fitness of sheep in a tropical climate. *Animal Biotechnology*, 2023, vol. 34, no. 9, pp. 4645–4657. <https://doi.org/10.1080/10495398.2023.2180010>
9. Salim B., Nakao R., Chatanga E., Marcuzzi O., Ahmed Eissawi M., Almuthen F., Hanotte O., Giovambattista G. Exploring genetic diversity and variation of Ovar-DRB1 gene in Sudan Desert sheep using targeted next-generation sequencing. *BMC Genomics*, 2024, vol. 25, no. 1, pp. 2–15. <https://doi.org/10.1186/s12864-024-10053-39>
10. Mahdy E.A., Mäkinen A., Chowdhary B.P., Andersson L., Gustavsson I. Chromosomal localization of the ovine major histocompatibility complex (OLA) by in situ hybridization. *Hereditas*, 1989, vol. 111, no. 1, pp. 87–90. <https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.1989.tb00381.x>
11. Ballingall K.T., Fardoe K., McKeever D.J. Genomic organisation and allelic diversity within coding and non-coding regions of the Ovar-DRB1 locus. *Immunogenetics*, 2008, vol. 60, no. 2, pp. 95–103.
12. Bay V., Keleş M., Aymaz R., Hatipoğlu E., Öner Y., Yaman Y. Documentation of extensive genetic diversity in the Ovar-DRB1 gene in native Turkish sheep. *Animal Biotechnology*, 2021, vol. 32, no. 4, pp. 507–518.
13. Buzan E., Pokorny B., Urzi F., Duniš L., Bončina A., Iacolina L., Šprem N., Stipoljev S., Mereu P., Leoni G., Pirastru M., Safner T. Genetic variation of European mouflon depends on admixture of introduced individuals. *Mammal Research*, 2023, no. 69, pp. 145–158. <https://doi.org/10.1007/s13364-023-00726-x>
14. Ballingall K.T., Tassi R. Sequence-based genotyping of the sheep MHC class II DRB1 locus. *Immunogenetics*, 2010, vol. 62, no. 1, pp. 31–39.
15. Polat M., Aida Y., Takeshima S.N., Aniwashi J., Halik M. The diversity of major histocompatibility complex class II DRB1 gene in sheep breeds from Xinjiang, China. *Tissue Antigens*, 2015, vol. 85, no. 1, pp. 50–57. <https://doi.org/10.1111/tan.12480>
16. Yaman Y., Bay V., Aymaz R., Keleş M., Öner Y., Teferedegn E.Y., Ün C. A novel 2 bp deletion variant in Ovine-DRB1 gene is associated with increased Visna/maedi susceptibility in Turkish sheep. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, article id: 14435, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93864-8>
17. Huang W., Dicks K.L., Hadfield J.D., Johnston S.E., Ballingall K.T., Pemberton J.M. Contemporary selection on MHC genes in a free-ranging ruminant population. *Ecology Letters*, 2022, vol. 25, no. 4, pp. 828–838. <https://doi.org/10.1111/ele.13957>
18. Stear M., Preston S., Piedrafita D., Donskow-Tysoniewska K. The Immune Response to Nematode Infection. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, vol. 24, article id: 2283, pp. 1–18. <https://doi.org/10.3390/ijms24032283>
19. Omarova F.A., Drokov M.Yu., Khamaganova E.G. Major histocompatibility complex: history of discovery, evolution, structure, significance for transplantation of allogeneic hematopoietic stem cells. *Transplantologiya. The Russian Journal of Transplantation*, 2023, vol. 15, no. 2, pp. 251–265. (In Russian) <https://doi.org/10.23873/2074-0506-2023-15-2-251-265>
20. Shen H., Han G., Jia B., Jiang S., Du Y. MHC-DRB1/DQB1 Gene Polymorphism and Its Association with Resistance/Susceptibility to Cystic Echinococcosis in Chinese Merino Sheep. *Journal Parasitology Research*, 2014, article id: 272601, pp. 1–7. <https://dx.doi.org/10.1155/2014/272601>
21. Esmailnejad A., Ganjani V., Hosseini-Nasab E., Nazifi S. Association of Ovar-DRB1 alleles with innate immune responses in sheep. *Veterinary Medicine and Science*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 752–757. <https://doi.org/10.1002/vms3.683>
22. Marzanova S.N., Devrishova D.A., Zuchkova V.A., Nikolaeva E.A., Marzanov N.S. Comparison of DRB1 Gene Alleles in Two Populations of Romanov Sheep Breed by Restriction Mapping and Sequencing. *Biotechnology*, 2025, vol. 41, no. 1, pp. 21–33. (In Russian) DOI: 10.56304/S0234275825010090
23. Maccari G., Robinson J., Barker D.J., Yates A.D., Hammond J.A., Marsh S.G.E. The 2024 IPD-MHC database update: a comprehensive resource for major histocompatibility complex studies. *Nucleic Acids Research*, 2025, vol. 53, no. D1, pp. D457–D461. <https://doi.org/10.1093/nar/gkae932>
24. Peakall R., Smouse P.E. GenAlEx 6.5: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research—an update. *Bioinformatics*, 2012, vol. 28, no. 19, pp. 2537–2539. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bts460>
25. Cinar M.U., Mousel M.R., Herrmann-Hoesing L.M., Taylor J.B., White S.N. Ovar-DRB1 haplotypes *2001 and *0301 are associated with sheep growth and ewe lifetime prolificacy. *Gene*, 2016, vol. 595, no. 2, pp. 187–192. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2016.10.004>
26. Hassan M., Good B., Hanrahan J. P., Campion D., Sayers G., Mulcahy G., Sweeney T. Sweeney. The dynamic influence of the DRB1*1101 allele on the resistance of sheep to experimental Teladorsagia circumcincta infection. *Veterinary Research*, 2011, vol. 42, no. 46, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1186/1297-9716-42-46>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Давудай А. Девришов, Нурбий С. Марзанов, Саида Н. Марзанова разработали концепцию исследования, руководили проектом, проанализировали данные и отредактировали статью. Саида Н. Марзанова, Владислав А. Жучков, Елизавета А. Николаева провели исследование и статистическую обработку данных. Владислав А. Жучков, Нурбий С. Марзанов, Саида Н. Марзанова написали статью и провели статистическую обработку данных. Курбан Ф. Фатахов, Кайрлы Г. Есенгалиев, Айнура М. Давлетова, Ерсайн С. Нысанов собрали биологические образцы. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Davuday A. Devrishov, Nurbii S. Marzanov and Saida N. Marzanova undertook study conceptualization, project administration, data analysis, article editing. Saida N. Marzanova, Vladislav A. Zhuchkov and Elizaveta A. Nikolaeva research and statistical data processing. Vladislav A. Zhuchkov, Nurbii S. Marzanov and Saida N. Marzanova wrote the article and processed statistical data. Kurban F. Fatakhov, Kairly G. Yesengaliev, Ainur M. Davletova and Ersain S. Nysanov collected biological samples. All authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Давудай А. Девришов / Davuday A. Devrishov <https://orcid.org/0000-0002-1747-2800>
Саида Н. Марзанова / Saida N. Marzanova <https://orcid.org/0000-0001-9895-8046>
Владислав А. Жучков / Vladislav A. Zhuchkov <https://orcid.org/0009-0008-7536-1325>
Нурбий С. Марзанов / Nurbiy S. Marzanov <https://orcid.org/0000-0003-0708-6196>
Елизавета А. Николаева / Elizaveta A. Nikolaeva <https://orcid.org/0000-0002-3678-9926>
Курбан Ф. Фатахов / Kurban F. Fatakhov <https://orcid.org/0000-0003-0427-8977>
Кайрлы Г. Есенгалиев / Kairly G. Yesengaliev <https://orcid.org/0000-0002-8820-5507>
Айнур М. Давлетова / Ainur M. Davletova <https://orcid.org/0000-0002-3178-3277>
Ерсаин С. Нысанов / Ersain S. Nysanov <https://orcid.org/0009-0003-2168-970803>

Инновационные технологии продовольственной обеспеченности аридных территорий Юга России

Назирхан Г. Гаджиев¹, Гилян В. Федотова², Иван И. Рязанцев³, Абдурахман Г. Чураев⁴,
Татьяна Е. Козенко⁵

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

²Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия

³Ставропольский государственный аграрный университет, Ставрополь, Россия

⁴Дагестанский государственный аграрный университет имени М.М. Джамбулатова, Махачкала, Россия

⁵Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия

Контактное лицо

Гилян В. Федотова, доктор экономических наук,
доцент, ведущий научный сотрудник,
ФИЦ «Информатика и управление» РАН;
119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 44 к.2.
Тел. +79033757374

Email g_evgeeva@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2066-8628>

Формат цитирования

Гаджиев Н.Г., Федотова Г.В., Рязанцев И.И.,
Чураев А.Г., Козенко Т.Е. Инновационные
технологии продовольственной обеспеченности
аридных территорий Юга России // Юг России:
экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 138-147.
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-13

Получена 2 июля 2025 г.

Прошла рецензирование 21 сентября 2025 г.

Принята 25 октября 2025 г.

Резюме

Цель: оценить специфику сельскохозяйственного производства Юга России в условиях ухудшающихся агроклиматических условий, нарастания антропогенных факторов риска, сокращения земель пригодных для сельскохозяйственного оборота, и поиска новых технологических решений сохранения продовольственной производительности данных территорий.

В исследовании были использованы методы аналогии, классификации, систематизации данных, расчетно-аналитические инструменты обработки цифрового материала, методы сопоставления и генерирования новых знаний.

Авторами рассмотрены особенности производства сельскохозяйственной продукции на предприятиях аридных территорий Юга России, проведена оценка вклада АПК Юга в общий объем производства сельскохозяйственной продукции на всей территории России и сделаны выводы о значимости данной отрасли в социально-экономической жизни населения данных регионов. Проведен анализ агроклиматического окружения аридных территорий Юга России. Доказано наличие процессов деградации и опустыниванию степей и пастбищных площадей, что требует применение бережливого и рационального природопользования. Практика применения инновационных технологических решений в производственном процессе сельскохозяйственных предприятий, доказала действенность подобных инструментов.

Доказана необходимость внедрения инновационных подходов в Южном макрорегионе для предотвращения процессов снижения социально-экономического климата территорий.

Ключевые слова

Аридные территории, земли, сельское хозяйство, АПК, агроклиматические условия, сельскохозяйственные предприятия, южные регионы.

Innovative technologies for food security in the arid territories of southern Russia

Nazirkhan G. Gadzhiev¹, Gilyan V. Fedotova², Ivan I. Ryazantsev³, Abdurakhman G. Churaev⁴ and Tatyana E. Kozenko⁵

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia

²Federal Research Centre, Informatics and Control, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russia

⁴M.M. Dzhambulatov Dagestan State Agrarian University, Makhachkala, Russia

⁵Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia

Principal contact

Gilyan V. Fedotova, Doctor of Economics,
Associate Professor, Leading Researcher,
Federal Research Centre Informatics and Control,
Russian Academy of Sciences; 44 Vavilov St, Bldg. 2,
Moscow, Russia 119333.

Tel. +79033757374

Email g_evgeeva@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2066-8628>

How to cite this article

Gadzhiev N.G., Fedotova G.V., Ryazantsev I.I.,
Churaev A.G., Kozenko T.E. Innovative technologies
for food security in the arid territories of southern
Russia. *South of Russia: ecology, development*.
2025; 20(4):138-147. (In Russ.) DOI:
10.18470/1992-1098-2025-4-13

Received 2 July 2025

Revised 21 September 2025

Accepted 25 October 2025

Abstract

The aim of the research was to assess the specifics of agricultural production in the south of Russia in the context of deteriorating agro-climatic conditions, increasing anthropogenic risk factors, a reduction in land suitable for agricultural use and the search for new technological solutions to maintain food productivity in these areas.

The study used methods of analogy, classification, data systematisation, computational and analytical tools for processing digital material, methods of comparison and the generation of new knowledge.

An analysis of the agro-climatic environment of the arid regions of southern Russia was conducted. The authors examined the specifics of agricultural production in those regions, assessed the contribution of the southern agro-industrial complex to the overall agricultural production of Russia as a whole and drew conclusions about the importance of this sector in the socioeconomic life of the regional populations. Degradation and desertification of steppes and pastures were demonstrated, requiring the use of sustainable and rational nature management. The practical application of innovative technological solutions in the production process at agricultural enterprises has demonstrated the effectiveness of such tools.

The need to implement innovative approaches in the southern Russian macroregion to prevent the decline in the socioeconomic climate of the territories has been proven.

Key Words

Arid territories, lands, agriculture, agro-industrial complex, agro-climatic conditions, agricultural enterprises, southern regions.

ВВЕДЕНИЕ

Аридные территории Юга России постоянно расширяются под влиянием климатических подвижек и постоянного движения почвенного покрова. Мировые экологические сообщества под эгидой ООН периодически информируют о глобальном потеплении и связанном с ним повышением уровня Мирового океана. Согласно данным исследований Межправительственной группы экспертов ООН именно в 2025 году наиболее интенсивно меняется климат планеты – изменяется состав воздуха, накапливаются парниковые газы, расширяется площадь территорий непригодных для жизнедеятельности человека, постоянно сокращается биоразнообразие флоры и фауны, растут темпы таяния ледников в Арктике и Антарктике, сокращается озоновый слой атмосферы нашей планеты [1]. Данные негативные факторы выступают сигналами, которые заставляют мировое сообщество обращать внимания на данную

проблему и предпринимать определённые шаги для сокращения антропогенного воздействия жизнедеятельности человека на окружающую среду.

Антропогенное влияние человечества на природу отражается, прежде всего, на повышении среднегодовой температуры воздуха на всей планете (рис. 1). Так, согласно отчёту Службы по изменению климата «Коперник» (C3S) динамика глобальной средней температуры воздуха в январе на протяжении 1950–2020 гг. имеет восходящий устойчивый тренд. Измерения температуры в 2024 году показали, что этот год стал самым тёплым годом с начала наблюдений в 1850 году, и этот уровень превышает рекомендуемый порог 1,5 °C. Очевидно, что при существующих темпах и подходах к системе потребления и производства тенденция будет продолжать нарастать и приводить к глобальным климатическим сдвигам.

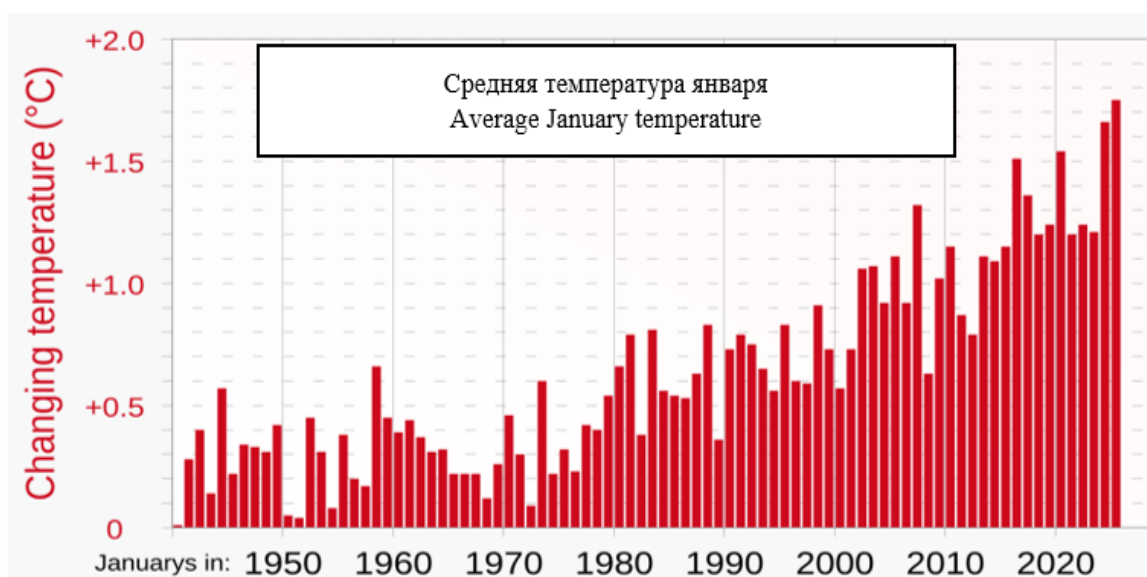


Рисунок 1. Динамика среднегодовой температуры января за период 1950–2020 гг. [2]

Figure 1. Dynamics of average annual temperature in January for the period 1950–2020 [2]

Влияние климатических подвижек отражается, прежде всего, на тех отраслях экономики, которые непосредственным образом работают и соприкасаются с природными биологическими и земельными ресурсами. Именно такой отраслью является сельское хозяйство – основная цель которого заключается в производстве продовольственного сырья с использованием природного и биологического потенциала территорий [3].

Отметим, что базовым ресурсом сельскохозяйственного производства выступает земля, которая должна эффективно и бережливо эксплуатироваться. Земельные ресурсы всегда ограничены административными границами стран, размерами суши нашей планеты, и нет возможности для их приумножения или расширения. Россия обладает значительным земельным потенциалом благодаря ее территориальной протяженности и агроклиматическим условиям. Общие площади сельскохозяйственных земель России составляют на начало 2024 года – 374 млн. га, в числе которых 198 млн. га угодья и 116 млн. га пашни [2].

В 2021 году Министерство сельского хозяйства РФ разработало государственную программу «Земля», в рамках которой будет продолжено государственное субсидирование работ по вовлечению в сельскохозяйст-

венный оборот к 2030 году около 13 млн. га простаивающих земель. При этом общий потенциал земельного фонда оценивается в 44 млн. га, в том числе пашни 20 млн. га. Тем не менее, несмотря на все усилия государственных органов и выделения финансирования на мелиоративные работы площади сельскохозяйственных земель не растут быстрыми темпами. Одной из базовых причин такого парадокса выступают агроклиматические подвижки и сокращение под их влиянием земель пригодных для ведения сельскохозяйственной деятельности, то есть увеличение площади аридных территорий [4; 5].

Южные территории России традиционно считаются сельскохозяйственными регионами, обеспечивающими внутренние и внешние потребности страны в продовольственном сырье. Тем не менее, согласно официальному Докладу о состоянии и использовании земель в РФ в 2024 году, территориальное распределение сельскохозяйственных земель доказывает, что большие площади находятся в других округах (Приволжский, Уральский, Дальневосточный, Сибирский) и практически не задействованы в сельскохозяйственном обороте (рис. 2).

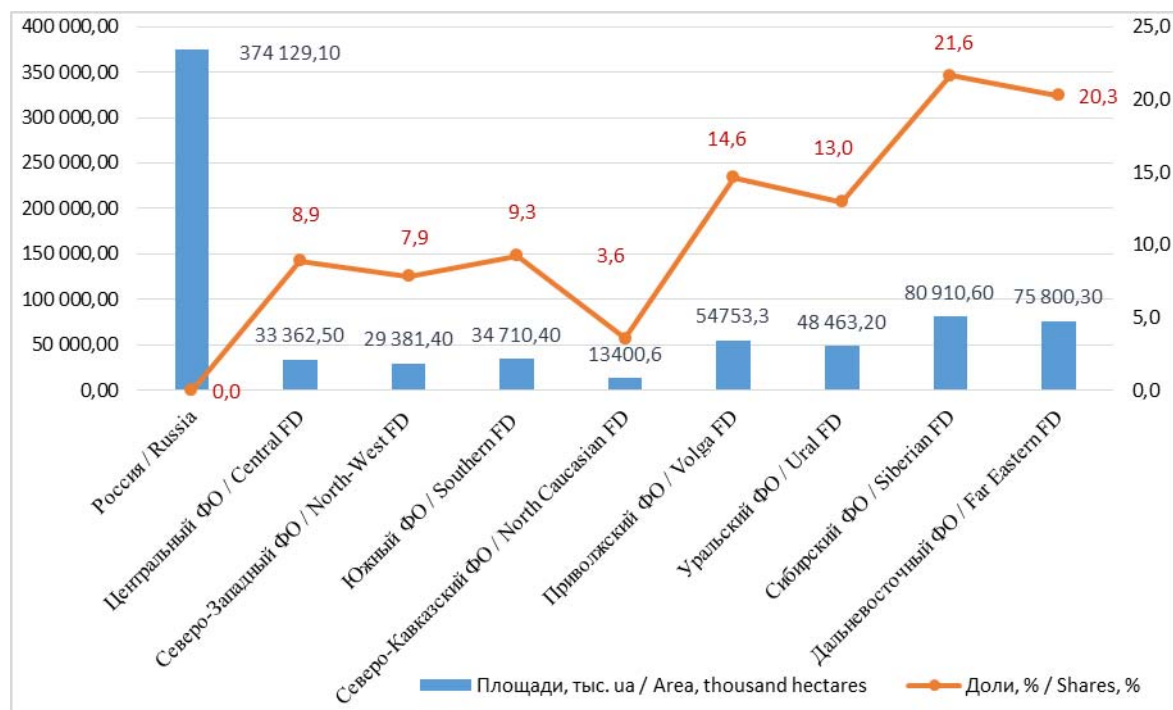


Рисунок 2. Распределение сельскохозяйственных земель РФ по округам на 1 января 2025 г. [2]

Figure 2. Distribution of agricultural lands of the Russian Federation by districts as of 1 January 2025 [2]

Представленный на рисунке 2 график размещения сельскохозяйственных земель на всей территории России демонстрирует рассредоточение максимальной площади территорий на Урале, Сибири, Дальнем Востоке. Очевидно, что данные территории не обладают высокой продуктивностью и большей своей частью не вовлечены в сельскохозяйственный оборот. Поэтому основная производственная нагрузка ложится на земли Юга, Приволжья и Центра. Именно данные сельскохозяйственные земли обеспечивают основные продовольственные потребности страны в сельскохозяйственном продуктивном сырье. Так, из общей площади земель сельскохозяйственного назначения 374129,1 тыс. га активно эксплуатируются только не более 30 % земель, размещённых на Юге, Кавказе, Приволжье и Центре. По этой причине на уровне руководства страны утверждены и реализуются государственные программы вовлечения в оборот новых территорий и простаивающих земельных ресурсов [6; 7].

Рост продовольственной потребности, как в России, так и на мировом продовольственном рынке заставляет не только активнее осваивать новые сельскохозяйственные угодья, но и сохранять, бережливо эксплуатировать уже имеющийся земельный фонд. Если оценивать движение земель, что за 2024 год данная категория земель в общей площади сократилась на 838,4 тыс. га, что не отвечает задачам, поставленным перед отраслью руководством страны – наращивание объемов производства сельскохозяйственной продукции и увеличение ее экспорта.

Проблема заключается в динамике роста процессов аридизации земель на Юге России. Поскольку именно на Юге России наблюдаются высокие темпы аридизации земель и эрозии верхнего плодородного почвенного покрова под влиянием различных природных и антропогенных факторов, которые оказывают негативное воздействие не только на уровень продовольственной безопасности страны, продуктовой

обеспеченности населения, но и социально-экономическое развитие самой сельской территории [8; 9].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованиями отечественных и зарубежных учёных доказана необходимость оценки последствия антропогенного воздействия на окружающую среду в современных условиях хозяйствования, оказывающие необратимые последствия на производственные процессы отраслях, зависимых от качества среды, земли, воздуха, воды, то есть отрасли АПК.

Оценка особенности климатических подвижек глобального природного фона доказала, что сегодня в мире устанавливаются периоды аномальной жары и засухи, отражающиеся сильнее всего на аридных территориях южных регионов. С этой позиции была изучена динамика среднегодовой температуры января с 1950–2020 гг., на основе спутниковых данных Службы по изменению климата «Коперник» (C3S), которая продемонстрировала устойчивый рост температуры до 1,5–2°C, что доказывает наступление засушливых периодов и опустынивания южных территорий.

Данные официальной статистики по оценке площадей земель сельскохозяйственного значения на территории России и в ее федеральных округах были использованы для определения значимости Южного Федерального Округа и его вклада в сельскохозяйственное производство. Было определено методами аналогии и систематизации данных, графической визуализации, что Юг России занимает весомую долю в сельскохозяйственном обороте. При этом доказано, что в сельскохозяйственный оборот вовлечено не более 30 % от всех земель данного фонда.

Оценка рисков деградации и опустынивания земель аридных зон Юга России была проведена методом факторного анализа и группировки основных факторов на 3 вида (климатические, экономические, социальные). Методом контент анализа выяснено, что корректировке и влиянию подвергаются только факторы экономического

характера, генерирующее антропогенное влияние на среду хозяйствования.

Методами экономического анализа было определено соотношение доли земель сельскохозяйственного назначения к общей площади по округам в 2024 г., была проведена оценка вклада отраслей АПК Юга России в общий объем производства продукции сельскохозяйственного назначения (мясо, молоко, яйцо, зерно) и сделан вывод о значимости южных регионов в обеспечении продовольственной безопасности страны.

Метод контент анализа позволил идентифицировать наиболее практически успешные кейсы по внедрению и эксплуатации инновационных цифровых решений на предприятиях агропромышленного комплекса Юга России, которые дают основание утверждать, что данные технологии принципиально меняют подходы к сельскохозяйственному производству и выводят его на другой качественный уровень.

Информационной базой исследования послужили официальные нормативно-правовые документы федерального и отраслевого значения, Интернет-ресурсы информационно-аналитических агентств, результаты научных трудов отечественных и иностранных экономистов. Обработка эмпирического материала была проведена с использованием пакета программ «Microsoft Office».

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нарастающие процессы деградации плодородного слоя почвы и аридизации сельских территорий Юга России несут глобальные и катастрофические последствия для местного населения данных территорий. Сельское хозяйство на Юге России выступает основным производственным сектором и сферой занятости населения. Нарастание климатических негативных факторов влияния на агроклимат Юга России приводит к росту частоты пыле-песчаных бурь и увеличению площади пустынь. Статистика констатирует неутешительные цифры – в 2025 году общая площадь территорий нашей страны, подверженной деградации составляет 120 млн. га. Среди данных территорий наиболее сильные разрушительные последствия испытывают территории Юга России, специализирующиеся на производстве растениеводческой и животноводческой продукции для АПК. При этом темпы роста аридных земель растут в среднем на 400–500 тыс. га в год.

Многие научно-исследовательские школы оценивают данную проблему – организуют и проводят комплексные мероприятия по оперативному мониторингу процессов опустынивания и появления аридных территорий в различных климатических зонах России. Так, учёными ФНЦ агроэкологии РАН была запущена программа оценки состояния пустынных земель различных регионов России (регионы Юга, регионы Сибири) и выведена динамика процессов аридизации данных территорий в связке с существующими природными событиями и климатическими факторами влияния. В рамках программы также создаются тестовые полигоны, на которых применяются и подбираются различные технологии замедления процессов опустынивания и истощения почвенного покрова, по результатам экспериментов осуществляется научно-методическое обоснование использования конкретных инновационных технологий с доказательной практикой [10].

Процессы деградации земель сельскохозяйственного назначения наносят не только экологический урон природной среде, но и снижают экономическую эффективность территории, а также подрывают основы ее продовольственной безопасности. Территории Юга России преимущественно специализируются на сельскохозяйственном производстве продовольственного сырья для перерабатывающих отраслей пищевой промышленности и формирующих устойчивую инфраструктуру территориального развития сельской местности [11]. Базой сельскохозяйственного производства выступает земля, именно земля пригодная для ведения данного вида деятельности, но ее площади неуклонно сокращаются по причине опустынивания и роста периода засухливости на юге России. Под воздействием климатических и антропогенных факторов меняется местный рельеф, происходит сильное обезвоживание суши, истощается плодородный слой почвы. Кроме того, земельный фонд – это основной производственный капитал аграрных территорий и источник легального заработка для местного населения. Сокращение данного ресурса не будет способствовать развитию южных сельских территорий, а только приведёт к их истощению как экономическому, так и демографическому [12].

Рассмотрим основные факторы влияния на деградацию данного природного ресурса в современных условиях хозяйствования (рис. 3).

Представленный перечень факторов, приводящих к деградации земель мы разбиваем на 3 категории: климатические, которые в целом ухудшают агробиоценоз данной территории и не поддаются существенному управлению; экономические, связанные с жизнедеятельностью человека и его производственной работой на данной территории; социальные, связанные с традиционным укладом жизни населения конкретной территории и видами занятости на проживаемой местности [13; 14]. Оценка данных факторов приводит нас к выводу о том, что необходимо пересматривать и трансформировать именно экономические факторы, так как изменения культурного или социального уклада населения практически невозможно в период жизни одного поколения местных жителей. Поэтому можно только пересмотреть реализуемую экономическую и производственную политику органам управления исследуемых территорий Юга России.

Традиционный уклад местного населения Юга России основан на сельскохозяйственном производстве, так как отсутствие промышленных комплексов и крупных добывающих предприятий позволяет использовать существующие земли под предприятия и организации АПК. Согласно официальным данным именно земли сельскохозяйственного назначения составляют до 77,5 % от всего земельного фонда Южного Федерального округа, уступая только Северо-Кавказскому Федеральному округу, где данная категория земель составляет 78,6 % от всех земель (рис. 4). При этом южные территории исторически сложились и воспринимались как житница России, производящая основные объемы зерновых, бобовых и масличных сельскохозяйственных культур. Поэтому деградация и сокращение сельскохозяйственных площадей данных регионов существенно снизит не только продовольственную обеспеченность Юга, но и отразится на общем уровне продовольственной безопасности России.

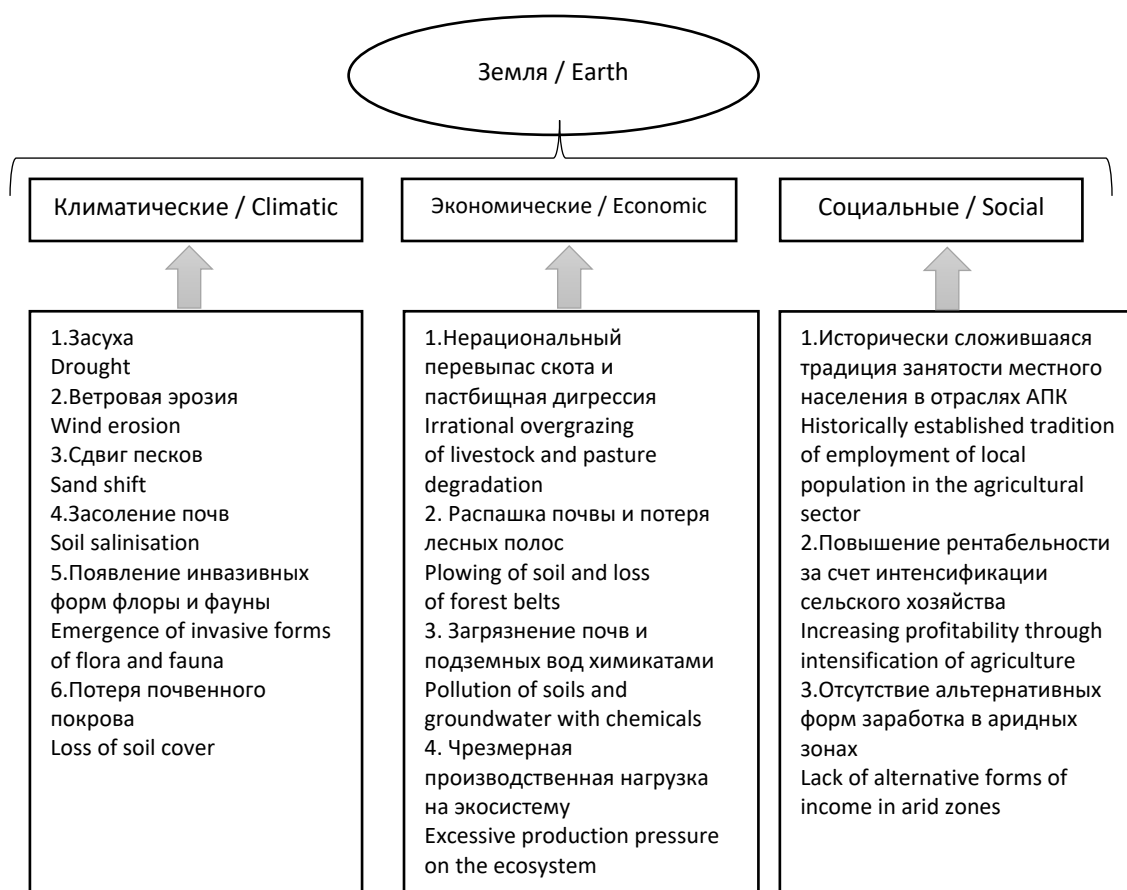


Рисунок 3. Факторы, влияющие на деградацию земель сельскохозяйственного назначения [3]

Figure 3. Factors affecting agricultural land degradation [3]

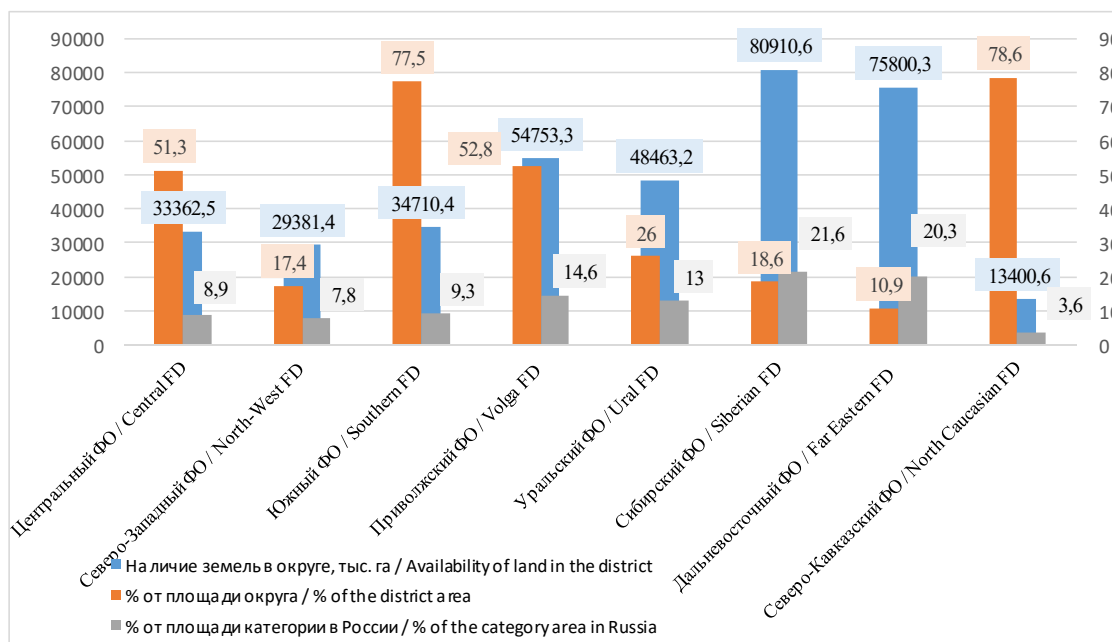


Рисунок 4. Соотношение земель сельскохозяйственного назначения к общей площади по округам в 2024 г. [2]

Figure 4. Ratio of agricultural land to total area by district in 2024 year [2]

Представленная на графике 4 структура и соотношение земель сельскохозяйственного назначения в общей площади территорий округов подчеркивает важность АПК именно для Южного Федерального Округа (ЮФО). Имея площадь 34710,4 тыс. га – ЮФО до 9,3 % земель в общей категории сельских использует под сельскохозяйственное производство. В сравнении с Северо-Кавказским Феде-

ральным Округом (СКФО) эта доля меньше на 1,1 %, но общая площадь данного округа составляет 13400,6 тыс. га, что меньше общей площади в 2,6 раз. По данной причине именно Юг России выступает базой производства сельскохозяйственного сырья. Занимая долю 9,3 % в общем фонде земель сельскохозяйственного назначения Южный макрорегион вносит значительные продовольст-

венный вклад в общий объем сельскохозяйственного производства в стране. Рассмотрим объёмы производства продукции АПК в 2024 году (табл. 1).

Таблица 1. Объёмы сельскохозяйственного производства в 2024 году
Table 1. Agricultural production volumes in 2024

Показатель Indicator	Россия Russia	Южный федеральный округ Southern Federal District	Вклад, % Contribution, %
Объем производства продукции АПК, млн рублей Volume of production of agricultural products, million roubles	8902883	1427271,6	16
Валовой сбор зерна, тыс. тонн Gross grain harvest, thousand tonnes	125000	31761,7	25
Крупный рогатый скот, тыс. голов Cattle, thousand heads	16400	2208,8	13,5
Свиньи, тыс. голов Pigs, thousand heads	27800	1293,5	4,7
Скот и птица на убой (в живом весе), тыс. тонн Cattle and poultry for slaughter (live weight), thousand tonnes	16900	1551,7	9,2
Молоко, тыс. тонн Milk, thousand tonnes	34100	3950,2	11,6

Представленные в таблице 1 объёмы сельскохозяйственного производства предприятия АПК Юга России доказывают, что отрасль внесла достаточно весомый вклад в общероссийские показатели производства по итогам 2024 года. Так, до 16 % от стоимости произведённого продовольственного сырья по стране было выращено на Юге России, почти 25 % собранного зерна – урожай предприятий Юга России, каждый десятый литр молока и каждое десятое яйцо произведено в хозяйствах Юга [15].

Представленные показатели подчёркивают важность и стратегическую значимость сельскохозяйственной отрасли для Южного макрорегиона, для поддержания уровня жизни населения данной местности, сокращения безработицы и воспроизводства качественного человеческого капитала. Снижение продуктивности сельскохозяйственных земель отразится на прибыльности предприятий и организаций отрасли, ухудшит благосостояние населения и вызовет социальную напряжённость, вынужденную миграцию в более благополучные регионы, профессиональную деградацию и общее снижение качества жизни в южных регионах [16]. Практически природное опустынивание и деградация земель Южного макрорегиона приводит к социальной деградации и потери культурных, исторических традиций местного населения, вынужденно перемещающегося в более развитые и экономически богатые территории проживания на совершенно другие виды трудовой деятельности. И такие тенденции приводят к сокращению населения аридных территорий, ухудшению социальной инфраструктуры и роста неблагоприятной санитарно-эпидемиологической ситуации в регионе.

Решение озвученных проблем частично реализуются в практике применения новых подходов к ведению хозяйственной деятельности, а также активной цифровизации некоторых бизнес-процессов в агропредприятиях [17]. Используемые крупными агрохолдингами цифровые решения и платформы выводят на качественно новый уровень работу на предприятиях АПК, привлекают в данную отрасль прогрессивное молодое поколение, позволяют экономить ресурсы

(финансовые, технические), меняют в целом представление о отраслях АПК как о чем-то малопривлекательном и отсталом от новейших разработок науки и техники.

Крупные сельскохозяйственные предприятия уже активно внедряют и эксплуатируют в своей деятельности следующие технологии цифровой трансформации:

- использование БПЛА, GPS, сенсоров для оперативного мониторинга полей и пашен, а также сельскохозяйственных животных на выпасах и фермах;
- формирование и настройка автоматизированных систем управления производственными процессами на фермах, теплицах;
- системы IoT и управления Базами Больших Данных посредством Интернет;
- применение технологий искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения для оценки и прогнозирования будущих урожаев или изменений агроклиматического профиля, анализа накопленного опыта и генерирования новой информации на его основе для принятия обоснованных управленческих решений.

Основными яркими кейсами по эксплуатации инновационных технологий выступает опыт агрохолдингов Юга России, стремящихся в существующих агроклиматических условиях достичь максимальной урожайности и рентабельности производства. Рассмотрим наиболее интересные примеры и результаты внедрения технологий в работу сельхоз товаропроизводителей (рис. 5).

Экономические эффекты, демонстрируемые сегодня отдельными цифровыми решениями, которые внедрены и эксплуатируются на различных предприятиях АПК доказали необходимость перехода от традиционного сельскохозяйственного производства к инновационному, основанному на оптимизации имеющихся ресурсов и бережливому их расходованию, а также максимизации экономического результата посредством сокращения балластных расходов и потерь при производстве, транспортировке, обработке и переработке продовольственного сырья.

Частичная замена человеческого труда машинным и роботизированным позволит качественно изменить структура АПК и подходы, применяемые сегодня фермерами. Кроме того, за счёт экономии расходов на заработную плату появится дополнительная прибыль,

которая будет стимулировать предприятия инвестировать в новые решения для максимального сохранения конечного результата своей деятельности и продвижения продукции на внешние и внутренние продовольственные рынки [18].

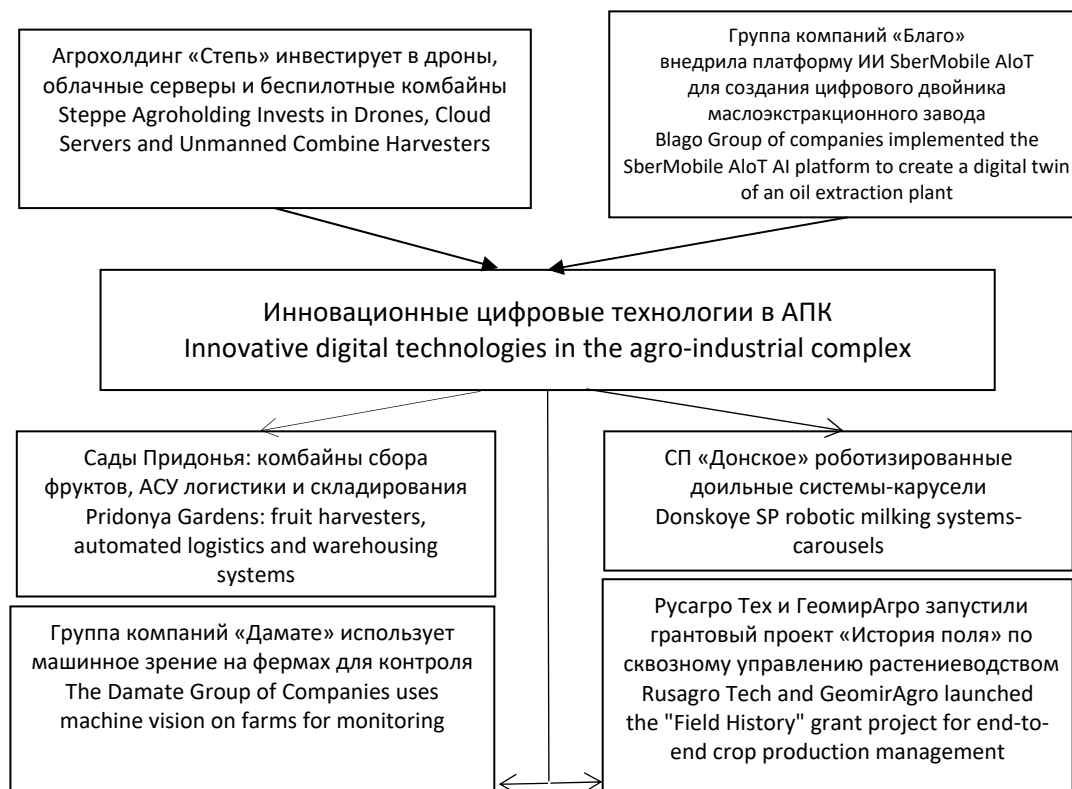


Рисунок 5. Практические кейсы цифровизации предприятий АПК Юга России [15]

Figure 5. Practical cases of digitalization of agricultural enterprises in southern Russia [15]

Сокращение и ухудшение природного потенциала земель сельскохозяйственного значения невозможно полностью устранить, так как данные процессы возникают в результате их эксплуатации производственными масштабами. Тем не менее данные процессы можно замедлить, при использовании новых технологий выращивания и производства сельскохозяйственного сырья на основе ресурсосберегающего подхода.

Иновационные технологии в АПК улучшают управление производственным процессом, увеличивают точность планирования, контроля и мониторинга. Интернет связь открывает возможности облачного накопления Данных, получения точных прогнозов климатическим изменениям, формирования оптимальных норм обработки земли, сокращения чрезмерной минерализации и истощения полей. Эксплуатация инноваций снижает антропогенную нагрузку на природную среду и открывает новое видение земли как живого актива, о котором необходимо также заботиться и продлевать период его производительной жизни [19–21].

Негативные факторы, препятствующие широкому внедрению инновационных технологий в отрасли АПК связаны, прежде всего, с отсутствием дополнительных инвестиционных возможностей у сельхозтоваропроизводителей, с отсутствием квалифицированных кадров с необходимыми ИТ-компетенциями, с отсутствием минимальной

телекоммуникационной инфраструктуры. Таким образом отметим, что полномасштабная эксплуатация ресурсосберегающих инноваций в АПК возможно только при значительных инвестиционных вливаниях и государственной поддержки модернизации сельского хозяйства. Успехи, которые уже получены рядом предприятий Юга России являются точечными, требующими последующего масштабирования и продвижения в производственные процессы других компаний. Стабильное функционирование предприятий АПК не только обеспечит рабочими местами и стабильным источником дохода местное население, но упрочит продовольственную безопасность страны, сформировав достаточный потенциал для экспорта сельскохозяйственной продукции. Помимо этого, сельскохозяйственная отрасль будет способствовать развитию сельских территорий посредством формирования и построения социальной инфраструктуры и привлечения молодёжи для работы в организациях образования, здравоохранения, культуры, спорта и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный обзор особенностей социально-экономического развития и производства на аридных территориях Юга России доказал, что негативные тенденции агроклиматических условий хозяйствования будут отражаться на перспективах развития территории в целом. Сокращение возможностей для легальных

заработков будет провоцировать социальную напряжённость, деградацию существующей инфраструктуры и внутреннюю миграцию квалифицированных рабочих кадров в более благополучные регионы и крупные города. Таким образом данные территории не будут развиваться, станут центром притяжения криминогенного контингента и некачественных трудовых ресурсов из стран СНГ.

Другая важная задача – обеспечение продовольственной безопасности, – также не будет решаться, поскольку снижение урожайности и производительности предприятиями АПК Юга России существенно сократит внутренний продуктовый потенциал страны. Южный макрорегион вносит существенный вклад в сельскохозяйственное производство страны, производя от 5 % до 25 % продукции растениеводства и животноводства. Потери или сокращение сельскохозяйственной ценности данных территорий будут отражаться на индикаторах продовольственной безопасности и снижать существующие экспортные возможности страны.

Практические примеры внедрения и успешной эксплуатации инновационных технологических решений крупными агрохолдингами Юга России позволили понять и оценить ценности применения и перспективы их развития в отрасли. Система АСУ и роботизации технологических процессов в агрохолдингах благодаря точному учету и контролю всех процессов сокращают производственные потери и уменьшают операционные расходы предприятия. Таким образом, доказана их эффективность и производительность в условиях современной технологической модернизации национальной экономики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Указ Президента Российской Федерации «Об утверждении доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации» № 120 от 30 января 2010 года // Информационно-справочная система «Консультант Плюс». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_96953/ (дата обращения: 02.06.2025)
2. Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2024 году. Официальный сайт Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии. URL: <https://rosreestr.gov.ru/upload/Doc/informatsiya/Natsionalnyi%20doklad%202024.pdf> (дата обращения: 05.06.2025)
3. Государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации. Официальный сайт Министерства сельского хозяйства РФ. URL: <https://mcx.gov.ru/ministry/departments/departament-melioratsii/industry-information/info-gosudarstvennaya-programma-effektivnogo-voevlecheniya-v-оборот-zemel-selskokhozyaystvennogo-naznachen/> (дата обращения: 08.06.2025)
4. Кабаненко М.Н. Анализ состояния земель сельскохозяйственного назначения России // Экономика, предпринимательство и право. 2020. Т. 10. N 4. С. 1035–1050. <https://doi.org/10.18334/epp.10.4.100689>
5. Кулик К.Н., Петров В.И., Рулев А.С., Кошелева О.Ю., Шинкаренко С.С. К 30-летию “генеральной схемы по борьбе с опустыниванием Черных земель и Кизлярских пастбищ” // Аридные экосистемы. 2018. Т. 8. N 1. С. 1–6.
6. Волков С.Н., Липски С.А. Правовые и землеустроительные меры по вовлечению неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения в хозяйственный оборот и обеспечению их эффективного использования // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2017. N 2. С. 5–10.

7. Аль-Байдани И.Д.А. Инновационные технологии в стратегическом развитии агропромышленного комплекса // Региональная экономика: теория и практика. 2021. Т. 19. N 5(488). С. 943–953. <https://doi.org/10.24891/re.19.5.943>
8. Прохорова В.В., Кобозева Е.М. О перспективах формирования агрогородов в пространстве Краснодарского края // Вестник АПК Ставрополя. 2017. N 3 (27). С. 76–81.
9. Горлов И.Ф. и др. Когнитивный подход к исследованию проблем продовольственной безопасности. Волгоград: Изд-во Волгоградского института управления, филиала РАНХиГС, 2018. 168 с.
10. Ушаев И.Г. Инновационная деятельность в агропромышленном комплексе России / под ред. И. Г. Ушаева. Москва: Экономика и информатика, 2010. 374 с.
11. Baliyants K.M., Dokholyan S.V., Hidirova S.Z., Zhamolatova Z.N. The resource potential of the agroindustrial complex of the North-Caucasian Federal district as a factor of innovative development of the macroregion // International Journal of Economics and Business Administration. 2019. Т. 7. N 1. P. 339–347.
12. Шахмурзов М.М., Гордеев А.С., Кулинцев В.В., Юлдашбаев Ю.А., Коник Н.В., Улимбаева Р.А., Улимбаев М.Б. Устойчивое развитие агропромышленного комплекса и сельских территорий регионов // Юг России: экология, развитие. 2018. Т. 13. N 3. С. 83–95. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2018-3-83-95>
13. Некрасов К.В. Применение инновационных технологий в организациях агропромышленного комплекса // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2019. N 12. С. 388–389. <https://doi.org/10.23672/SAE.2019.2019.43779>
14. Бакинова Т.И., Кованова Е.С., Павлова Н.Ц. Экологические ограничения аграрной деятельности в контексте устойчивого развития территорий Республики Калмыкия // Юг России: экология, развитие. 2025. Т. 20. N 2. С. 176–184. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-2-14
15. Шумова Н.А. Количественные показатели климата в приложении к оценке гидротермических условий в Республике Калмыкия // Аридные экосистемы. 2021. Т. 27. N 4 (89). С. 13–24.
16. Королева Е.Г., Петрова И.Ф. Подходы к сохранению биоразнообразия в управляемом степном агроландшафте // Юг России: экология, развитие. 2025. N 20(1). С. 80–97. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2025-1-8>
17. Прохорова В.В., Кобозева Е.М. Выявление агрозон интенсивного развития в хозяйственном пространстве Краснодарского края на основе кадастровой оценки земли и производственно-экономического потенциала развития территориальной системы // Вестник АГУ, сер. «Экономика». 2018. N 4 (230). С. 134–140.
18. Соболев Н.А. Биологическое разнообразие и экосистемы как ресурс экологической стабильности // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2020. N 1 (161). С. 48–55.
19. Prokhorova V.V., Kolomyts O.N., Kobozeva E.M., Gudkova A.G. Forecasting Spatial Indicators of the Activities of Russian Agrarian Territories // International Journal of Applied Business and Economic Reserch. 2017. V. 15. N 23. P. 439–451.
20. Michurina F., Latysheva A. Sustainable Development Problems of Ruval Areas. Tariff Police Power Supply // Asian Social Science. 2014. V. 24. P. 18–28.
21. Timmers R., van Kuijk M., Verweij P.A., Ghazoul J., Hautier Ya., Laurance W.F., Arriaga-Weiss S.L., Askins R.A., Battisti C., Berg Å., Daily G.C., Estades C.F., Frank B., Kurosawa R., Pojar R.A., Woinarski J., Soons M.B. Conservation of birds in fragmented landscapes requires protected areas // Frontiers in Ecology and the Environment. 2022. V. 20. N 6. P. 361–369. <https://doi.org/10.1002/fee.2485>

REFERENCES

1. Ukaz Prezidenta Rossiiskoi Federatsii «Ob utverzhdenii doktriny prodovol'stvennoi bezopasnosti Rossiiskoi Federatsii» № 120 ot 30 yanvarya 2010 goda [Decree of the President of the Russian Federation "On Approval of the Doctrine of Food Security of the Russian Federation" No. 120 of January 30, 2010. Information and Reference System "Consultant Plus"]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_96953/ (accessed 02.06.2025)
2. Gosudarstvennyi (natsional'nyi) doklad o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' v Rossiiskoi Federatsii v 2024 godu. Ofitsial'nyi sait Federal'naya

- sluzhba gosudarstvennoi registratsii, kadastra i kartografii [State Report on the Status and Use of Land in the Russian Federation in 2024. Official website of the Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography]. Available at: <https://rosreestr.gov.ru/upload/Doc/informatsiya/Нацный%20доклад%202024.pdf> (accessed 05.06.2025)
3. Gosudarstvennaya programma effektivnogo вовлечения v оборот zemel' sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya i razvitiya meliorativnogo kompleksa Rossiiskoi Federatsii. Ofitsial'nyi sait Ministerstva sel'skogo khozyaystva RF [State program for the effective involvement of agricultural land into circulation and development of the melioration complex of the Russian Federation. Official website of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation]. Available at: <https://mcx.gov.ru/ministry/departments/departament-melioratsii/industry-information/info-gosudarstvennaya-programma-effektivnogo-vovlечения-v-oborot-zemel-selskokhozyaystvennogo-naznachen/> (accessed 09.06.2025)
4. Kabanenko M.N. Analysis of the state of agricultural land in Russia. *Economy, entrepreneurship and law*, 2020, vol. 10, no. 4, pp. 1035–1050. (In Russian) <https://doi.org/10.18334/epp.10.4.100689>
5. Kulik K.N., Petrov V.I., Rulev A.S., Koshcheva O.Yu., Shinkarenko S.S. On the 30th anniversary of the “general plan to combat desertification of the Black Lands and Kizlyar Pastures”. *Aridnye ekosistemy* [Arid ecosystems]. 2018, vol. 8, no. 1, pp. 1–6. (In Russian)
6. Volkov S.N., Lipsky S.A. Legal and land management measures to involve unused agricultural lands in economic circulation and ensure their efficient use. *Zemleustroistvo, kadastr i monitoring zemel'* [Land management, cadastre and land monitoring]. 2017, no. 2, pp. 5–10. (In Russian)
7. Al-Baydani I.D.A. Innovative technologies in the strategic development of the agro-industrial complex. *Regional Economics: Theory and Practice*, 2021, vol. 19, no. 5 (488), pp. 943–953. (In Russian) <https://doi.org/10.24891/re.19.5.943>
8. Prokhorova V.V., Kobozeva E.M. On the prospects for the formation of agro-towns in the space of Krasnodar Krai. *Vestnik APK Stavropol'ya* [Bulletin of the AIC of Stavropol]. 2017, no. 3 (27), pp. 76–81. (In Russian)
9. Gorlov I.F. et al. *Kognitivnyi podkhod k issledovaniyu problem prodovol'stvennoi bezopasnosti* [A Cognitive Approach to the Study of Food Security Problems]. Volgograd, Volgograd Institute of Management - Branch of RANEPA Publ., 2018, 168 p. (In Russian)
10. Ushachev I.G. et al. *Innovatsionnaya deyatel'nost' v agropromyshlennom komplekse Rossii* [Innovative Activity in the Agro-Industrial Complex of Russia]. Moscow, Economics and Informatics Publ., 2010, 374 p. (In Russian)
11. Baliyants K.M., Dokholyan S.V., Hidirova S.Z., Zhamolatova Z.N. The resource potential of the agroindustrial complex of the North-Caucasian Federal district as a factor of innovative development of the macroregion. *International Journal of Economics and Business Administration*. 2019, vol. 7, no. 1, pp. 339–347.
12. Shakhmurzov M.M., Gordeev A.S., Kulintsev V.V., Yuldashbaev Yu.A., Konik N.V., Ulimbasheva R.A., Ulimbashev M.B. Sustainable development of the agro-industrial complex and rural areas of the regions. *South of Russia: ecology, development*, 2018, no. 13(3), pp. 83–95. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2018-3-83-95>
13. Nekrasov K.V. Application of innovative technologies in organizations of the agro-industrial complex. *Humanitarian, socio-economic and social sciences*, 2019, no. 12, pp. 388–389. (In Russian) <https://doi.org/10.23672/SAE.2019.2019.43779>
14. Bakinova T.I., Kovanova E.S., Pavlova N.Ts. Environmental constraints on agricultural activity in the context of sustainable development of the territories of the Republic of Kalmykia. *South of Russia: ecology, development*, 2025, vol. 20, no. 2, pp. 176–184. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2025-2-14>
15. Shumova N.A. Quantitative climate indicators as applied to the assessment of hydrothermal conditions in the Republic of Kalmykia. *Aridnye ekosistemy* [Arid ecosystems]. 2021, vol. 27, no. 4 (89), pp. 13–24. (In Russian)
16. Koroleva E.G., Petrova I.F. Approaches to biodiversity conservation in a managed steppe agricultural landscape. *South of Russia: ecology, development*, 2025, no. 20(1), pp. 80–97. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2025-1-8>
17. Prokhorova V.V., Kobozeva E.M. Identification of agrozones of intensive development in the economic space of Krasnodar Krai based on cadastral valuation of land and production and economic potential for the development of the territorial system. *Vestnik AGU, ser. «Ekonomika»* [Bulletin of ASU, series. "Economics"]. 2018, no. 4 (230), pp. 134–140. (In Russian)
18. Sobolev N.A. Biological diversity and ecosystems as a resource of environmental stability. *Ispol'zovanie i okhrana prirodnikh resursov v Rossii* [Use and protection of natural resources in Russia]. 2020, no. 1 (161), pp. 48–55. (In Russian)
19. Prokhorova V.V., Kolomyts O.N., Kobozeva E.M., Gudkova A.G. Forecasting Spatial Indicators of the Activities of Russian Agrarian Territories. *International Journal of Applied Business and Economic Research*, 2017, vol. 15, no. 23, pp. 439–451.
20. Michurina F., Latysheva A. Sustainable Development Problems of Rural Areas. *Tariff Police Power Supply*. Asian Social Science, 2014, vol. 24, pp. 18–28.
21. Timmers R., van Kuijk M., Verweij P.A., Ghazoul J., Hautier Ya., Laurance W.F., Arriaga-Weiss S.L., Askins R.A., Battisti C., Berg Å., Daily G.C., Estades C.F., Frank B., Kurosawa R., Pojar R.A., Woinarski J., Soons M.B. Conservation of birds in fragmented landscapes requires protected areas. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2022, vol. 20, no. 6, pp. 361–369. (In Russian) <https://doi.org/10.1002/fee.2485>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность за плагиат, самоплагиат и другие неэтические проблемы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Назирхан Г. Гаджиев / Nazirkhan G. Gadzhiev <https://orcid.org/0000-0002-6321-3543>
 Гилян В. Федотова / Gilyan V. Fedotova <https://orcid.org/0000-0002-2066-8628>
 Иван И. Рязанцев / Ivan I. Ryazantsev <https://orcid.org/0000-0003-3144-4301>
 Абдурахман Г. Чураев / Abdurakhman G. Churaev <https://orcid.org/0009-0005-5051-0361>
 Татьяна Е. Козенко / Tatyana E. Kozenko <https://orcid.org/0000-0002-0544-1361>

Оригинальная статья / Original article

УДК: 633.18, 631.811

DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-14



Эколого-агрохимическая эффективность лигногумата в агроценозе риса (*Oryza sativa* L.)

Асхад Х. Шеуджен^{1,2}, Оксана А. Гуторова^{1,3}, Хазрет Д. Хурум¹, Юнус Н. Ашинов³, Альбина Ю. Захарова¹¹Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия²Федеральный научный центр риса, Краснодар, Россия³Майкопский государственный технологический университет, Майкоп, Республика Адыгея, Россия

Контактное лицо

Асхад А. Шеуджен, доктор биологических наук, профессор, академик РАН, кафедра агрохимии, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина; 350044 Россия, г. Краснодар, ул. Калинина, 13. Тел. +79284003863

Email ashad.sheudzhen@mail.ruORCID <https://orcid.org/0000-0001-5116-197X>

Формат цитирования

Шеуджен А.Х., Гуторова О.А., Хурум Х.Д., Ашинов Ю.Н., Захарова А.Ю. Эколого-агрохимическая эффективность лигногумата в агроценозе риса (*Oryza sativa* L.) // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 148-154. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-14

Получена 2 июня 2025 г.

Прошла рецензирование 16 сентября 2025 г.

Принята 25 октября 2025 г.

Резюме

Целью данной работы является оценка эколого-агрохимической эффективности обработки растений риса лигногуматом.

Полевой опыт располагался на рисовой оросительной системе левобережья Кубани (Республика Адыгея). Схема опыта включала контроль (без удобрений), внесение удобрений $N_{120}P_{80}K_{60}$ (фон) и варианты с обработкой растений риса водным раствором лигногумата на фоне $N_{120}P_{80}K_{60}$. Изучались нормы препарата 125, 250, 500, 750 и 1000 мл/га. Эколого-агрохимическая эффективность лигногумата в рисовом агроценозе оценивалась по потреблению элементов питания растениями в период их роста и развития, выносу питательных веществ урожаем и коэффициентам их использования рисом из внесенных удобрений.

Обработка посевов риса лигногуматом увеличивала по отношению к фону $N_{120}P_{80}K_{60}$ среднесуточное потребление растениями азота на 9,0–22,2 %, фосфора – 11,9–23,9 и калия – 9,9–23,2 %, вынос их урожаем – 3,1–13,1 %; 6,1–14,8 и 3,9–13,9 % и коэффициенты использования из удобрений – 2,7–11,5 %, 3,8–9,3 и 7,8–27,7 % соответственно.

Эколого-агрохимическая эффективность лигногумата сильнее проявляется при обработке растений риса из расчета 750 мл препарата на гектар посева. При этой норме повышается среднесуточное поглощение рисом азота, фосфора и калия на 22,2 %, 23,9, 23,2 %, их вынос урожаем на 13,1 %, 14,8 и 13,9 % и использование элементов растениями из удобрений на 11,5 %, 9,3 и 27,7 % соответственно.

Ключевые слова

Рис (*Oryza sativa* L.), агроценоз, лигногумат, обработка растений, потребление элементов питания, хозяйственный вынос, коэффициенты использования из удобрений.

Ecological and agrochemical efficiency of lignohumate in rice agroecosystem (*Oryza sativa* L.)

Askhad H. Sheudzhien^{1,2}, Oksana A. Gutorova^{1,3}, Khazret D. Khurum¹, Yunus N. Ashinov³ and Albina Yu. Zakharova¹

¹I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

²Federal Rice Research Center, Krasnodar, Russia

³Maikop State Technological University, Maykop, Republic of Adygea, Russia

Principal contact

Askhad H. Sheudzhien, Doctor of Biological Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Department of Agrochemistry, I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University; 13 Kalinina St, Krasnodar, Russia 350044.

Tel. +79284003863

Email ashad.sheudzhien@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5116-197X>

How to cite this article

Sheudzhien A.H., Gutorova O.A., Khurum Kh.D., Ashinov Yu.N., Zakharova A.Yu. Ecological and agrochemical efficiency of lignohumate in rice agroecosystem (*Oryza sativa* L.). *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):148-154. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-14

Received 2 June 2025

Revised 16 September 2025

Accepted 25 October 2025

Abstract

The aim of this work was to evaluate the ecological and agrochemical efficiency of treating rice plants with lignohumate.

The field experiment was located in the rice irrigation system of the left bank of the Kuban (Republic of Adygea). The experimental design included control (without fertilizers), application of $N_{120}P_{80}K_{60}$ fertilizers (background) and variant treatments of rice plants with an aqueous solution of lignohumate against a background of $N_{120}P_{80}K_{60}$. Rates of preparation of 125, 250, 500, 750 and 1000 ml/ha were studied. The ecological and agrochemical efficiency of lignohumate in the rice agroecosystem was assessed by measuring the consumption of nutrients by plants during their growth and development, the removal of nutrients by the crop and the coefficients of their use by rice from the applied fertilizers.

Treatment of rice agroecosystem with lignohumate increased: the average daily (on average throughout the growing season) consumption of nitrogen, phosphorus and potassium by rice by 9.0–22.2 %, 11.9–23.9 and 9.9–23.2 %; removal of nutrients by the crop by 3.1–13.1 %; 6.1–14.8 and 3.9–13.9 %, and the coefficients of their use by plants from fertilizers by 2.7–11.5 %, 3.8–9.3 and 7.8–27.7 %, respectively, in relation to the $N_{120}P_{80}K_{60}$ background.

The ecological and agrochemical efficiency of lignohumate is more pronounced when treating rice plants at the rate of 750 ml of the preparation per hectare of sowing. At this rate, the average daily absorption of nitrogen, phosphorus and potassium by rice increases by 22.2 %, 23.9, 23.2 %, their removal by the crop by 13.1 %, 14.8 and 13.9 % and the use of elements by plants from fertilizers by 11.5 %, 9.3 and 27.7 %, respectively.

Key Words

Rice (*Oryza sativa* L.), agroecosystem, lignohumate, plant treatment, consumption of nutrients, economic removal, utilization factors from fertilizers.

ВВЕДЕНИЕ

Рис – распространенная зерновая культура, возделываемая более чем в ста странах мира на площади 170 млн га. Эта культура занимает первое место в мире по продуктивности и второе – по площади посева и валовому сбору. Ежегодный объем производства риса составляет 740 млн т. Рисовая крупа служит основным продуктом у трети населения планеты, потребление которой на одного человека в разных странах неодинаковое. На основании прогноза ФАО к 2025 году востребованность в зерне риса составит 781 млн т, а ожидаемое производство 750 млн т, что не сможет в полной мере обеспечить население этим продуктом питания [1].

Проблема минерального питания растений – одна из важнейших в области агрохимии и физиологии. Элементы питания необходимы растительному организму, чтобы обеспечить ему оптимальные условия роста и развития, в том числе и для растений риса. Недостаток питательных веществ вызывает замедление их роста, нарушения в формировании вегетативных и генеративных органов, неустойчивость к неблагоприятным факторам и другие отклонения в физиологических и биохимических процессах. Дефицит элементов питания может, в целом, отразиться на продуктивности агроценоза [1–4].

Культура риса требовательна к минеральному питанию и неравномерно потребляет питательные вещества в течение всей вегетации. К фазе кущения потребность риса в элементах питания усиливается, поэтому максимальное их поступление в растения приходится на период кущения–выметывания. Для формирования 1 т зерна и соответствующей массы соломы рис затрачивает 20,8 кг азота, 12,4 кг фосфора, 21,5 кг калия, а также ряд микроэлементов. Поэтому для сбалансированности питания по всем элементам, необходимых для жизнедеятельности растений, следует в систему удобрения риса включать макро- и микроэлементы, а в отдельных случаях и ультрамикроэлементы, учитывая сортовые особенности культуры, предшественника, технологию выращивания и почвенно-климатические условия [1; 2].

В последнее время на посевах сельскохозяйственных культур применяются гуминовые препараты [5–7], представляющие собой соли гуминовых кислот и обладающие высокой физиологической активностью [8]. В литературе отмечена их эффективность в условиях рисосеяния путем обработки семян и растений риса. Под влиянием гуматов возрастает площадь листьев растений риса, интенсивность фотосинтеза, потребление ими элементов питания из почвы и удобрений, что приводит, в конечном итоге, повышению их продуктивности [3; 7; 9–11]. Целью данной работы являлась оценка эколого-агрохимической эффективности обработки растений риса лигногуматом.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методология исследования основывалась на полевом эксперименте, заложенного на лугово-черноземной почве левобережья реки Кубань, характеризующейся $pH_{вод}$ 6,88 и содержанием органического вещества 3,2 %, общего азота 0,22 %, фосфора 0,20 %, калия 1,80 %, наличием подвижных форм фосфора 52 мг/кг и калия 225 мг/кг (по Чирикову). Место размещения полевого опыта – рисовая оросительная система Адыгейского научно-технического центра по рису (Республика Адыгея).

Общая площадь опытной делянки 120 м², учетной – 72 м², повторность вариантов – 4-х кратная, размещение

– рендомизированное. В опыте использовался сорт риса Рапан 2 с нормой высева 7 млн всхожих семян на гектар и глубиной заделки в почву 1–1,5 см. Агротехника возделывания риса в опыте соответствовала рекомендациям ФНЦ риса [2].

На фоне азотно-фосфорно-калийного внесения удобрений под рис из расчета $N_{120}P_{80}K_{60}$ проводили обработку растений водным раствором лигногумата (ЛГ) марки БМ–20 % в фазе кущения согласно схеме опыта: 1. Контроль (без удобрений); 2. $N_{120}P_{80}K_{60}$ – фон; 3. Фон + 125 мл/га ЛГ; 4. Фон + 250 мл/га ЛГ; 5. Фон + 500 мл/га ЛГ; 6. Фон + 750 мл/га ЛГ; 7. Фон + 1000 мл/га ЛГ. Расход рабочего раствора 200 л/га.

Лигногумат – препарат на основе гуминовых солей (18 %), содержит гуминовые кислоты 11 %, фульвокислоты 5 %, калий не менее 1,8 %, а также ряд микроэлементов, таких как серу, железо, марганец, медь, цинк, молибден, селен, бор и кобальт [9].

Эколого-агрохимическую эффективность обработки посевов риса лигногуматом оценивали по потреблению элементов питания растениями в период их роста и развития, выносу биогенных элементов урожаем и коэффициентам их использования растениями из внесенных удобрений [1].

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Растения риса элементы питания из почвы и удобрений потребляли в течение всего вегетационного периода. К фазе кущения азота, фосфора и калия растениями усваивалось 33–44 %, 21–27 и 29–33 %, к выметыванию – 66–79 %, 59–71 и 89–92 % и полной спелости зерна – 21–34 %, 29–41 и 8–11 % соответственно от общего их количества поглощенного за весь период их роста и развития.

В наибольшем количестве азота и фосфора потреблялось растениями риса до фазы выметывания. Причем более интенсивно поглощался азот, чем фосфор. В фазе кущения усвоение калия рисом практически не отличалось по количеству потребленного азота, а к выметыванию оно усиливалось и превышало не только потребление азота, но и фосфора (рис. 1, рис. 2).

Минеральные удобрения из расчета $N_{120}P_{80}K_{60}$, внесенные под культуру риса, увеличивали способность растений усваивать азот, фосфор и калий из почвы и удобрений на 35–38 % по отношению к контролю без их применения. Обработка растений лигногуматом, проведенная в фазу кущения, повышало потребление рисом биогенных элементов питания.

Под влиянием гуминового препарата в зависимости от интенсивности нарастания биомассы и изменения минерального статуса растений в течение их вегетации усвоение рисом азота в межфазный период всходы–кущение увеличивалось относительно фона на 3,94–13,8 мг/растение или на 12,9–13,8 %, кущение–выметывание – 4,6–9,1 мг/растение или на 14,1–20,3 %, выметывание–полная спелость зерна – 7,6–17,0 мг/растение или на 9,0–17,0 %. Превышение фона по потреблению фосфора в межфазные периоды всходы–кущение, кущение–выметывание и выметывание–полная спелость составило 1,3–4,1 мг/растение или 15,2–45,4 %; 4,6–9,2 мг/растение или 18,2–36,1 % и 4,9–8,8 мг/растение или 12,2–22,0 % соответственно. Поглощение калия растениями повышалось на 3,3–10,9; 9,3–20,1; 9,6–20,5 мг или на 11,6–38,54 10,7–23,3; 9,9–21,1 % соответственно.

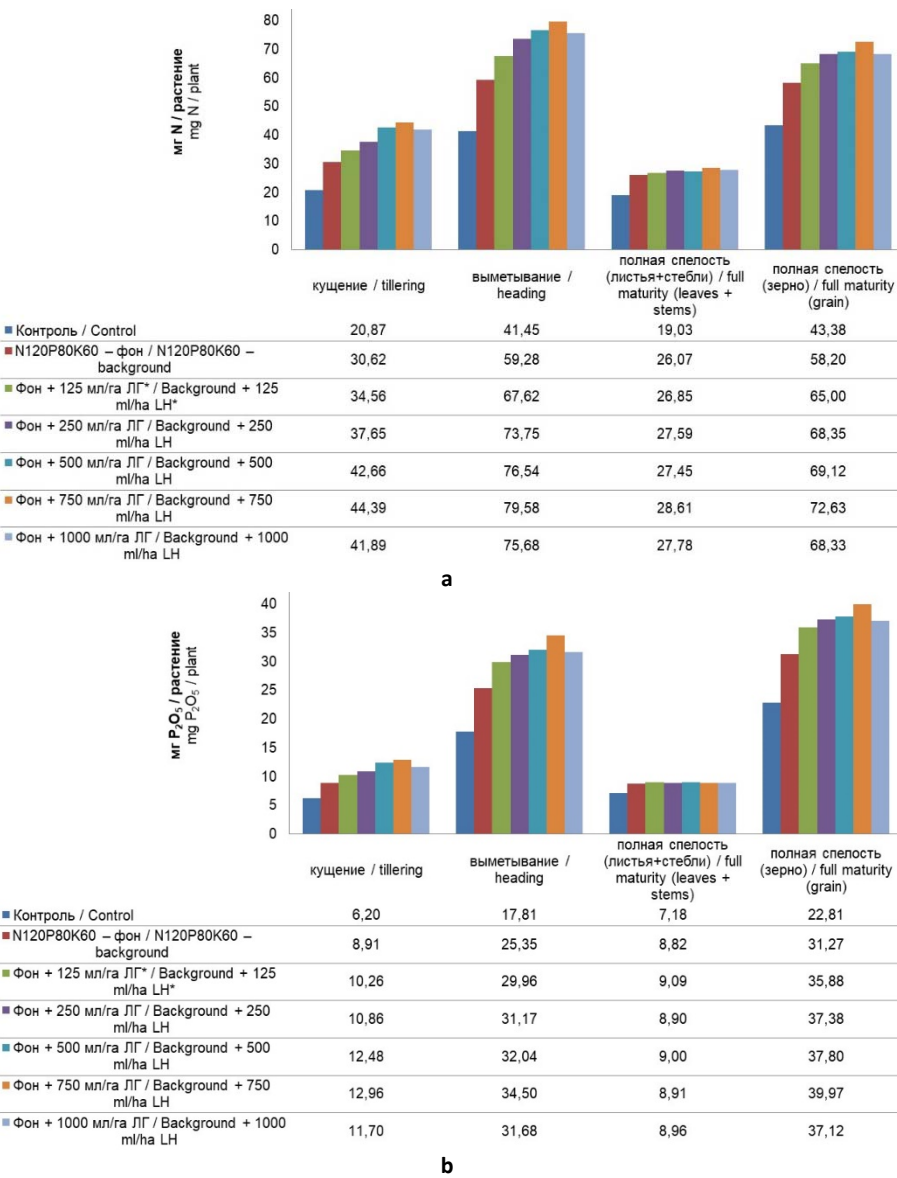


Рисунок 1. Потребление азота (а) и фосфора (б) растениями риса: *ЛГ – лигногумат
Figure 1. Nitrogen (a) and phosphorus (b) consumption by rice plants: *LH – lignohumat

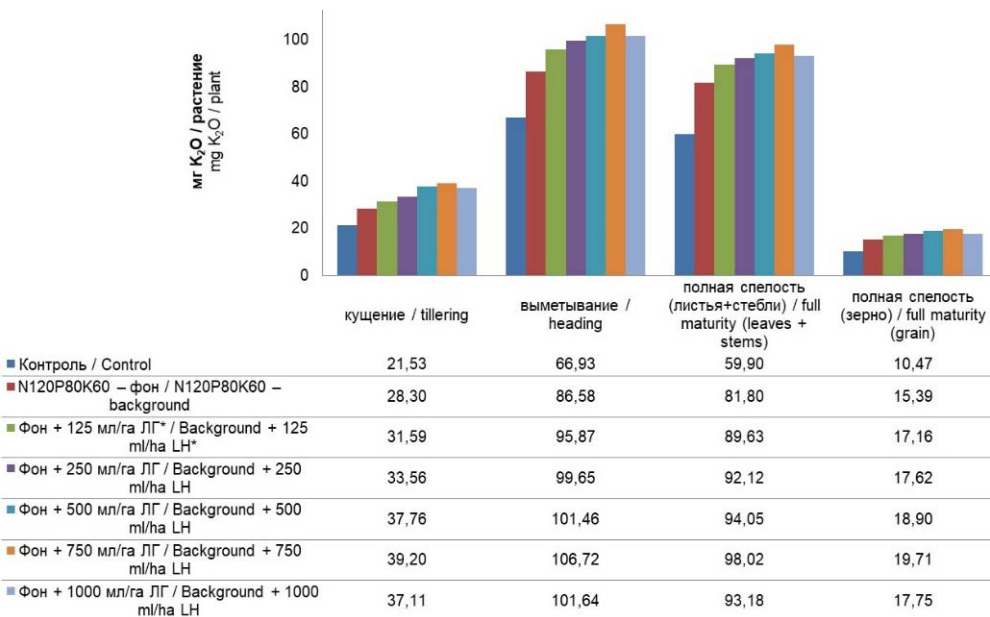


Рисунок 2. Потребление калия растениями риса: *ЛГ – лигногумат
Figure 2. Potassium uptake by rice plants: *LH – lignohumat

Количество усвояемого азота, фосфора и калия растениями риса зависело не только от физиолого-биохимических процессов, но и от нормы лигногумата. Растения риса лучше усваивали элементы минерального питания из почвы и удобрений при обработке посева из расчета 750 мл препарата на гектар – увеличение относительно контроля составило 62,2, 63,0 и 67,3 % и фона – 20,1, 21,9 и 21,2 % соответственно (рис. 1, рис. 2).

По потреблению рисом питательных элементов лидирует калий, за ним следуют азот и фосфор (рис. 3). Оптимизация минерального питания риса путем

введения в систему удобрения лигногумата повлияла на интенсивность их поглощения растениями. На обработанных посевах риса скорость потребления калия растениями в среднем за их вегетацию возрастала по отношению к фону $N_{120}P_{80}K_{60}$ на 9,9–23,2 %, азота – 9,0–22,2 % и фосфора – 11,9–23,9 %. Наибольшее среднесуточное (в среднем за вегетацию риса) поглощение элементов питания происходило при обработке растений риса из расчета 750 мл препарата на гектар посева.

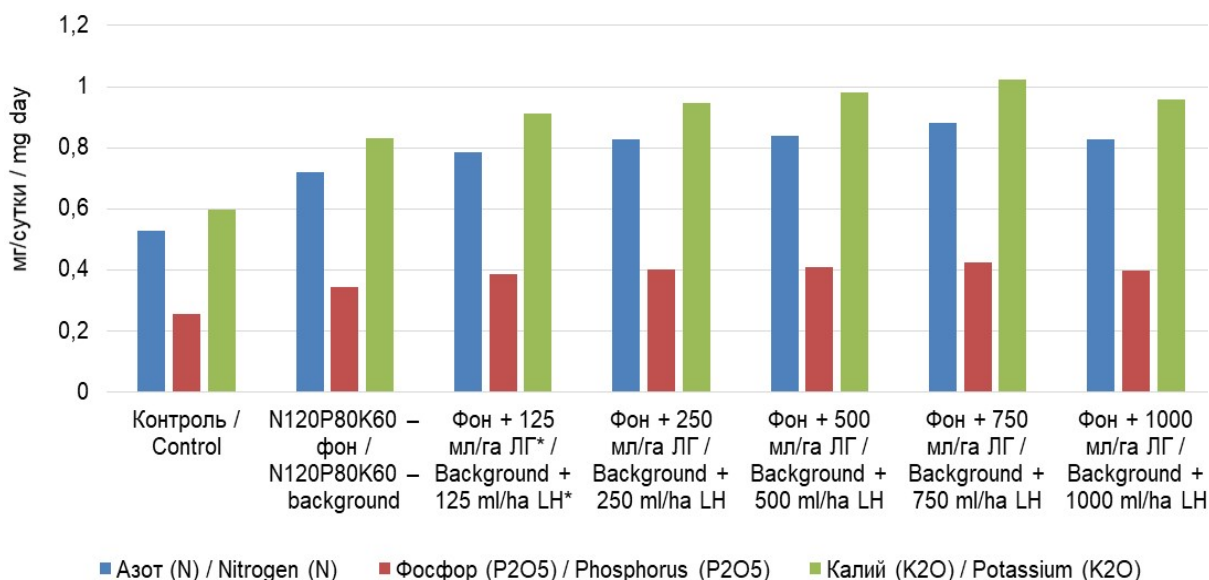


Рисунок 3. Интенсивность потребления элементов питания растениями риса: *ЛГ – лигногумат

Figure 3. Intensity of consumption of nutrients by rice plants: *LH – lignohumate

В результате проведенной обработки растений лигногуматом в фазе кущения риса на фоне внесения $N_{120}P_{80}K_{60}$ повышалась продуктивность рисового агроценоза. В зависимости от используемых норм препарата прибавки урожая зерна риса относительно фона находились в диапазоне 1,3–6,1 ц/га ($HC_{P05}=2,1$ ц/га). Наибольшая урожайность риса, в количестве 67,1 ц/га, достигалась из расчета лигногумата 750 мл/га. Другие нормы препарата давали меньший эффект [9].

Обработка рисового агроценоза лигногуматом обеспечивала прирост сухой массы и накопление элементов питания в растениях [9], создавала условия для извлечения рисом питательных веществ из почвы и удобрений, что повлияло на затраты формирования урожая, которые по отношению к фону $N_{120}P_{80}K_{60}$ несколько повышались – на 0,16–0,48 кг азота, 0,32–0,36 фосфора и 0,34–0,70 кг калия (табл. 1).

Под влиянием лигногумата, учитывая урожайность и содержание биогенных элементов в растениях риса, хозяйственный вынос азота, фосфора и калия с урожаем относительно фона увеличивался на 3,3–13,8 кг/га (3,1–13,1 %); 3,1–7,5 кг/га (6,1–14,8 %) и 4,7–16,6 кг/га (3,9–13,9 %) соответственно. При этом с зерном риса больше выносилось азота (~ 72–73 %) и фосфора (~ 80–82 %), а с листостебельной массой растений (соломой) – калия (~ 83 %).

Включение обработки растений лигногуматом в систему удобрения риса усиливало транспортировку азота и фосфора в генеративные органы [11], поэтому азота с побочной продукцией отчуждалось почти также, как и на фоне или немного выше, а фосфора – меньше на 0,15–0,54 кг/га. И наоборот, вынос азота, фосфора и калия с урожаем зерна превышал фон на 4,1–12,8 кг/га (5,5–17,3 %), 3,3–8,0 кг/га (8,4–20,2 %) и 1,0–4,0 кг/га (5,3–20,3 %) соответственно. Вынос биогенных элементов урожаем риса показал недостаточное внесение калийного удобрения. Внесенное его количество компенсирует вынос калия лишь на 44–50 % (табл. 1).

Информативным показателем эколого-агрохимической эффективности обработки посевов риса лигногуматом является коэффициент использования растениями риса действующего вещества удобрения, который повышался под воздействием препарата. По отношению к контролю коэффициент использования азота растениями риса из удобрений возрос на 23,9–32,7 %, фосфора – 18,6–24,1 % и калия – 59,1–79,0 %, к фону – на 2,7–11,5, 3,8–9,3 и 7,8–27,7 % соответственно (табл. 1).

Таким образом, растения риса в большем количестве выносят питательные элементы урожаем риса и лучше их используют из удобрений при обработке посевов лигногуматом из расчета препарата 750 мл на гектар.

Таблица 1. Показатели эколого-агрохимической эффективности лигногумата в рисовом агроценозе
Table 1. Indicators of ecological and agrochemical efficiency of lignohumate in rice agroecosystem

Показатель Indicator	Вариант / Option						
	1	2	3	4	5	6	7
Затраты на 1 т зерна, кг Costs per 1 tonne of grain, kg							
N	16,48	17,30	17,46	17,76	17,68	17,78	17,66
P ₂ O ₅	7,94	8,26	8,58	8,60	8,60	8,62	8,50
K ₂ O	18,16	19,52	19,86	19,86	20,22	20,22	19,94
Коэффициент использования из удобрений, % Fertilizer utilisation rate, %							
N	–	21,20	23,90	28,12	30,79	32,68	30,24
P ₂ O ₅	–	14,75	18,58	20,67	22,93	24,06	21,78
K ₂ O	–	51,36	59,12	65,08	76,00	79,03	71,91
Вынос с зерном, кг/га Removal with grain, kg/ha							
N	56,38	73,81	77,88	82,05	84,74	86,56	83,69
P ₂ O ₅	29,65	39,65	42,99	44,87	46,34	47,64	45,47
K ₂ O	13,61	19,52	20,56	21,15	23,17	23,49	21,75
Вынос с соломой, кг/га Removal with straw, kg/ha							
N	23,72	31,72	30,90	31,79	32,31	32,74	32,69
P ₂ O ₅	8,94	10,74	10,47	10,26	10,59	10,20	10,54
K ₂ O	74,65	99,55	103,17	106,15	110,69	112,19	109,66

Примечание: 1. Контроль (без удобрений); 2. N₁₂₀P₈₀K₆₀ – фон; 3. Фон + 125 мл/га лигногумата (ЛГ);
4. Фон + 250 мл/га ЛГ; 5. Фон + 500 мл/га ЛГ; 6. Фон + 750 мл/га ЛГ; 7. Фон + 1000 мл/га ЛГ
Note: 1. Control (without fertilizers); 2. N₁₂₀P₈₀K₆₀ – background; 3. Background + 125 ml/ha lignohumate (LH);
4. Background + 250 ml/ha LH; 5. Background + 500 ml/ha LH; 6. Background + 750 ml/ha LH; 7. Background + 1000 ml/ha LH

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эколого-агрохимическая эффективность лигногумата в рисовом агроценозе показала целесообразность применения препарата при обработке растений в фазе кущения из расчета 750 мл/га на фоне внесения N₁₂₀P₈₀K₆₀.

При обработке растений лигногуматом потребление рисом азота, фосфора и калия в период вегетации повышается относительно фона на 20,1 %, 21,9 и 21,2 %, а среднесуточное (в среднем за вегетацию) поглощение – на 22,2 %, 23,9 23,2 % соответственно.

Оптимизация минерального питания растений риса путем включения в систему удобрения лигногумата сопровождается повышенным выносом азота с урожаем по отношению к N₁₂₀P₈₀K₆₀ на 13,1 %, фосфора – 14,8 и калия – 13,9 %. При этом затраты элементов питания на формирование 1 тонны зерна повышаются незначительно: азота на 0,48 кг; фосфора – 0,36 и калия – 0,70 кг, а их использование растениями риса из внесенных удобрений возрастают на 11,5 %, 9,3 и 27,7 % соответственно.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-00201,
<https://rscf.ru/project/24-26-00201/>.

ACKNOWLEDGMENT

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 24-26-00201,
<https://rscf.ru/project/24-26-00201/>.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шеуджен А.Х. Научные основы применения удобрений в рисовых агроценозах. Майкоп: АО «Полиграф-Юг», 2024. 144 с.

2. Система рисоводства Российской Федерации // Под общ. ред. С. В. Гаркуши. Краснодар: ФГБНУ «ФНЦ риса»; Просвещение-Юг, 2022. 368 с.
3. Белоусов И.Е., Чижилов В.Н., Слепцова О.И. Эффективность новых удобрений для некорневой подкормки при выращивании перспективных сортов риса // Рисоводство. 2022. N 1(54). С. 26–32. <https://doi.org/10.33775/1684-2464-2022-54-1-26-32>
4. Битюцкий Н.П. Минеральное питание растений. СПб: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 2020. 540 с.
5. Жаркова С.В. Использование биологических препаратов при предпосевной обработке семян ячменя // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024. N 4-4(91). С. 235–238. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-4-4-235-238>
6. Гуреев И.И. Эффективность обработки стимуляторами роста семян озимой пшеницы в условиях Центрально-Черноземного региона // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. N 3 (67). С. 13–22. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2024-3-13-22>
7. Князева А.О., Чернышева Н.В. Влияние обработки семян и растений риса гуминовыми препаратами на урожайность и качество зерна // Рисоводство. 2020. N 1 (46). С. 18–22. <https://doi.org/10.33775/1684-2464-2020-46-1-18-22>
8. Bezuglova O., Klimenko A. Application of Humic Substances in Agricultural Industry // Agronomy. 2022. N 12. P. 584. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030584>
9. Шеуджен А.Х., Гуторова О.А., Захарова А.Ю., Хурум Х.Д., Перепелин М.А., Ашинов Ю.Н. Агрохимическая оценка некорневой подкормки растений лигногуматом в рисовом агроценозе // Плодородие. 2025. N 1(142). С. 13–16. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2025.142.03>
10. Van Tol de Castro T.A., Barbara R.L.L., Tavares O.C.H., Mello D.F.D.G., Pereira E.G., Souza C.D.C.B., Espinosa L.M., García A.C. Humic acids induce a eustress state via photosynthesis and nitrogen metabolism leading to a root growth improvement in rice plants // Plant Physiol Biochem. 2021. V. 162. P. 171–184. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.043>
11. Шеуджен А.Х., Гуторова О.А., Захарова А.Ю., Есипенко С.В., Слюсаренко Ю.Ю. Эффективность обработки семян риса лигногуматом в условиях левобережья реки Кубань // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2024. N 116. С. 177–182. <https://doi.org/10.21515/1999-1703-116-177-182>

REFERENCES

1. Sheudzhen A. Kh. *Nauchnye osnovy primeneniya udobrenii v risovykh agrotsenozakh* [Scientific basis for the use of fertilizers in rice agrocenoses]. Maykop, « Polygraph-South» Publ., 2024, 144 p. (In Russian)
2. *Sistema risovodstva Rossiiskoi Federatsii* [Rice growing system of the Russian Federation]. Krasnodar, FSBSI «Federal Scientific Rice Centre», Enlightenment-South Publ., 2022, 368 p. (In Russian)
3. Belousov I.E., Chizhikov V.N., Sleptsova O.I. Efficiency of new fertilizers for foliar feeding in growing promising rice varieties. *Rice growing*, 2022, no. 1(54), pp. 26–32. (In Russian) <https://doi.org/10.33775/1684-2464-2022-54-1-26-32>
4. Bityutskii N.P. *Mineral'noe pitanie rastenii* [Mineral nutrition of plants]. St. Petersburg, St. Petersburg University Publ., 2020, 540 p. (In Russian)
5. Zharkova S.V. Use of biological preparations in pre-sowing treatment of barley seeds. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2024, no. 4-4(91), pp. 235–238. (In Russian) <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-4-4-235-238>
6. Gureev I.I. Efficiency of treatment of winter wheat seeds with growth stimulants in the conditions of the Central Black Earth Region. *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*, 2024, no. 3 (67), pp. 13–22. (In Russian) <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2024-3-13-22>
7. Knyazeva A.O., Chernysheva N.V. Effect of treating rice seeds and plants with humic preparations on grain yield and quality. *Rice growing*, 2020, no. 1 (46), pp. 18–22. (In Russian) <https://doi.org/10.33775/1684-2464-2020-46-1-18-22>
8. Bezuglova O., Klimenko A. Application of Humic Substances in Agricultural Industry. *Agronomy*, 2022, no. 12, p. 584. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030584>
9. Sheudzhen A.Kh., Gutorova O.A., Zakharova A.Yu., Khurum Kh.D., Perepelin M.A., Ashinov Yu.N. Agrochemical assessment of foliar feeding of plants with lignohumate in rice agrocenosis. *Fertility*, 2025, no. 1(142), pp. 13–16. (In Russian) <https://doi.org/10.25680/S19948603.2025.142.03>
10. Van Tol de Castro T.A., Berbara R.L.L., Tavares O.C.H., Mello D.F.D.G., Pereira E.G. et.al. Humic acids induce a eustress state via photosynthesis and nitrogen metabolism leading to a root growth improvement in rice plants. *Plant Physiol Biochem*, 2021, vol. 162, pp. 171–184. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.043>
11. Sheudzhen A.Kh., Gutorova O.A., Zakharova A.Yu., Esipenko S.V., Slyusarenko Yu.Yu. Efficiency of rice seed treatment with lignohumate in the conditions of the left bank of the Kuban River. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*, 2024, no. 116, pp. 177–182. (In Russian) <https://doi.org/10.21515/1999-1703-116-177-182>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Асхад Х. Шеуджен и Оксана А. Гуторова провели обобщение, анализ, интерпретацию данных и подготовили рукопись для подачи в редакцию. Хазрет Д. Хурум, Юнус Н. Ашинов, Альбина Ю. Захарова участвовали в сборе материала. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Askhad H. Sheudzhen and Oksana A. Gutorova summarised, analysed and interpreted the data and prepared the manuscript for submission to the Editor. Khazret D. Khurum, Yunus N. Ashinov and Albina Yu. Zakharova participated in collecting the material. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Асхад Х. Шеуджен / Askhad H. Sheudzhen <https://orcid.org/0000-0001-5116-197X>
Оксана А. Гуторова / Oksana A. Gutorova <https://orcid.org/0000-0003-0752-2488>
Хазрет Д. Хурум / Khazret D. Khurum <https://orcid.org/0000-0002-8410-5269>
Юнус Н. Ашинов / Yunus N. Ashinov <https://orcid.org/0000-0002-5309-5715>
Альбина Ю. Захарова / Albina Yu. Zakharova <https://orcid.org/0009-0008-2728-8039>

Обзорная статья / Review article

УДК: 379.85 + 913

DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-15



Водно-рекреационные и природоохранные структуры в экотуристском каркасе особо охраняемой природной территории

Ирина В. Андреева, Антон В. Головин, Ирина Д. Рыбкина

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

Контактное лицо

Ирина В. Андреева, кандидат географических наук, Институт водных и экологических проблем СО РАН; 656038 Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1.

Тел. +73852666458

Email direction-altai@yandex.ruORCID <https://orcid.org/0000-0003-4010-0826>**Формат цитирования**

Андреева И.В., Головин А.В., Рыбкина И.Д. Водно-рекреационные и природоохранные структуры в экотуристском каркасе особо охраняемой природной территории // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 155-166. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-15

Получена 26 июня 2025 г.

Прошла рецензирование 18 сентября 2025 г.

Принята 25 октября 2025 г.

Резюме.

Цель: подбор научных идей и положений для концепции регионального каркаса экотуризма на особо охраняемых природных территориях (ООПТ). Для детальности водные объекты приняты за фокусные элементы экосистем, а водозависимые рекреационные практики – за заглавное содержание экотуристских программ.

Проанализировано более 4 000 источников по теории пространственных природоохранных и туристско-рекреационных структур. В геоэкологии, рекреационной географии, теории заповедного дела определены положения, концептуально близкие идее природо- и деятельностьно-ориентированного синтеза таких структур на ООПТ. В основе теоретических построений – рассуждения о региональных туристско-рекреационных системе и каркасе, дифференциации видов туризма, туристско-рекреационных особенностях водных объектов, функциональном зонировании и особенностях водно-рекреационных практик на ООПТ.

Экотуристский каркас ООПТ физически состоит из элементов природного, туристско-рекреационного и экологического каркасов, компенсирует расширенный доступ посетителей. Ядра каркаса – наиболее выразительные (информативные) природные и специфичные производственные доминанты вне заповедного ядра, соответствующие ему содержательно. Связующие элементы – экомаршруты, технологическая и внешняя транспортная сети. Водные объекты в медико-биологических, пейзажно-эстетических, информационно-познавательных качествах выступают в экотуризме ядерными элементами экотуристского каркаса.

Ключевые слова

Экологический туризм (экотуризм), экологический каркас, туристско-рекреационный каркас, экотуристский каркас, особо охраняемая природная территория.

Water-recreational and nature conservation structures in the ecotourism framework of a specially protected natural area

Irina V. Andreeva, Anton V. Golovin and Irina D. Rybkina

Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia

Principal contact

Irina V. Andreeva, Candidate of Geographical Sciences, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences; 1 Molodejnaya St, Barnaul, Russia 656038.

Tel. +73852666458

Email direction-altai@yandex.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4010-0826>

How to cite this article

Andreeva I.V., Golovin A.V., Rybkina I.D. Water-recreational and nature conservation structures in the ecotourism framework of a specially protected natural area. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):155-166. (In Russ.)
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-15

Received 26 June 2025

Revised 18 September 2025

Accepted 25 October 2025

Abstract

The objective was the selection of scientific ideas for the concept of regional ecotourism framework (carcass) of specially protected natural areas (SPNAs). Water bodies are taken as focal elements of ecosystems, while water-dependent recreational practices are the primary content of ecotourism programmes.

Over 4,000 sources on the theory of spatial nature conservation and tourism-recreational structures have been analysed. Propositions conceptually close to the idea of a nature- and activity-oriented synthesis of such structures in SPNAs have been identified in geoecology, recreational geography and conservation theory. The theoretical framework is based on reasoning about regional tourism-recreational systems and frameworks, differentiation of tourism types, tourism and recreational characteristics of water bodies, functional zoning and features of water recreation in SPNAs.

An ecotourism framework of SPNAs consists of elements of natural, tourism-recreational, and ecological frameworks. It compensates for expanded visitor access. The core elements of a framework are the most expressive (informative) natural and specific production dominants outside the reserve core and corresponding to the latter in content. Connecting elements are eco-routes, technological and external transportation networks. In medical-biological, landscape-aesthetic and informational-educational terms, water bodies serve as core elements of the ecotourism framework in ecotourism.

Key Words

Ecological tourism, ecological framework, tourism and recreational framework, framework for ecotourism, specially protected natural area.

ВВЕДЕНИЕ

Экологический туризм прочно закрепился в практике современного туризма и в институциональной среде. Понимаемый как деятельность по организации путешествий в различных формах природного туризма, ориентированная на изучение природы и культурных достопримечательностей, бережное отношение к природе и содействие в ее сохранении, географически он, как правило, связывается с зонами организованного туризма и экологическими тропами (экотропами), в том числе на особо охраняемых природных территориях (ООПТ) [1]. Следуя логике определения, «относить к экологическому туризму возможно только тот туризм, для которого характерен не только набор определенных качественных характеристик объектов, но и определенные качества субъектов – потребителей услуг» [2].

По аналогии с термином «региональная организация туризма» [3] мы будем понимать под «региональной организацией экотуризма» его отраслевую и территориальную структуру, сформированную комплексом ресурсов экотуризма, экологических маршрутов, центров и зон природного туризма. Представляя собой часть территориальной туристско-рекреационной системы (ТТРС) – сложной функционально и территориально целостной взаимосвязи природных и культурных комплексов, инженерных сооружений, персонала, органа управления и отдыхающих (рекреантов) [4], – экотуризм наследует ее фундаментальные свойства (географичность, системность, иерархичность) и повторяет ее структурно-функциональную архитектуру.

Ресурсы, специализацию и программное наполнение туризма, дифференциацию видов занятий определяют физико- и экономико-географические особенности места [5; 6]. Они отражают конкурентные туристские преимущества района и служат основой формирования стратегии туристского развития [7]. Системность наделяет экологический туризм управляемостью, способностью к самоорганизации и развитию, структурностью, континуальностью и обеспечивает специфичным исследовательским инструментарием: геосистемным, пространственно-временным и каркасным подходами [8; 9].

Эволюция научных представлений о каркасном обустройстве территорий прошла путь от конструирования каркасов крупных социально-экономических систем (расселения, народного хозяйства) до разработки каркасов узких сфер человеческой деятельности, в том числе экологических, туристско-рекреационных и природно-рекреационных. Каркасы разного рода признаны универсальными инструментами пространственной организации и управления территориями, а их создание основано на выделении неких узловых точек (населенных пунктов) с концентрацией ресурсов, производства, населения (потребителей), инфраструктуры [10; 11].

Актуальная теория и методология природообустроенных каркасов достаточно детальны. Они согласованы с обобщенным научным взглядом на специализированные структуры и практическими запросами в области территориального планирования и развития территорий. Как категория «территориальная организация» каркасы характеризуются физическими объектами, их пространственными процессами, отношениями и связями, территориальными системами (группировками однородных объектов) и структурами [12].

Обычно относимый к природоохранным системам *экологический каркас* понимается как «пространственно-организованная структура, которая поддерживает экологическую стабильность территории, предотвращая потерю биоразнообразия и деградацию природных систем... Экологический каркас составляют: площадные (ядра, биоцентры) и линейно вытянутые элементы (биокоридоры, связывающие между собой ядра)» [13]. На национальном уровне экологическими ядрами являются крупноареальные ключевые территории (заповедники, национальные и природные парки, заказники) [14]. Одновременно, экологический каркас неоднороден и состоит из взаимосвязанных и взаимодополняющих локальных каркасов: эколого-рекреационного, эколого-экономического, историко-культурного, социально-инфраструктурного [15; 16].

Туристско-рекреационный каркас – мыслимая территориальная сеть из иерархически взаимосвязанных точечных и площадных туристских ресурсов, актуальных и потенциальных туристских объектов, туристско-значимых транспортных путей и туристских маршрутов, создающих в конкретном регионе пространственно-организованную инфраструктуру туристской индустрии [8; 9; 17]. При этом именно туристские маршруты определяют пространственные связи и образуют туристский каркас территории.

Оба типа каркаса – экологический и туристско-рекреационный – существуют максимально тесно ввиду схожих требований к природной среде: наименее нарушенные, слабо обжитые и наименее хозяйственно освоенные территории [18].

Исходя из определений, экотуристский (эколого-рекреационный [19]) каркас может быть рассмотрен как некая модель, синтезирующая экологический и туристско-рекреационный каркасы, служащая инструментом регулирования специфичной деятельности на особой территории. В настоящее время в представлениях об экотуризме на ООПТ нет четкого понимания о такой структуре и недостаточно практики для фундаментальных обобщений. Ясно лишь, что структура такого каркаса не может быть механическим объединением экологического и туристско-рекреационного каркасов [20].

Также бесспорно, что наиболее популярными локациями и наиболее уязвимыми природными объектами являются водотоки и водоемы, которые вовлечены в туристско-рекреационную деятельность и испытывают максимальные нагрузки [21–26]. Разработанная теория экологического туризма, к сожалению, не охватывает так называемые водно-рекреационные практики на ООПТ, а сами водные объекты крайне редко рассматриваются как с точки зрения нормирования рекреационного воздействия, так и с позиции организующего (узлового) элемента региональных туристско-рекреационных систем.

Тем не менее, в научных направлениях, решающих задачи в области охраны уникальных природных территорий, их рекреационного освоения и повышения социально-экономической эффективности, накоплен опыт функционального зонирования, определения допустимых рекреационных нагрузок, разработки общих правил и ограничений в рекреационной деятельности, полезный для теории экотуристских каркасов. В предлагаемой вниманию статье эти разработки проанализированы, систематизированы и обобщены в форме базисных положений для каркасной концепции экотуризма. Концепция учитывает необходимость специальных

компенсаторных структур, обеспечивающих экологическую безопасность (приемлемость) рекреационных практик при их организации на ООПТ.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Следуя задачам исследования – обобщение теоретических представлений об экологическом и туристско-рекреационном каркасах, анализ разработанности вопросов интеграции водно-рекреационных практик в программы и территориальные структуры экологического туризма, формирование основ концепции экотуристского каркаса ООПТ – подобран массив публикаций из научной электронной библиотеки www.elibrary.ru [33]. По ключевым словам, «экологический туризм» (3579 источников), «экологический каркас» (639), «природно-экологический каркас» (113), «ландшафтно-экологический каркас» (54), «туристско-рекреационный каркас» (19), рекреационный каркас (18), «эколого-рекреационный каркас» (8), «природно-рекреационный каркас» (7) и смежным обнаружено более четырех тысяч источников. При том по запросу «водно-рекреационный каркас» и запросам, связанным с ним тематически, обнаружен только один источник, посвященный исследованиям в области ландшафтной урбанистики и описывающей процесс реконструкции городской набережной [34].

Характер массива источников и мультидисциплинарность проблемы предопределили использование в последующем анализе междисциплинарного подхода, положений и комплекса методов, прежде всего геоэкологии и рекреационной географии. С их помощью разработаны архитектура формируемой научной парадигмы. Системный подход позволил собрать и обобщить первичную информацию, проанализировать композиционные, функциональные и планировочные элементы, применяемые в проектировании экологических и туристско-рекреационных каркасов, разработать типовую модель эколого-рекреационного каркаса ООПТ. На положениях системного подхода проведен сопряженный анализ компонентов эколого-рекреационного каркаса, установлены взаимосвязи между блоками и внешние взаимосвязи природоохранных территорий и объектов с туристско-рекреационными ресурсами, разработаны теоретико-методические положения целевой оценки территории.

Экспертным методом определена толерантность структур разнотипных каркасов в рамках экотуризма, их сопоставимость и способность взаимно усиливать эффект от управленческих технологий, прогнозирования, планирования и программирования рекреационной деятельности на ООПТ. Рассмотрены и оценены теоретико-методические положения смежных научных дисциплин на предмет соответствия принципам экологической приемлемости развития рекреационных практик на территориях особой значимости и возможности их интеграции в формальную (типовую) научную парадигму.

ОБСУЖДЕНИЕ

Первичный анализ массива источников предопределил направления последующих аналитических рассуждений:

- подход к каркасной концепции экотуризма через теорию функционального зонирования природоохранных территорий и туристско-рекреационного каркаса;

- дифференциация видов туризма на ООПТ через позиции рекреационных интересов и занятий, туристские программы и маршруты;

- идентификация водно-рекреационных практик на ООПТ через природно-ресурсный, социально-экономический, демографический и технологический потенциалы.

Функциональное зонирование устанавливает разграничения видов хозяйства (в т.ч. рекреационного) на участках ООПТ в зависимости от их ценности. Оно базируется на анализе современной ландшафтной структуры ООПТ, а для учреждений паркового типа – также функциональной и территориальной структур. Полезные для развития экотуризма условия лежат в основе формирования зон сохранения природных и культурно-исторических объектов, познавательного туризма и рекреации, обслуживания посетителей [13]. В туристско-рекреационное пространственное планирование функциональное зонирование делегирует возможности оценки степени дифференциации целевой деятельности, в том числе определение локализации и иерархической соподчиненности территориальных ресурсов и структур, выявление факторов специализации или ограничений в освоении [29].

Понятие «экологический каркас ООПТ» отсутствует в природоохранной парадигме, поскольку базовая логика понятия «экологический каркас» сфокусирована на решении задач сохранения природной целостности и поддержания экологического равновесия на освоенных территориях. Здесь она представляет собой некую компенсационную систему – взаимосвязанную совокупность участков с различными режимами природопользования [30; 31]. Тем не менее, в необходимости дифференциации режимов концепции функционального зонирования и экологического каркаса пересекаются, что взаимно дополняет смежные области в теоретических построениях.

Ключевыми композиционными и функциональными элементами каркасных теорий служат физические природные и антропогенные объекты с определенным целевым назначением:

- ареалы – жилые районы, участки сосредоточения ресурсов, участки экстенсивного сельского хозяйства, загородные природные парки;

- узлы (ядра) – центры городов, ценные экосистемы и объекты, ООПТ;

- коридоры (оси) – транспортные магистрали, туристские маршруты, долины рек, цепочки озер и ООПТ, лесные полосы и массивы [17; 32; 33];

- многофункциональные буферные (переходные) территории или охранные зоны – территории регулируемой хозяйственной деятельности вокруг ключевых территорий и экологических коридоров [11].

К факторам их обособления, помимо ландшафтных, отнесены социально-трудовые условия: характер труда, занятость, рабочее место и время, постоянное место жительства потребителей [34]. Для большей эффективности структуру каркаса должны слагать наиболее крупные и значимые элементы [35], а конфигурация может быть линейной, звездочно-радиальной, радиально-кольцевой или рассредоточенной (каскадной), что отражает пространственное развитие и региональные перспективы [36].

Примеров синтеза эокаркасных и туристско-рекреационных пространственных структур не много и чаще такие конструкторы сосредоточены в области

архитектуры и градостроительства. Так, в проекте ландшафтно-рекреационного каркаса Казани в структуре и геометрии основных городских элементов учтена морфология природных территорий. Суть проекта логично сведена к пространственной и иерархической соподчиненности градостроительных рекреационных элементов в зависимости от доли зеленых пространств в площади города: чем крупнее природный массив, тем значимее каркасный элемент. Долины рек, лесные массивы и крупные транспортные магистрали формируют систему зеленых клиньев и поясов, разделяющих жилые массивы, сохраняемых лесов, неудобий и водно-зеленых коридоров. В районах застройки элементы каркаса – искусственные озелененные пространства вдоль основных транспортных магистралей. В наиболее людных местах сетка каркаса состоит из системы лучевых линейных водно-зеленых комплексов, обеспечивающих пешеходные линейные связи между элементами с выходами к доминантам. Такая структура, по мнению авторов, оптимальна для рекреационного обслуживания и архитектурно-планировочного регулирования, поддерживает санитарные и природоохранные функции места [37].

Обратный подход – формирование функциональных зон путем объединения каркасных элементов [38]. На примере национальных парков предложено формировать заповедное ядро в конфигурации узлов экологического каркаса, экологических коридоров, а также ключевых и эталонных природных территорий, не затронутых хозяйством. Зону рекреации – очерчивать по исторически сложившимся туристическим маршрутам, популярным туристским объектам, локациям с благоприятным биоклиматом и ландшафтным разнообразием. Делается вывод о необходимости включения в нее также памятников природы и экологических коридоров. По планировочным узлам (населенные пункты и учреждения отдыха) – ооконтуривать зону обслуживания посетителей. Уточняется, что «планировочные узлы – это узлы *рекреационного каркаса*. Здесь берут начало несколько туристических маршрутов...» [38, с. 8], а рекреационные зоны и зона обслуживания туристов сопряжены.

В современном географическом понимании туристско-рекреационное пространство совпадает с географическим (геосистемным) пространством Земли, является его частью (слоем, сферой) и изучается с применением подходов к познанию сложных географических явлений: геосистемного анализа, районирования, типологии [39–43]. Так, «...«туристское пространство» – это составная часть геопространства, и в его основе лежит «геосистема», состоящая из элементов туристско-рекреационной сферы» [44, с. 11]. При этом именно географическое пространство – основа туристско-рекреационного потенциала [43], а «туристско-рекреационная сфера в регионах имеет закономерную пространственную структуру, согласующуюся с секторно-концентрическим социально-экономическим строением, природной дифференциацией, ландшафтной контрастностью» [45, с. 94].

Важно, что пространственная организация многоуровнева. Базисный ее уровень – географический – представлен территориальными системами, соответствующими центрами и объектами «in situ». Он инерционен, обеспечивает устойчивость всей конструкции, включая второй, экономический уровень, который более мобилен и изменяется экономикой и спросом [44; 46]. С

согласованной географической позиции туристско-рекреационный каркас территории – пространственное материальное (физическое) выражение региональной туристско-рекреационной системы [47].

Определенные уровни заложены и в самой туристско-рекреационной системе: в форме туристской и рекреационной подсистем. Первая формируется на уникальных брендовых продуктах региона, вторая – на ресурсах типичных и широкодоступных для местного самоорганизованного досуга [47]. Пространственные каркасы подсистем также различны. Туристский – формируется как сетевой проводник потоков людей, вещества, энергии и информации, а рекреационный – как точечно-линейный, связывающий места постоянной локации потребителей с объектами рекреационной инфраструктуры [24]. Второй при этом устойчивее во времени и рациональнее по форме организации пространства, поскольку деконцентрирует потоки рекреантов [22].

Наряду с разным целевым назначением и многоуровневостью, взаимную интеграцию каркасов осложняет разнородность их элементов: в экологическом каркасе – природных, в туристско-рекреационном – социальных, экономических и инфраструктурных. Имеются разные мнения на счет их значимости: 1) природная группа факторов (географическая среда) играет базисную роль ввиду хронологической первичности и значительно большей стабильности во времени по сравнению с социально-экономическими явлениями, а также непереносимости учета географических условий при разных содержательных основах [48; 49]; 2) природные и антропогенные элементы равнозначны [34].

Тем не менее, очевидно, что в любой организованной форме туризма, а, значит и экотуризме, экономические конструкты необходимы и неизбежны. Экологический, как любой другой вид туризма в современном обществе потребления, нуждается в определенном сервисе, хотя, возможно, в меньшей степени, чем другие. В этом плане он может быть сопоставлен с сельским туризмом, который наряду с лаконичным общим сервисом «требует определенных ландшафтных характеристик, можно сказать «ландшафтного сервиса», поскольку достоинства конкретного сельского ландшафта – эстетика, привлекательность, экология – играют существенную роль» [50, с. 35]. Так как каждый вид территориального каркаса нацелен на определенные человеческие или производственные запросы, отражает специфичный способ организации деятельности, то он имеет определенную материальную базу [51].

Множество объектов туризма функционирует самостоятельно и иерархически соподчиненно, образуя туристские кластеры – доминанты на однородном фоне, узлы пространственных туристско-рекреационных систем [17; 43; 52]. Подобный взгляд на устройство экотуризма обнаруживает хотя и своеобразные, но функционально аналогичные пространственные формы объектов. В природном туризме и на природном туристском маршруте также имеются доминанты – наиболее впечатляющие точки с оптимальным сочетанием туристско-рекреационных ресурсов и придающие маршруту логическую завершенность. В природной среде таковы ООПТ [18; 53], а на самих ООПТ – объекты и явления, представляющие эмоциональный центр или фокус маршрута.

Обобщая сказанное, считаем необходимым в формируемую концепцию заимствовать ряд адаптированных идей. Прежде всего, ввиду первостепенной экосистемной ценности ООПТ структуру экотуристского каркаса должно слагать сочетание элементов трех типов каркасов: природного (ядрами в нем служат типичные, уникальные, экосистемно и экологически значимые природные комплексы и объекты, коридорами – пути миграции вещества и биоты), туристско-рекреационного (ядра – объекты туризма и экскурсионных программ, коридоры – маршруты и транспортная инфраструктура) и экологического (ядра – дублирующие туристские объекты, коридоры – альтернативные (компенсаторные) маршруты). Первый необходимо включить в конструкт ввиду географичности и природности принимающих пространств, второй – ввиду особенностей современного потребления и экономического устройства отрасли. Последний, как и в случае освоенных пространств, на ООПТ служит компенсации расширенного доступа посетителей на охраняемые территории.

Далее допустим, что внутри ООПТ (ввиду иерархичности природных систем и целевой сущности экотуризма) доминантами (фокусом и целью экомаршрута) будут служить наиболее выразительные элементы и панорамы ландшафтов, расположенные вне заповедного ядра, но соответствующие ему по сути и содержанию. Учитывая общий природно-ориентированный характер, ресурсные и инфраструктурные потребности экологического туризма, предположим, что основой его модели может быть классическая отраслевая территориальная туристско-рекреационная система, расширенная сферой производства – природоохранного. Практически это выразится во включении в пространственную и функциональную организацию методов и объектов производственного цикла (центральная усадьба, кордоны, экспериментальные и подкормочные площадки, связанные с ними технологии).

При этом общей основой пространственной модели (собственно каркаса) может быть некий вариант поляризованного ландшафта Б.Б. Родомана [34]. Эта мысль подкреплена современным смещением туристской активности в узкую полосу вдоль автомобильных дорог. В модели поляризованного ландшафта природно-ориентированная туристско-рекреационная активность происходит как раз преимущественно в центре города (место жительства, точка прибытия-убытия) и в руральных (сельских, природных) местностях, практикующих агротуризм и экотуризм по большей части для жителей ближних городов и в режиме выходного дня.

Содержательная дифференциация видов туризма на ООПТ в комплексном подходе к пространственному планированию экотуризма позволяет определить ресурсную обеспеченность, опасность или безопасность туристских активностей, оптимальность природоохранных, бизнес, инфраструктурных и других решений [54]. В отсутствии четких целевых и видовых разграничений экологический туризм на ООПТ часто подменяется промысловой рекреацией, рыбалкой, другими видами досуга. Ресурсами для них служат по большей части физические элементы охраняемых экосистем, прежде всего – биота. Если считать экотуризмом путешествия «для знакомства с природными достопримечательностями и объектами геокультурного пространства, созданными природой и человеком, с

целью экологического образования и воспитания» [55, с. 213] или рассматривать его как «условно бесконечный процесс познания ландшафта» [2; с. 81], то характер необходимого ресурса сильно изменится, а использование ландшафта – опосредуется. При этом изменятся и требования к самим природным пространствам: они должны быть не столько безлюдными и слабо освоенными, сколько информационно разнообразными и насыщенными достопримечательностями – фокусами экотуристских программ.

Информативность экотуристского пространства согласуется с идеями о маршрутности и эталонном маршруте. Понятие «маршрут» – одно из сущностных понятий, обеспечивающих образ деятельности и отраслевую технологию в туризме. Он взаимоувязывает элементы туристской системы – группы людей, достопримечательности и инфраструктуру в пространственный каркас через транспортную сеть, обуславливающую местоположение пунктов входа и выхода на маршруты. Маршруты служат носителями регионально-контекстных (географически репрезентативных) туристских предложений [56].

Маршруты способствуют улучшению и сбалансированности классических моделей экологического туризма, делая путешествия по ООПТ через знание и понимание ландшафта более полезными и экологически дружелюбными [2; 57; 58]. При том, непосредственное маршрутное планирование и планирование инфраструктурное – равнозначны [59], собственно инфраструктура формирует физическую структуру экологического туризма [60], а логическую – слагают элементы разной природы (природные, культурно-исторические, рекреационные, сервисные, этнические, мифологические, экономические) [61].

С дефиницией «эталонный маршрут» связано обеспечение безопасности путешествий посредством постепенного усложнения в процессе приобретения человеком туристского опыта. Для этого маршруты оцениваются категориями сложности в зависимости от набора туристских препятствий [62]. Эталонность маршрутов в экотуризме может быть выражена как через предоставление доступа к более технологически сложным маршрутам или их участкам, так и через усложнение программ в процессе познания ландшафта отдельной ООПТ, региона, страны. В целом же маршрутность в экотуризме потенциальна не только в технологическом и деятельностном аспектах, но и как гарант управляемости туристскими потоками через их режимность и пропускную способность.

В изучении и планировании маршрутной рекреации на региональном уровне метод построения туристско-рекреационного каркаса первостепенен. С панорамной точки зрения Б.Б. Родомана [32], территория дифференцируется на пространства повседневной жизни и утилитарной деятельности людей, природной рекреации и естественных биогеоценозов – узлы каркаса, соединенные сетью маршрутов разной мощности. Уровни этих элементов зависят от совокупности и концентрации функций, объектов показа, мест размещения и обслуживания туристов. В частных схемах маршрутной рекреации элементы дифференцируются в зависимости от значимости на:

- туристско-рекреационные центры (населенные пункты с ресурсами, средствами размещения и обслуживания туристов), транспортные артерии (все виды транспортной связи) [43];

- маршрутно-опорные центры региональные (населенные пункты, концентрирующие и распределяющие потоки туристов), маршрутно-опорные центры местные (населенные пункты с достопримечательностями), маршрутно-опорные точки (локальные достопримечательности), маршрутно-транзитные точки (отдельные объекты размещения на маршруте) [63];

- транспортные хабы (пересечения важнейших автодорог и связи большого района), транзит (положение на важнейшей сквозной автодороге), ворота в район (вход в район природного, архитектурно-исторического, этнического туризма) [49];

- туристские местечки (конкретные туристские объекты), туристские места (территория с туристской специализацией), туристские центры (крупные города с мировой туристской специализацией) [64];

- опорные точки (совпадают с опорными узлами расселения), доминанты (места концентрации уникальных объектов и пересечения маршрутов), рекреационные парки и зоны, транспортные коридоры, зоны придорожного сервиса, сеть туристских маршрутов (объединяющая структура) [47; 52];

- опорные точки (ключевые туристические объекты с развитой инфраструктурой), зоны пригородного отдыха, сеть туристских маршрутов, транзитные коридоры, перспективные территории (точки роста) [60];

- крупные опорные центры, главные туристские центры, локальные туристские зоны; территории тематических парков, точечные объекты [64];

- туристско-рекреационные кластеры, протокластеры (несут часть признаков кластера) и локалитеты, экологические коридоры (долины рек, пойменные леса) [65].

Приведенные структуры, хотя весьма разнообразны, разнородны и носят теоретико-рекомендательный характер, но предложены в рамках конкретных региональных проектов. Физическое наполнение их природными, историко-культурными, социальными и инфраструктурными объектами подчеркивает условия и особенности региона, а функционал выражается в последовательном использовании туристских объектов (туристской инфраструктуры) в процессе организации тура на конкретной территории и в возможности формирования эффективных кластеров [43].

Таким образом, в процессе маршрутизации и самом конструкте маршрута читается четкое дублирование структур туристско-рекреационного каркаса: от точки входа на маршрут (узел каркаса) по транспортным коридорам к фокусной точке путешествия (узел каркаса) и обратно. В этой связи маршрутизация экологического туризма вписывается в общую схему, а различия заключаются в особенностях непосредственного передвижения уже по самой природной территории.

Так, в региональном масштабе саму ООПТ можно рассматривать как фокусную точку – цель маршрута. Внутренняя маршрутизация вполне может заключаться в аналогичном структурировании, но более низкого масштабного ранга, включая точки входа и выхода с маршрута (кордоны, визит-центры, центральные усадьбы, гостевые зоны), различаясь по сути лишь способом передвижения (пеший и иные допустимые режимом). Упрощенно такая схема представляет собой вилку, где длинная часть – маршрут заброски, веерная – маршруты по самой территории. В этой конфигурации экотуризм

органичен в общих пространственном каркасе и территориальной туристско-рекреационной системе.

Необходимость *идентификации водно-рекреационных практик на ООПТ* продиктована доминированием отдыха у водоема или реки в структуре современных рекреационных предпочтений [24]. В пределах городов и их ближайших окрестностей пляжный отдых превалирует в рекреационных предпочтениях. На освоение околородных пространств влияет повышенная эстетика прибрежного ландшафта (живописность, выразительность, обзорность), пригодность для купания, ловли рыбы и доступность (уклон поверхности, наличие инфраструктуры) [25]. Даже на ООПТ туристские потоки четко локализируются в пределах русел рек, пойм и надпойменных террас, коренных склонов и прибрежных скал. Рекреационные воздействия максимальны у уреза воды и убывают до нуля при удалении на 150 метров [27].

К водозависимым рекреационным практикам относят виды туризма, отдыха и рекреации, в которых мотивацией потребителей, предпочтенной рекреационной средой и главным ресурсом служит вода в форме водных объектов [66]. Люди выбирают береговые экосистемы для отдыха в силу их медико-биологических и пейзажно-эстетических качеств, обусловленных особыми геолого-геоморфологическими (главный фактор в оценке комфортности) [67], гидрологическими и почвенно-биологическими условиями [23], а иногда из-за их территориального символизма [68]. Организованный отдых опирается на возможность судоходства – для речных экскурсий и круизов, подходящие характеристики воды, дна и побережья – для пляжного отдыха, наличие уникальных природных проявлений – для познавательного досуга. Крупные водные объекты (большие озера, водохранилища, системы небольших озер, реки, пруды) и некоторые типы природных феноменов (устья рек, обнажения в крутых берегах, панорамы заречий) представляют собой собственные типы туристских объектов [5].

Есть мнение, что природные туристские ресурсы на равнинах имеют больше не туристское, а рекреационное значение. Они служат рекреационной средой для местного населения, а сам туризм и рекреация более массовы, чем в горах. Кроме того, выводы из советского опыта массовой рекреационно-досуговой организации гласят об оптимальности пеших и водных в качестве «быстрых» видов маршрутов [5]. Это позволяет заключить, что равнинные водные объекты по сравнению с горными наиболее подходят для организации экотуристских программ с их экспресс характером, а вовлечение крупных водных объектов (в том числе на ООПТ) в эстетические экскурсионные маршруты вдоль берегов, естественнонаучные и историко-культурные экскурсии диверсифицируют туристско-рекреационную деятельность и собственно экологический туризм [26].

Систему планирования и организации водозависимого туризма формируют запросы потребителя, тесно увязанные с географическими особенностями места. Так, на равнинах отдельные участки судоходных рек с круизами и некоторые бальнеологические местности выступают в качестве туристских дестинаций (наравне с городами), в то время как остальная часть системы туризма в этих местах менее развита [5]. Запрос на наблюдение выразительных черт ландшафта обуславливает обособление локаций (фокусов, узлов) со специфичными явлениями: прибрежными обрывами, скалами, пещерами, валунами, быстрыми

участками реками, озерами, водопадами, обзорными точками с участием акваторий [12]. Особая значимость принадлежит речным устьям как самобытному ландшафту с уникальными формами рельефа (песчаные косы, мысы, обрывы) и проявлениями (слияние потоков разного цвета и мутности, повышенная динамика ландшафта), что привлекательнее при осмотре, наблюдении и изучении [69]. В ряде случаев, «речное богатство... (разветвленность речной сети, чистая вода верховьев, скульптурные долины, водохранилища, навигационная связь» имеет наивысшую (главную) значимость среди составляющих туристского потенциала [7, с. 81].

Учитывая сказанное, и, прежде всего, тренды современного природно-ориентированного туризма (смещение активности в узкие полосы вдоль автодорог, приверженность комфорту и инфраструктуре, запрос на качественные рекреационные услуги в пределах кратковременной доступности), заключим, что эти запросы пространственно и функционально сближают природные водные объекты и транспортную инфраструктуру, увязывая их в единую территориальную туристско-рекреационную систему и делегируя им первостепенную значимость в проектировании экологического туризма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа источников, посвященных пространственной организации и внутренней структуризации туристско-рекреационной деятельности, приводят к выводу о дефиците идей о территориальном и внутреннем устройстве экологического туризма. Преобладающим идейно и результативно, а также наиболее детально изученным вопросом является региональная организация туризма и рекреации, ключевые понятия в которой – региональная система отрасли и ее пространственный каркас. Следуя логике размышлений и полученным результатам, очевидно, что в случае обособления экологического туризма в соответствующую отрасль экономики, к ней станут применимы все ранее достигнутые разработки общего характера. Пока такого не случилось.

Однако, попытка пространственной систематизации экологического туризма по этой схеме уже на этапе предварительной концептуализации сталкивается с необходимостью учета ряда нюансов, кроющихся в сущности экологического туризма, экосистемных и идеологических особенностях слагающих его компонентов. Также и формальное заимствование положений теории экокarakса пока выглядит слабо обоснованным и малоэффективным. Поэтому и примеры интеграции экотуристских элементов в действующие научные представления и логические схемы пока недостаточно стройны и неубедительны.

Подобные выводы сделаны в области маршрутизации экологического туризма и роли водных объектов в пространственно-функциональной его организации. Пока наработки здесь носят единичный, частный, локальный и сугубо практикоориентированный характер, а сами разработки ведутся отдельными исследователями в непрофильных коллективах.

И все же, обобщая массив данных через призму экологического туризма, считаем целесообразным в качестве базисных (магистральных) для его каркасной концепции рассматривать следующие положения:

1. Исходя из трактовок экологического туризма, физической (материальной) основой его является система

ООПТ, конфигурация которой, следовательно, и формирует его укрупненную пространственную схему. Более чем вековой процесс формирования национальной природоохранной системы и его региональных подразделений обеспечил практически равномерное распределение отдельных ООПТ в регионах. С точки зрения развития экотуризма это гарантирует не только максимальную природную представленность, но и доступность для потребителя (в том числе, местного) и организаторов, поскольку сближает фокусные территории экотуризма с элементами систем транспорта и расселения.

2. Слагающие экологический туризм элементы разной природы (экосистемные, социальные, экономические, инфраструктурные) формируют экотуристский каркас на ООПТ как управляемую (администрируемую) и управляющую (режимную) независимую структуру, служащую компенсации расширенного доступа посетителей на охраняемые территории.

3. Физически каркас состоит из элементов природного, туристско-рекреационного и экологического каркасов. Каждый из элементов включается в экотуристский каркас с учетом места и роли в изначальном каркасе, что делегирует объединяющей структуре целостность и мультифункциональность.

4. Ядрами экотуристского каркаса выступают наиболее выразительные (информационные) природные и специфические производственные доминанты вне заповедного ядра, но соответствующие ему по содержанию. Связующими элементами – экомаршруты, технологическая (внутренняя) и внешняя транспортная сети.

5. В силу предпочтительности в общерекреационных практиках, водные объекты (в форме медико-биологических, пейзажно-эстетических, информационно-познавательных качеств) выступают в экологическом туризме ядерными элементами пространственного каркаса.

6. Учитывая необходимость специальных компенсаторных структур, обеспечивающих экологическую безопасность (приемлемость) рекреационных практик при их организации на ООПТ, в экотуристском каркасе необходимы дублирующие элементы для снижения рекреационной нагрузки.

Не смотря на обширную практику экологического туризма и даже предпринимаемые попытки ее анализа, пока невозможно сформулировать внятных теоретических выводов по причине отсутствия единых концепции и методик. Разработанные на положениях фундаментальных знаний предложения носят поисковый характер и могут стать отправной точкой научных дискуссий в области пространственной и функциональной систематизации экологического туризма.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 25-27-20032 «Оценка потенциала и возможностей реализации эколого-приемлемых принципов развития водно-зависимых рекреационных практик на особо охраняемых природных территориях (ООПТ) Алтайского края».

ACKNOWLEDGMENT

The study was supported by the Russian Science Foundation grant N 25-27-20032 "Assessment of the Potential and Possibilities for the Implementation of Environmentally

Friendly Principles for the Development of Water-dependent Recreational Practices in Specially Protected Natural Areas of the Altai Territory”.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 56642-2021 Туристские услуги. Экологический туризм. Общие требования. Москва, Российский институт стандартизации, 2022. 12 с.
2. Черных Д.В., Лубенец Л.Ф. Познавание ландшафта – неисчерпаемый ресурс для экологического туризма (размышления на материале Тигирекского заповедника) // В кн. Экологический туризм: современные векторы развития / под редакцией О.Ю. Гурьевских и др. Екатеринбург: Уральский государственный педагогический университет, 2022. С. 80–86.
3. Зырянов А.И. Географические технологии в проектах развития инфраструктуры туризма // География и туризм. 2018. N 1. С. 61–71.
4. Теория рекреационной географии / сост. В. П. Преображенский и др. М.: АН СССР, Ин-т географии, 1988. 54 с.
5. Гудковских М.В., Зырянов А.И. Туризм на равнине // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2015. Т. 1. N 3(3). С. 30–42.
6. Зырянов А.И., Зырянова И.С. Самостоятельные путешествия: маршрутное планирование. Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2015. 154 с.
7. Зырянов А.И. Географические основания регионального туристского планирования // География и туризм. Сборник научных трудов. Т. 3. Пермский государственный университет. Пермь, 2006. С. 75–84.
8. Астанин Д.М. Использование каркасного метода в планировании и функциональном зонировании территорий, благоприятных для организации экотуризма (на примере центральной части Восточного Саяна) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2017. N 3. С. 51–60.
9. Амеликина Д.В. Современные теоретические подходы к пониманию и актуальная проблематика исследований территориальной организации рекреации и туризма // Вестник ТвГУ. Серия "География и геоэкология". 2020. N 2(30). С. 43–59.
10. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20.09.2019 г. № 2129-р «Об утверждении стратегии развития туризма в Российской Федерации на период до 2035+года» (в ред. Постановления Правительства Российской Федерации от 23.11.2020 N 1903; Распоряжения Правительства Российской Федерации от 07.02.2022 № 187-р). URL: <http://government.ru/docs/all/123838/> (дата обращения: 21.04.25)
11. Чибилёва В.П., Чибилёв А.А. Каркасный подход в изучении пространственной структуры территории // Развитие науки и образования. 2018. Т. 2. С. 194–201.
12. Шарыгин М.Д., Столбов В.А. Понятие территориальной организации в современной социально-экономической географии // Материалы международной научной конференции «Социально-экономическая география – 2011: Теория и практика». Ассоциация российских географов-обществоведов; Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта. 2011. С. 46–50.
13. Методические рекомендации по подготовке схем территориального планирования субъектов Российской Федерации: утверждены приказом Минрегиона России от 19.04.2013 N 169. URL: <https://www.itpgrad.ru/node/600> (дата обращения: 12.06.2025)
14. Пономарев А.А., Байбаков Э.И., Рубцов В.А. Экологический каркас: анализ понятий // Ученые записки Казанского университета. 2012. Т.154, кн. 3. С. 228–238.
15. Культурный ландшафт как объект наследия / Под ред. Ю.А. Веденина, М.Е. Кулешовой. М.: Институт Наследия; СПб.: Дмитрий Буланин, 2004. 620 с.
16. Чибилёва В.П. Природно-экологический каркас Оренбургской области и его роль в формировании рекреационного потенциала // Проблемы геоэкологии и степеведения. Т. II. Развитие научной школы в Институте степи УрО РАН. Екатеринбург, 2010. С. 285–294.
17. Зырянов А.И., Мышлявцева С.Э. Технология развития туризма в новом районе // Региональные исследования. 2021. N 4 (34). С. 49–56.
18. Мышлявцева С.Э. Сеть туристских маршрутов и охраняемые природные территории в регионах Урала // Географический вестник. 2007. N 1–2 (5–6). С. 193–197.
19. Антропов Д.В., Фомина А.В. Формирование эколого-рекреационного каркаса Ивановской области // Международный сельскохозяйственный журнал. 2019. N 4. С. 33–37.
20. Редькин А.Г., Маммадова А., Отто О.В., Сухова М.Г., Журавлева О.В. Теоретико-методическое обоснование разработки эколого-рекреационного каркаса Республики Алтай // Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 100-летию подготовки в Томском государственном университете специалистов в области наук о Земле «Динамика и взаимодействие геосфер Земли». Том III. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ. 2021. С. 172–175.
21. Мышлявцева С.Э., Семенов В.В. Мониторинг туристских маршрутов природного парка «Пермский» // География и туризма. 2019. N 2. С. 96–101.
22. Назаров Н.Н., Фролова И.В. Береговые зоны водохранилищ как элементы рекреационного каркаса города (на примере Перми) // Известия Алтайского государственного университета. 2012. N 3-2 (75). С. 81–84.
23. Назаров Н.Н., Фролова И.В. Природно-рекреационный потенциал береговых геосистем водохранилищ как элементов рекреационного каркаса города // Географический вестник. 2012. N 3 (22). С. 5–14.
24. Худеньких Ю.А. Подходы к оценке туристского потенциала территории на примере Пермского края // География и туризм. Сборник научных трудов. Т. 2. Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Пермский государственный университет". Пермь, 2006. Издательство: Пермский государственный университет. С. 217–230.
25. Унагаева Н.А. Сибирский город и река: особенности рекреационного водопользования в Красноярске // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Вып. 3(88). С. 276–290.
26. Чибилёв А.А. (мл.), Григорьевский Д.В., Падалко Ю.А. К вопросу о формировании туристской легенды в рамках организации рекреационно-туристских кластеров в Оренбургской области // Успехи современного естествознания. 2017. N 12. С. 267–272.
27. Научная электронная библиотека www.elibrary.ru. URL: <https://www.elibrary.ru/defaultx.asp> (дата обращения: 07.05.2025)
28. Булатова Е.К. Подход ландшафтного урбанизма при реконструкции городских набережных в условиях крупного города // Урбанистика. 2020. N 3. С. 9–19.
29. Зырянов А.И., Гудковских М.В. Природная зональность как принцип туристского районирования // Вестник Удмуртского университета. 2020. Т. 30. Вып. 3. С. 332–339.
30. Стоянцева Н.В. Экологический каркас как основа оптимизации территориальной организации природопользования (на примере Алтайского края) // Проблемы региональной экологии. 2012. N 3. С. 186–191.
31. Елизаров А.В. Экологический каркас – стратегия степного природопользования XXI в. // Самарская Лука. 2008. Т. 17. N 2 (24). С. 289–317.
32. Родоман Б.Б. Поляризованный ландшафт: полвека спустя // Известия РАН. Серия географическая. 2021. Т. 85. N 3. С. 467–480.
33. Завальяускас П. Геосистемная концепция планировочного природного каркаса // Теоретические и прикладные проблемы ландшафтоведения: Тез. XIII Всесоюз. совещ. по ландшафтоведению. Л.: ГО АН СССР, 1988. С. 102–104.
34. Родоман Б.Б. Поляризация ландшафта как средство сохранения биосферы и рекреационных ресурсов // Ресурсы, среда, расселение. М.: Наука, 1974. С. 150–162.
35. Селиверстов В.Е. Региональное стратегическое планирование: от методологии к практике. Новосибирск: ИЭОП СО РАН, 2013. 436 с.
36. Александрова А.Ю., Сорокин Д.П. Зарождение и развитие туристского опорного каркаса Рязанской области // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2019. N 2. С. 115–131. DOI: 10.18384/2310-7189-2019-2-115-131
37. Исмагилова С.Х., Залетова Е.А. Формирование ландшафтно-рекреационного и транспортного каркасов городского округа г. Казань // Известия КГАСУ. 2016. N 3. С. 110–117.
38. Астанин Д.М. Методика формирования функциональных зон ООПТ для развития экологического туризма // Архитектор: известия вузов. 2018. N 3 (63). С. 4.
39. Мажар Л.Ю. Туризм в пространстве и времени: взгляд географа // Современные проблемы сервиса и туризма. 2014. N 1. С. 16–23.
40. Пирожник И.И. Структурно-функциональные особенности рекреационного пространства и формирование туристского продукта Беларуси // Туризм и региональное развитие / отв. ред. Л.Ю. Мажар. Смоленск: Универсум, 2008. С. 124–136.
41. Дунец А.Н. Туристское пространство как научная категория в исследованиях туризма // Ползуновский альманах. 2015. N 3. С. 86–90.
42. Тарасенок А.И. Новые подходы к структурированию туристского пространства: от рекреационных районов к геоэкономическим системам // Вестник БГУ. Сер. 2. Химия. Биология. География. 2010. N 1. С. 95–98.

43. Котляков В.М., Кружалин В.И., Мажар Л.Ю. Теоретические основы развития туризма на межрегиональном уровне // Туризм и региональное развитие. 2020. N 1. С. 17–30.
44. Кружалин В.И., Мажар Л.Ю. Геоэкономический подход к освоению туристского пространства в контексте устойчивого развития внутреннего туризма в России // Географическая среда и живые системы. 2023. N 4. С. 7–19.
45. Зырянов А.И. Региональная топонимия туризма // География и туризм. Пермь, 2005. С. 81–99.
46. Кружалин В.И., Шабалина Н.В., Кружалин К.В. Теоретико-методологические подходы к туристско-рекреационному проектированию // Вопросы географии. Вып. 139: Теория и практика туризма. М.: Издательский дом «Кодекс», 2014. С. 100–121.
47. Конышев Е.В. Концептуальные модели региональной туристско-рекреационной системы (функциональный и пространственный уровни) // Вестник ЗабГУ. 2015. N 12 (127). С. 99–109.
48. Исаченко А.Г. Формирование историко-географических краев Европейской России в XVI–XVII вв. // Известия Русского географического общества. 2016. Т. 148. Вып. 2. С. 1–21.
49. Зырянов А.И. Дробное районирование и площадное развитие туризма // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2018. N 5. С. 44–51.
50. Зырянов А.И., Семиглазова В.А. Сельский туризм: от географических конструктов к моделям развития // География и природные ресурсы. 2021. N 1 С. 33–41.
51. Гатаулин Р.Ф. Формирование новой каркасной модели пространственного развития как результат трансформации разнородных территориальных систем // Вестник Евразийской науки. 2020. N 2. <http://dx.doi.org/10.15862/32ECVN220>
52. Конышев Е.В. Географический взгляд на структуризацию туристско-рекреационного пространства // География и туризм. 2019. N 1. С. 5–10.
53. Лисова О.С., Григорьевская А.Я. Якименко О.В., Прохорова Н.Л. Охраняемые территории как «ядра» рекреационного каркаса // Лесотехнический журнал. 2016. N 1. С. 93–104. DOI: 10.12737/18731
54. Зырянов А.И., Слащёв Д.Н. Виды туристско-рекреационной деятельности на особо охраняемых природных территориях Пермского края // Вестник Удмуртского университета. 2018. Т. 28. Вып. 3. С. 314–320.
55. Гурьевских О.Ю., Скок Н.В., Ширыкалова М.И., Долгушина Ю.А., Юровских А.М., Максимов Л.В., Лаптев Н.А. Ландшафтное проектирование и разработка экологических маршрутов Свердловской области // В кн. Экологический туризм: современные векторы развития. Екатеринбург : Уральский государственный педагогический университет, 2022. С. 212–229.
56. Гурьевских О.Ю., Долгушина Ю.А., Юровских А.М. Анализ ландшафтной структуры Свердловской области как основа разработки региональной стратегии развития экологического туризма / В кн. Экологический туризм: современные векторы развития. Екатеринбург : Уральский государственный педагогический университет, 2022. С. 13–22.
57. Конышев Е.В., Колесова Ю.А., Кузнецова А.И., Шпенглер А.В., Веприкова А.А. Туристские маршруты как компонент туристско-рекреационного пространства Кировской области // Успехи современного естествознания. 2021. N 7. С. 39–46.
58. Саранча М.А., Голубева О.А. Методические подходы к исследованию состояния туристской маршрутной сети (на примере Приволжского федерального округа) // Сервис в России и за рубежом. 2015. Т. 9. N 2 (58). С. 194–203.
59. Мосалев А.И., Саранча М.А. Туристская маршрутная сеть России: систематизация // Актуальные проблемы экономики. 2015. Т. 169. N 7. С. 444–453.
60. Волкова Т.А., Кучер М.О., Анисимова В.В. Территориальная организация развития туризма на Черноморском побережье Краснодарского края // Московский экономический журнал. 2024. N 10. С. 116–129.
61. Джанджугазова Е.А. Туристско-рекреационное проектирование: учебник. М.: Издательский центр «Академия», 2016. 272 с.
62. Зырянов А.И., Королев А.Ю. Логика туристского путешествия и разработка эталонных маршрутов // Географический вестник. 2009. N 2 (10). С. 78–88.
63. Исаченко Т.Е. Подходы к пространственной организации рекреации и туризма на различных территориальных уровнях // Известия русского географического общества. 2022. Т. 154. N 3. С. 47–65.
64. Лутченко С.И. Планировочный и природный каркасы региона, как основа для формирования туристско-рекреационных зон // Инженерный вестник Дона. 2021, N 10. Электронный научный журнал: vdon.ru/magazine/archive/n10y2021/7241 (дата обращения: 12.06.2025).
65. Чибилёва В.П., Филимонова И.Ю. Туристско-рекреационный каркас Оренбургского региона как эффективный механизм управления социально-экономическим развитием территории // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2022. N 4. С. 88–94. <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2022/4/88-94>
66. Архипова И.В., Андреева И.В., Цибликина С.В. Оценка водопотребления и рекреационной нагрузки водозависимых рекреационных практик на Телецком озере // Известия АО РГО. 2021. N 3. С. 5–19.
67. Васильев Ю.С., Кукушкин В.А. Рекреационное использование водохранилищ: проблемы и решения. М.: Наука, 1990. 152 с.
68. Голубчиков Ю.Н., Кружалин В.И. Геотуризм в концепциях наследия и образования // Географический вестник. 2023. N 4 (67). С. 160–171. DOI: 10.17072/2079-7877-2023-4-160-171
69. Зырянов А.И. Речные устья как туристские объекты // Двадцать восьмое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов: доклады и краткие сообщения. 8-10 октября 2013 г. Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2013. С. 107–109.

REFERENCES

1. GOST R 56642-2021 *Turistskie uslugi. Ehkologicheskii turizm. Obshchie trebovaniya* [GOST R 56642-2021. Tourism services. Ecological tourism. General requirements]. Moscow, Russian Institute of Standardization Publ., 2022, 12 p. (In Russian)
2. Chernykh D.V., Lubenets L.F. Cognition of the landscape is an inexhaustible resource for ecological tourism (reflections on the material of the Tigirek Reserve). In: *Ehkologicheskii turizm: sovremennye vektory razvitiya* [Ecological tourism: modern vectors of development: a collective monograph]. Yekaterinburg, Ural State Pedagogical University Publ., 2022, pp. 80–86. (In Russian)
3. Zyryanov A.I. Geographical technologies in tourism infrastructure development projects. *Geografiya i turizm* [Geography and tourism]. 2018, no. 1, pp. 61–71. (In Russian)
4. *Teoriya rekreatsionnoi geografii* [Theory of recreational geography]. Moscow, USSR Academy of Sciences, Institute of Geography Publ., 1988, 54 p. (In Russian)
5. Gudkovskikh M.V., Zyryanov A.I. Tourism on the plain. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ehkologiya i prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Tyumen State University. Ecology and nature management]. 2015, vol. 1, no. 3(3), pp. 30–42. (In Russian)
6. Zyryanov A.I., Zyryanova I.S. *Samostoyatel'nye puteshestviya: marshrutnoe planirovanie* [Independent travel: route planning]. Perm, PGNIU Publ., 2015, 154 p. (In Russian)
7. Zyryanov A.I. [Geographical foundations of regional tourism planning]. In: *Geografiya i turizm* [Geography and tourism]. 2006, vol. 3, pp. 75–84. (In Russian)
8. Astanin D.M. The use of the frame method in planning and functional zoning of territories favorable for the organization of ecotourism (on the example of the central part of the Eastern Sayan). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya* [Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography]. 2017, no. 3, pp. 51–60. (In Russian)
9. Amelkina D.V. Modern theoretical approaches to understanding and current issues of research on the territorial organization of recreation and tourism. *Vestnik TVGU. Seriya "Geografiya i geoehkologiya"* [TvSU Bulletin. Geography and Geoecology]. 2020, no. 2(30), pp. 43–59. (In Russian)
10. Decree of the Government of the Russian Federation dated 09.20.2019 N 2129-р (as amended on 05/29/2025) "On approval of the Strategy for the Development of Tourism in the Russian Federation for the period up to 2035" (as amended Resolutions of the Government of the Russian Federation No. 1903 dated 11.23.2020; Orders of the Government of the Russian Federation No. 187-р dated 02/07/2022). (In Russian) Available at: <http://government.ru/docs/all/123838/> (accessed: 04.21.25)
11. Chibileva V.P., Chibilev A.A. A framework approach in studying the spatial structure of a territory. In: *Razvitie nauki i obrazovaniya* [Development of science and education]. 2018, vol. 2, pp. 194–201. (In Russian)
12. Sharygin M.D., Stolbov V.A. *Ponyatie territorial'noi organizatsii v sovremennoi sotsial'no-ehkonomicheskoi geografii* [The concept of territorial organization in modern socio-economic geography]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Sotsial'no-ehkonomicheskaya geografiya – 2011: Teoriya i praktika»* [Materials of the international scientific conference "Socio-economic geography 2011: Theory and practice"]. Association of Russian Geographers and Social Scientists; Immanuel Kant Baltic Federal University, 2011, pp. 46–50. (In Russian)
13. Methodological recommendations for the preparation of territorial planning schemes for the subjects of the Russian Federation: approved by Order of the Ministry of Regional Development of Russia dated 04.19.2013

- N 169. Available at: <https://www.itppgrad.ru/node/600> (accessed: 12.06.2025)
14. Ponomarev A.A., Baibakov E.I., Rubtsov V.A. [Ecological framework: an analysis of concepts]. In: *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta* [Scientific notes of Kazan University]. 2012, vol. 154, book 3, pp. 228–238. (In Russian)
 15. Vedenin Yu.A., Kuleshova M.E., eds. *Kul'turnyi landschaft kak ob"ekt naslediya* [Cultural landscape as a heritage site]. Moscow, Institute of Heritage; St. Petersburg: Dmitry Bulanin Publ., 2004, 620 p. (In Russian)
 16. Chibileva V.P. The natural and ecological framework of the Orenburg region and its role in the formation of recreational potential. In: *Problemy geohkologii i stepovedeniya* [Problems of geoeology and steppe studies. Vol. II. The development of a scientific school at the Institute of Steppe, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences]. Yekaterinburg, 2010, pp. 285–294. (In Russian)
 17. Zyryanov A.I., Myshlyaytseva S.E. Technology of tourism development in a new area. *Regional'nye issledovaniya* [Regional studies]. 2021, no. 4 (34), pp. 49–56. (In Russian)
 18. Myshlyaytseva S.E. A network of tourist routes and protected natural territories in the regions of the Urals. *Geograficheskii vestnik* [Geographical Bulletin]. 2007, no. 1-2 (5-6), pp. 193–197. (In Russian)
 19. Antropov D.V., Fomina A.V. Formation of the ecological and recreational framework of the Ivanovo region. *Mezhdunarodnyi sel'skokhozyaistvennyi zhurnal* [International Agricultural Journal]. 2019, no. 4, pp. 33–37. (In Russian)
 20. Redkin A.G., Mammadova A., Otto O.V., Sukhova M.G., Zhuravleva O.V. Teoretiko-metodicheskoe obosnovanie razrabotki ehkologo-rekreatsionnogo karkasa Respubliki Altai [Theoretical and methodological substantiation of the development of the ecological and recreational framework of the Altai Republic. Dynamics and interaction of the Earth's geospheres]. *Materialy Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 100-letiyu podgotovki v Tomskom gosudarstvennom universitete spetsialistov v oblasti nauk o Zemle «Dinamika i vzaimodeistvie geosfer Zemli»* [Materials of the All-Russian conference with international participation dedicated to the 100th anniversary of the training of specialists in the field of Earth sciences at Tomsk State University. In 3 volumes. Vol. III]. Tomsk, Tomsk Central Research Institute Publ., 2021, pp. 172–175. (In Russian)
 21. Myshlyaytseva S.E., Semenov V.V. Monitoring of tourist routes of the Perm's Nature Park. *Geografiya i turizm* [Geography and Tourism]. 2019, no. 2, pp. 96–101. (In Russian)
 22. Nazarov N.N., Frolova I.V. Coastal zones of reservoirs as elements of the recreational framework of the city (on the example of Perm). *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Altai State University]. 2012, no. 3-2 (75), pp. 81–84. (In Russian)
 23. Nazarov N.N., Frolova I.V. Natural and recreational potential of coastal geosystems of reservoirs as elements of the recreational framework of the city. *Geograficheskii vestnik* [Geographical Bulletin]. 2012, no. 3 (22), pp. 5–14. (In Russian)
 24. Khudenkikh Yu.A. Approaches to assessing the tourist potential of the territory on the example of the Perm Region. In: *Geografiya i turizm. Sbornik nauchnykh trudov* [Geography and tourism. Collection of scientific papers]. Perm, Perm State University Publ., 2006, vol. 2, pp. 217–230. (In Russian)
 25. Unagaeva N.A. Siberian city and river: features of recreational water use in Krasnoyarsk. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture]. 2022, iss. 3(88), pp. 276–290. (In Russian)
 26. Chibilev A.A. (jr.), Grigorevsky D.V., Padalko Yu.A. On the formation of a tourist legend in the framework of the organization of recreational and tourist clusters in the Orenburg region. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [The successes of modern natural science]. 2017, no. 12, pp. 267–272. (In Russian)
 27. Scientific Electronic Library www.elibrary.ru. Available at: <https://www.elibrary.ru/defaultx.asp> (accessed: 05.07.2025)
 28. Bulatova E.K. The approach of landscape urbanism in the reconstruction of urban embankments in a large city. *Urbanistika* [Urbanistics]. 2020, no. 3, pp. 9–19. (In Russian)
 29. Zyryanov A.I., Gudkovskikh M.V. Natural zonality as a principle of tourist zoning. *Vestnik Udmurtskogo universiteta* [Bulletin of the Udmurt University]. 2020, vol. 30, iss. 3, pp. 332–339. (In Russian)
 30. Stoyasheva N.V. Ecological framework as a basis for optimizing the territorial organization of nature management (on the example of the Altai Territory). *Problemy regional'noi ehkologii* [Problems of regional ecology]. 2012, no. 3, pp. 186–191. (In Russian)
 31. Elizarov A.V. Ecological framework – strategy of steppe nature management of the XXI century. *Samarskaya Luka* [Samarskaya Luka]. 2008, vol. 17, no. 2 (24), pp. 289–317. (In Russian)
 32. Rodoman B.B. Polarized landscape: half a century later. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya* [News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series]. 2021, vol. 85, no. 3, pp. 467–480. (In Russian)
 33. Kavalyauskas P. Geosystem concept of the planning natural framework. In: *Teoreticheskie i prikladnye problemy landshaftovedeniya: Tez. KhIII Vsesoyuz. soveshch. po landshaftovedeniyu* [Theoretical and applied problems of landscape science: Thesis XIII All-Union the meeting on landscape studies]. Leningrad, GO Academy of Sciences of the USSR Publ., 1988, pp. 102–104. (In Russian)
 34. Rodoman B.B. Landscape polarization as a means of preserving the biosphere and recreational resources. In: *Resursy, sreda, rasselenie* [Resources, environment, settlement]. Moscow, Nauka Publ., 1974, pp. 150–162. (In Russian)
 35. Seliverstov V.E. *Regional'noe strategicheskoe planirovanie: ot metodologii k praktike* [Regional strategic planning: from methodology to practice]. Novosibirsk, IEOP SB RAS, 2013, 436 p. (In Russian)
 36. Alexandrova A.Yu., Sorokin D.P. The origin and development of the tourist support frame of the Ryazan region. *Bulletin of the Moscow State Regional University. Series: Natural Sciences*, 2019, no. 2, pp. 115–131. (In Russian) <https://doi.org/10.18384/2310-7189-2019-2-115-131>
 37. Ismagilova S.Kh., Zaletova E.A. Formation of landscape, recreational and transport frameworks of the urban district of Kazan. *Izvestiya KGASU*, 2016, no. 3, pp. 110–117. (In Russian)
 38. Astanin D.M. Methods of formation of functional zones of protected areas for the development of ecological tourism. [Architecton: izvestiya vuzov]. 2018, no. 3 (63). Available at: http://archvuz.ru/2018_3/4 (accessed: 12.06.2025).
 39. Mazhar L.Y. Tourism in space and time: a geographer's view. *Sovremennye problemy servisa i turizma* [Modern problems of service and tourism]. 2014, no. 1, pp. 16–23. (In Russian)
 40. Pirozhnik I.I. Structural and functional features of the recreational space and the formation of the tourist product of Belarus. *Turizm i regional'noe razvitie* [Tourism and regional development]. Smolensk, Universum Publ., 2008, pp. 124–136. (In Russian)
 41. Dunets A.N. Tourist space as a scientific category in tourism research. *Polzunovskii al'manakh* [Polzunovsky almanac]. 2015, no. 3, pp. 86–90. (In Russian)
 42. Tarasenko A.I. New approaches to structuring the tourist space: from recreational areas to geo-economic systems. *Vestnik BGU. Ser. 2. Khimiya. Biologiya. Geografiya* [Bulletin of BSU. Series 2. Chemistry. Biology. Geography]. 2010, no. 1, pp. 95–98. (In Russian)
 43. Kotlyakov V.M., Kruzhalin V.I., Mazhar L.Yu. Theoretical foundations of tourism development at the interregional level. *Turizm i regional'noe razvitie* [Tourism and regional development]. 2020, no. 1, pp. 17–30. (In Russian)
 44. Kruzhalin V.I., Mazhar L.Yu. Geosystem approach to the development of tourist space in the context of sustainable development of domestic tourism in Russia. *Geograficheskaya sreda i zhivye sistemy* [Geographical environment and living systems]. 2023, no. 4, pp. 7–19. (In Russian)
 45. Zyryanov A.I. Regional topology of tourism. *Geografiya i turizm* [Geography and tourism]. Perm, 2005, pp. 81–99. (In Russian)
 46. Kruzhalin V.I., Shabalina N.V., Kruzhalin K.V. Theoretical and methodological approaches to tourist and recreational design. [Geography issues, Iss. 139. Theory and practice of tourism]. Moscow, Codex Publ., 2014, pp. 100–121. (In Russian)
 47. Konyshchev E.V. Conceptual models of the regional tourist and recreational system (functional and spatial levels). *Vestnik ZabGU* [Bulletin of ZabGU]. 2015, no. 12 (127), pp. 99–109. (In Russian)
 48. Isachenko A.G. Formation of historical and geographical territories of European Russia in the XVI–XVII centuries. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva* [News of the Russian Geographical Society]. 2016, vol. 148, iss. 2, pp. 1–21. (In Russian)
 49. Zyryanov A.I. Fractional zoning and areal development of tourism. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya* [Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography]. 2018, no. 5, pp. 44–51. (In Russian)
 50. Zyryanov A.I., Semiglazova V.A. Rural tourism: from geographical constructs to development models. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources]. 2021, no. 1, pp. 33–41. (In Russian)
 51. Gataullin R.F. Formation of a new framework model of spatial development as a result of transformation of multi-level territorial systems. *The Eurasian Scientific Journal*, 2020, vol. 2(12). Available at: <https://esj.today/PDF/32ECVN220.pdf> (In Russian). doi: 10.15862/32ECVN220
 52. Konyshchev E.V. Geographical view on the structuring of tourist and recreational space. *Geografiya i turizm* [Geography and tourism]. 2019, no. 1, pp. 5–10. (In Russian)
 53. Lisova O.S., Grigorievskaya A.Ya., Yakimenko O.V., Prokhorova N.L. Protected areas as "cores" of the recreational framework. *Forestry*

engineering magazine, 2016, no. 1, pp. 93–104. (In Russian) doi: 10.12737/18731

54. Zyryanov A.I., Slashchev D.N. Types of tourist and recreational activities in specially protected natural territories of the Perm Territory. *Vestnik Udmurtskogo universiteta* [Bulletin of the Udmurt University]. 2018, vol. 28, iss. 3, pp. 314–320. (In Russian)

55. Guryevskikh O.Yu., Skok N.V., Shirykalova M.I., Dolgushina Yu.A., Yurovskikh A.M., Maksimov L.V., Laptev N.A. Landscape design and development of ecological routes in the Sverdlovsk region. In: *Ehkologicheskii turizm: sovremennye vektory razvitiya. Ekaterinburg : Ural'skii gosudarstvennyi pedagogicheskii universitet* [Ecological tourism: modern vectors of development]. Yekaterinburg, Ural State Pedagogical University Publ., 2022, pp. 212–229. (In Russian)

56. Guryevskikh O.Yu., Dolgushina Yu.A., Yurovskikh A.M. Analysis of the landscape structure of the Sverdlovsk region as a basis for developing a regional strategy for the development of ecological tourism. In: *Ehkologicheskii turizm: sovremennye vektory razvitiya. Ekaterinburg : Ural'skii gosudarstvennyi pedagogicheskii universitet* [Ecological tourism: modern vectors of development]. Yekaterinburg, Ural State Pedagogical University Publ., 2022, pp. 13–22. (In Russian)

57. Konyshov E.V., Kolesova Yu.A., Kuznetsova A.I., Shpengler A.V., Veprikova A.A. Tourist routes as a component of the tourist and recreational space of the Kirov region. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Successes of modern natural science]. 2021, no. 7, pp. 39–46. (In Russian)

58. Sarancha M.A., Golubeva O.A. Methodological approaches to the study of the state of the tourist route network (on the example of the Volga Federal District). *Servis v Rossii i za rubezhom* [Service in Russia and abroad]. 2015, vol. 9, no. 2 (58), pp. 194–203. (In Russian)

59. Mosalev A.I., Sarancha M.A. Tourist route network of Russia: systematization. *Aktual'nye problemy ehkonomiki* [Actual problems of the economy]. 2015, vol. 169, no. 7, pp. 444–453. (In Russian)

60. Volkova T.A., Kucher M.O., Anisimova V.V. Territorial organization of tourism development on the Black Sea coast of the Krasnodar Territory. *Moskovskii ekonomicheskii zhurnal* [Moscow Economic Journal]. 2024, no. 10, pp. 116–129. (In Russian)

61. Dzhandzhugazova E.A. *Turistsko-rekreatsionnoe proektirovanie* [Tourist and recreational design]. Moscow, Akademiya Publ., 2016, 272 p. (In Russian)

62. Zyryanov A.I., Korolev A.Yu. The logic of tourist travel and the development of reference routes. *Geograficheskii vestnik* [Geographical Bulletin]. 2009, no. 2 (10), pp. 78–88. (In Russian)

63. Isachenko T.E. Approaches to spatial organization of recreation and tourism at various territorial levels. *Izvestiya russkogo geograficheskogo obshchestva* [Izvestiya Russian geographical society]. 2022, vol. 154, no. 3, pp. 47–65. (In Russian)

64. Lutchenko S.I. Planning and natural frameworks of the region as a basis for the formation of tourist and recreational zones. *Engineering Bulletin of the Don*, 2021, N. 10. Available at: vdon.ru/magazine/archive/n10y2021/7241 (accessed: 12. 06.2025). (In Russian)

65. Chibileva V.P., Filimonova I.Yu. The tourist and recreational framework of the Orenburg region as an effective mechanism for managing the socio-economic development of the territory. *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*, 2022, no. 4, pp. 88–94. (In Russian) <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2022/4/88-94>

66. Arkhipova I.V., Andreeva I.V., Tsilikina S.V. Assessment of water consumption and recreational load of water-dependent recreational practices on Lake Teletskoye. *Izvestiya AO RGO*, 2021, no. 3, pp. 5–19. (In Russian)

67. Vasiliev Yu.S., Kukushkin V.A. *Rekreatsionnoe ispol'zovanie vodokhranilishch: problemy i resheniya* [Recreational use of reservoirs: problems and solutions]. Moscow, Nauka Publ., 1990, 152 p. (In Russian)

68. Golubchikov Yu.N., Kruzhalin V.I. Geotourism in concepts of heritage and education. *Geographical bulletin*, 2023, no. 4 (67), pp. 160–171. (In Russian) DOI: 10.17072/2079-7877-2023-4-160-171

69. Zyryanov A.I. River estuaries as tourist sites. In: *Dvadsat' vos'moe plenarnoe mezhvuzovskoe koordinatsionnoe soveshchanie po probleme ehrozionnykh, ruslovykh i ust'evykh protsessov: doklady i kratkie soobshcheniya* [Twenty-eighth plenary interuniversity coordination meeting on the problem of erosion, riverbed and estuarine processes: reports and brief reports]. Perm, 2013, pp. 107–109. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Ирина В. Андреева разработала идею исследования, концепцию и структуру статьи, собрала и проанализировала материал, подготовила текст рукописи. Антон В. Головин собрал, обработал и проанализировал материал. Ирина Д. Рыбкина разработала идею исследования, концепцию и структуру статьи, проводила авторский надзор идей и этики исследования. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Irina V. Andreeva developed the idea of the research, developed the concept and structure of the article, undertook collection and analysis of the material and prepared the text of the manuscript. Anton V. Golovin undertook collection, processing and analysis of the material. Irina D. Rybkina developed the idea of the research, developed the concept and structure of the article, and supervised the idea of research. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Ирина В. Андреева / Irina V. Andreeva <https://orcid.org/0000-0003-4010-0826>

Антон В. Головин / Anton V. Golovin <https://orcid.org/0000-0003-0946-9393>

Ирина Д. Рыбкина / Irina D. Rybkina <https://orcid.org/0000-0002-0081-9652>

Обзорная статья / Review article
УДК 621.583 + 620.92: 624.131.2
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-16



Современные тенденции использования низкопотенциальной тепловой энергии Земли в целях устойчивого развития

Валерий Р. Волошин¹, Константин В. Белов¹, Мин Оак Со¹, Людмила В. Боронина²

¹Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

²Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия

Контактное лицо

Валерий Р. Волошин, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ); 117997 Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23.
Тел. +79254144441
Email voloshinvr@mgri.ru
ORCID <https://orcid.org/0009-0003-1971-3852>

Формат цитирования

Волошин В.Р., Белов К.В., Мин Оак Со, Боронина Л.В. Современные тенденции использования низкопотенциальной тепловой энергии Земли в целях устойчивого развития // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 167-177.
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-16

Получена 21 августа 2025 г.

Прошла рецензирование 15 октября 2025 г.

Принята 25 октября 2025 г.

Резюме

Цель: рассмотреть современные тенденции в области использования низкопотенциальной тепловой энергии Земли посредством геотермальных теплонасосных систем (ГТСТ), обобщить их преимущества, проблемы и перспективы внедрения в России.

В статье приведён анализ принципов работы и конструктивных решений геотермальных систем, рассмотрены критерии эффективности, термодинамические основы, а также геоэкологические риски и преимущества их эксплуатации. Показано, что использование ГТСТ способствует снижению выбросов парниковых газов, уменьшению эффекта «теплового острова» в городах и улучшению качества атмосферного воздуха. Особое внимание уделено вопросам нормативного регулирования, технологическим барьерам и методам минимизации геоэкологических рисков при проектировании систем. Отмечена высокая энергоэффективность и экологическая устойчивость технологии, при этом указаны факторы, ограничивающие её широкое внедрение в России.

Геотермальные теплонасосные системы являются ключевым элементом устойчивой энергетической трансформации, способствуя декарбонизации, оптимизации теплового баланса и формированию экологически безопасной городской среды. Необходима разработка национальных стандартов, стимулирующих мер и интеграция ГТСТ в гибридные энергетические комплексы.

Ключевые слова

Геотермальные теплонасосные системы, низкопотенциальная энергия, возобновляемые источники, энергоэффективность, устойчивое развитие, тепловой насос, экологическая безопасность.

Modern trends in the utilisation of low-grade geothermal energy for sustainable development

Valeriy R. Voloshin¹, Konstantin V. Belov¹, Min Oak So¹, Lyudmila V. Boronina²

¹Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

²Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Principal contact

Valeriy R. Voloshin, Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University;
23 Miklukho-Maklaya St, Moscow, Russia 117997.
Tel. +79254144441

Email voloshinvr@mgri.ru

ORCID <https://orcid.org/0009-0003-1971-3852>

How to cite this article

Voloshin V.R., Belov K.V., Min Oak So, Boronina L.V.
Modern trends in the utilisation of low-grade geothermal energy for sustainable development.
South of Russia: ecology, development. 2025;
20(4):167-177. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-16

Received 21 August 2025

Revised 15 October 2025

Accepted 25 October 2025

Abstract

To review current trends in the use of low-grade geothermal energy of the Earth through geothermal heat pump systems (GHPS), summarising their advantages, challenges and implementation prospects in Russia.

The article analyses the principles and structural designs of geothermal systems, performance criteria, thermodynamic aspects and environmental risks. It demonstrates that the use of GHPS reduces greenhouse gas emissions, mitigates the urban heat island effect and improves air quality. Particular attention is paid to regulatory issues, technical barriers and strategies for minimising geoecological risks during system design. The technology's high energy efficiency and environmental sustainability are highlighted, along with key factors constraining its large-scale adoption in Russia.

Geothermal heat pump systems are a cornerstone of sustainable energy transition, promoting decarbonisation, optimisation of heat balance and the creation of environmentally safe urban environments. Developing national standards, incentives and integrating GHPS into hybrid energy systems are considered necessary.

Key Words

Geothermal heat pump systems, low-grade energy, renewable energy, energy efficiency, sustainable development, heat pump, environmental safety.

ВВЕДЕНИЕ

В современной энергетике всё чаще используют возобновляемые источники. Особенно выделяется геотермальная энергия из верхних слоёв земли, которую получают с помощью геотермальных теплонасосных систем теплохладоснабжения (ГТСТ). Основное преимущество геотермальной энергии из верхних слоёв земли — она есть почти везде, в отличие от гидротермальных источников, которые встречаются только в определённых местах (районы современной тектонической активизации, горно-складчатые области, районы современного вулканизма). Эти системы могут генерировать тепло, и вырабатывать холод для зданий: осуществлять отопление, подавать горячую воду, бороться с гололёдом на тротуарах и дорогах [1].

В основном геотермальную энергию используют для отопления и охлаждения через ГТСТ. На эти системы приходится большая часть всей геотермальной мощности в мире. С 1995 года популярность ГТСТ растёт по ряду причин. Прежде всего из-за их экономической эффективности и экологичности [1–5].

Анализируя данные, приведенные на рис. 1, видно, что использование геотермальных тепловых насосов растёт высокими темпами. К концу 2020 года эти насосы по всему миру произвели около 600 000 ТДж энергии в год. Это намного больше, чем в 2015 и 2010 годах [2] (рис. 1).

В последние 30 лет ГТСТ стали популярнее, потому что они помогают экономить энергию при отоплении и охлаждении зданий, а ещё уменьшают выбросы углекислого газа.

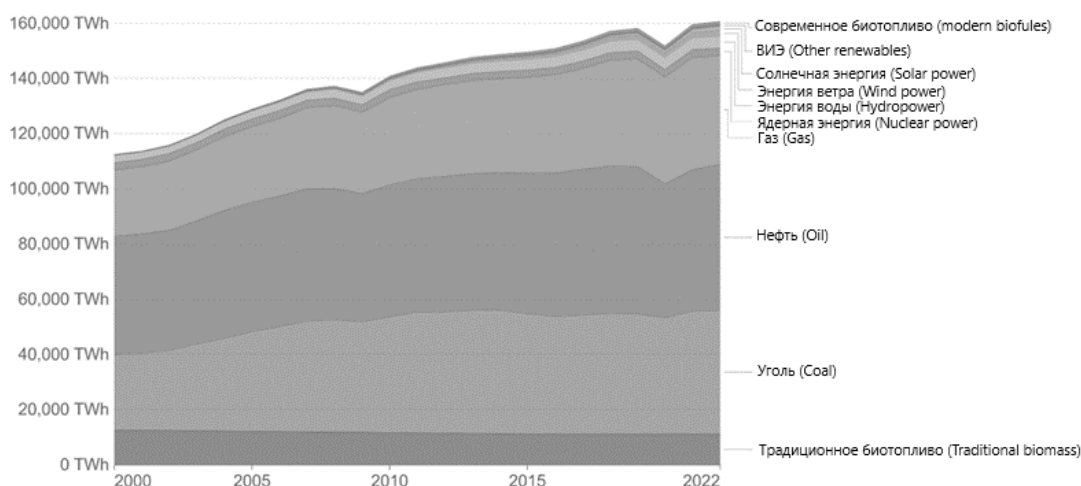


Рисунок 1. Использование тепловых ресурсов

Figure 1. Use of thermal resources

На сегодняшний день мировым лидером по использованию ГТСТ является Китай — установленная мощность установок достигла 30000 МВт, при годовой выработке 240 ТДж.

Установленная мощность ГТСТ в США составляет 20000 МВт при объеме годовой выработки 150000 ТДж. Развитие систем ГТСТ поддерживается государственной политикой и длительной историей популяризации технологии.

Швеция (10000 МВт, 60000 ТДж) и Германия (8000 МВт, 25000 ТДж) показывают эффективность

использования установленных мощностей, что свидетельствует о высоком уровне в проектировании систем, ориентированных на покрытие базовой тепловой нагрузки.

Финляндия (300 МВт, 1962 ТДж) и Австрия (228 МВт, 1094 ТДж) демонстрируют, что даже страны без внушительных общих мощностей могут достигать высоких показателей по удельному производству энергии, что говорит о высокой культуре эксплуатации и оптимальном режиме работы систем.

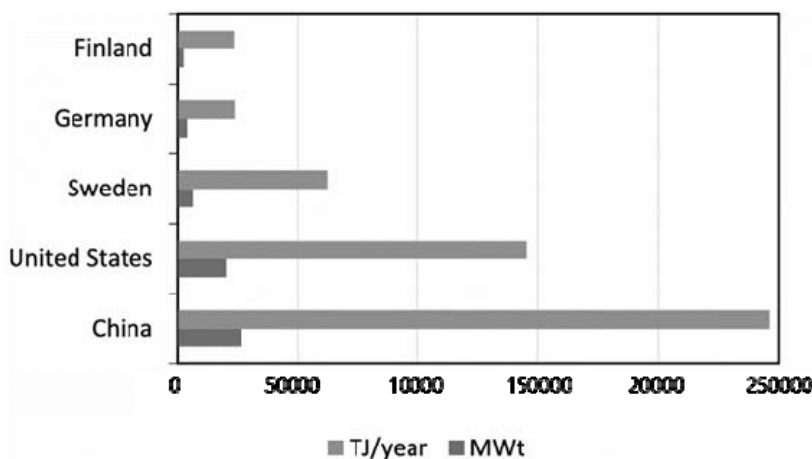


Рисунок 2. Потребления и установленной мощности

Figure 2. Consumption and installed capacity

Показатели России (1,2 МВт, 11,5 ТДж) и ряда других стран Восточной Европы указывают на наличие значительного нереализованного потенциала для внедрения данной технологии [1–13].

Прогнозируется дальнейшее увеличение количества ГТСТ в мире и рост их вклада в удельное производство энергии.

ОБСУЖДЕНИЕ

В современной мировой энергетике наблюдается устойчивая тенденция к расширению использования возобновляемых источников энергии. Среди них выделяется низкопотенциальная тепловая энергия поверхностных слоев Земли, которую получают посредством геотермальных теплонасосных систем (ГТСТ). Ключевое преимущество этого направления заключается в его практически повсеместной доступности, в отличие от «прямого» использования высокопотенциальных гидротермальных ресурсов, привязанных к специфическим геологическим регионам [6–13].

Любая геотермальная теплонасосная система теплоснабжения включает в себя четыре компонента:

1. Оборудование потребителя тепла: системы отопления, радиаторы, теплые полы, бойлеры для горячего водоснабжения.
2. Оборудование потребителя холода: системы кондиционирования воздуха, вентиляции, чиллеры.
3. Теплонасосное оборудование: основной компонент системы, преобразует низкопотенциальную энергию в высокопотенциальную. Наиболее распространены парокompрессионные машины, также используются абсорбционные, электрохимические и термоэлектрические аналоги.
4. Система сбора низкопотенциального тепла: грунтовый теплообменник, который извлекает энергию из земных недр или сбрасывает избытки тепла/холода обратно в грунт.

Теплонасосные установки являются устройствами, которые способны передавать тепловую энергию от низкопотенциального источника, к телу, имеющим более высокий тепловой потенциал. Согласно второму закону термодинамики, тепловая энергия, без затрат внешних сил, может переходить исключительно от более нагретого тела к менее нагретому. Поэтому, для осуществления цикла работы тепловой машины, необходимы дополнительные затраты энергии (прежде всего, электрической для работы компрессора). Процесс передачи тепла в обратном температурном напоре направлении, осуществляется в обратном цикле. С термодинамической точки зрения, теплонасосная установка — это тепловая машина, цикл работы которой схож с циклом работы холодильной машины, однако является обратным направленным. [5; 6; 12–13]

Принцип работы теплонасосного оборудования

Устройство, принципиально, состоит из тех же самых элементов, что и холодильная машина (рис. 3):

- Теплообменник-испаритель (1), с помощью которого производится отбор тепла от источника с низким потенциалом тепла;
- Контур, который осуществляет термодинамический цикл (электрический компрессор, дроссель) (2,4);

- Теплообменник-конденсатор (3), где осуществляется отдача тепловой энергии хладагента внешнему источнику.

На участке 1 (испаритель) хладагент (легкокипящая жидкость, фреон) получает тепло (Q_1) от внешнего низкопотенциального источника, при этом, происходит его расширение и полное испарение жидкой фазы хладагента. Затем на участке 2 (электрический компрессор), происходит сжатие хладагента, в результате которого давление и температура резко повышаются. Далее, происходит подача перегретого пара с достаточно высокой температурой на участок 3 (конденсатор), где происходит сначала изобарическое охлаждение пара до сухого насыщенного состояния, затем по адиабатическому принципу происходит конденсация хладагента до жидкого состояния, отдавая при этом тепловую энергию (Q_2) внешнему источнику. Впоследствии, хладагент подается на участок 3 (дроссель), при прохождении которого снижается давление и температура хладагента. Дросселирование происходит почти по адиабатному принципу. Потом, хладагент, имеющий температуру ниже, чем низкопотенциальный источник тепла подается на участок 1 (испаритель), где термодинамический цикл завершается [5; 14–18] (рис. 3).

В основу работы теплонасосной установки положены следующие физические принципы:

1. Поглощение и выделение тепловой энергии при фазовом переходе от одного агрегатного состояния к другому.
2. Изменение температуры фазового перехода от давления.

Критерии эффективности и термодинамические основы
Основным показателем, характеризующим эффективность работы теплового насоса, является коэффициент трансформации (или преобразования) энергии COP (Coefficient of Performance). Для идеального термодинамического цикла Карно он определяется формулой [11–13]:

$$COP = \frac{T_0}{T_0 - T_n}$$

где:

- T_0 — абсолютная температура (в Кельвинах), на которую тепло отводится в систему отопления;
- T_n — абсолютная температура (в Кельвинах) низкопотенциального источника тепла.

Физический смысл COP заключается в том, что он показывает, сколько единиц полезной тепловой энергии производится на каждую единицу затраченной электрической энергии. Реальный коэффициент трансформации всегда ниже идеального из-за неизбежных потерь. Он корректируется коэффициентом η , который интегрирует в себя степень термодинамического совершенства системы, учитывая:

- Потери в компрессоре (трение, электрохимические потери).
- Потери в теплообменных аппаратах (испарителе и конденсаторе).
- Энергозатраты на работу вспомогательного оборудования (циркуляционные насосы, автоматика).
- Неидеальность термодинамических свойств хладагентов.

Исследования и практика показывают, что величина η для современных систем варьируется в

широких пределах (от 0.2 до 0.75) и сильно зависит от типа условий эксплуатации [11–13].
и мощности компрессора, качества его изготовления и

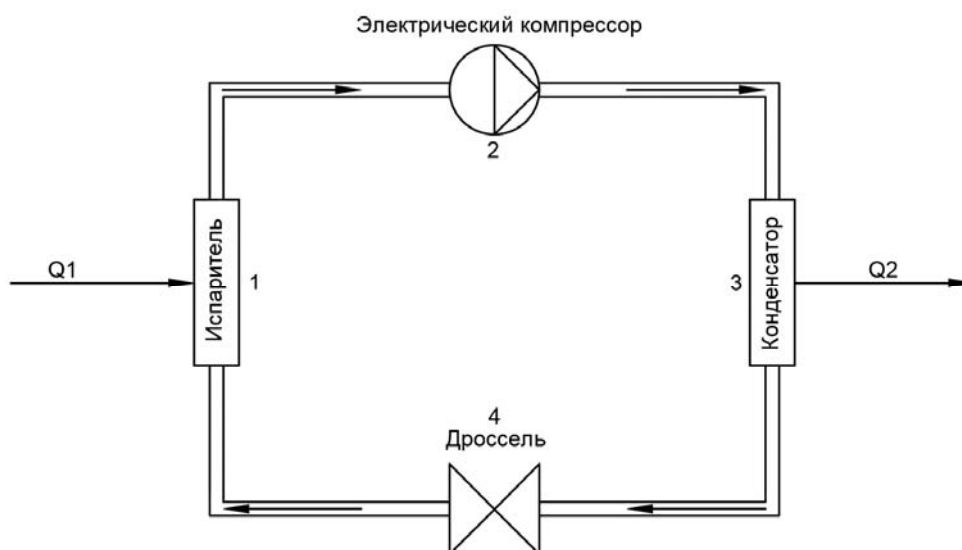


Рисунок 3. Принципиальная схема работы теплового насоса (1 – Испаритель; 2 – Электрический компрессор; 3 – конденсатор; 4 – Дроссель)

Figure 3. Basic operation of a heat pump (1 – Evaporator; 2 – Electric compressor; 3 – Condenser; 4 – Expansion Valve)

Грунт как многофункциональный тепловой аккумулятор

Поверхностные слои земной коры (до глубины 100 метров) представляют собой глобальный тепловой аккумулятор колоссальной емкости. Его тепловой баланс формируется под воздействием двух основных факторов: нисходящего потока солнечной радиации и восходящего потока радиогенного тепла из недр Земли [6; 9; 11–12].

- Солнечное излучение. Суточные колебания температуры проникают на глубину до 1.5 метров, а сезонные – до 15–20 метров. Важной особенностью

является временной сдвиг (лаг): максимальная температура грунта на определенной глубине наблюдается в наиболее холодный период года, и наоборот.

- Геотермальный тепловой поток. Ниже «нейтральной зоны» (15–20 м) температурный режим стабилизируется и определяется внутренним теплом Земли. Температура линейно возрастает с глубиной в соответствии с геотермическим градиентом, составляющим примерно 3°C на каждые 100 метров. Величина теплового потока из недр варьируется от 0.05 до 0.12 Вт/м².

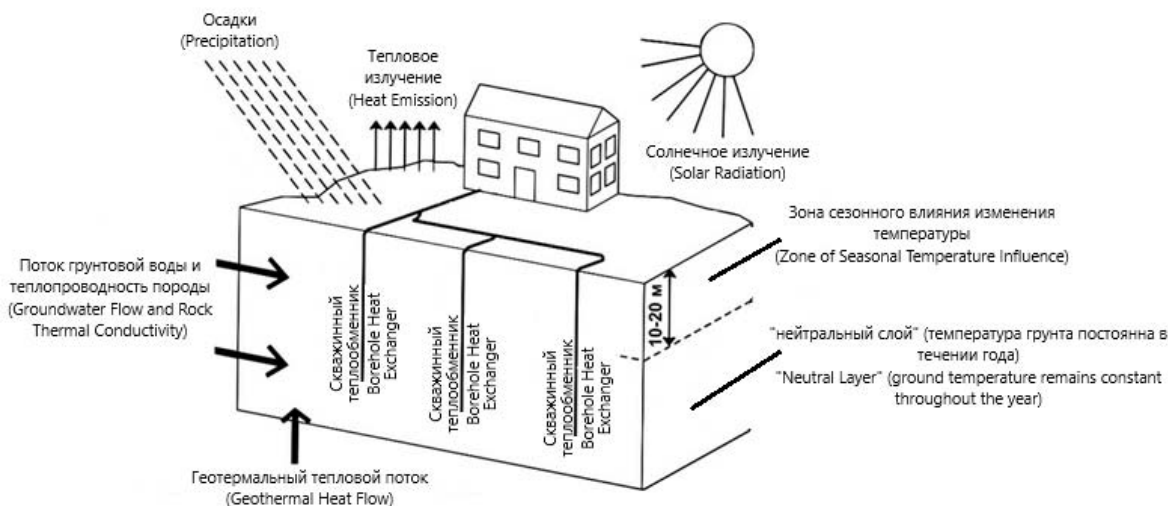


Рисунок 4. Тепловой режим приповерхностных слоев земли
Figure 4. Thermal regime of the near-surface layers of the earth

При устройстве в грунте теплообменника (системы труб с циркулирующим теплоносителем) происходит целенаправленный отбор накопленной тепловой энергии.

Зимой теплоноситель, охлаждаясь в грунте, «забирает» у него тепло и передает его на испаритель теплового насоса. Летом система работает в реверсном режиме, отводя

избыточное тепло из здания в грунт, тем самым охлаждая здание и одновременно «подзаряжая» грунтовый массив теплом к следующему отопительному сезону. Этот процесс повышает общую годовую эффективность системы.

Грунтовый массив, вовлеченный в тепловой обмен, представляет собой сложную трехфазную систему (твердая фаза – минеральный скелет грунта, жидкая – вода, газообразная – воздух и пар). При эксплуатации ГТСТ в холодном климате этот массив подвергается циклическому замораживанию и оттаиванию, что сопровождается фазовыми переходами влаги и изменением его теплофизических свойств (теплопроводности льда, мерзлого и талого грунта, воды сильно различаются). Это предопределяет особые требования к точности прогнозирования работы системы ГТСТ.

Важным аспектом при проектировании систем ГТСТ является долгосрочная стабильность температурного поля грунта. При некорректном расчете может возникнуть накопительный эффект: за отопительный сезон грунт переохлаждается, а за лето не успевает восстановить температурный потенциал. С каждым годом дисбаланс возрастает, что приводит к прогрессирующему падению эффективности системы. По этой причине расчеты должны учитывать не только пиковые нагрузки, но и многолетний тепловой баланс грунтового массива.

Конструктивные особенности систем сбора низкопотенциальной энергии

Системы сбора тепла являются ключевым элементом ГТСТ, определяющим как первоначальные инвестиции, так и долгосрочную эффективность (большой объем земляных работ, высокая стоимость первоначальных вложений, дорогостоящее бурение). В мировой практике сформировалось несколько конструктивных решений, каждое из которых имеет четкую область применения [1; 4; 11–14].

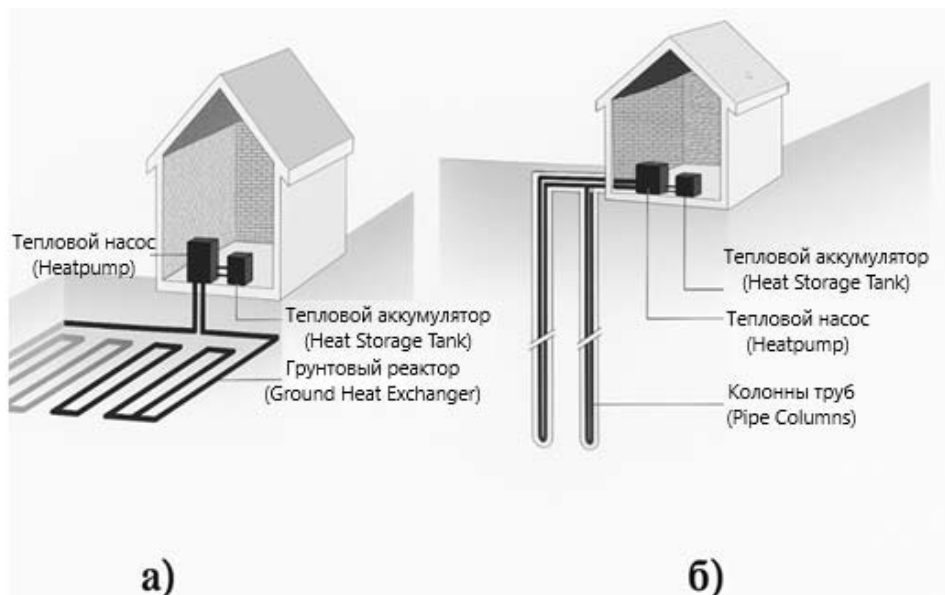


Рисунок 5. Основные типы грунтовых теплообменников: а) горизонтальные б) вертикальные
Figure 5. Main types of ground heat exchangers a) horizontal b) vertical

А) Горизонтальные грунтовые теплообменники

Конфигурация. Трубы укладываются в траншеи ниже глубины промерзания грунта (обычно 1.2 – 2.0 м). Классическая схема – «змейка» из параллельных или последовательно соединенных труб. Для экономии

Открытые системы сбора низкопотенциального тепла Данный тип систем использует в качестве теплоносителя грунтовые воды, извлекаемые из водоносных горизонтов.

Принцип действия. Через эксплуатационную скважину вода подается непосредственно к теплообменнику теплового насоса или к самому насосу, после чего охлажденная (или нагретая) вода возвращается в тот же или соседний пласт через нагнетательную скважину. Часто используется схема с парными скважинами.

Преимущества. Высокая удельная производительность и относительно низкие капиталовложения на единицу полученной тепловой мощности, так как вода является отличным теплоносителем и не требует устройства протяженных трубных регистров.

Ограничения и риски.

Гидрогеологические условия: строительство системы возможно только в районах с достаточной водопроницаемостью грунта и высоким уровнем грунтовых вод.

Качество воды: высокое содержание растворенного железа, солей жесткости или агрессивных соединений может привести к интенсивной коррозии, образованию отложений (скейлинга) и выходу оборудования из строя.

Нормативные барьеры: Во многих странах существуют строгие нормы на изъятие и сброс подземных вод, что может сделать получение разрешения сложным или невозможным.

Замкнутые системы (поверхностные теплообменники)

Эти системы используют замкнутый контур, в котором теплоноситель (чаще всего рассол на основе гликоля) циркулирует по трубам, уложенным в грунте, без прямого контакта с окружающей средой. Они подразделяются на два основных типа.

площади участка разработаны более компактные решения, такие как спиральные теплообменники (горизонтальные или вертикальные).

Преимущества. Относительно низкая стоимость бурения по сравнению с вертикальными скважинами.

Недостатки. Требуемая площадь: для обеспечения достаточной мощности необходима значительная свободная территория (часто в 1.5–2 раза больше отапливаемой площади здания).

Зависимость от климата: эффективность сильно зависит от поступления солнечной радиации на поверхность земли над теплообменником, поэтому участок не должен быть затенен.

Сезонные колебания: температура грунта на этой глубине подвержена сезонным изменениям, что влияет на стабильность коэффициента трансформации.

Б) Вертикальные грунтовые теплообменники (Borehole Heat Exchangers, BHE)

Конфигурация. Трубные регистры размещаются в вертикальных скважинах глубиной от 50 до 200+ метров. Наибольшее распространение получили:

1. U-образные теплообменники: Одна или две пары труб, соединенные внизу. Двойной U-образный контур – наиболее популярный в Европе тип.

2. Коаксиальные (концентрические) теплообменники: Труба меньшего диаметра внутри трубы большего диаметра. Более сложные в монтаже, но часто обладают лучшими теплотехническими характеристиками.

Преимущества. Экономия площади: Не требуют больших земельных участков.

Стабильность: Используют тепловую энергию грунта ниже "нейтральной зоны", где температура постоянна в течение года, что обеспечивает высокий и стабильный COP.

Энергоэффективность: Затраты электроэнергии на циркуляцию теплоносителя обычно ниже, чем в протяженных горизонтальных системах.

Недостатки. Высокая стоимость бурения.

Гибридные и специальные системы

Применение термосвайного типа фундамента. Совмещение функций несущей строительной конструкции (сваи) и грунтового теплообменника. В бетон сваи помещаются пластиковые трубы, что позволяет значительно снизить стоимость устройства фундамента и системы теплосбора одновременно.

Системы "стоящей колонны" (Standing Column Well): Глубокая одиночная скважина, заполненная водой, выполняет роль и теплообменника, и источника/приемника воды. При необходимости возможен сброс части воды для предотвращения замерзания и подпитка из водоносного горизонта. Эффективны только в специфических грунтовых условиях.

Анализ геоэкологических рисков при эксплуатации ГТСТ

Наиболее фундаментальным воздействием ГТСТ на геологическую среду является изменение ее естественного теплового поля. Этот процесс требует тщательного расчёта.

Эксплуатация геотермальных тепловых насосов в режиме отопления сопровождается формированием в грунтовом массиве стационарной или квазистационарной тепловой аномалии — зоны пониженных температур, возникающей вокруг теплообменника. Пространственные характеристики этой аномалии, ее размеры и геометрия, находятся в прямой зависимости от интенсивности и продолжительности теплосъема, термических свойств грунта, а также наличия и скорости фильтрационного потока подземных вод. Согласно результатам исследований, для одиночной скважины глубиной 100 метров радиус теплового влияния может достигать 10–15 метров после десяти лет эксплуатации [6]. В случае

использования групповых скважинных полей, подобных системе колледжа Ричарда Стоктона, наблюдается эффект суперпозиции отдельных тепловых аномалий, что приводит к формированию обширной области охлаждения [10].

Ключевым фактором, оказывающим влияние на динамику данного процесса, являются гидрогеологические условия. Наличие устойчивого потока подземных вод выполняет функцию естественного «теплового конвейера», обеспечивая постоянный приток тепловой энергии к теплообменнику и одновременно отвод охлажденной воды, что существенно ограничивает масштабы и интенсивность теплового воздействия. В условиях слабопроницаемых глинистых грунтов, где теплоперенос осуществляется преимущественно за счет теплопроводности, охлаждающий эффект проявляется более выражено и носит локализованный характер.

В регионах с холодным климатом длительное охлаждающее воздействие может сместить нулевую изотерму на значительную глубину, инициируя промерзание ранее талых грунтов. Фазовый переход поровой воды в лед сопровождается увеличением объема примерно на 9 %, что приводит к началу процесса морозного пучения. Данные силы вызывают деформации фундаментов близлежащих зданий и сооружений, повреждают элементы самих грунтовых теплообменников и нарушают целостность сопутствующих инженерных коммуникаций.

Изменение термического режима оказывает непосредственное влияние на физико-механические свойства грунтового массива. Даже при отсутствии фазовых переходов снижение температуры способно увеличивать прочностные характеристики и несущую способность грунтов, одновременно повышая их хрупкость. В песчаных грунтах температурные колебания могут влиять на величину угла внутреннего трения [8–14].

Важным аспектом воздействия является изменение гидрогеохимических условий. Поскольку температура является одним из ключевых параметров, контролирующих растворимость минералов (таких как карбонат кальция и гипс) и кинетику химических реакций, длительное охлаждение способно смещать химическое равновесие в системе, провоцируя процессы растворения одних минеральных фаз и выпадения в осадок других [1–9].

Наконец, для систем с горизонтальными теплообменниками изменение теплового режима верхних горизонтов грунта напрямую воздействует на почвенные экосистемы. Снижение температуры может замедлять ключевые биохимические процессы, включая разложение органического вещества и нитрификацию, изменять влажностный режим и оказывать негативное влияние на корневые системы растений.

Эксплуатация геотермальных систем с открытым контуром сопряжена с рисками прямого загрязнения гидрогеологической среды. Одним из ключевых факторов является коррозионная активность грунтовых вод, характеризующихся агрессивными свойствами — низким водородным показателем (pH), повышенной минерализацией, включающей хлориды и сульфаты, а также значительными концентрациями железа и марганца. Это приводит к активной коррозии металлических компонентов системы, таких как трубопроводы, теплообменники и насосное оборудование. Образующиеся в результате продукты коррозии, в частности оксиды железа, способны

мигрировать с потоком и выпадать в осадок в прискважинной зоне, вызывая кольматацию порового пространства водоносного горизонта. Данный процесс существенно снижает производительность откачной и нагнетательной скважины.

Нагрев или охлаждение пластовой среды вызывает изменения содержания растворенного кислорода и редокс-потенциала (Eh). Эти сдвиги физико-химических параметров способны перевести ранее стабильные формы загрязняющих веществ, таких как тяжелые металлы (мышьяк, свинец), в подвижное состояние, вызвав их мобилизацию из минеральной матрицы водоносного горизонта.

Что касается замкнутых систем, то основными экологическими рисками, связанными с их эксплуатацией, являются потенциальные последствия утечек теплоносителя. Совершенные растворы на основе пропиленгликоля, позиционируемые как нетоксичные и биоразлагаемые, при масштабном попадании в подземные воды представляют угрозу для окружающей среды. Исторически использовавшийся этиленгликоль является высокотоксичным соединением. Даже условно безопасные теплоносители в условиях анаэробной геологической среды могут подвергаться трансформации, сопровождающейся потреблением растворенного кислорода и нарушением сложившихся биохимических равновесий.

Неправильно спроектированные или некачественно изолированные скважины (как эксплуатационные, так и нагнетательные) могут стать каналами для вертикальной миграции загрязняющих веществ между ранее изолированными водоносными горизонтами. Это представляет особую опасность в промышленных и урбанизированных районах, где верхние водоносные горизонты часто уже загрязнены.

Геомеханические воздействия и риски

Бурение глубоких скважин представляет собой техногенное вмешательство в естественное поле напряжений горных пород. Хотя воздействие одиночной скважины является незначительным, формирование крупномасштабных скважинных полей, насчитывающих сотни стволов, теоретически способно оказывать влияние на региональное напряженно-деформированное состояние геологической среды.

Отдельного рассмотрения требует вопрос сейсмичности. Системы с замкнутым контуром, в которых циркулирует теплоноситель, крайне редко ассоциируются с значительными сейсмическими событиями. В отличие от них, открытые системы, осуществляющие интенсивный забор и нагнетание значительных объемов подземных вод, способны существенно модифицировать поровое давление в продуктивных пластах. Это изменение гидродинамического режима может приводить к снижению эффективных напряжений в зонах тектонических нарушений, выполняя роль триггерного механизма для микроземлетрясений.

Анализ геоэкологических преимуществ эксплуатации ГТСТ

Внедрение геотермальных тепловых насосов (ГТН) снижает выбросы углекислого газа. При прямом замещении происходит полное исключение процессов сжигания ископаемого топлива в локальных котельных установках. Переход системы отопления типового жилого дома в Центральной Европе с природного газа на

геотермальное отопление приводит к снижению эмиссии CO₂ на 50–70 %, что эквивалентно 2.5–4.0 тоннам углекислого газа ежегодно для объекта площадью 200 м².

Преимущество технологии ГТСТ заключается в исключительной энергоэффективности преобразования энергии. При коэффициенте производительности (COP) 3–5 система генерирует 3–5 кВт·ч тепловой энергии на 1 кВт·ч потребленной электрической.

Экологический профиль технологии дополнительно усиливается за счет перехода на хладагенты четвертого поколения. Традиционные фторсодержащие хладагенты (R410A, R134a) замещаются природными хладагентами: углекислый газ (R744), аммиак (R717), углеводороды (R290).

Прямой водосберегающий эффект достигается за счет исключения эксплуатационных потерь воды за счёт использования её в замкнутых контурах. Анализ показывает, что потери воды (по разным причинам, техническим, утечки, испарение) составляют: градирни 50–100 м³/сутки, промышленные системы охлаждения до 500 м³/сутки.

Косвенное ресурсосбережение реализуется за счёт разгрузки тепловых электростанций – крупнейших промышленных потребителей воды. Удельное водопотребление на производство электроэнергии составляет для угольных ТЭС: 1.9–2.3 л/кВт·ч, для газовых ТЭС: 0.7–1.1 л/кВт·ч, для АЭС: 2.5–3.0 л/кВт·ч [11–13].

Благодаря COP=4, геотермальная система снижает косвенное водопотребление на 75–85 % в сравнении с электрическим отоплением и на 60–70 % в сравнении с воздушными тепловыми насосами.

К дополнительным преимуществам систем ГТСТ возможно отнести снижение эмиссии загрязняющих веществ (NO_x, SO_x) в урбанизированных территориях, ликвидацию рисков аварийных разливов топлива, сокращение землеотвода для топливной инфраструктуры, устранение шумового загрязнения.

Снижение локального теплового загрязнения и эффекта "теплового острова"

Крупные городские агломерации характеризуются значительной генерацией антропогенного тепла, формирующего специфический микроклимат с выраженным эффектом «городского теплового острова». Традиционные системы кондиционирования воздуха усугубляют эту проблему, осуществляя прямой сброс тепловой энергии от конденсационных установок в приземный слой атмосферы. Согласно исследованиям, вклад систем охлаждения зданий в тепловую нагрузку урбанизированных территорий может достигать 15–20 % от общего антропогенного тепловыделения в летний период.

Геотермальные тепловые насосные системы предлагают принципиально иной подход к терморегуляции, используя грунтовый массив в качестве распределительного теплового буфера. Этот механизм основан на фундаментальном различии теплофизических характеристик сред: объемная теплоемкость горных пород составляет 800–2500 кДж/м³·К, что в 2–4 раза превышает аналогичный показатель для воздуха, а теплопроводность грунтов варьируется в диапазоне 1.5–3.5 Вт/м·К против 0.025 Вт/м·К у воздушной среды.

Грунтовый массив функционирует как распределенный тепловой аккумулятор, поглощающий избыточное тепло в летний период с последующей рекуперацией в холодный сезон. Низкая тепловая инерция

воздушной среды приводит к быстрому росту температур при тепловом воздействии, тогда как высокая тепловая инерция грунтового массива обеспечивает поглощение значительных тепловых потоков при минимальном изменении температуры. Модельные расчеты демонстрируют, что при тепловой нагрузке 100 кВт сброс в атмосферу приводит к локальному росту температуры на 3–7°C в приземном слое, в то время как аккумуляция в грунтовом массиве вызывает температурный отклик не более 0.5–1.5°C.

Системное внедрение геотермальных технологий позволяет смягчать пиковые тепловые нагрузки через снижение интенсивности городского теплового острова на 1–3°C, улучшать качество воздуха за счет уменьшения энергопотребления традиционных систем кондиционирования, стабилизировать температурный режим приземных слоев атмосферы, а также создавать синергию с другими энергетическими системами через возможность сезонного аккумулирования тепловой энергии. Таким образом, переход на геотермальные системы терморегуляции представляет собой эффективную технологию управления тепловым балансом урбанизированных территорий, обеспечивающую устойчивое развитие городской среды за счет оптимизации энергетических потоков и минимизации антропогенного воздействия на локальный климат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные подходы к проектированию и эксплуатации геотермальных систем предполагают реализацию комплексных мер, направленных на минимизацию потенциальных рисков и обеспечение долгосрочной устойчивости. Ключевым элементом является обязательное применение трехмерного численного моделирования при проектировании крупных скважинных полей. Использование специализированного программного обеспечения, такого как FEFLOW или COMSOL Multiphysics, позволяет осуществлять расчеты с учетом нестационарного теплопереноса, учётом реальной гидрогеологической структуры массива, возможных фазовых переходов воды в лед и пространственной геометрии всей системы скважин. Это обеспечивает точное прогнозирование формирования тепловых аномалий и позволяет оптимизировать конфигурацию системы на этапе проектирования.

Важным компонентом является внедрение систем адаптивного управления, которые обеспечивают динамическое регулирование тепловой мощности на основе данных непрерывного мониторинга температуры грунта в реальном времени. Такие системы позволяют предотвращать критические переохлаждения или перегревы грунтового массива за счет автоматической корректировки режимов работы тепловых насосов в зависимости от текущего теплового состояния массива.

Для объектов мощностью свыше 100 кВт обязательным требованием становится создание разветвленной сети мониторинга, включающей оборудование термометрических скважин, расположенных на различных расстояниях от рабочих скважин и на разных глубинах для контроля развития тепловой аномалии, а также сооружение пьезометрических скважин для отслеживания динамики уровня и химического состава грунтовых вод, что особенно важно для оценки возможного влияния на гидрогеохимический режим.

С точки зрения экологической безопасности, передовой практикой является применение "зеленых" технологий рабочих жидкостей, в частности использование в качестве первичного хладагента природных веществ, таких как диоксид углерода (CO₂) или аммиак (R717), а в качестве вторичного теплоносителя – растворов на основе биоразлагаемых соединений, например, ацетата калия или пропиленгликоля низкой концентрации, что минимизирует потенциальный ущерб в случае утечек. Комплексная реализация указанных мер позволяет обеспечить не только энергетическую эффективность, но и экологическую безопасность геотермальных систем на всех этапах их жизненного цикла.

Широкомасштабное внедрение технологий геотермальных тепловых насосов сталкивается с комплексом взаимосвязанных проблем, которые можно систематизировать по двум основным категориям. Первая группа – научно-методические барьеры – включает дефицит репрезентативных долгосрочных данных о тепловом поведении различных типов грунтов, что критически важно для точного прогнозирования эффективности систем. Существующие математические модели характеризуются ограниченностью, поскольку не в полной мере учитывают гетерогенность трёхфазных сред и воздействие циклических термических нагрузок. Усугубляет ситуацию отсутствие унифицированных методик проектирования, приводящее к значительному разбросу в определяемых параметрах систем.

Вторая группа объединяет экономические и нормативно-правовые барьеры. Значительный объем первоначальных капиталовложений, особенно для систем с вертикальными теплообменниками, остается ключевым сдерживающим фактором. Немаловажную роль играет недостаточная информированность потенциальных заказчиков о долгосрочной экономической эффективности и реальных сроках окупаемости. Кроме того, развитию технологий препятствует неразвитость нормативной базы, выражающаяся в отсутствии комплексной регламентирующей документации и прозрачных административных процедур для получения разрешений, что особенно актуально для систем с открытым контуром.

Использование низкопотенциальной тепловой энергии Земли посредством геотермальных теплонасосных систем представляет собой технологию, доказавшую свою высокую энергетическую и экологическую эффективность в мировом масштабе. Ее ключевыми преимуществами являются универсальность, возобновляемость и способность обеспечивать как отопление, так и охлаждение.

Для успешного развития этого направления в странах с формирующимся рынком, в частности в России, необходима комплексная работа по следующим направлениям:

- Научное обеспечение: Разработка и валидация адекватных математических моделей и национальных стандартов проектирования.
- Государственная поддержка: Создание понятной нормативной базы и стимулирующих мер (субсидии, льготы).
- Информационная политика: Широкая популяризация технологии среди проектировщиков, строителей и конечных пользователей.

Дальнейшая эволюция ГТСТ видится в их интеграции в системы умных энергетических сетей и

совместной работе с другими возобновляемыми источниками энергии, что позволит создавать устойчивые и энергонезависимые объекты недвижимости.

Формирование комплексной системы государственного регулирования представляет собой ключевой фактор ускоренного внедрения геотермальных технологий. Первоочередной задачей является разработка и внедрение национальных стандартов и технических регламентов, устанавливающих обязательные требования на всех этапах жизненного цикла систем. Нормативная база должна включать регламентацию проведения детальных тепловых и гидрогеологических изысканий на участке строительства с определением термического сопротивления грунта, коэффициента теплопроводности пород и гидрогеологических условий. Особое внимание должно уделяться стандартизации требований к качеству тапмонажа скважин, включая состав тапмонажных материалов, их теплопроводность и долговечность, а также к материалам теплообменников, работающих в условиях длительного воздействия агрессивных сред. Для объектов тепловой мощностью свыше 500 кВт необходимо установить обязательный порядок мониторинга с регулярной отчетностью по температурному режиму грунтового массива и динамике химического состава подземных вод.

Экономическое стимулирование должно реализовываться через систему адресных мер, включающих введение "зеленых" тарифов на тепло, производимое геотермальными системами, с применением механизма надбавок к базовому тарифу. Дополнительно целесообразно установление налоговых льгот в форме пониженной ставки налога на имущество для зданий, оборудованных ГТСТ, и ускоренной амортизации оборудования. Расчет размера экономических преференций должен быть привязан к верифицированным показателям сокращения выбросов CO₂, подтвержденным результатами инструментальных замеров и расчетов по утвержденным методикам.

Параллельно необходимо проведение политики ужесточения экологических требований к традиционным системам отопления на основе ископаемого топлива через введение повышенных ставок на тарифы и экологических сборов за выбросы загрязняющих веществ, установление нормативов энергетической эффективности для зданий и поэтапное снижение лимитов допустимых выбросов для котельных установок. Комплексная реализация указанных мер создаст сбалансированную систему экономических стимулов и административных регуляторов, обеспечивающую повышение конкурентоспособности низкоуглеродных технологий и формирование условий для масштабного перехода к устойчивой энергетической инфраструктуре.

Объект исследования «геотермальные теплонасосные системы» представляет собой междисциплинарную технологию, интегрирующую достижения энергетики, экологии и наук о Земле. Потенциал данной технологии для декарбонизации энергетического сектора и улучшения параметров городской среды является значительным, однако её не следует рассматривать в качестве универсального решения, лишённого экологических издержек.

Комплексный подход при проектировании систем ГТСТ должен включать проведение тщательных предпроектных изысканий, направленных на изучение геологического строения и гидрогеологических условий площадки, применение современных математических

моделей, позволяющих прогнозировать долгосрочное тепловое и гидрогеохимическое воздействие на геологическую среду, использование материалов с подтвержденными эксплуатационными характеристиками при строгом соблюдении технологических нормативов монтажа, а также внедрение систем непрерывного мониторинга и адаптивного управления эксплуатационными режимами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шулюпин А.Н., Варламова Н.Н. Современные тенденции в освоении геотермальных ресурсов // Георесурсы. 2020. Т. 22. N 4. С. 113–122. DOI: 10.18599/grs.2020.4.113-122
2. Lund J.W., Boyd T.L., Freeston D.H. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review // *Geothermics*. 2021. V. 90. Article id: 101971. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101971>
3. Psomas A., Bariamis G., Rouillard J., Stein U., Roy S., Study of the impacts of pressures on groundwater in Europe: Analysis of groundwater associated aquatic ecosystems (GWAAEs) and groundwater dependent terrestrial ecosystems (GWDTEs), 2021.
4. Бутузов В.А. Обзор российских геотермальных теплонасосных технологий // Энергетик. 2022. N 2. С. 40–44. <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.80.96.009>
5. Дадацкий А.В., Космовский П.Ю. Тепловой насос. Принцип работы теплового насоса // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства : Сборник научных статей, Гродно, 23–24 мая 2019 года. Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2019. С. 172–174.
6. Cantor A., Owen D., Harter D., Nylen G., Kiparsky M. Navigating groundwater-surface water interactions under the Sustainable Groundwater Management Act, Center for Law, Energy & the Environment, UC Berkley School of Law, Berkley, CA. 2018.
7. Волошин В.Р., Белов К.В. Модельные исследования эффективности использования грунтовых вод как низкопотенциальных источников энергии // *Proceedings of Higher Educational Establishments: Geology and Exploration*. 2024. V. 66(3). P. 88–99. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-3-88-99>
8. Liu G. Study on Heat Transfer Model of Capillary Exchanger in Subway Source Heat Pump System // *Renewable Energy*. 2020. V. 150. P. 1074–1088. DOI: 10.1016/j.renene.2019.10.112
9. Ильина Т.Н. Возобновляемые и вторичные источники энергии инженерных систем при эксплуатации и реконструкции зданий и сооружений // *Вестник евразийской науки*. 2023. Т. 15. N 4. Article id: 39SAVN423.
10. Han J., Cui M., Chen J., Lv W. Analysis of Thermal Performance and Economy of Ground Source Heat Pump System: a Case Study of the Large Building // *Geothermics*. 2021. V. 89. Article id: 101929. DOI: 10.1016/j.geothermics.2020.101929
11. Васильев Г.П. Применение ГТСТ в России // *Энергия: экономика, техника, экология*. 2009. N 7. С. 22–29.
12. Васильев Г.П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли. Москва: Издательский дом "Граница", 2006. 173 с.
13. Васильев Г.П. Использование низкопотенциальной тепловой энергии грунта поверхностных слоев Земли для теплохладоснабжения здания // *Теплоэнергетика*. 1994. N 2. С. 31–35.
14. ГОСТ 34346.2-2017 Тепловые насосы с водой в качестве источника тепла. Испытания и оценка рабочих характеристик. Часть 2. М.: Стандартинформ, 2018.
15. Дадацкий А.В., Космовский П.Ю. Тепловой насос. Принцип работы теплового насоса // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства: Сборник научных статей, Гродно, 23–24 мая 2019 года / Редколлегия: А.Р. Волик и др.. Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2019. С. 172–174.
16. СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04–88. М.: Минрегион России, 2012.

17. Ржесик К.А., Осокин В.В., Карнаух В.В. Хладотеплотехника: инновации и достижения : Монография, посвященная 55-летию со дня основания кафедры холодильной и торговой техники имени В.В. Осокина. Донецк: ФГБОУ ВО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского», 2024. 536 с.
18. Lund J.W., Toth A.N. Direct utilization of geothermal energy: 2020 worldwide review // Proc. World Geothermal Congress, Reykjavik, Iceland, 2020, 39 p.

REFERENCES

1. Shulyupin A.N., Varlamova N.N. Modern trends in the development of geothermal resources. *Georesursy*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 113–122. (In Russian) <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.113-122>
2. Lund J.W., Boyd T.L., Freeston D.H. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, 2021, vol. 90, article id: 101971. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101971>
3. Psomas A., Bariamis G., Rouillard J., Stein U., Roy S. Study of the impacts of pressures on groundwater in Europe: Analysis of GWAAEs and GWDTEs. 2021.
4. Butuzov V.A. Review of Russian geothermal heat pump technologies. *Energetik*, 2022, no. 2, pp. 40–44. (In Russian) <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.80.96.009>
5. Dadatsky A.V., Kosmovsky P.Yu. [Heat pump: principle of operation]. In: *Traditsii, sovremennye problemy i perspektivy razvitiya stroitel'stva: Sbornik nauchnykh statey, Grodno, 23–24 maya 2019 goda*. [Traditions, Modern Problems and Prospects for Construction Development of Construction: Collection of Scientific Articles, Grodno, May 23–24, 2019]. Grodno, Yanka Kupala Grodno State University Publ., 2019, pp. 172–174. (In Russian)
6. Cantor A., Owen D., Harter D., Nylen G., Kiparsky M. Navigating groundwater-surface water interactions under the Sustainable Groundwater Management Act. UC Berkeley School of Law, 2018.
7. Voloshin V.R., Belov K.V. Model studies of the efficiency of groundwater use as a low-potential energy source. *Proceedings of Higher Educational Establishments: Geology and Exploration*, 2024, vol. 66, no. 3, pp. 88–99. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-3-88-99>
8. Liu G. et al. Study on heat transfer model of capillary exchanger in subway source heat pump system. *Renewable Energy*, 2020, vol. 150, pp. 1074–1088. DOI: 10.1016/j.renene.2019.10.112
9. Ilyina T.N., Savvin N.Yu., Averkova O.A., Logachev K.I. Renewable and secondary energy sources of engineering systems during the operation and reconstruction of buildings and structures. *Vestnik Evraziiskoi nauki* [Eurasian Science Bulletin]. 2023, vol. 13, no. 4, article id: 39SAVN423. (In Russian)
10. Han J., Cui M., Chen J., Lv W. Analysis of thermal performance and economy of ground source heat pump system: A case study of a large building. *Geothermics*, 2021, vol. 89, p. 101929. DOI: 10.1016/j.geothermics.2020.101929
11. Vasiliev G.P. Application of GHPS in Russia. *Ehnergiya: ehkonomika, tekhnika, ehkologiya* [Energy: Economics, Technology, Ecology]. 2009, no. 7, pp. 22–29. (In Russian)
12. Vasiliev G.P. *Teplokhodosnabzhenie zdaniy i sooruzhenii s ispol'zovaniem nizkopotentsial'noi teplovoi energii poverkhnostnykh sloev Zemli* [Heating and cooling of buildings using low-grade thermal energy of surface soil layers]. Moscow, Granitsa Publ., 2006, 173 p. (In Russian)
13. Vasiliev G.P. The use of low-potential thermal energy of soil surface layers for building heating and cooling. *Teploenergetika* [Thermal Engineering]. 1994, no. 2, pp. 31–35. (In Russian)
14. *GOST 34346.2-2017 Teplovyie nasosy s vodoi v kachestve istochnika tepla. Ispytaniya i otsenka rabochikh kharakteristik. Chast' 2* [GOST 34346.2–2017. Water-source heat pumps. Testing and rating for performance. Part 2]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. (In Russian)
15. Dadatsky A.V., Kosmovsky P.Yu. Heat pump: principle of operation. In: *Traditsii, sovremennye problemy i perspektivy razvitiya stroitel'stva* [Traditions, Modern Problems and Prospects for Construction Development]. 2019, no. 1, pp. 172–174. (In Russian)
16. *SP 25.13330.2012 Osnovaniya i fundamente na vechnomerzlykh gruntakh. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.04–88* [SP 25.13330.2012. Bases and foundations on permafrost soils. Updated version of SNiP 2.02.04–88]. Moscow, Minregion Rossii Publ., 2012. (In Russian)
17. Rzheshik K.A., Osokin V.V., Karnaukh V.V. et al. *Khладотеплотехника: innovatsii i dostizheniia* [Refrigeration and Thermal Engineering: Innovations and Achievements]. Donetsk, DonNUET Publ., 2024, 536 p. (In Russian)
18. Lund J.W., Toth A.N. Direct utilization of geothermal energy: 2020 worldwide review. Proc. World Geothermal Congress, Reykjavik, Iceland, 2020, 39 p.

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Валерий Р. Волошин и Константин В. Белов внесли вклад в разработку концепции статьи, методики статьи и результатов исследования, подготовили текст статьи, окончательно утвердили публикуемую версию статьи. Мин Оак Со и Людмила В. Боронина участвовали в подготовке текста статьи, окончательно утвердили публикуемую версию статьи. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Valeriy R. Voloshin and Konstantin V. Belov developed contribution to the article concept, contributed to the development of the article's methodology and research results, prepared the article text, gave final approval to the published version of the article. Min Oak So and Lyudmila V. Boronina participated in the preparation of the article text, gave final approval to the published version of the article. All authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Валерий Р. Волошин / Valeriy R. Voloshin <https://orcid.org/0009-0003-1971-3852>

Константин В. Белов / Konstantin V. Belov <https://orcid.org/0009-0009-5105-4627>

Мин Оак Со / Min Oak So <https://orcid.org/0009-0000-6252-9880>

Людмила В. Боронина / Lyudmila V. Boronina <https://orcid.org/0000-0002-2442-9050>

Оригинальная статья / Original article
УДК 551.435.36:504.064(262.5)
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-17



Геоморфологические основы формирования и функционирования аква-территориального (морского) карбонового полигона «Каспий» на дагестанском побережье Каспийского моря

Загир В. Атаев^{1,2}, Алимурад А. Гаджиев¹, Абдула М. Гюльмагомедов¹,
Гаджибек С. Джамирзоев³, Абдулгамид А. Теймуров¹

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

²Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, Махачкала, Россия

³Государственный природный заповедник «Дагестанский», Махачкала, Россия

Контактное лицо

Загир В. Атаев, кандидат географических наук, доцент кафедры рекреационной географии и устойчивого развития, Дагестанский государственный университет; 367000 Россия, г. Махачкала, ул. Дахадаева, 21; ведущий научный сотрудник, лаборатория гидрогеологии и геозкологии, Институт геологии, Дагестанский федеральный исследовательский центр Российской академии наук; 367000 Россия, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 75. Тел. +79289611097
Email zagir05@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7731-5594>

Формат цитирования

Атаев В.В., Гаджиев А.А., Гюльмагомедов А.М., Джамирзоев Г.С., Теймуров А.А.
Геоморфологические основы формирования и функционирования аква-территориального (морского) карбонового полигона «Каспий» на дагестанском побережье Каспийского моря // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 178-189. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-17

Получена 27 сентября 2025 г.

Прошла рецензирование 1 декабря 2025 г.

Принята 8 декабря 2025 г.

Резюме

Цель: исследование геоморфологического строения, морфодинамики и ландшафтно-экологических особенностей дагестанского побережья Каспийского моря для научного обоснования создания аква-территориального карбонового полигона «Каспий». Особое внимание уделено обоснованию уникальности полигона как первой в России и мире площадки подобного типа, формируемой на крупном внутриматериковом замкнутом водоёме.

Использован комплексный анализ литературных данных, материалов дистанционного зондирования (Sentinel-2, Landsat-8), цифровых моделей рельефа и полевых наблюдений. Применены методы геоморфологической типизации берегов, анализа динамики береговой линии и оценки ландшафтно-экологических рисков.

Установлено, что современная регрессия уровня Каспийского моря вызывает интенсификацию аккумулятивных процессов: рост кос и баров, обмеление лагун, расширение солончаковых и песчаных массивов. Выявлена высокая чувствительность дельтовых комплексов Терека, Сулака и Самура к изменениям уровня моря и речного стока. Оценены основные ландшафтно-экологические риски: опустынивание, вторичное засоление, деградация водно-болотных угодий.

Обоснована необходимость создания карбонового полигона «Каспий» как ключевой и в то же время уникальной площадки для долгосрочного мониторинга углеродного баланса и состояния прибрежных экосистем на крупном внутриматериковом замкнутом водоёме. Показано, что такой полигон не имеет аналогов в России и мире, что подчёркивает его значимость для изучения трансформирующихся природных систем и апробации ГИС-методов прогнозирования изменений береговой зоны в условиях динамичных природных и антропогенных процессов.

Ключевые слова

Каспийское море, дагестанское побережье, береговая геоморфология, морфодинамика, регрессия уровня моря, аккумулятивные берега, дельты Терека, Сулака и Самура, лагунно-барные системы, ландшафтно-экологические риски, дистанционное зондирование, ГИС-картографирование, карбоновый полигон «Каспий».

Geomorphological Foundations for the Formation and Functioning of the "Caspiy" Aqua-Territorial (Marine) Carbon Polygon on the Dagestan Coast of the Caspian Sea

Zagir V. Ataev^{1,2}, Alimurad A. Gadzhiev¹, Abdula M. Gyulmagomedov¹,
Gadzhibek S. Dzhamirzoev³, Abdulgamid A. Teymurov¹

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia

²Dagestan Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia

³Dagestansky State Nature Reserve, Makhachkala, Russia

Principal contact

Zagir V. Ataev, PhD (Geography), Associate Professor, Department of Recreational Geography and Sustainable Development, Institute of Ecology and Sustainable Development, Dagestan State University; 21 Dakhadaeva St., Makhachkala, Russia 367000; Leading Researcher, Laboratory of Hydrogeology and Geoecology, Institute of Geology, Dagestan Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences; 75 M. Yaragsky St, Makhachkala, Russia 367000.

Tel. +79289611097

Email zagir05@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7731-5594>

How to cite this article

Ataev Z.V., Gadzhiev A.A., Gyulmagomedov A.M., Dzhamirzoev G.S., Teymurov A.A.
Geomorphological Foundations for the Formation and Functioning of the "Caspiy" Aqua-Territorial (Marine) Carbon Polygon on the Dagestan Coast of the Caspian Sea. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):178-189. (In Russ.)
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-17

Received 27 September 2025

Revised 1 December 2025

Accepted 8 December 2025

Abstract

The study investigates the geomorphological structure, morphodynamics and landscape-ecological characteristics of the Dagestan coast of the Caspian Sea in order to provide a scientific rationale for establishing the aqua-territorial carbon polygon "Caspiy". Special attention is given to substantiating the uniqueness of this polygon as the first facility of its kind in Russia and worldwide to be created on a large inland closed water body. The study is based on a comprehensive analysis of published sources, remote sensing data (Sentinel-2, Landsat-8), digital elevation models and field observations. Methods applied include geomorphological typology of coasts, shoreline dynamics analysis and assessment of landscape-ecological risks.

It has been established that the ongoing regression of Caspian Sea level intensifies accumulative processes, including the growth of spits and bars, lagoon shallowing and expansion of saline and sandy landforms. High sensitivity of the Terek, Sulak, and Samur delta complexes to sea-level and river discharge variations has been identified. Key landscape-ecological risks have been assessed, including desertification, secondary salinisation and degradation of wetlands.

The study substantiates the need to establish the "Caspiy" carbon polygon as a key and at the same time unique platform for long-term monitoring of the carbon balance and coastal ecosystem dynamics on a large inland closed water body. It is shown that no analogous polygon exists in Russia or globally, which underscores its significance for studying the transformation of natural systems and for testing GIS-based methods for predicting coastal zone changes under dynamic natural and anthropogenic conditions.

Key Words

Caspian Sea, Dagestan coast, coastal geomorphology, morphodynamics, sea-level regression, accumulative coasts, river deltas (Terek, Sulak, Samur), lagoon and bar systems, landscape-ecological risks, remote sensing, GIS mapping, "Caspiy" carbon polygon.

изменения контуров лагун, кос, баров и мелководий [7–9]. Использовались также цифровые модели рельефа SRTM и ALOS PALSAR, что обеспечило возможность анализа морфоструктурных особенностей побережья и выявления участков, наиболее подверженных абразии или аккумуляции.

Для геоморфологического анализа применялись методы морфометрии, трасологические и профилно-линейные построения, дешифрирование спутниковых изображений, выделение микроформ рельефа. Важным элементом исследования стало использование палеогеографических реконструкций, представленных в работах Свиточа, Яниной [2], Рычагова [1], а также исследований процессов берегового морфогенеза Леонтьева и др. [3].

Полевые обследования включали описание литологических разрезов, характеристику типов берегов, выявление современных морфодинамических процессов (активные пляжи, зоны абразии, участки эоловой переработки, солончаки). Дистанционные данные проходили предварительную коррекцию, атмосферную нормализацию и классификацию методом спектральных индексов. Геоинформационные системы (ArcGIS, QGIS) использовались для построения карт и пространственного анализа [10].

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Геолого-геоморфологическое строение и палеогеография побережья

Дагестанское побережье Каспийского моря формировалось в условиях сложного взаимодействия тектонических структур, морских трансгрессий и регрессий, аллювиальных и эоловых процессов. Согласно работам [2], мощность осадочной толщи позднеплейстоценового возраста здесь достигает 20–60 м, увеличиваясь в направлении осевого прогиба Каспийской впадины. Морфоструктурный анализ показывает, что современные низменные аккумулятивные равнины сложены преимущественно за счёт переработки хвалынских морских отложений и переотложения аллювия крупных рек [11; 12].

Береговая зона представляет собой сложную систему аккумулятивных форм: грядовых песков, баровых массивов, кос, лагунных понижений и солончаков. Для этих форм характерна выраженная пространственная неоднородность: от широких барово-косовых систем на севере до узких абразионно-аккумулятивных участков на юге, где береговая линия контролируется выходами коренных пород. Сравнение картографических материалов 1970–2020-х гг. фиксирует последовательное наращивание баров, удлинение кос, сокращение площади лагун и обнажение участков бывшего морского дна [13–15].

Палеогеографическая динамика побережья непосредственно связана с хвалынскими трансгрессиями и последующими регрессиями Каспия [1; 15]. Морские террасы, прослеживаемые вдоль побережья, служат индикаторами высоких стояний уровня древнего моря [12; 16, 17]. В периоды регрессий происходило формирование обширных аккумулятивных низменностей, ландшафт которых сохранил черты древнеморского рельефа. Аллювиальные процессы в это время активно конкурировали с морскими, что приводило к развитию крупных палеodelьтовых комплексов [18].

Современная динамика береговой зоны

Ключевым фактором современной динамики береговой линии дагестанского побережья является продолжающаяся регрессия уровня Каспийского моря, которая фиксируется инструментальными наблюдениями и многолетними рядами спутниковых данных Sentinel-2 и Landsat-8 [7; 19]. Анализ изменений за период 2016–2025 гг. выявил ряд устойчивых тенденций: увеличение площади аккумулятивных кос на 8–12 %, обмеление лагун и прибрежных мелководий, расширение солончаковых массивов за счёт осушения бывших акваторий, а также активное развитие баров и локальных пересыпей.

Данные долгосрочных исследований, в том числе работы Naderi Beni и соавт. [20], подтверждают циклический характер уровня Каспия с выраженным трендом к снижению в последние десятилетия [15; 21]. Падение уровня моря служит непосредственной причиной смещения береговой линии, усиления эоловой переработки осушенных территорий и формирования новых песчаных массивов [22]. Мониторинг этих процессов опирается на анализ спектральных индексов (NDWI, MNDWI, BSI), рассчитанных по временным сериям Sentinel-2, которые также демонстрируют сезонные колебания положения уреза воды [8; 9].

Морфогенез южной части побережья имеет более сложный характер. Здесь на фоне общей регрессии сочетаются абразионно-аккумулятивные процессы, обусловленные взаимодействием морского волнения с выходами коренных пород. Это приводит к локальным отступаниям береговой линии, формированию клифов и интенсивной переработке глинисто-алевритовых толщ (рис. 2).

Дельтовые комплексы Терека, Сулака и Самура

Дельтам рек Терека, Сулака и Самура принадлежит ключевая роль в морфодинамике дагестанского побережья. Эти природные системы функционируют как буферные зоны на стыке речного и морского режимов, где сочетаются процессы речной аккумуляции наносов, их последующей переработки морским волнением и эоловой перестройки. Согласно фундаментальным и современным исследованиям [23], каждая из дельт обладает уникальным комплексом характеристик, определяющим её реакцию на изменение уровня Каспия и климатические колебания.

Наиболее мощной и динамичной аккумулятивной структурой региона является дельта Терека. Она отличается разветвлённой сетью рукавов, обилием пересыпей, баров и кос, что свидетельствует об интенсивном поступлении наносов. Данная дельта демонстрирует повышенную чувствительность к регрессии уровня моря, активно наращивая площадь за счёт формирования новых островов и отмелей [18; 24].

Дельта Сулака характеризуется активным формированием баров и обособленных лагунных систем. Спутниковый мониторинг за период 2010–2024 гг. показывает, что перераспределение наносов здесь происходит особенно интенсивно в зоне пересыпей, что отражает высокую энергетику прибрежных процессов [7].

Дельта Самура представляет собой пример тесного взаимодействия морских и аллювиальных процессов. В условиях современной регрессии здесь наблюдается не только расширение площади аккумулятивных форм, но и активное развитие обширных эоловых песчаных массивов, что указывает на значительную роль ветровой переработки обнажающегося материала [22].

Таким образом, дельтовые комплексы выступают не только как важнейшие структурные элементы побережья, но и как высокочувствительные индикаторы его

современной динамики, что определяет их особую значимость для мониторинга в рамках карбонового полигона.

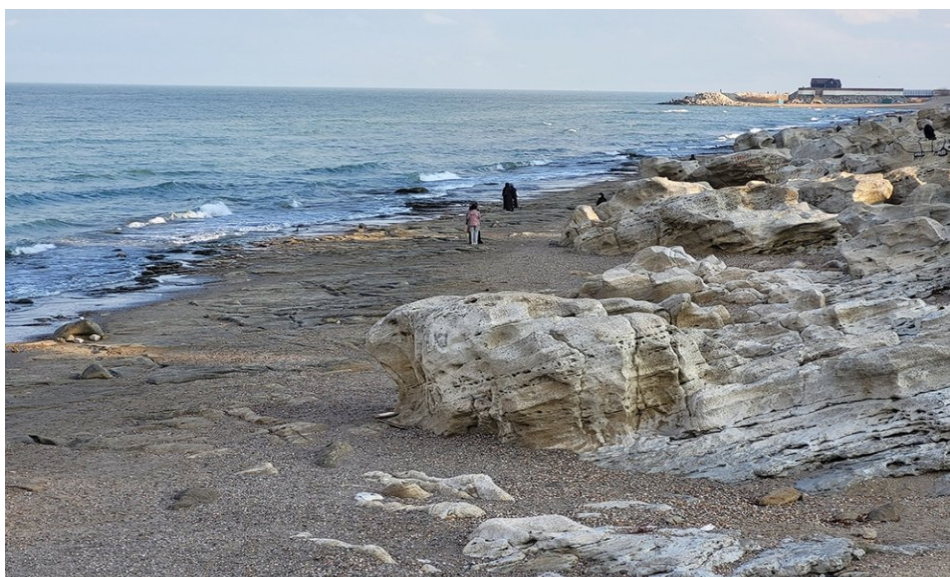


Рисунок 2. Скалисто-абразионный участок дагестанского побережья (район Махачкалы)

Примечание: волновая абразия размывает выходы известняков, формируя плоскую береговую террасу и осыпи обломочного материала. Подобные абразионные формы распространены точечно, преимущественно в местах непосредственного примыкания предгорий Кавказа к морю. Фото Загира Атаева

Figure 2. Rocky-abrasional segment of the Dagestan coast (Makhachkala area)

Note: Wave abrasion erodes limestone outcrops, forming a flat coastal terrace and accumulations of clastic material. Such abrasional landforms occur sporadically, primarily in areas where the foothills of the Caucasus directly adjoin the sea. Photo by Zagir Ataev

Ландшафтно-экологические риски побережья

Дагестанское побережье Каспийского моря представляет собой зону повышенных ландшафтно-экологических рисков, формирующихся на стыке интенсивных природных динамических процессов и растущего антропогенного пресса [10; 25]. Ключевые риски образуют комплекс взаимосвязанных и взаимообусловленных угроз, основными из которых являются:

Опустынивание и эоловая дефляция. Регрессия моря и осушение обширных мелководий привели к образованию легко развеваемых песчаных и супесчаных субстратов. На этих территориях активизируются процессы дефляции, формируются подвижные пески и кучевые дюны, что ведет к потере почвенного покрова и трансформации ландшафтов в аридные аналоги [22].

Засоление и деградация почв. На обнажившихся участках морского дна и в зоне колебания уровня происходит первичное и вторичное засоление. Капиллярный подъём минерализованных грунтовых вод в условиях аридизации климата приводит к солонцеватости и осолонцеванию почв, делая их непригодными для естественной растительности и сельскохозяйственного использования [24].

Утрата и трансформация ключевых биотопов. Наиболее уязвимыми являются водно-болотные угодья и лагунные комплексы. Их обмеление, зарастание и полное осушение ведут к деградации мест обитания водоплавающих птиц, рыбных нерестилищ и уникальных сообществ прибрежной флоры [3]. Фрагментация и сокращение площади таких биотопов снижает биоразнообразие и устойчивость экосистем.

Прямое антропогенное воздействие. Указанные природные процессы усугубляются хозяйственной деятельностью: нерегулируемым выпасом, ускоряющим опустынивание; планировочными работами и

строительством, нарушающими естественный литодинамический баланс; загрязнением, связанным с портовой и рекреационной инфраструктурой [10].

Таким образом, формируется комплекс взаимосвязанных угроз, ведущих к снижению экологической ёмкости и продуктивности прибрежных территорий. Мониторинг и оценка этих рисков являются критически важной компонентой для научного обоснования мер адаптации и одной из практических задач создаваемого карбонового полигона.

Влияние рельефа на процессы секвестрации и эмиссии углерода

Геоморфологическое строение береговой зоны Дагестана является ключевым фактором, регулирующим углеродный цикл в прибрежных экосистемах, определяя пространственное распределение процессов секвестрации (поглощения) и эмиссии (выделения) углерода. Различные формы рельефа формируют специфические среды обитания и почвенные условия, которые предопределяют способность ландшафта к долгосрочному накоплению или, напротив, быстрой потере органического вещества (табл. 1).

Аккумулятивные формы: дельты и болотные равнины как поглотители углерода. Морские дельты и приустьевые болотные равнины выступают мощными природными поглотителями углерода. В дельтах Терека и Самура аккумулируются большие объёмы органического материала. Богатый органикой речной ил откладывается в плавнях и заводях, где в условиях постоянного увлажнения и анаэробного разложения скорость разложения резко замедлена. Это приводит к консервации углерода в форме торфянистых отложений и илистого гумуса. Мощность сапропелевых толщ в заболоченных участках аграханско-кизлярского побережья может достигать нескольких метров,

представляя собой многовековое хранилище углерода [12; 17]. Отдельную роль играют дельтовые леса, такие как Самурский лиановый лес, который представляет собой наземный резервуар углерода с высокой биомассой древостоя и почв. Эта уникальная экосистема

функционирует как активный поглотитель CO₂, а специфический влажный микроклимат способствует долговременному удержанию углерода в богатых перегноем почвах [23; 24].

Таблица 1. Функция основных геоморфологических систем дагестанского побережья Каспийского моря в углеродном балансе

Table 1. Function of the main geomorphological systems of the Dagestan coast of the Caspian Sea in the carbon balance

№ п/п No	Геоморфологическая система Geomorphological system	Преобладающая роль в цикле углерода Dominant role in the carbon cycle	Ключевые процессы и механизмы Key processes and mechanisms	Пример объекта Example site	Значение для карбонового полигона Relevance for the carbon polygon
1	Дельтовые комплексы (Терек, Самур) River deltas (Terek, Samur)	Мощный поглотитель (сток) Powerful absorber (sink)	Аккумуляция аллювиального органического материала и торфообразование в анаэробных условиях; депонирование углерода в биомассе лесов Accumulation of alluvial organic matter and peat formation under anaerobic conditions; carbon storage in forest biomass	Самурский лиановый лес, плавни дельты Терека Samur liana forest, Terek delta floodplains	Ключевая площадка для оценки максимального потенциала секвестрации Key site for assessing the maximum sequestration potential
2	Лагунно-лиманские системы Lagoon and liman systems	Сбалансированный сток / источник Balanced sink / source	Фотосинтез и захоронение органического детрита с анаэробной продукцией метана (CH ₄) в условиях мелководий Photosynthesis and burial of organic detritus vs anaerobic methane (CH ₄) production in shallow waters	Аграханский залив, Сулакская бухта Agrakhan Bay, Sulak Bay	Мониторинг баланса парниковых газов (CO ₂ /CH ₄) в условиях обмеления Monitoring of greenhouse gas balance (CO ₂ /CH ₄) under shallowing water level
3	Аккумулятивные косы и бары Accumulative spits and bars	Формирующийся поглотитель Forming absorber	Захоронение органического вещества при обнажении морского дна и последующем зарастании новообразованных сухопутных участков Burial of organic matter upon seabed exposure and subsequent overgrowth of newly formed land areas	Коса о. Тюлений, пересыпь в дельте Сулака Spit of Tyuleny Island, bar in the Sulak delta	Изучение начальных стадий углеродного накопления Studying the initial stages of carbon accumulation
4	Аридные и солончаковые равнины Arid and saline plains	Потенциальный источник эмиссии Potential emission source	Окисление органического вещества при засолении и дефляция (выдувание) почвенных частиц Oxidation of organic matter during salinisation and deflation (wind erosion) of soil particles	Побережье Ногайской степи, осушенные литорали Coast of the Nogai Steppe, drained littoral zones	Оценка рисков высвобождения углерода и опустынивания Assessment of carbon release and desertification risks
5	Абразионные клифы Abrasion cliffs	Незначительный локальный источник Minor local source	Эрозия почвенно-растительного покрова и растворение карбонатных пород (известняков) Erosion of soil-vegetation layer and dissolution of carbonate rocks (limestones)	Скальные участки побережья у Махачкалы Rocky coastal areas near Makhachkala	Фоновый мониторинг второстепенных процессов эмиссии Background monitoring of secondary emission processes



Рисунок 4. Контур литорали по периметру острова Тюлений (по состоянию на 26 октября 2025 г.)

Figure 4. Contour of the littoral zone around the perimeter of Tyuleniy Island (as of October 26, 2025)



Рисунок 5. Литораль в западной части острова Тюлений (фото от 1 ноября 2025 г.). Фото Г. Джамирзоева

Figure 5. Littoral zone in the western part of Tyuleniy Island (photo taken on 1 November 2025). Photo by G. Dzhampirzoev

В целом, рельеф Дагестанского побережья Каспия формирует контрастную мозаику экосистем – от мощных поглотителей углерода в депрессиях до потенциальных источников эмиссии на возвышенных и аридных участках. Дифференцированный учёт этой пространственной неоднородности и её динамики является фундаментальной задачей, решаемой в рамках создания и функционирования аква-территориального (морского) карбонового полигона «Каспий» [5; 27].

Геоморфологический облик дагестанского побережья Каспийского моря является определяющим

фактором для экосистемных процессов, включая углеродный цикл, и, следовательно, имеет фундаментальное значение для организации эффективной работы морского карбонового полигона «Каспий».

Во-первых, рельеф контролирует пространственное распределение экосистем с противоположными функциями в углеродном балансе. Обширные дельты, лагуны и заболоченные низменности – продукты аккумулятивного рельефа – выступают зонами интенсивной секвестрации углерода благодаря развитию тростниковых зарослей, торфонакоплению и осадению

речного детрита. Эти территории функционируют как естественные поглотители CO_2 , смягчающие парниковый эффект, и именно на них карбоновый полигон сможет оценить максимальный потенциал поглощения и разработать методы его повышения [5]. Напротив, на возвышенных сухих и абразионных участках, где рельеф препятствует удержанию влаги и органики, преобладают процессы эмиссии. Учёт этого контраста необходим для корректного расчёта общего углеродного бюджета региона.

Во-вторых, динамичность рельефа напрямую влияет на стабильность углеродного накопления. Подвижность береговой линии Дагестана, обусловленная трансгрессиями и регрессиями моря, способна за короткое время трансформировать ландшафт, приводя к высвобождению ранее накопленного углерода (например, при подтоплении леса или осушении торфяника) [13; 15; 24]. Таким образом, геоморфологический мониторинг служит основой для системы раннего предупреждения о потенциальных выбросах. Данные полигона о колебаниях уровня моря, эрозии берегов и росте дельт позволят прогнозировать переход экосистем из состояния поглотителя в источник углерода и наоборот [15; 20; 28].

В-третьих, особенности рельефа диктуют конкретные управленческие решения и технологические подходы на полигоне. Например, для намывных низменностей, подверженных засолению в условиях регрессии, могут быть рекомендованы мероприятия по искусственному увлажнению или восстановлению плавней для консервации углерода [26; 28]. На абразионных участках для предотвращения углеродных потерь может потребоваться проведение берегоукрепительных работ или фитомелиорация. Таким образом, геоморфологический анализ закладывает основу для разработки стратегий управления ландшафтом с целью максимизации его углеродосберегающей функции.

В-четвёртых, уникальные геоморфологические объекты побережья, такие как Самурский лиановый лес или аграханские плавни, являются готовыми природными лабораториями в рамках полигона. Их изучение позволяет

определить предельные возможности экосистем по аккумуляции углерода, а благоприятные условия, созданные рельефом (плоская дельта, мелководный залив), делают эти объекты ценнейшими долгосрочными резервуарами, состояние которых требует мониторинга [17; 23].

Полученные результаты позволяют переоценить роль дагестанского побережья как ключевого участка Прикаспия, где наиболее репрезентативно проявляются современные тенденции регрессии моря, перестройки дельтово-лагунных систем и трансформации ландшафтов. Комплексный анализ данных дистанционного зондирования, геоморфологических и палеогеографических исследований подтверждает согласованность наблюдаемых трендов: сокращение акватории Каспия сопровождается экспансией аккумулятивных форм, расширением зон опустынивания и ростом ландшафтно-экологических рисков [3; 10; 15].

В связи с этим создание аква-территориального карбонового полигона «Каспий» в дагестанском секторе побережья моря (рис. 6) является логичным и научно обоснованным шагом. Полигон, размещаемый в пределах южной части Прикаспийской низменности, станет первой на Каспийском море площадкой для комплексного мониторинга углеродного баланса в условиях динамичного изменения уровня моря [5; 29]. Особая уникальность создаваемого полигона заключается в том, что в России и мире не существует аналогичных исследовательских площадок на внутриматериковых замкнутых крупных водоёмах типа Каспийского моря, что делает проект принципиально новым и исключительно значимым. Его уникальность также обусловлена сочетанием быстро обмелевающей акватории, формирующихся литоральных зон и контрастных ландшафтов (дельты, лагуны, солончаковые и песчаные равнины), что позволяет развернуть типологически репрезентативную сеть стационаров для изучения потоков парниковых газов в трансформирующихся экосистемах [5; 26].

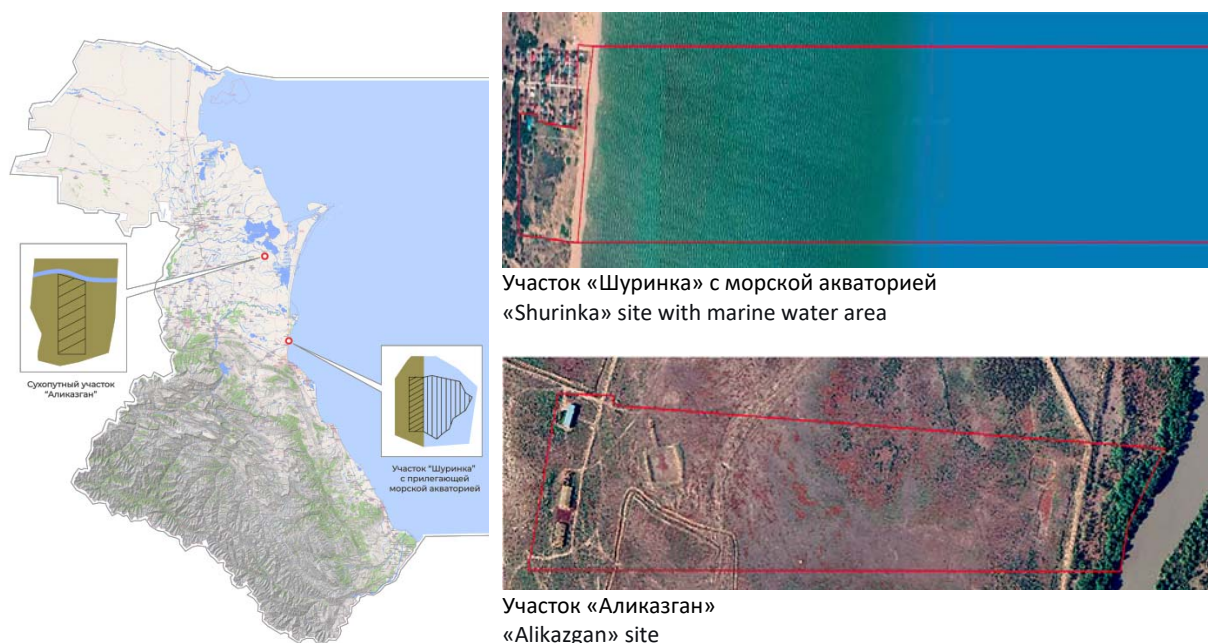


Рисунок 6. Картосхема участков аква-территориального карбонового полигона «Каспий»

Figure 6. Map of sites within the «Caspian» aqua-territorial carbon polygon

Для эффективного картографирования и мониторинга такой динамичной территории в рамках полигона требуется синтез классических геоморфологических методов с современными ГИС-технологиями и ДЗЗ. В качестве методологической основы целесообразно использовать трёхуровневую иерархическую схему:

- 1) морфоструктурное районирование на основе цифровых моделей рельефа (SRTM, ALOS PALSAR);
- 2) морфолого-генетическая классификация берегов и прибрежных низменностей;
- 3) тематическое картографирование динамики процессов и связанных с ними рисков [10; 11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование позволило выявить комплекс взаимосвязанных закономерностей формирования, динамики и современного состояния дагестанского побережья Каспийского моря. Установлено, что его облик исторически определялся чередованием хвалыньских трансгрессий и последующих регрессий, а в современный период ключевым фактором развития является продолжающаяся регрессия уровня моря. Она проявляется в увеличении площади аккумулятивных форм (кос, баров), обмелении лагун, расширении солончаковых и песчаных пространств и интенсификации эоловых процессов.

Особую роль в морфодинамике побережья играют дельтовые комплексы рек Терека, Сулака и Самура, демонстрирующие высокую чувствительность к изменениям уровня моря и стока. Современные процессы создают комплекс ландшафтно-экологических рисков, включающих опустынивание, вторичное засоление, деградацию водно-болотных угодий и усиление антропогенной нагрузки.

В этих условиях создание аква-территориального карбонового полигона «Каспий» в дагестанском секторе побережья является научно обоснованной и необходимой мерой. При этом уникальность будущего полигона заключается в том, что он станет первым в России и мире объектом подобного назначения, создаваемым на крупном внутриматериковом замкнутом водоёме – Каспийском море, что обеспечивает исключительные возможности для исследования углеродного цикла в условиях нестабильного уровня моря и быстро трансформирующихся прибрежных экосистем.

Полигон будет выполнять функции опорной площадки для комплексного мониторинга углеродного баланса, состояния экосистем и отработки методов прогнозирования. Геоморфологический каркас побережья определяет пространственное распределение как стоков углерода (дельта, плавни, леса), так и источников эмиссий (аридные и деградированные земли). Следовательно, эффективное управление полигоном требует дифференцированного подхода: сохранения и поддержки форм рельефа, способствующих секвестрации, и минимизации воздействия процессов, ведущих к эмиссии.

Таким образом, рельеф выступает не пассивным фоном, а активным регулятором углеродного цикла. Его детальное изучение в рамках уникального полигона «Каспий» позволит разработать научно обоснованные меры по повышению поглощающей способности прибрежных ландшафтов Каспия и достижению целей климатически нейтрального развития региона.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-20040 «Пространственно-временная изменчивость приморских природных и антропогенных ландшафтов Дагестана под влиянием современных климатических изменений и колебаний уровня Каспийского моря» (<http://rscf.ru/project/25-17-20040/>).

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Russian Science Foundation, grant no. 25-17-20040, «Spatiotemporal variability of coastal natural and anthropogenic landscapes of Dagestan under the influence of modern climate change and fluctuations in the level regime of the Caspian Sea» (<https://rscf.ru/project/25-17-20040/>).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рычагов Г.И. Плейстоценовая история Каспийского моря. М.: Изд-во МГУ, 1997. 267 с.
2. Свиточ А.А., Янина Т.А. Четвертичные отложения побережий Каспийского моря. М.: РАСХН, 1997. 268 с.
3. Леонтьев О.К., Маев Е.Г., Рычагов Г.И. Геоморфология берегов и дна Каспийского моря. М.: Изд-во МГУ, 1977. 208 с.
4. IPCC. Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (Chapter 4: Sea Level Rise and Implications). Geneva, 2019. P. 321–445.
5. Карбоновые полигоны. Минобрнауки России – пилотный проект. Итоги первого года. М.: Инконсалт, 2021. 45 с.
6. ESA. Sentinel-2 User Handbook. 2015.
7. Якушев В.П., Дубенок Н.Н., Лупян Е.А. Опыт применения и перспективы развития технологий дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 11–23. DOI 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23
8. Vostokov S.V., Sahling I.V., Vostokova A.S. et al. Seasonal Chlorophyll Variability in the Caspian Sea Based on Remote Sensing Data // Doklady Earth Sciences. 2023. V. 508. Suppl. 1. P. S47–S52. DOI: 10.1134/S1028334X22601924
9. Раджабова Р.Т., Ахмедова Л.Ш. Оценка природно-антропогенного воздействия на эко- и геосистемы зоны водохранилища Ирганайской ГЭС по данным дистанционного зондирования // Юг России: экология, развитие. 2024. Т. 19. № 3. С. 193–203. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-3-193-203
10. Панасенко Д.Н. Экологическая безопасность Каспийского моря в условиях нефтегазодобывающей деятельности // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2004. № 2. С. 136–144.
11. Варущенко А.Н., Варущенко С.И., Клиге Р.К. Изменение режима Каспийского моря и бессточных водоемов в палеовремени. М.: Наука, 1987. 234 с.
12. Абумуслимов А.А., Банкурова Р.У., Алахвердиев Ф.Д. Особенности геоморфологии Терско-Кумской низменности // Вестник Академии наук Чеченской Республики. 2013. № 1(18). С. 72–76.
13. Kroonenberg S.B., Badyukova E.N., Storms J.E.A., et al. A full sea-level cycle in 65 years: barrier dynamics along Caspian shores // Sedimentary Geology. 2000. V. 134. Is. 3–4. P. 257–274. DOI: 10.1016/S0037-0738(00)00048-8
14. Обмеление Каспия вызвало появление новых островов и изменило береговые линии // ТАСС. 24 марта 2024. URL: <https://tass.ru/nauka/23481053> (дата обращения: 05.08.2025)
15. Koriche S.A., Singarayer J.S., Hannah L.C., et al. What are the drivers of Caspian Sea level variation during the late Quaternary? // Quaternary Science Reviews. 2022. V. 283. Article id: 107457. DOI: 10.1016/j.quascirev.2022.107457
16. Сорокин В.М., Янина Т.А., Лукша В.Л. О времени последней связи Каспийского и Черного морей в позднем плейстоцене // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2023. № 1. С. 75–84. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-1-75-84
17. Михайлова М.В. Закономерности скачкообразного развития дельт // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 6. С. 676–684. DOI: 10.31857/S0321059621060122

18. Naderi Beni A., Lahijani H., Mousavi R.H., et al. Caspian sea-level changes during the last millennium: historical and geological evidence from the south Caspian Sea // *Climate of the Past*. 2013. V. 9. P. 1645–1665. DOI: 10.5194/cp-9-1645-2013
19. Vostokov S.V., Pautova L.A., Sahling I.V. et al. Seasonal and Long-Term Phytoplankton Dynamics in the Middle Caspian According to Satellite Data and In Situ Observations in the First Decades of the 21st Century // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. V. 11. Iss. 5. Article id: 957. DOI: 10.3390/jmse11050957
20. Атаев З.В., Братков В.В., Гаджибеков М.И. Полупустынные ландшафты Северо-Западного Прикаспия: изменчивость климата и динамика: монография. Махачкала: ДГПУ, 2011. 123 с.
21. Каспийское море: энциклопедия / авторы и составители И.С. Зонн, А.Г. Костяной, А.Н. Косарев, С.С. Жильцов. 2-е изд. М.: Международные отношения, 2015. 542 с.
22. Kakroodi A.A., Leroy S.A.G., Kroonenberg S.B., et al. Late Pleistocene and Holocene sea-level change and coastal paleoenvironment evolution along the Iranian Caspian shore // *Marine Geology*. 2015. V. 361. P. 111–125. DOI: 10.1016/j.margeo.2015.01.007
23. Игнатов Е.И., Рычагов Г.И., Эльдаров Э.М. и др. Динамика каспийских берегов в концепции "Атласа культурного и природного наследия Дагестана" // *Геоморфология и палеогеография*. 2020. N 4. С. 58–73.
24. Эдельгериев Р.С.Х., Иванов А.Л., Донник И.М. и др. Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство). М.: Издательство МБА, 2021. 700 с.
25. State of Environment of the Caspian Sea (SOE). Tehran: Caspian Environment Programme, 2019. 134 p.
26. Leroy S.A.G., Gracheva R., Medvedev A. Natural hazards and disasters around the Caspian Sea // *Natural Hazards*. 2022. V. 114. N 3. P. 2435–2478. DOI 10.1007/s11069-022-05522-5
27. Табелинова А.С. Колебание уровня Каспийского моря: причины, последствия и методы исследования // *Евразийский Союз Ученых*. 2019. N 7(61). С. 57–61.
28. Гаджиев Н.Г., Плешаков А.М. Особенности финансового обеспечения экологических проектов в зеленой экономики // *Юг России: экология, развитие*. 2024. T. 19. N 1. С. 134–144. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-1-134-144
29. Leroy S.A.G., Kakroodi A.A., Kroonenberg S.B., et al. Holocene vegetation history and sea level changes in the SE corner of the Caspian Sea: relevance to SW Asia climate // *Quaternary Science Reviews*. 2013. V. 70. P. 28–47. DOI: 10.1016/j.quascirev.2013.03.004
30. Каспийское море стремительно мелеет. URL: <https://www.vesti.ru/article/2628534> (дата обращения: 05.08.2025)
31. Rychagov G.I. *Pleistotsenovaya istoriya Kaspiiskogo morya* [Pleistocene History of the Caspian Sea]. Moscow, MSU Publ., 1997, 267 p. (In Russian)
32. Svitoch A.A., Yanina T.A. *Chetvertichnye otlozheniya poberezhii Kaspiiskogo morya* [Quaternary Sediments of the Caspian Sea Coasts]. Moscow, RASKhN Publ., 1997, 268 p. (In Russian)
33. Leont'ev O.K., Maev E.G., Rychagov G.I. *Geomorfologiya beregov i dna Kaspiiskogo morya* [Geomorphology of the Shores and Bottom of the Caspian Sea]. Moscow, MSU Publ., 1977, 208 p. (In Russian)
34. IPCC. Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (Chapter 4: Sea Level Rise and Implications). Geneva, 2019, pp. 321–445.
35. *Uglerodnye poligony. Minobrnauki Rossii – pilotnyi proekt. Itogi pervogo goda* [Carbon Polygons. Russian Ministry of Education and Science – Pilot Project. Results of the First Year]. Moscow, Inksalt Publ., 2021, 45 p. (In Russian)
36. ESA. Sentinel-2 User Handbook. 2015.
37. Yakushev V.P., Dubenok N.N., Lupyan E.A. Experience in the application and development prospects of Earth remote sensing technologies for agriculture. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2019, vol. 16, no. 3, pp. 11–23. (In Russian) DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23
38. Vostokov S.V., Sahling I.V., Vostokova A.S. et al. Seasonal Chlorophyll Variability in the Caspian Sea Based on Remote Sensing Data. *Doklady Earth Sciences*, 2023, vol. 508, suppl. 1, pp. S47–S52. DOI: 10.1134/S1028334X22601924
39. Radzhabova R.T., Akhmedova L.Sh. Assessment of natural and anthropogenic impact on eco- and geosystems of the Irganai HPP reservoir zone using remote sensing data. *South of Russia: ecology, development*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 193–203. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-3-193-203
40. Panasenko D.N. Environmental safety of the Caspian Sea under conditions of oil and gas production. *Neftegazovye tekhnologii i ekologicheskaya bezopasnost'* [Oil and Gas Technologies and Environmental Safety]. 2004, no. 2, pp. 136–144. (In Russian)
41. Varushchenko A.N., Varushchenko S.I., Klige R.K. *Izmenenie rezhima Kaspiiskogo morya i besstochnykh vodoemov v paleovremeni* [Changes in the Regime of the Caspian Sea and Endorheic Water Bodies in Paleotime]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 234 p. (In Russian)
42. Abumuslimov A.A., Bankurova R.U., Alakhverdiev F.D. Features of the geomorphology of the Tersko-Kuma lowland. *Vestnik Akademii nauk Chechenskoi Respubliki* [Bulletin of the Academy of Sciences of the Chechen Republic]. 2013, no. 1(18), pp. 72–76. (In Russian)
43. Kroonenberg S.B., Badyukova E.N., Storms J.E.A., et al. A full sea-level cycle in 65 years: barrier dynamics along Caspian shores. *Sedimentary Geology*, 2000, vol. 134, iss. 3–4, pp. 257–274. DOI: 10.1016/S0037-0738(00)00048-8
44. Shallowing of the Caspian Sea caused the appearance of new islands and changed coastlines. *TASS*, March 24, 2024. (In Russian) Available at: <https://tass.ru/nauka/23481053> (accessed 05.08.2025)
45. Koriche S.A., Singarayer J.S., Hannah L.C., et al. What are the drivers of Caspian Sea level variation during the late Quaternary? *Quaternary Science Reviews*, 2022, vol. 283, article id: 107457. DOI: 10.1016/j.quascirev.2022.107457
46. Sorokin V.M., Yanina T.A., Luksha V.L. On the timing of the last connection between the Caspian and Black Seas in the Late Pleistocene. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya* [Moscow University Geology Bulletin]. 2023, no. 1, pp. 75–84. (In Russian) DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-1-75-84
47. Mikhailova M.V. Patterns of abrupt delta development. *Water Resources*, 2021, vol. 48, no. 6, pp. 676–684. (In Russian) DOI: 10.31857/S0321059621060122
48. Naderi Beni A., Lahijani H., Mousavi R.H., et al. Caspian sea-level changes during the last millennium: historical and geological evidence from the south Caspian Sea. *Climate of the Past*, 2013, vol. 9, pp. 1645–1665. DOI: 10.5194/cp-9-1645-2013
49. Vostokov S.V., Pautova L.A., Sahling I.V. et al. Seasonal and Long-Term Phytoplankton Dynamics in the Middle Caspian According to Satellite Data and In Situ Observations in the First Decades of the 21st Century. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, vol. 11, iss. 5, article id: 957. DOI: 10.3390/jmse11050957
50. Ataev Z.V., Bratkov V.V., Gadzhibekov M.I. *Polupustynnye landshafty Severo-Zapadnogo Prikaspii: izmenchivost' klimata i dinamika* [Semi-Desert Landscapes of the Northwestern Caspian Region: Climate Variability and Dynamics]. Makhachkala, DSPU Publ., 2011, 123 p. (In Russian)
51. Zonn I.S., Kostyanoi A.G., Kosarev A.N., Zhil'tsov S.S., eds. *Zhiltsov Kaspiiskoe more: entsiklopediya* [Caspian Sea: Encyclopedia]. Moscow, Mezhdunarodnye otnosheniya Publ., 2015, 2nd ed., 542 p. (In Russian)
52. Kakroodi A.A., Leroy S.A.G., Kroonenberg S.B., et al. Late Pleistocene and Holocene sea-level change and coastal paleoenvironment evolution along the Iranian Caspian shore. *Marine Geology*, 2015, vol. 361, pp. 111–125. DOI: 10.1016/j.margeo.2015.01.007
53. Ignatov E.I., Rychagov G.I., Eldarov E.M. et al. Dynamics of the Caspian shores in the concept of the "Atlas of Cultural and Natural Heritage of Dagestan". *Geomorfologiya i paleogeografiya* [Geomorphology and Paleogeography]. 2020, no. 4, pp. 58–73. (In Russian)
54. Edelgeriev R.S.Kh., Ivanov A.L., Donnik I.M. et al. *Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: proyavleniya zasukhi, mery preduprezhdeniya, bor'by, likvidatsiya posledstviy i adaptatsionnye meropriyatiya (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)* [Global Climate and Soil Cover of Russia: Manifestations of Drought, Measures of Prevention, Control, Elimination of Consequences and Adaptation Measures (Agriculture and Forestry)]. Moscow, MBA Publ., 2021, 700 p. (In Russian)

25. State of Environment of the Caspian Sea (SOE). Tehran, Caspian Environment Programme, 2019, 134 p.
26. Leroy S.A.G., Gracheva R., Medvedev A. Natural hazards and disasters around the Caspian Sea. *Natural Hazards*, 2022, vol. 114, no. 3, pp. 2435–2478. DOI: 10.1007/s11069-022-05522-5
27. Tabelinova A.S. Fluctuations of the Caspian Sea level: causes, consequences and research methods. *Evrasiiskii Soyuz Uchenykh* [Eurasian Union of Scientists]. 2019, no. 7(61), pp. 57–61. (In Russian)
28. Gadzhiev N.G., Pleshakova A.M. Features of financial support for environmental projects in the green economy. *South of Russia: ecology, development*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 134–144. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-1-134-144
29. Leroy S.A.G., Kakroodi A.A., Kroonenberg S.B., et al. Holocene vegetation history and sea level changes in the SE corner of the Caspian Sea: relevance to SW Asia climate. *Quaternary Science Reviews*, 2013, vol. 70, pp. 28–47. DOI: 10.1016/j.quascirev.2013.03.004
30. The Caspian Sea is rapidly shallowing. (In Russian) Available at: <https://www.vesti.ru/article/2628534> (accessed 05.08.2025)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Загир В. Атаев составил концепцию работы и провел анализ данных. Алимурат А. Гаджиев проводил полевые работы, участвовал в интерпретации результатов. Абдула М. Гюльмагомедов участвовал в полевых работах. Гаджибек С. Джамирзоев участвовал в полевых работах и давал экологическую оценку. Абдугамид А. Теймуров проводил палеогеографический анализ и дистанционное зондирование. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Zagir V. Ataev undertook conceptualization and data analysis. Alimurad A. Gadzhiev undertook field investigation and interpretation of results. Abdula M. Gyulmagomedov undertook field investigation. Gadzhibek S. Dzhampirzoev undertook field investigation and ecological assessment. Abdulgamid A. Teymurov undertook paleogeographical analysis and remote sensing organisation. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Загир В. Атаев / Zagir V. Ataev <https://orcid.org/0000-0001-7731-5594>
 Алимурат А. Гаджиев / Alimurad A. Gadzhiev <https://orcid.org/0000-0002-7359-1951>
 Абдула М. Гюльмагомедов / Abdula M. Gyulmagomedov <https://orcid.org/0009-0009-5523-5214>
 Гаджибек С. Джамирзоев / Gadzhibek S. Dzhampirzoev <https://orcid.org/0000-0003-1137-2726>
 Абдугамид А. Теймуров / Abdulgamid A. Teymurov <https://orcid.org/0000-0003-0736-1522>

Оригинальная статья / Original article

УДК: 911

DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-18



Кластерное формирование ландшафтно-экологического каркаса Западно-Казахстанской области для целей устойчивого развития территории

Ахан А. Тургумбаев¹, Сергей В. Левыкин², Григорий В. Казачков², Александр А. Чибилёв²

¹Западно-Казахстанский университет им. М. Утемисова, Уральск, Казахстан

²Институт степи Уральского отделения Российской академии наук (ИС УРО РАН), Оренбург, Россия

Контактное лицо

Сергей В. Левыкин, доктор географических наук, профессор РАН, зав. отделом степеведения и природопользования, Институт степи УРО РАН; 46000 Россия, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11. Тел. +735327744-2; +79096023539

Email stepevedy@yandex.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0949-9939>

Формат цитирования

Тургумбаев А.А., Левыкин С.В., Казачков Г.В., Чибилёв А.А. Кластерное формирование ландшафтно-экологического каркаса Западно-Казахстанской области для целей устойчивого развития территории // Юг России: экология, развитие. 2025. Т. 20, N 4. С. 190-206. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-18

Получена 22 июня 2025 г.

Прошла рецензирование 16 сентября 2025 г.

Принята 25 октября 2025 г.

Резюме

Цель: разработать научные основы оптимизации ландшафтно-экологического каркаса Западно-Казахстанской области (далее – ЗКО). Основные задачи: поиск геоэкологических предпосылок устойчивого развития области и районирование её территории.

Сочетание ландшафтного и кластерного подходов, общегеографические методы, методы ДЗЗ, методы оценки антропогенной нагрузки по Б.И. Кочурову, по Л.В. Кропянко и Л.А. Беспаловой.

Для территории ЗКО определены перспективы устойчивого развития. На основе пространственного анализа природно-ресурсного потенциала установлена кластерная организация ландшафтно-экологического каркаса. В области выделено семь кластеров, для каждого определены ведущие геоэкологические предпосылки устойчивого развития и на их основании даны рекомендации по приоритетным направлениям природопользования.

Пространственное распределение геоэкологических предпосылок устойчивого развития в ЗКО таково, что её территория и ландшафтно-экологический каркас организованы в кластеры, характеризующиеся размытыми границами и способностью ко взаимному наложению. Геоэкологические предпосылки являются основанием для определения приоритетов природопользования, их реализация будет способствовать устойчивому развитию региона.

Ключевые слова

Западно-Казахстанская область, устойчивое развитие, геоэкологические предпосылки, приоритет природопользования, ландшафтно-экологический каркас.

Cluster formation of the landscape and ecological framework in the west Kazakhstan region for its sustainable development

Akhan A. Turgumbaev¹, Sergey V. Levykin², Grigory V. Kazachkov² and Alexander A. Chibilev²

¹Makhambet Utemisov West Kazakhstan University, Uralsk, Kazakhstan

²Institute of Steppe, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

Principal contact

Sergey V. Levykin, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Russian Academy of Sciences, Head, Department of Steppe Studies and Nature Management, Institute of Steppe, Ural Branch, Russian Academy of Sciences; 11 Pionerskaya st, Orenburg, Russia 460000.

Tel. +73532774432; +79096023539

Email stepevedy@yandex.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0949-9939>

How to cite this article

Turgumbaev A.A., Levykin S.V., Kazachkov G.V., Chibilev A.A. Cluster formation of the landscape and ecological framework in the west Kazakhstan region for its sustainable development. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):190-206. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-18

Received 22 June 2025

Revised 16 September 2025

Accepted 25 October 2025

Abstract

Develop the scientific basis for optimise landscape and ecological conditions in the west Kazakhstan region. The main objectives were to identify geo-ecological preconditions for sustainable developmen, and to zonate the territory of the region.

A combination of landscape, cluster and geographic approaches, remote sensing data and methods for assessing human impact on the environment of B.I. Kochurovand L.V. Kropyanko and L.A. Bespalovaw

Prospects for sustainable development have been identified for the West Kazakhstan region. Based on spatial analysis of natural resource potential, a cluster organisation of the landscape-ecological framework has been established. Seven clusters were identified in the region. The most significant geo-ecological preconditions for sustainable development were identified for each cluster and recommendations for priority areas of environmental management were given.

The spatial distribution of geo-ecological conditions for sustainable development in west Kazakhstan is such that the territory and landscape ecology are organised into clusters with blurred boundaries and overlapping capabilities. Geo-ecological factors for sustainable development form the basis for environmental management priorities and their implementation will contribute to sustainable regional development.

Key Words

West Kazakhstan region, sustainable development, geo-ecological preconditions, priority of nature management, landscape and ecological framework.

ВВЕДЕНИЕ

Массовая распахка степей в 1950-е гг. и их последующее доосвоение спровоцировали системный кризис степей конца XX в. [1]. Степь стала самым пострадавшим ландшафтом Планеты, что вывело её в приоритеты природоохранного движения [2]. В то время осознание угрозы глобальной экологической катастрофы и истощаемости ископаемых энергоресурсов вызвало к жизни концепцию устойчивого развития, утверждённую на Конференции ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, 3–14.06.1992). Несмотря на очевидные достижения в охране природы и появившуюся научную базу концепции устойчивого развития, до настоящего времени экологический кризис не преодолён, сохраняются негативные тенденции развития экосистем.

Северная Евразия на рубеже веков пережила глубокие изменения социально-политических и экономических условий. С проведением радикальных экономических реформ в России (далее – РФ) и Казахстане (далее – РК) возникли новые проблемы, но в начале XXI века проявил себя феномен вторичных степей – шанс на полноценное устойчивое развитие степных агроландшафтов [3–5].

В текущем десятилетии РФ и РК стремятся к лидерству на мировом зерновом рынке: в России активно реализуется «Государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации» до 2031 года, известная как «Целина-2» (утверждена Постановлением Правительства РФ от 14 мая 2021 г. №731); в Казахстане реализуется Национальный проект по развитию агропромышленного комплекса РК на 2021–2025 гг. (утвержден Постановлением Правительства РК от 12 октября 2021 г. №732). По обе стороны границы в текущем десятилетии прервана пахотная передышка, являвшаяся условием самовосстановления степей.

Несмотря на все успехи возобновляемой энергетики, основным энергетическим сырьём остаются углеводороды. Страны, обладающие их крупнейшими запасами, с одной стороны, имеют дополнительный ресурс экономического развития, а с другой – несут ответственность за экологические последствия добычи и переработки углеводородного сырья. РК признана динамично развивающейся страной с высокими темпами экономического роста, увеличивается экспорт продукции, в т. ч. углеводородного сырья и зерна; ставится задача в краткосрочной перспективе войти в 30 наиболее конкурентоспособных стран мира. В этой связи для Казахстана актуальна проблема совмещения высоких темпов экономического развития и соблюдения высоких стандартов охраны природы, согласно национальным приоритетам, то есть, существует проблема устойчивого развития.

Казахстан – это одно из крупнейших степных государств мира, имеющее многовековой опыт рационального использования степей в адаптивном животноводстве, развивающемся и сегодня, но в новом качестве. Степь для казахстанцев является вмещающим, материнским ландшафтом, географической основой традиционной культуры и нравственности, а значит, её благополучие лежит в основе устойчивого развития страны. Поиск путей интеграции степей в устойчивое развитие страны был сосредоточен на степях Западного Казахстана, которые в силу более низкого биоклиматического потенциала в меньшей степени

затронуты проектами развития полеводства. В Западно-Казахстанской области (далее – ЗКО) и в некоторых приграничных районах Оренбургской области ещё продолжается пахотная передышка, позволившая степеведам России и Казахстана совместно выявить и изучить степные массивы и их динамику в современных условиях.

Учитывая актуальность проблемы перехода Казахстана на устойчивое развитие и сосредоточенность исследований в ЗКО, данная работа имеет целью дополнить научные основы выхода ЗКО на траекторию устойчивого развития. Основными задачами были поиск геоэкологических предпосылок устойчивого развития ЗКО и районирование её территории по этим предпосылкам. Данная работа основана: 1) на результатах изучения геоэкологической обстановки в ЗКО РК, проводившегося с целью нахождения путей устойчивого развития для этого субъекта РК; 2) на результатах изучения современного феномена восстановления сайгака; 3) на результатах предшествующих исследований феномена вторичной степи и других степеведческих исследований. Совокупность результатов перечисленных исследований привела к изложенным в данной статье принципам и схеме кластерной организации территории Западно-Казахстанской области и её ландшафтно-экологического каркаса.

Исследования проводились совместно специалистами Института степи УрО РАН и Западно-Казахстанского университета им. М. Утемисова в рамках реализации Межгосударственной программы инновационного сотрудничества государств – участников СНГ на период до 2030 года. Следуя этой программе, названные учреждения и Национальная академия РК сотрудничают по следующим направлениям: 1) оптимизация степного землепользования; 2) развитие непрерывной сети ООПТ в степной зоне от Волги до Иртыша; 3) проблемы экологической безопасности в трансграничных бассейнах рек Урал и Тобол; 4) проблемы сохранения трансграничной волго-уральской популяции сайгака. Исследования, результаты которых представлены в данной статье, также реализуют п. 8 «Сотрудничество в области экологии», п. 9 «Сотрудничество в области АПК», п. 14 «Сотрудничество в области туризма», п. 15 «Межрегиональное сотрудничество» плана мероприятий Комплексной программы экономического сотрудничества между Правительствами РК и РФ на 2026–2030 годы.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задача поиска геоэкологических предпосылок устойчивого развития поставлена исходя из императива А.А. Чибилёва «Природа знает лучше» [6], то есть из того, что условием устойчивого развития любой территории является реализация существующих геоэкологических предпосылок к нему.

Постановка вопроса о геоэкологических предпосылках устойчивого развития делает основными понятия о геоэкологии и об устойчивом развитии. Принимаем трактовку геоэкологии по А.А. Тишкову и В.И. Осипову как междисциплинарного научного направления, изучающего пространственно-временные закономерности взаимодействия природы и общества, объединяющего теоретические и прикладные исследования в области наук о Земле и живой природе на основе эколого-географического (геоэкологического) подхода [7]. При такой трактовке геоэкологии геоэкологические предпосылки устойчивого развития

территории отождествляются с ландшафтными предпосылками устойчивого развития. Пространство действия каждой ландшафтной предпосылки устойчивого развития и является составляющей ландшафтно-экологического каркаса области, а поскольку в рамках данной работы ни одна геоэкологическая (она же ландшафтная) предпосылка устойчивого развития не рассматривается в отрыве от пространства её действия, далее для удобства изложения, составляющие ландшафтно-экологического каркаса отождествляются с геоэкологическими предпосылками устойчивого развития.

Трактовку устойчивого развития принимаем из концепции «слабой устойчивости» по Р. Солоу (R.M. Solow), то есть признаём устойчивым такое развитие, при котором благосостояние следующего поколения не ниже, чем у предыдущего, при этом благосостояние понимается как обеспеченность общества физическим, человеческим и природным капиталом, а истощение ресурсов как природного капитала допускается только если сопровождается не меньшим приростом человеческого или физического капитала [8; 9]. Фактически это концепция долгосрочного экономического развития с сохранением благополучного состояния природных и природно-антропогенных экосистем, но допускающая использование невозобновляемых ископаемых ресурсов.

Структура природопользования изучалась методами полевых ландшафтных исследований, включая общегеографические: картографический, сравнительно-географический. Также использовались данные дистанционного зондирования Земли (с сайта Sentinel Hub), для их обработки применена программа ArcGIS for Desktop, использовались данные государственной статистической отчетности, иные статистические и исторические сведения об изучаемой территории. Изучение и оценка степных, полупустынных и пустынных пастбищ выполнялись в процессе полевых и камеральных работ с использованием классических методик изучения растительного покрова в травяных экосистемах [10–13].

Оценка антропогенной нагрузки на изучаемую территорию проводилась по методике Б.И. Кочурова [14] с авторскими дополнениями, внесёнными для адаптации методики к отличиям данных статистической отчетности, принятой в Республике Казахстан, от данных, используемых в методиках Б.И. Кочурова. Для ранжирования факторов сельскохозяйственной нагрузки использовались линейная интерполяция и масштабирование по Л.В. Кропьянко и Л.А. Беспаловой [15].

Результаты, полученные перечисленными выше методами, интерпретировались на основе ландшафтного подхода по Ф.Н. Милькову [16] и А.А. Чибилёву [17], реализованного в Оренбургской ландшафтно-экологической школе степеведения. Следуя этому подходу, значимость природных и антропогенных факторов и элементов ландшафта как геоэкологических предпосылок устойчивого развития определялась по их отражению в облике ландшафта, доступному для изучения методами полевых ландшафтных исследований и дополненному общими статистическими и историческими сведениями.

Для решения задачи районирования ЗКО по геоэкологическим предпосылкам устойчивого развития применены названный выше ландшафтный подход и кластерный подход по М.Ю. Портеру (M.E. Porter) и В.П. Воробьёву, В.С. Липатникову, С.К. Розановой [18; 19]. Исходим из определений кластера: 1) у М.Ю. Портера как

«группы географически соседствующих взаимосвязанных компаний и связанных с ними организаций, действующих в определённой сфере, характеризующихся общностью деятельности и взаимодополняющих друг друга» [18, с. 258]; 2) у В.П. Воробьёва, В.С. Липатникова и С.К. Розановой как «совокупности сосредоточенных в одной географической области организаций одной или нескольких отраслей, добровольно взаимодействующих на долгосрочной основе, получающих за счет этого взаимодействия синергетический эффект, конкурирующих на основе знаний и оказывающих воздействие на инновационное развитие региональной инфраструктуры, социальных и экономических особенностей региона» [19, с. 31]. Исходя из этих определений, называем кластером (выделенным по геоэкологическим предпосылкам устойчивого развития) территорию, в пределах которой ведущей геоэкологической предпосылкой устойчивого развития является одна и та же «группа географически соседствующих взаимосвязанных» или «совокупность сосредоточенных в одной географической области» природных и антропогенных факторов и элементов ландшафта.

То есть, проводя кластеризацию ЗКО, объединяем в один кластер территории с одной и той же ведущей геоэкологической предпосылкой устойчивого развития. Именно эта предпосылка является основанием для стратегического приоритета природопользования на данных территориях и, если необходимо для реализации этого приоритета, оптимизации природопользования. Значимость природных и антропогенных факторов и элементов ландшафта как геоэкологических предпосылок устойчивого развития (как составляющих ландшафтно-экологического каркаса), как было сказано выше, определялась по их отражению в облике ландшафта, дополненному статистическими и историческими сведениями.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Существование геоэкологических предпосылок устойчивого развития

В результате изучения структуры природопользования, изучения и оценки степных, полупустынных и пустынных пастбищ, а также оценки антропогенной нагрузки, установлено, что в пределах ЗКО не определяются заметные ареалы критического или катастрофического геоэкологического состояния территории. Поэтому было принято считать, что на всей территории ЗКО существуют геоэкологические предпосылки устойчивого развития, нужно лишь найти их. Эти предпосылки были найдены для всей территории области, но их пространственное распределение, как будет показано ниже, оказалось таким, что не позволило выделить в пределах ЗКО районы с чёткими границами и без взаимного наложения. Территории ЗКО и её ландшафтно-экологическому каркасу свойственна пространственная дифференциация, что позволило выделить соответствующие кластеры оптимального развития.

Общие свойства кластеров и схема кластеризации ЗКО

В пределах ЗКО выделено семь кластеров, совокупно охватывающих всю территорию области. Каждый кластер является территорией, в пределах которой одна и та же геоэкологическая предпосылка устойчивого развития (составляющая ландшафтно-экологического каркаса) является приоритетной. Такая однородность с явным отличием от остальных территорий и рассматривается

нами как основание для выделения в отдельный кластер. Реализация ведущей геоэкологической предпосылки устойчивого развития является его условием для данного кластера, а значит, приоритеты природопользования в данном кластере должны определяться исходя из реализации этой предпосылки.

Все семь кластеров обладают двумя принципиальными географическими свойствами. Во-первых, соседние кластеры плавно переходят друг в друга, в силу чего любые линии их границ на карте становятся приблизительными. Причина в том, что территории, различающиеся по ведущим предпосылкам устойчивого развития, соседствуют на равнинной местности и не разделены друг от друга резким географическим рубежом. Во-вторых, все кластеры способны к суперпозиции (взаимному наложению) и этим принципиально отличаются от географических районов, всегда разделяющихся чётко проведёнными границами и никогда не накладывающихся друг на друга. Эти свойства кластеров не случайны, таково пространственное распределение значимости геоэкологических предпосылок устойчивого развития (составляющих ландшафтно-экологического каркаса), согласно которому эти кластеры были выделены. Такое пространственное распределение и не позволило выделить в пределах ЗКО районы по ведущим геоэкологическим предпосылкам устойчивого развития, которые имели бы чёткие границы и не накладывались друг на друга.

Ареал волго-уральской популяции сайгака является наилучшей иллюстрацией того, как пространственное распределение значимости геоэкологических предпосылок устойчивого развития обуславливает два перечисленных выше свойства кластеров. В пределах своего ареала волго-уральская популяция сайгака является ведущей геоэкологической предпосылкой устойчивого развития, на основании чего ареал этой популяции в пределах области выделен в сайгачий кластер. В ЗКО этот ареал располагается к юго-западу от линии, проведённой на юго-восток от места выхода р. Бол. Узень на территорию РФ, занимает там всё пространство вне Рын-песков и отчасти проникает в Рын-пески. Точное указание границ ареала невозможно хотя бы в силу его пульсирования в зависимости от условий года и численности вида; уже одно это обстоятельство размывает пространственные границы наибольшей значимости сайгака как предпосылки устойчивого развития, а значит и границы кластера. Едва ли возможно точно указать, например, где именно заканчивается наибольшая значимость сайгака и начинается таковая традиционного для Казахстана адаптивного животноводства, обуславливающая соседний животноводческий кластер в центральной части области. Это не только размывает границы соседних кластеров, но и приводит к их взаимному наложению по краям, ведь, как показали наши исследования, ведущие предпосылки устойчивого развития, свойственные соседним кластерам, не отменяют значимость друг друга.

Плавный переход соседних кластеров друг в друга и суперпозиция кластеров оказались свойственны всем выделенным кластерам, не только сайгачьему, но наилучшим образом иллюстрируются именно им. Для целей выработки рекомендаций по устойчивому развитию степных и аридных регионов предлагаем использовать такие кластеры, выделенные на основе пространственного распределения ведущего фактора и напоминающие по географическим свойствам ареалы биологических видов.

Четыре из семи выделенных кластеров находятся в функциональном сопряжении с аналогичными территориями в регионах РФ, сопредельных с ЗКО. Как будет показано при описании этих кластеров, в случае каждого это сопряжение формирует трансграничный российско-казахстанский кластер, в интересах устойчивого развития нуждающийся в едином трансграничном управлении природопользованием. Данное обстоятельство, а по существу дела причину данного обстоятельства – трансграничное расположение единых природных систем – считаем объективным основанием для развития российско-казахстанского сотрудничества в сфере природопользования.

Описание конкретных кластеров, изложение предпосылок их выделения и рекомендаций по приоритетам природопользования для них считаем необходимым предварить схемой кластеризации ЗКО по ведущим геоэкологическим предпосылкам устойчивого развития (рис. 1) и следующими пояснениями к ней.

Пояснения к схеме кластеризации ЗКО:

1. Большинство кластеров показаны на карте чётко очерченными контурами, но это сделано исключительно в иллюстративных целях, в действительности кластеры не имеют чётких границ, соседние плавно переходят друг в друга.

2. Полеводческий, осевой, сайгачий, вторичностепной кластеры и кластер Рын-песков имеют в своём составе один крупный компактный контур, охватывающий порядка 1 млн га или больше. Животноводческий кластер имеет два таких контура, — эти шесть кластеров на карте показаны залитыми контурами и далее называются компактными. Нефтегазовый кластер не имеет контуров, охватывающих площадь порядка 1 млн га, но состоит из настолько мелких контуров, что на территории ЗКО их удобнее рассматривать как точечные объекты, — этот кластер показан пунсонами, каждый из которых обозначает местоположение одного мелкого контура, и называется очаговым. В отличие от компактных, этот кластер не имеет территорий вне суперпозиции с другими кластерами.

3. Схема не отражает функциональное сопряжение осевого, сайгачьего, вторичностепного и нефтегазового кластеров с аналогичными территориями в сопредельных с ЗКО регионах РФ, т.к. это лежит за её географическими рамками. Трансграничный характер этих кластеров рассмотрен и проиллюстрирован отдельно при их описании, как и перспективы трансграничных российско-казахстанских кластеров с их участием.

Полеводческий кластер ЗКО

Располагается вне Прикаспийской низменности в северной части области на южных отрогах Сыртов, но полностью её не занимает, находится только к западу от вектора, начинающегося в месте вхождения реки Урал в пределы ЗКО и направленного на юго-юго-восток (рис. 1: 1). Не занимает пойму реки Урал ниже г. Уральск. Компактный кластер, площадь порядка 1,04 млн га. В суперпозиции с этим кластером находится нефтегазовый кластер, о чём будет сказано при его рассмотрении.

Ведущей геоэкологической предпосылкой устойчивого развития является наивысший в области биоклиматический потенциал для полеводства. На самом севере представлены южные чернозёмы, занимающие порядка 100 тыс. га, большая часть покрыта тёмно-каштановыми и каштановыми почвами, свыше половины полнопрофильны и пригодны для земледелия. Именно здесь к настоящему времени по объективным причинам

сконцентрировались основные пахотные угодья области общей площадью свыше 0,5 млн га. В этом кластере полеводство уже нашло своё географическое место, свою агроэкологическую и экономическую нишу, в условиях

роста спроса на основные коммерческие культуры можно прогнозировать планомерный рост его масштабов до 0,8–1 млн га со стабилизацией либо постепенным ростом урожайности.

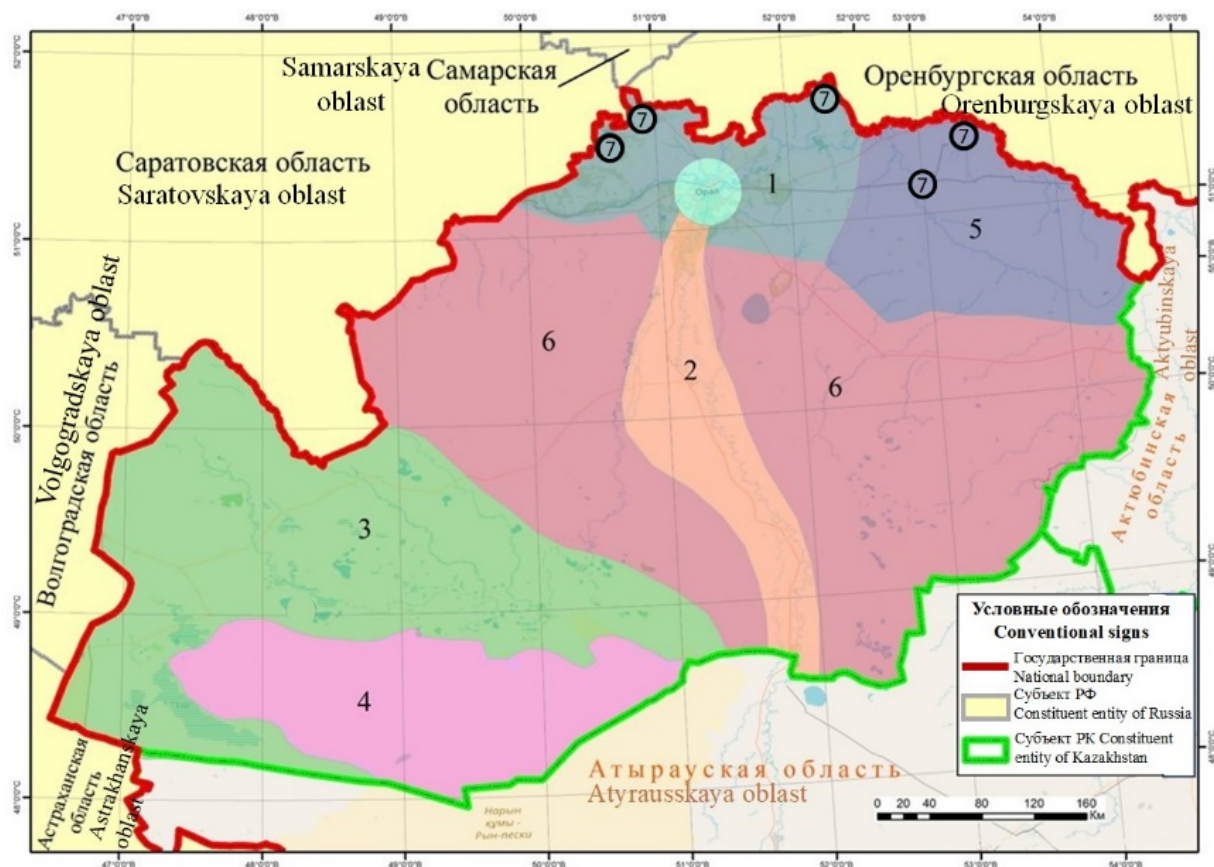


Рисунок 1. Схема кластеризации ЗКО по ведущим геоэкологическим предпосылкам устойчивого развития
Кластеры: 1 – полеводческий, 2 – осевой, 3 – сайгачий, 4 – Рын-песков, 5 – вторичностепной, 6 – животноводческий, 7 – нефтегазовый

Figure 1. Scheme of the west Kazakhstan oblast clustering by the most significant geo-ecological grounds for sustainable development

Clusters: 1 – field husbandry, 2 – axial, 3 – saiga, 4 – Ryn-sands, 5 – secondary steppe, 6 – animal husbandry, 7 – oil and gas

Биоклиматический потенциал для полеводства, будучи наивысшим в области, тем не менее существенно уступает основным зерносеющим регионам соседней РФ, в силу чего невозможно говорить о природных предпосылках к конкуренции с этими регионами на мировых рынках. Рекомендуем ориентировать эту относительно небольшую полеводческую территорию в первую очередь на внутриобластной рынок, в т.ч. на поддержку адаптивного животноводства, но в случае достижения очень высокого качества продукции и при грамотном маркетинге не исключаем вывод ограниченного количества продукции (например, зерна твёрдой пшеницы) на рынок дорогостоящего пищевого сырья.

Для данного кластера рекомендуем адаптивный принцип степного землепользования, выражающийся в адаптации агротехнологий к сложившимся природным и антропогенным условиям, сосредоточении посевных площадей на лучших землях и технологическое перевооружение, ориентированное на природоподобные технологии.

Наибольший природо- и ресурсосберегающий эффект, необходимый для поддержки устойчивого развития полеводческого кластера и ЗКО в целом,

ожидаем при реализации следующих технологических решений:

- минимизация обработки почвы или её полное исключение с мульчированием поверхности пожнивными остатками и незерновой частью урожая;
- насыщение севооборотов многолетними травами и создание травяных экосистем, обеспечивающих благоприятные условия почвообразования, расширение посевов бобовых культур;
- выращивание засухоустойчивых и скороспелых сортов, своевременная сортомена и сортообновление районированных сортов;
- экологическое сортоиспытание перспективных сортов устойчивых к наиболее вредоносным болезням;
- интродукция нетрадиционных культур, совершенствование технологических приёмов их возделывания с адаптацией к современным климатическим и антропогенным изменениям.

Реализуя адаптивный принцип землепользования и современные технологии, полеводческий кластер вполне способен стать опорой продовольственной безопасности ЗКО.

Кластер региона, связанный с трансграничной рекой Урал

Осевой кластер располагается в первую очередь в поймах рек Урал, Кушум и между ними. Восточная граница, она же левобережная по отношению к р. Урал, проведена по линии «с. Кемер (Теректинский р-н) – впадение р. Карабас в р. Шамотсай – с. Кадыркул (Акжаикский р-н)» и далее на юг. Западная граница, она же правобережная по отношению к р. Урал, проведена от Вишнёвого пруда до Кировского водохранилища, далее по правобережному краю Кушумской поймы до Донгулёвского водохранилища, оттуда по Тайпакскому каналу до широты с. Атамекен (Акжаикский р-н) и далее на юг (рис. 1: 2). Охватывает площадь порядка 1 млн га.

Ведущей геоэкологической предпосылкой устойчивого развития для этого кластера является река Урал. Вода, собранная рекой по большей части с территории РФ, поддерживает русла рек Урал и Кушум, Урало-Кушумскую водную систему, поддерживает древесную и луговую растительность при реках Урал и Кушум. Река Урал на протяжении веков определяет судьбу этой территории. Современное пространственное распределение населения ЗКО обусловлено в значительной степени рекой Урал, она является источником воды для крупнейшего населённого пункта и областного центра, г. Уральск, по берегам Урала проживает большая часть населения области. Вопрос распределения водных ресурсов Урала первостепенный

для устойчивого развития осевого кластера. Этот кластер обладает потенциалом развития рекреации и туризма, сохраняется потенциал восстановления прошлого рыбопромыслового значения реки Урал, хотя его реализация потребует значительных вложений и времени.

В свете имеющихся на сегодня работ по бассейну Урала [20–23] можно признать очевидным, что такая крупная река, как Урал, и её пойма вместе с притоками и их поймами образуют единую трансграничную систему. Результаты многолетних исследований не позволяют рассматривать Осевой кластер в отрыве от реки и бассейна в целом, само выделение этого кластера – следствие превалирования значимости именно реки над другими предпосылками устойчивого развития именно на данном участке её бассейна, а не следствие каких-либо природных предпосылок. Основываясь на цитированных выше работах Оренбургской школы по трансграничному бассейну реки Урал, выделяем *трансграничный кластер реки Урал* как территорию, где природопользование должно быть подчинено приоритету сохранения реки. В этом кластере рассматриваем ключевые для водности Урала горные и предгорные водосборные территории бассейна Урала, Урало-Сакмарское междуречье, Осевой кластер ЗКО, пойменные территории вдоль русла Урала ниже устья Сакмары и ниже Осевого кластера ЗКО. Границы этого кластера, равно как границы всех выделяемых нами кластеров, могут быть очерчены лишь приблизительно (рис. 2).

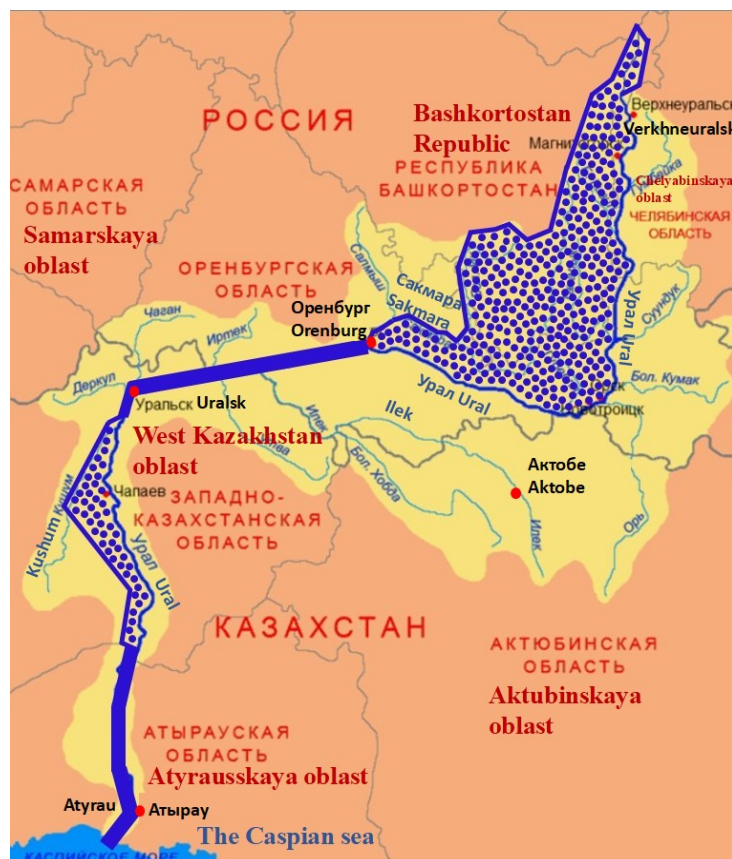


Рисунок 2. Приблизительные очертания трансграничного кластера реки Урал. Желтым показан бассейн Урала, тёмно-синим – трансграничный кластер реки Урал. Контур заполненный синими пятнами на юго-западе – Осевой кластер ЗКО, контур заполненный синими пятнами на северо-востоке – горные и предгорные водосборные территории бассейна Урала и Урало-Сакмарское междуречье

Figure 2. Approximate outline of the Ural River transboundary cluster. The Ural River basin is shown in yellow and the Ural River transboundary cluster in dark blue. The contour filled with blue dots is the southwest – axial west Kazakhstan oblast cluster and the contour filled with blue dots in the northeast –montane and pre-montane territories drainage areas of the Ural River basin and the Ural and Sakmara rivers interfluvium

Результаты многолетних исследований Оренбургской школы привели её основателя и лидера к «12 заповедям сохранения экосистемы бассейна реки Урал» [21], касающимся оптимизации природопользования в бассейне в целом. Опираясь на эти заповеди, мы для трансграничного кластера предлагаем, прежде всего, провести оптимизацию водоохранных зон. Законодательство и правоприменительная практика РФ и РК использует для их определения расстояние от уреза воды в межень (50 м, 100 м, 200 м, и т.п.), что удобно с точки зрения права, но далеко не всегда отвечает природным рубежам значимых для водоёма территорий. В качестве водоохранных зон рекомендуем выделять земли водоохранного значения – территории, состояние которых зависит от сезонных колебаний уровня водоёма или пользование которыми оказывает существенное влияние на водные, прибрежные и пойменные природные сообщества, – основываясь на объективных географических рубежах. Для р. Урал и крупных притоков за таковой рубеж предлагаем принять потенциальную ширину области возможного перемещения русла, фактически это понижение в рельефе, соответствующее пойме, маркируемое системой стариц и речных меандров. Для малых притоков Урала важное водоохранное значение имеет вся пойменная система, которая может быть прерывистой, при этом необходима как минимум 100–метровая зона с приоритетом долговременного сохранения травяной дернины. На тех участках рек, где нет развитой поймы, эта зона должна отсчитываться от уреза воды, где есть развитая пойма – от её края. Пользование землями водоохранного значения должно регламентироваться водным, а не земельным кодексом.

Для водоохранных зон, как и для земель водоохранного значения в нашей трактовке, должна быть полностью исключена ежегодная обработка почвы, прежде всего зябь и пропашные культуры, и рекомендованы следующие природоподобные технологии степного землепользования: многолетние полевые культуры [24], традиционные технологии кормопроизводства, в т.ч. залужение малопродуктивной пашни многолетними травами и травосмесями, метод Агростепи по Д.С. Дзыбову [25], технологии степных пастбищеоборотов и клеточной пастбы [26–28], технологии пойменного товарного сеноводства, разработанные в будущем.

По совокупности цитированных выше и наших исследований отмечаем следующее:

- Отдельного внимания заслуживают русла верховий и истоки малых рек. Требуется расчистка русел малых рек, зарастающих древесно-кустарниковой и тростниковой растительностью, и последующий уход за ними. В связи с этим необходим пересмотр природоохранного статуса бобра в регионе, допускающий регулирование численности.

- Для р. Урал и его крупных притоков необходим запрет на капитальное жилищное строительство в пойме и на низко расположенных террасах. Весенний паводок 2024 года со всей очевидностью показал: любое капитальное жилищное строительство в пойме и на низких террасах реки Урал и его крупных притоков является намеренным провоцированием ЧС.

- Регламент водопользования и использования земель водоохранного значения должен учитывать предотвращение и ликвидацию последствий замусоривания вследствие недостатка общей культуры природопользования и землепользования.

- Необходима отдельная регламентация использования непосредственно русел рек, наиболее актуальна регламентация использования моторных лодок, катеров, водных мотоциклов и т.п. на р. Урал вплоть до полного их запрета на нерестилищах как на особо ценных участках русла.

- Одной из основ устойчивого развития трансграничного кластера реки Урал должно стать восстановление и последующее рациональное использование рыбных ресурсов, прежде всего осетровых. Частиковые промысловые рыбы также заслуживают внимания. Наше видение реализуемости восстановления рыбных ресурсов Урала и их использования для устойчивого развития регионов поддерживается успехом Казахстана в восстановлении сайгака (о нём будет сказано при рассмотрении сайгачьего кластера) и высоким спросом на водные туристические объекты. Восстановление реки Урал как осетровой со всей очевидностью принципиально повысит туристическую привлекательность и конкурентоспособность сплавов по ней, в т.ч. трансграничных, разовьёт такие бренды, как уральский осётр, казахстанский осётр, оренбургский осётр. Эти бренды должны встать в один ряд с казахстанским миллиардом (пудов зерна), золотым человеком, сайгаком, алматинскими яблоками, Медео.

- Не запрещая частным лицам находиться в водоохранной зоне даже с автотранспортом, необходимо принципиально усилить ответственность за умышленное оставление мусора, как правило пикникового. Свободный доступ отдыхающих в водоохранную зону должен сочетаться с их ответственностью перед законом за своё поведение по отношению к реке и берегам как к национальному достоянию.

Сайгачий кластер ЗКО и одноимённый трансграничный кластер

За исключением Рын-песков, сайгачий кластер ЗКО занимает всё пространство области к юго-западу от линии, проведённой на юго-восток от места выхода р. Бол. Узень на территорию РФ (рис. 1: 3). Компактный кластер, площадь порядка 3,8 млн га.

Ведущей геоэкологической предпосылкой устойчивого развития для этого кластера является волго-уральская популяция сайгака, на данный момент находящаяся в фазе максимума своей численности, но даже в самые опасные моменты минимума численности показавшая возможность своего быстрого восстановления. Как часть этой же самой предпосылки рассматриваем развитое на данной территории табунное коневодство, поддерживающее сайгака. Рациональное использование ресурсов сайгака – важнейший ключ к устойчивому развитию этой территории, но не единственный. Другим не менее важным ключом является табунное коневодство: во-первых, его доминирование в ландшафте в сочетании с минимумом овцеводства показало себя условием процветания сайгака и, во-вторых, традиционное для данной территории табунное коневодство при должном маркетинге его продукции и услуг способно поддерживать устойчивое развитие. В 2022 г., когда по нашим наблюдениям волго-уральская популяция сайгака уже распространила свой ареал на сопредельные с ЗКО приграничные районы Саратовской и Волгоградской областей РФ, численность этой популяции составляла 1,1 млн голов [29]. По данным авиаучёта апреля 2024 г. численность сайгака в Казахстане составляет уже 2,8 млн голов, из них волго-уральская популяция 1,6 млн голов

[30]. На весну 2025 г. имеется экспертная оценка поголовья вида в Казахстане на уровне 4,5–5 млн голов, из них 3 млн голов в волго-уральской популяции [31].

При численности волго-уральской популяции сайгака выше 1 млн. голов, необходимой как для благополучия степных экосистем, так и в интересах устойчивого развития ЗКО, эта популяция распространяет свой ареал на сопредельные с ЗКО районы Саратовской и Волгоградской областей РФ, причём эти территории выступают не в виде окраинных маргинальных частей ареала, а как воспроизводственные участки вида, т.к. там

располагаются родильные поля. Факт ключевого значения российской части ареала для поддержки численности популяции рассматриваем как предпосылку развития *трансграничного сайгачьего кластера*, охватывающего весь ареал волго-уральской популяции вида по обе стороны границы (рис. 3). Смысл трансграничного кластера – единое трансграничное управление природопользованием на всей территории кластера с приоритетом сохранения и рационального использования ресурсов волго-уральской популяции сайгака.



Рисунок 3. Трансграничный сайгачий кластер (внутри синего контура). Российская часть кластера заштрихована
Figure 3. The saiga transboundary cluster (inside the blue contour). The Russian part of this cluster is shaded.

В ключевой для поддержания высокой численности российской части ареала сайгак вступает в конфликт с сельским хозяйством, особенно остро с полеводством, по отношению к которому выступает как опасный вредитель полей, с которым действующее законодательство запрещает бороться. Без взаимоприемлемого решения этого конфликта поддержание высокой численности сайгака, а значит и его функция как опоры устойчивого развития, становится проблематичным. Для решения конфликта в российской части ареала рекомендуем:

- минимизировать физические преграды на протяженных линейных сооружениях государственной границы (колючая проволока, каналы, транспортные пути);
- отдать приоритет животноводческому направлению сельского хозяйства в подзоне светло-каштановых и каштановых почв волгоградского и саратовского Заволжья, оренбургского Приуралья и Зауралья;
- выделять угодья в качестве местообитаний сайгака;
- учредить специализированные сайгачьи резерваты по аналогии с Государственным природным резерватом «Бокейорда» и Ащизекским государственным природным заказником в РК;

- учредить охранный статус сайгака как титульного (брендового) степного вида, допускающий регулирование численности;

- признать сайгака живым символом приграничных с РК административных районов.

Ключевым является переход к пастбищному животноводству на наименее продуктивных землях, причём с минимумом овец и максимумом лошадей в структуре поголовья, что в казахстанской части ареала уже достигнуто и послужило предпосылкой восстановления вида наряду со строгой охраной и благоприятными погодно-климатическими условиями.

Не менее важным, причём уже по обе стороны границы, считаем рациональное охотничье использование волго-уральской популяции сайгака. Эта популяция не только достигла промысловой численности, но и вступила в конфликт с сельским хозяйством, решение которого со всей очевидностью требует регулирования её численности и в то же время сохранения функциональности российской части ареала как воспроизводственной территории. Рациональное охотничье использование сайгака, реализующее всю совокупность достижений охотоведения и знаний о сайгаке, должно стать средством, при помощи которого устойчивое развитие опирается на сайгака. При

рациональном использовании популяция сайгака способна поддерживать такие виды деятельности как спортивная охота, продажа высоко ценящихся на рынке сайгачьих рогов или продукции их переработки, продажа мясной и иной продукции охоты на сайгака. Эти охотничьи в своей основе виды деятельности вполне совместимы с привлечением туристов к наблюдению за стадами сайгаков.

Другой столь же важной опорой устойчивого развития сайгачьего кластера должно стать табунное коневодство, которое вполне может развиваться, например, по разработанной в Казахстане концепции неономадизма, изложенной и обоснованной М. Акышем и М. Туякбаевым [32]. Табунное коневодство могло бы поставлять не только конину, традиционную пищу казахов и соседних тюркских народов, но и кумыс, который может выступать не только непосредственно товаром, но и основой кумысолечения в сайгачьем кластере. При достаточном маркетинге и таких очевидных объективных предпосылках востребованности как распространённость туберкулёза лёгких и лёгочных осложнений COVID-19, кумысолечение вполне способно поддержать устойчивое развитие любых коневодческих территорий с засушливым климатом.

Кластер Рын-песков

Данный кластер занимает всю территорию Рын-песков в пределах ЗКО (рис. 1: 4). Компактный кластер площадью порядка 1,7 млн га.

Ведущей геоэкологической предпосылкой устойчивого развития является специфический природный комплекс, развившийся на грядово-бугристых песках с характерным чередованием песчаных гряд (нарынов) и долинообразных понижений между ними (ашиков), где развились зелёные оазисы, напоминающие лесостепь. На севере Рын-пески имеют определённое значение для волго-уральской популяции сайгака; весь кластер привлекателен для адаптивного животноводства как зимние пастбища, в т.ч. вследствие доступности водопоя и ослабленного воздействия джутов, но в то же время особо уязвим к перевыпасу; на фоне окружающих аридных и семиаридных территорий кластер обладает высоким туристическим потенциалом.

В ашиках на рубеже XIX и XX вв. были с особой тщательностью, с научным подходом к выбору мест и технологиям, созданы культуры сосны, ольхи чёрной и белой акации. И по сей день куртинные посадки сосны в Урдинских песках представляются нам уникальным памятником лесоразведению в песках Прикаспия (рис. 4).



Рисунок 4. Культуры сосны старше 100 лет в Урдинских песках

Figure 4. Forest plantation more than 100 years old in the Urda sands

В начале XX века Рын-пески были очагом экологического бедствия вследствие перевыпаса, в борьбе с ним развивалась культура травосеяния. Так в Урдинских песках на одном из ашиков в 30 км к юго-востоку от пос. Урда в урочище Айкемен в 1926 г. было организовано Букеевское опытное поле, просуществовавшее до 1932 года, но успевшее накопить позитивный опыт травосеяния на ашиках [33].

Уникальные ландшафты Рын-песков с ашиками, напоминающими разнотравно-луговые степи, и нарынами, похожими скорее на барханные пустыни, «чистейшая и вкуснейшая, как мёд» вода, сохранившиеся естественные и культурные лесные насаждения послужили основаниями для проекта Урдинского

заповедника на площади 104 тыс. га, предложенного к разработке в конце 1980-х [34], но такой проект не был реализован.

Задача сегодняшнего дня – это не столько экстренное закрепление песков, сколько организация рационального использования кормовых угодий и целенаправленное повышение кормовой продуктивности путём фитомелиораций с применением природоподобных агротехнологий. Для кластера Рын-песков рекомендуем:

- как минимум вдвое снизить пастбищную нагрузку до порядка 20 га пастбищ на 1 условную голову или до выпаса 80–100 тыс. условных голов на весь кластер. Организация рационального использования кормовых

угодий и целенаправленное повышение кормовой продуктивности путём фитомелиораций с применением природоподобных агротехнологий;

- восстановить «Букеевское опытное поле»;
- вернуться к проекту Урдинского заповедника, но с учётом современных условий и приоритетов;
- использовать высокий туристический потенциал сочетания экзотики и романтики пустынных регионов Евразии с ландшафтами, похожими на процветающую лесостепь.

Вторичностепной кластер ЗКО и трансграничный степной кластер

Вторичностепной кластер ЗКО располагается на северо-востоке области, на южных отрогах Сыртов, в пространстве, охваченном целинной кампанией 1950-х годов, к востоку от вектора, начинающегося в месте вхождения реки Урал в пределы ЗКО и направленного на юг-юго-восток, и к северу от линии «гора Алмазтау – с. Аралтобе (Сырымский р-н)» и далее до р. Анкаты параллельно автодороге «Уральск-Актобе» (рис. 1: 5). Компактный кластер, площадь порядка 1,5 млн га.

Ведущей геоэкологической предпосылкой устойчивого развития является массив вторичных степей на месте степей, распаханых в советскую целинную кампанию 1950-х годов, площадью не менее 400 тыс. га, вероятно, крупнейший в Евразии. Вторичные степи на таких площадях позволяют основывать устойчивое развитие на их рациональном использовании, на оказываемом ими широком спектре экологических услуг, в то же время поддерживая сохранение ландшафтного и биологического разнообразия степей.

Уже достигшая ковыльной стадии степной сукцессии, но в то же время ещё молодая растительность вторичных степей характеризуется высокой продуктивностью и способна поддерживать традиционное для этих мест пастбищное животноводство, причём существуют технологии, позволяющие одновременно поддерживать высокую кормовую продуктивность степей. Вторичная степь активно и надёжно депонирует углерод, причём это возможно в режиме рационального непахотного использования, что позволяет развивать пастбищное животноводство и в то же время требовать учёта депонирования углерода как вклада РК в решение углеродной проблемы. Вторичная степь сосредотачивает ресурсы титульных биологических видов степей, сохранение которых возможно без исключения территории из хозяйственного использования. Более того, оптимальным для этих видов является сохранение в процессе рационального использования биологических ресурсов их популяций. Вторичностепной кластер самой природой призван к устойчивому развитию на основе природоохранной специфики степей через реализацию идеи сохранения степей в процессе их рационального использования. Благодаря пахотной передышке и стечению благоприятных условий, к 2016 году во вторичностепном кластере ЗКО и на сопредельном Троицком выступе Оренбургской области сформировалось порядка 400–450 тыс. га вторичных степей на плакорах. Все эти степи составляют обусловленный общей причиной комплекс вторичных степей, генетически и функционально представляющий собой единое трансграничное целое, которое предлагаем рассматривать как *трансграничный степной кластер* (рис. 5).

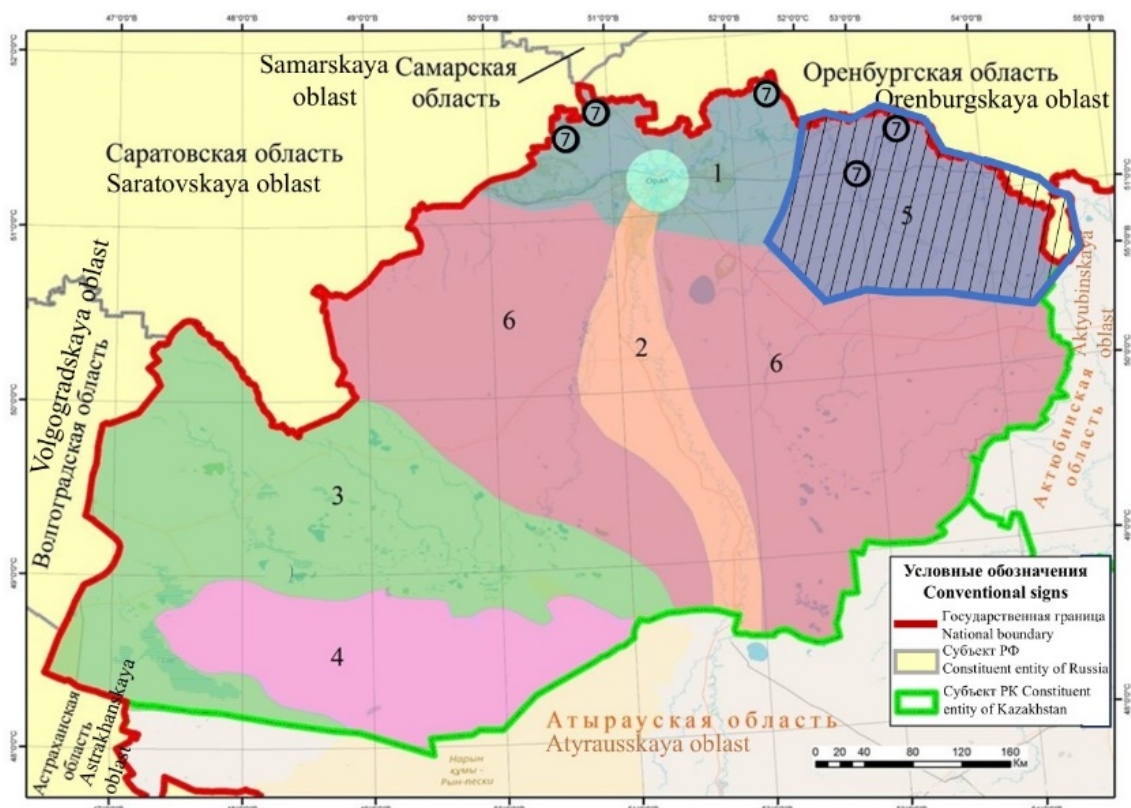


Рисунок 5. Трансграничный степной кластер (заштрихован)
Figure 5. The steppe transboundary cluster (shaded)

Для вторичностепного кластера ЗКО и трансграничного степного кластера рекомендуем сделать упор на

использовании естественных степных фитоценозов для адаптивного животноводства и депонирования углерода.

Рекомендуемое поголовье оцениваем как не более 150 тыс. условных голов с ежегодным изъятием 30 % стада (порядка 50 тыс. голов) и получением порядка 10 тыс. т. высоко ценной мясной продукции. Основываясь на отечественных исследованиях депонирования углерода степными экосистемами [35; 36], ожидаем, что при таком использовании кластер, особенно его вторичные степные экосистемы, может депонировать не менее 0,5 млн т атмосферного углерода в год.

Рекомендуем следующие взаимосовместимые сценарии развития землепользования во вторичностепном кластере ЗКО и трансграничном степном кластере:

1. Резервирование больших площадей перспективных для организации степных заповедников, в т.ч. трансграничных.
2. Организация сети степных карбоновых полигонов, в т.ч. международных.
3. Организация специализированных охотничьих хозяйств.
4. Степной ревайлдинг, в т.ч. степное бизоноводство.
5. Организация плейстоценовых парков, в т.ч. трансграничных.
6. Организация системы международного степного туризма.

Главная задача – это поддержка кластера как крупнейшей в Евразии степной территории площадью свыше 1,5 млн га. Для решения этой задачи землепользование должно быть организовано на началах «долгой травы» или цеспезария [37]; для пахотных угодий должен быть приоритет кормовых культур, поддерживающих адаптивное животноводство и организована система ландшафтооборота «поле-залежь-степь-поле», разработанная Оренбургской школой степеведения [38].

Крупнейший в Евразии трансграничный массив целинных и вторичных степей можно расценивать как глобальный устойчивый резерв степей, вклад Казахстана и России в сохранение биосферы Земли в XXI веке, поддерживающий устойчивое развитие и, кроме того, дающий основания для соискания достойной международной поддержки, в т.ч. финансовой, под лозунгом «Степи – будущим поколениям».

Животноводческий кластер

Занимает всю территорию области к югу от полеводческого и вторичностепного кластеров и к северо-востоку от сайгачьего кластера за исключением отнесённой к осевому кластеру (рис. 1: 6). Компактный кластер, площадь порядка 6 млн га. Ведущей геоэкологической предпосылкой устойчивого развития является традиционное для равнинного Казахстана пастбищное животноводство. Среди выделенных кластеров животноводческими также являются сайгачий, вторичностепной кластеры и кластер Рын-песков, но в сайгачьем кластере не менее важной основой устойчивого развития является сайгак и доминирование коневодства, во вторичностепном – весь комплекс экосистемных услуг вторичных степей, а в кластере Рын-песков животноводство обременено высокой экологической уязвимостью территории. Животноводческий кластер – это типичная для равнинного Казахстана полупустынная животноводческая территория без дополнительных специфик.

В качестве средства развития пастбищного животноводства в опору устойчивого развития предлагаем опираться на цитировавшуюся выше концепцию неонмадизма [32], авторы которой убедительно доказали, что при природных условиях Казахстана адаптивное животноводство способно наиболее эффективно использовать ресурсы пастбищ только в случае реализации системы мобильного пастбищного хозяйства, выделяющего сезонные пастбища так же, как кочевое животноводство казахов ранее XX века.

Принимая мобильность адаптивного животноводства, признаём, что в идеале пастбища животноводческого кластера ЗКО должны входить в качестве сезонных в более крупную систему пастбищных угодий вместе с сезонными пастбищами в других кластерах, а возможно и с пастбищами в соседних областях. То же самое верно в отношении пастбищ сайгачьего, вторичностепного кластера и кластера Рын-песков, но на данный момент не представляется возможным очертить контур такого функционального объединения. Приблизительное представление о нём иллюстрируется схемой пространственного распределения сезонных угодий Казахстана во второй половине 1920-х годов (рис. 6).

Признавая, что именно мобильное пастбищное животноводство наилучшим образом способствовало бы устойчивому развитию животноводческого, сайгачьего, вторичностепного кластера и кластера Рын-песков, мы не можем согласиться с авторами неонмадизма в приоритетной долговременной ориентации на овцеводство как в силу переменчивости рыночной конъюнктуры и экономических параметров, которыми аргументирована эта ориентация, так и с позиций степеведения, совокупность достижений которого возражает против любой монокультуры и настаивает на максимальном приближении воздействия пасущихся стад к таковому дикой степной фауны в интересах долговременного сохранения качества пастбищ.

Исходя из принципа природоподобия в землепользовании, которого придерживается Оренбургская школа степеведения, животноводческие стада выступают экологическими аналогами стад диких степных копытных, а значит должны выполнять как минимум экологические функции лошадей (питание грубым злаковым кормом на ходу), бычьих (питание зелёными частями злаков и разнотравьем с длительным перевариванием), овец и сайгаков (питание кормом, не употребляемым доминантами). Основываясь на этом принципе, для животноводческого кластера предлагаем в предварительном порядке признать оптимальным отношение поголовья лошадей к поголовью КРС как 1:1, отношение поголовья лошадей к поголовью овец и коз как 3:4. Отсюда следующая пропорция поголовья – лошади : КРС : овцы и козы = 3 : 3 : 4. На основе совокупности имеющихся данных приблизительно оцениваем потребность в пастбищах в данном кластере (при условии неистощительного использования) как 10 га на 1 голову лошадей или КРС и 1,5 га на 1 голову овец или коз; исходя из этой оценки и приведённой выше пропорции поголовья приблизительно оцениваем оптимальное поголовье кластера как порядка 270 тыс. гол. КРС, 270 тыс. гол. лошадей, 360 тыс. гол. овец.

Поддерживая рациональное использование степей как пастбищ мобильного животноводства, животноводческий кластер, а также сайгачий, вторичностепной кластеры и кластер Рын-песков, смогут

поставлять конину и кумыс, способный выступать не только непосредственно товаром, но и основой

кумысолечения; мраморное мясо и полный набор продукции животноводства лошадей, КРС, овец и коз.



Рисунок 6. Схема основных пастбищных массивов и маршрутов перекочетов в 1926–1930 гг.

по М.Г. Сахарову. Цитирована в: [32, с. 34] по: [39, с.309].

Figure 6. Scheme of main pasture territories and season migration routes in 1926–1930

by M.G. Sakharov. Cited by [32, p. 34] & by [39, p. 309].

Нефтегазовый кластер ЗКО и одноимённый трансграничный кластер

Нефтегазовый кластер ЗКО представляет собой типичный кластер по М.Ю. Портеру [18], состоит из разрабатываемых месторождений углеводородного сырья на севере области, крупнейшие из которых Карачаганакское и Чинарёвское нефтегазоконденсатные, из предприятий поддерживающих добычу и перерабатывающих предприятий в городах Уральск и Аксай. Кластер полностью находится в суперпозиции с полеводческим и вторично-степным кластерами (рис. 1: 8). Очаговый кластер, его площадные параметры здесь не приводятся, т.к. по отношению к территории ЗКО элементы этого кластера удобно рассматривать как точечные объекты, а их распределение по области имеет принципиально большее значение, чем собственная площадь.

Ведущей геоэкологической предпосылкой устойчивого развития являются месторождения углеводородного сырья. На севере ЗКО, на границе с Оренбургской, Самарской и Саратовской областями, выделяется промышленный пояс с центром в г. Уральск, характеризующийся нефтегазовыми месторождениями, наиболее крупные из которых — Карачаганакское и Чинарёвское, перспективны Дарьинское и Ростошинское. То есть, предпосылкой к выделению нефтегазового кластера фактически является уже сформировавшийся кластер, он будет и далее продолжать развиваться, пока существуют его сырьевая основа и высокая экономическая значимость углеводородного сырья и получаемой из него продукции.

Принципиальным является совместимость углеводородной отрасли с благополучным состоянием природных и природно-антропогенных сообществ, сохранением ландшафтного и биологического разнообразия, сохранением земельных и водных ресурсов, с развитием других кластеров, то есть с устойчивым развитием ЗКО. Результаты наших

исследований на данный момент позволяют признать: важнейшим для совместимости углеводородной отрасли и устойчивого развития ЗКО является сохранение существующего государственного регулирования воздействия отрасли на окружающую среду и очагового характера пространственного распределения её элементов. Если не возникнет тенденция к слиянию очагов в компактный кластер, как это произошло в Атырауско-Эмбенском промышленном узле, то функционирование нефтегазового кластера окажется вполне совместимым с устойчивым развитием ЗКО. Выход нефтегазового кластера в Прикаспийскую низменность едва ли принципиален при условии сохранения очагового характера кластера и того регламента, которого в настоящее время придерживается деятельность по добыче и переработке углеводородов.

Говоря о нефтегазовом кластере, нельзя не сказать о трансграничных перспективах его развития. В области переработки газа на данный момент уже сложилась кооперация с Оренбургским газоперерабатывающим заводом, что и обуславливает такие перспективы, особенно заманчивые в связи с близостью Карачаганакского и Чинарёвского месторождений к Оренбургу. Ниже дана схема трансграничного нефтегазового кластера, состоящего из этих месторождений и Оренбургского ГПЗ (рис. 7).

При всей заманчивости перспектив трансграничного сотрудничества, не можем не отметить очевидную целесообразность дальнейшего развития нефтегазовой отрасли Казахстана в направлении углубления переработки углеводородного сырья, в т.ч. с использованием международных инвестиций.

Город Уральск как областной центр

Город Уральск является единственным крупным городским центром ЗКО, её экономическим и

административным центром. Ниже рассмотрено отношение города ко всем кластерам.

Сосредоточение в Уральске предприятий пищевой промышленности (Желаевский комбинат хлебопродуктов, Аккайнар и др.) относит город к полеводческому кластеру, т.к. через эти предприятия кластер выходит на жизненно важный для него внутренний рынок ЗКО. Уральск, удобно связанный транспортной инфраструктурой со всеми соседними регионами РК и РФ, объективно является местом промышленной переработки животноводческой продукции (например, действует мясокомбинат Батыс-Нык), а потенциально и охотничьей продукции. Это обстоятельство относит Уральск ко всем кластерам

животноводческой ориентации: животноводческий, сайгачий, вторичностепной, кластер Рын-песков. Расположение города на реке Урал делает его одним из крупнейших водопользователей и важным земледельцем, от которого зависит благополучие реки и всего осевого кластера. К нефтегазовому кластеру Уральск относят расположенные в городе предприятия, поддерживающие добычу углеводородов (например, «БатысМунайГазЖабдыктары», Oilfield Support LTD), входящие в этот кластер, а также то, что город со всей очевидностью является оптимальным местом жительства работников нефтяной и газовой промышленности, занятых на предприятиях нефтегазового кластера.



Рисунок 7. Схема трансграничного нефтегазового кластера
Figure 7. Scheme of the oil and gas transboundary cluster

Считаем, что в целях развития научных основ устойчивого развития ЗКО было бы непродуктивно как относить Уральск к одному из выделенных кластеров (тогда сложнее учесть отношение города к остальным), так и выделять его в отдельный кластер, аналогичный остальным (тогда сложнее учесть отношение города ко всем кластерам). Уральск — это именно место суперпозиции всех кластеров области, объединяющее их в единое целое, и следовательно объективный центр ЗКО.

Официальные границы г. Уральск, как показали наши обследования, не совпадают с примерным контуром города как места суперпозиции всех кластеров. В этом качестве Уральск приблизительно очерчивается окружностью радиусом порядка 10 км с центром в Перевалочной роще в середине основания меандра р. Урал. Эта окружность частично трассируется окружающими город автодорогами: трассой Уральск-Оренбург на участке с. Пойма – с. Подстепное, Окружным шоссе, ул. Айткулова в пос. Загаганск. В то же время, вся территория в пределах официальных границ города имеет тенденцию присоединиться к Уральску как месту суперпозиции всех кластеров, что придаёт очертаниям этого места дополнительную неопределённость и динамичность. Поэтому на генеральной карте кластеризации ЗКО (рис. 1) г. Уральск показан кругом с центром в Перевалочной роще и радиусом до с. Барбастау, то есть в пределах окружности концентричной

вышеописанной и несколько больше её, но без полного охвата Уральска в его административной границе.

Помимо административного центра области, г. Уральск является центром научной поддержки её устойчивого развития. В Западно-Казахстанском университете им М. Утемисова действует геоботаническая степеведческая научная школа, проводимые ею исследования охватывают Западный Казахстан и сопредельные территории, успешно решается целый ряд фундаментальных и прикладных задач, в т.ч. по научному обеспечению перехода к устойчивому развитию, сохранения ландшафтного и биологического разнообразия Северного Прикаспия. Географическая и историческая общность Заволжско-Уральского сектора степной зоны делает трансграничной любую задачу его изучения как единого целого, в связи с чем школа В.В. Иванова развивает трансграничное научное сотрудничество с Оренбургской ландшафтно-экологической школой степеведения в Институте степи УрО РАН.

Между Западно-Казахстанским университетом им. М. Утемисова и Институтом степи УрО РАН подписан договор о сотрудничестве, в ЗКО организован международный научный полустационар «Аралсорский», расположенный при одноимённом озере, на базе стационара в последние годы проведён ряд совместных полевых исследований по углублению представлений о ландшафтном разнообразии и специфике Северного

Прикаспия, изучению крупнейшей в мире трансграничной волго-уральской популяции сайгака и перспектив её интеграции в современный агроландшафт.

Научной поддержке устойчивого развития Заволжско-Уральского сектора степной зоны, в том числе ЗКО, могут способствовать исследования, проводимые на стационарах Института степи УрО РАН: «Бузулукский Бор» и «Оренбургская Тарпания». Стационар «Оренбургская Тарпания» расположен в буферной зоне участка ГПЗ «Оренбургский» «Предуральская степь», обоснование организации этого участка было подготовлено сотрудниками Института степи, на нём успешно реализован проект реинтродукции лошади Пржевальского, в подготовке которого также участвовали сотрудники Института степи, принадлежащие Оренбургской степеведческой школе. Стационар «Бузулукский бор» организован в пределах одноимённого лесного массива, его целями, помимо научных исследований, являются развитие взаимодействия академической науки и высшего образования, предоставление научно-методической и учебно-информационной помощи государственным и муниципальным органам власти, предприятиям и организациям, функционирование как база научных экспедиций.

Научное сопровождение программ устойчивого развития ЗКО может быть усилено двумя исследовательскими базами. Это уже упоминавшееся Букеевское опытное поле, необходимое для разработки природоподобных технологий на основе культуры кормовых трав для Волго-Уральского междуречья, и Джаныбекский стационар в окрестностях с. Жанибек (Жанибекский р-н), территория которого в настоящее время разделена между Россией и Казахстаном. Восстановление межгосударственного стационара будет способствовать развитию степеведения в этом трансграничном регионе.

ВЫВОДЫ

- Геоэкологические предпосылки устойчивого развития существуют на всей территории ЗКО.
- Пространственное распределение значимости геоэкологических предпосылок устойчивого развития в Западно-Казахстанской области таково, что её территория и ландшафтно-экологический каркас организованы не в районы с чётко очерченными границами, а в кластеры, характеризующиеся размытыми границами.
- По ведущим геоэкологическим предпосылкам устойчивого развития Западно-Казахстанская область состоит из следующих кластеров: 1 – полеводческий, 2 – осевой, 3 – сайгачий, 4 – Рын-песков, 5 – вторичностепной, 6 – животноводческий, 7 – нефтегазовый.
- Трансграничное расположение единых природных систем обуславливает следующие трансграничные российско-казахстанские кластеры с участием кластеров Западно-Казахстанской области: трансграничный кластер реки Урал, трансграничный сайгачий кластер, трансграничный степной кластер, трансграничный нефтегазовый кластер. Смысл трансграничных кластеров в едином трансграничном управлении природопользованием.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено по теме НИР Института степи УрО РАН «Проблемы степного природопользования в

условиях современных вызовов: оптимизация взаимодействия природных и социально-экономических систем» № ГР АААА-А21-121011190016-1и в рамках российско-казахстанского научного сотрудничества школ степеведения НАО «Западно-Казахстанский университет им. М. Утемисова» и Института степи УрО РАН в рамках развития Аралсорского международного научного полустационара.

ACKNOWLEDGMENTS

The research was carried out on the topic of the research Institute of Steppes, Ural Branch, Russian Academy of Sciences "Problems of Steppe Management in the Face of Modern Challenges: Optimising the Interaction between Natural and Socioeconomic systems" No. GR AAAAAA-A21-121011190016-1, within the framework of the Russian-Kazakhstan cooperation between the schools of steppe study at the Mukhambet Utemisov west Kazakhstan and the Institute for Steppe Studies, UB, RAS, as part of the development of the Aralsorsk International Scientific Semi-Station.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чибилёв А.А. Экологическая оптимизация степных ландшафтов. Репринтное издание. Оренбург: ООО «Типография Южный Урал», 2016. 182 с.
2. Чибилёв А.А. Современные проблемы степеведения // Вопросы степеведения. Оренбург: ООО «Оренбургская губерния», 2000. С. 5–7.
3. Левыкин С.В., Казачков Г.В., Яковлев И.Г., Груднин Д.А. Предпосылки восстановления типичных степей в Заволжско-Уральском регионе // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. N 3(1). С. 312–316.
4. Brinkert A., Hölzel N., Sidorova T.V., Kamp J. Spontaneous steppe restoration on abandoned cropland in Kazakhstan: grazing affects successional pathways // Biodiversity and conservation. 2016. V. 25(12). P. 2543–2561. <https://doi.org/10.1007/s10531-016-1083-0>
5. Kamp J., Koshkin M.A., Bragina T.M., Katzner T.E., Milner-Gulland E.J., Schreiber D., Sheldon R., Shmalenko A., Smelansky I., Terraube J., Urazaliev R. Persistent and novel threats to the biodiversity of Kazakhstan's steppes and semi-deserts // Biodiversity and conservation. 2016. V. 25(12). P. 2521–2541. <https://doi.org/10.1007/s10531-015-1020-7>
6. Чибилёв А.А. Природа знает лучше. Екатеринбург: ИС УрО РАН, 1999. 275 с.
7. Тишков А.А., Осипов В.И. Геоэкология // Большая Российская энциклопедия. Т. 6. М.: БРЭ, 2006. С. 657.
8. Solow R.M. Sustainability: An Economist's Perspective // Robert N. Stavins (ed.), Economics of the Environment (4th edn). New York: W.W. Norton. 2000, P. 505–513.
9. Макаров И.А. Устойчивое развитие // Большая российская энциклопедия. URL: <https://bigenc.ru/c/ustoichivoe-razvitie-1e8c42> (дата обращения: 29.04.2025)
10. Ларин И.В. Краткое пособие по изучению естественных кормов. М., Л.: Гос. изд-во, 1930. 80 с.
11. Иванов В.В. Степи Западного Казахстана в связи с динамикой их покрова. М., Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1958. 288 с.
12. Временные указания по геоботаническому обследованию природных кормовых угодий колхозов, совхозов и других сельскохозяйственных предприятий РСФСР. М.: [б. и.], 1973. 112 с.
13. Общесоюзная инструкция по проведению геоботанического обследования природных кормовых угодий и составлению крупномасштабных геоботанических карт. М.: Колос, 1984. 105 с.
14. Кочуров Б.И. Геоэкология: экодиагностика и эколого-хозяйственный баланс территории. Смоленск: СГУ, 1999. 154 с.
15. Кропьянко Л.В., Беспалова Л.А. Геоэкологическая оценка и районирование Азово-Черноморского побережья России. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. 212 с.
16. Милюков Ф.Н. Физическая география: учение о ландшафте и географическая зональность. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1986. 328 с.
17. Чибилёв А.А. Картины природы Оренбургского края: атлас-монография. М., Оренбург, СПб: Институт степи ОФИЦ УрО РАН, РГО, 2024. 488 с.

18. Портер М.Э. Конкуренция. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. 608 с.
19. Воробьев В.П., Липатников В.С., Розанова С.К. Инновационное развитие промышленных комплексов на основе кластерного подхода. СПб: ЧОУ ВПО «Балтийский гуманитарный институт», ИД «Петрополис», 2011. 144 с.
20. Сивохиц Ж.Т., Павлейчик В.М., Чибилев А.А., Падалко Ю.А., Козлова М.А., Попова О.Б. Гидроэкологические ограничения использования водных ресурсов трансграничных рек Урала и Тобола в пределах степной зоны // Юг России: экология, развитие. 2024. Т. 19. N 2. С. 170–180. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2024-2-15>
21. Чибилев А.А. Бассейн Урала как модельный трансграничный регион евразийского сотрудничества // Известия Оренбургского отделения Русского Географического Общества. 2017. N 9(42). С. 31–36.
22. Сивохиц Ж.Т., Чибилев А.А. Географические предпосылки межгосударственного управления трансграничным бассейном р. Урал // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2010. N 4. С. 103–105.
23. Чибилев А.А. Бассейн Урала: история, география, экология. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 312 с.
24. Perennial crops: New hardware for agriculture // The Land Institute. 2022. URL: <https://landinstitute.org/our-work/perennial-crops/> (дата обращения: 31.08.2022)
25. Дзыбов Д.С. Агроксепи. Ставрополь: АГРУС, 2010. 256 с.
26. Евсеев В.И. Пастбища юго-востока. Чкалов: Кн. изд-во, 1954. 340 с.
27. Ларин И.В. Пастбищеоборот, система использования пастбищ и ухода за ними. М.; Л.: Сельхозгиз, 1955. 123 с.
28. Ларин И.В. Луговое хозяйство и пастбищное хозяйство. 3-изд., перераб. и доп. Л.: Колос, 1969. 549 с.
29. Кривошеева А. Численность сайгаков в Казахстане приближается к 2 миллиону // SaigaNews. Бюллетень Альянса по сохранению сайгака. 2023. Вып. 29. С. 10.
30. Цутер Ш. В Казахстане продолжается рост популяции сайгака // SaigaNews. Бюллетень Альянса по сохранению сайгака. 2024-2025. Вып. 30. С.17–18.
31. Эксперт объяснил массовую миграцию сайгаков из Казахстана в Саратовскую область // Известия. 30.05.2025. URL: <https://iz.ru/1895744/2025-05-30/ekspert-obiasnil-massovuiu-migratciiu-saigakov-iz-kazakhstanu-v-saratovskuiu-oblast> (дата обращения: 01.06.2025)
32. Акыш М., Туякбаев М. Новые номады и Великая Степь. Как восстановить мобильное пастбищное животноводство Казахстана и сделать его эффективным и прибыльным. Екатеринбург: «Издательские решения», 2019. 128 с.
33. Жугина Л.И., Салин А.Н. Травосеяние на песках. Алма-Ата, Москва: Казахстанское краеведческое изд-во, 1933. 44 с.
34. Перспективы формирования природно-заповедного фонда Казахстана. Алма-Ата: Наука, 1989. 87 с.
35. Карелин Д.В., Люри Д.И., Горячкин С.В., Лукин В.Н., Кудиков А.В. Изменение почвенной эмиссии диоксида углерода в ходе постагрогенной сукцессии в чернозёмной лесостепи // Почвоведение. 2015. N 11. С. 1354–1366. DOI: 10.7868/S0032180X1511009X
36. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Жиенгалиев А.Т., Кудеяров В.Н. Углеродный бюджет степных экосистем России // Доклады Академии Наук. 2019. Т. 485. N 6. С. 732–735. DOI: 10.31857/S0869-56524856732-735
37. Левыкин С.В., Чибилев А.А., Казачков Г.В. Восстановление экосистемного базиса степей новационными формами степного землепользования // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2010. N 2(26). С. 223–225.
38. Левыкин С.В., Казачков Г.В., Яковлев И.Г., Грудинин Д.А. Обустройство степных агроландшафтов и управление ими как ось конвергенции фундаментальных наук и природоподобных технологий // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. N 3(65). С.194–196.
39. Тореханов А.А., Алимаев И.И., Оразбаев С.А. Лугопастбищное кормопроизводство. Алматы: Гылым, 2008. 446 с.

REFERENCES

1. Chibilev A.A. *Ecologicheskaya optimizatsiya stepnykh landshaftov* [Ecological optimization of steppe landscapes]. Reprint. Orenburg, LLC printing house "Yuzhnyi Ural". 2016, 182 p. (In Russian)
2. Chibilev A.A. Current problems of steppe science. *Voprosy stepvedeniya* [Steppe Science]. Orenburg, LLC "Orenburgskaya guberniya", 2000. pp. 5–7. (In Russian)
3. Levykin S.V., Kazachkov G.V., Yakovlev I.G., Grudin D.A. Preconditions of the typical steppe restoration in the Trans-Volga-Urals region. *Izvestiya of SSF RAS* [Proceeding of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2013, vol. 15, no. 3(1), pp. 312–316. (In Russian)
4. Brinkert A., Hölzel N., Sidorova T. V., Kamp J. Spontaneous steppe restoration on abandoned cropland in Kazakhstan: grazing affects successional pathways. *Biodiversity and conservation*, 2016, vol. 25(12), pp. 2543–2561. <https://doi.org/10.1007/s10531-016-1083-0>
5. Kamp J., Koshkin M.A., Bragina T.M., Katzner T.E., Milner-Gulland E.J., Schreiber D., Sheldon R., Shmalenko A., Smelansky I., Terraube J., Urazaliev R. Persistent and novel threats to the biodiversity of Kazakhstan's steppes and semi-deserts. *Biodiversity and conservation*, 2016, vol. 25(12), pp. 2521–2541. <https://doi.org/10.1007/s10531-015-1020-7>
6. Chibilev A.A. *Priroda znaet lytshche* [The Nature knows better]. Yekaterinburg, Institute of Steppe UB RAS, 1999, 275 p. (In Russian)
7. Tishkov A.A., Osipov V.I. *Geoecology. The Great Russian encyclopedia*, 2006, vol. 6, p. 657. (In Russian)
8. Solow R.M. Sustainability: An Economist's Perspective. Robert N. Stavins (ed.), *Economics of the Environment* (4th edn). New York, W.W. Norton, 2000, pp. 505–513.
9. Makarov I.A. [The sustainable development]. In: *Ustoychivoe razvitie. Bolshaya Rossiyskaya enciklopediya*. (In Russian). Available at: <https://bigenc.ru/c/ustoychivoe-razvitie-1e8c42> (accessed 29.04.2025)
10. Larin I.V. *Kratkoe posobie po izucheniyu estestvennykh kormov* [A short guide to the study of natural feeds]. Moscow, Leningrad, State Publ., 1930, 80 p. (In Russian)
11. Ivanov V.V. *Stepi Zapadnogo Kazakhstana v svyazi s dinamikoikh pokrova* [Steppes of the West Kazakhstan in connection with its cover]. Moscow, Leningrad, USSR Academy of Sciences Publ., 1958, 288 p. (In Russian)
12. Temporary guidelines for the geobotanical survey of natural forage lands of collective farms, state farms and other agricultural enterprises of the RSFSR. Moscow, 1973, 112 p. (In Russian)
13. All-Union instruction on conducting a geobotanical survey of natural forage lands and compiling large-scale geobotanical maps. Moscow, Kolos Publ., 1984, 105 p. (In Russian)
14. Kochurov B.I. *Geoekologiya: ekodiagnostika i ekologo-khozyaystvennyy balans territorii*. [Geoecology: ecodiagnosis and ecological and economic balance of the territory]. Smolensk, SSU Publ., 1999, 154 p. (In Russian)
15. Kropyanko L.V., Bespalova L.A. *Geoekologicheskaya otsenka i rayonirovaniye Azovo-Chernomorskogo poberezhia Rossii* [Geoecological assessment and zoning of the Azov-Black Sea coast of Russia]. Rostov-on-Don, SFU Publ., 2016, 212 p. (In Russian)
16. Milkov Ph.N. *Phizicheskaya geografiya: uchenie o landshafte i geographicheskaya zonalnost'*. [Physical geography: the study of landscape and geographical zonation]. Voronezh, VSU Publ., 1986, 328 p. (In Russian)
17. Chibilev A.A. *Kartiny prirody Orenburgskogo kraya: atlas-monografiya*. [The View of Nature: atlas-monograph]. Moscow, Orenburg, S-Pb, Institute of Steppe OFRC UB RAS, RGS Publ., 2024, 488 p. (In Russian)
18. Porter M.E. *Konkurentsiya* [Competition]. Translated from Engl. Moscow, Williams Publ., 2005, 608 p. (In Russian)
19. Vorob'ev V.P., Lipatnikov V.S., Rozanova S.K. *Innovatsionnoe razvitie promyshlennykh kompleksov na osnove klaster'nogo podkhoda*. [Innovative development of industrial complexes based on the cluster approach]. Saint Petersburg, PEO HE "Baltic Humanitarian institute", "Petropolis" Publ., 2011, 144 p. (In Russian)
20. Sivokhip Zh.T., Pavleichik V.M., Chibilev A.A., Padalko Yu.A., Kozlova M.A., Popova O.B. Hydroecological restrictions on the use of water resources of the trans-boundary rivers of the Urals and Tobol within the steppe zone. *South of Russia: ecology, development*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 170–180. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2024-2-15>

21. Chibilev A.A. Ural river basin as a model trans-boundary region of Eurasian cooperation. *Izvestiya Orenburgskogo otdeleniya Russkogo Geograficheskogo Obshchestva* [Proceedings of the Orenburg branch of Russian Geographical Society]. 2017, no. 9(42), pp. 31–36. (In Russian)
22. Sivokhip Zh.T., Chibilev A.A. Geographical prerequisites for the interstate management of the trans-boundary basin of the Ural River. *Ispol'zovanie i okhrana prirodnikh resursov v Rossii* [Use and protection of natural resources in Russia]. 2010, no. 4, pp. 103–105. (In Russian)
23. Chibilev A.A. *Bassein Urala: istoriya, geografiya, ekologiya* [Ural Basin: history, geography, ecology]. Yekaterinburg, IS URO RAS Publ., 2008, 312 p. (In Russian)
24. Perennial crops: New hardware for agriculture. The Land Institute. 2022. Available at: <https://landinstitute.org/our-work/perennial-crops/> (accessed: 31.08.2022)
25. Dzybov D.S. *Agrostepi* [Agro-steppes]. Stavropol', AGRUS Publ., 2010, 256 p. (In Russian)
26. Evseev V.I. *Pastbishcha yugo-vostoka*. [Pastures of the south-east region]. Chkalov, 1954, 340 p. (In Russian)
27. Larin I.V. *Pastbishcheoborot, sistema ispol'zovaniya pastbishch i ukhoda za nimi*. [Pasture-rotation, the system of pasture use and their maintaining] Moscow, Leningrad, Sel'khozgiz Publ., 1955, 123 p. (In Russian)
28. Larin I.V. *Lugovodstvo i pastbishchnoe khozyaistvo* [Meadow farming and pasture management]. Leningrad, Kolos Publ., 1969, 3rd ed., revised and additional, 549 p. (In Russian)
29. Krivosheeva A. The number of saigas in Kazakhstan is approaching 2 million. *SaigaNews*. Byulleten' Al'yansa po sokhraneniuyu saigaka [Bulletin of the Saiga Conservation Alliance]. 2023, vol. 29, pp. 10. (In Russian)
30. Tsuter Sh. The saiga population continues to grow in Kazakhstan. *SaigaNews*. Byulleten' Al'yansa po sokhraneniuyu saigaka [Bulletin of the Saiga Conservation Alliance]. 2024–2025, vol. 30, pp.17–18. (In Russian)
31. *Ekspert ob'yasn timer massovuyu migratsiyu saigakov iz Kazakhstana v Saratovskuyu oblast'* [The expert explained the mass migration of saigas from Kazakhstan to the Saratov region]. *Izvestiya*. 30.05.2025. Available at: <https://iz.ru/1895744/2025-05-30/ekspert-obiasnil-massovuyu-migratsiyu-saigakov-iz-kazakhstana-v-saratovskuyu-oblast> (accessed 01.06.2025)
32. Akys M., Tuyakbaev M. *Novye nomady i Velikaya Step'*. *Kak vosstanovit' mobil'noe pastbishchnoe zhitel'no-stroitel'stvo Kazakhstana i sdelat' ego effektivnym i pribyl'nym* [New nomads and the Great Steppe. How to restore mobile pasture animal husbandry in Kazakhstan and make it efficient and profitable]. Ekaterinburg, "Izdatelskie resheniya" Publ., 2019. 128 p. (In Russian)
33. Zhugina L.I., Salin A.N. *Travoseyanie na peskakh* [Grass-growing on the sands]. Alma-Ata, Moscow, Kazakhstani Local History Publ., 1933, 44 p. (In Russian)
34. *Perspektivy formirovaniya prirodno-zapovednogo fonda Kazakhstana* [Prospects of formation of nature-reserve fund]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1989, 87 p. (In Russian)
35. Karelin D.V., Luri D.I., Goryachkin S.V., Lunin V.N., Kudikov A.V. Changes in soil carbon dioxide emissions during postagrogenic succession in the chernozem forest-steppe. *Soil Science*, 2015, no. 11, pp. 1354–1366. (In Russian). DOI: 10.7868/S0032180X1511009X
36. Kurganova I.N., Lopez de Guereñu V.O., Zhiengaliyev A.T., Kudeyarov V.N. Carbon budget of steppe ecosystems of Russia. *Reports of the Academy of Sciences*, 2019, vol. 485, no. 6, pp. 732–735. (In Russian) DOI: 10.31857/S0869-56524856732-735
37. Levykin S.V., Chibilev A.A., Kazachkov G.V. Restoration of the ecosystem basis of steppes by innovative forms of steppe land use. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceedings of the Orenburg State Agrarian University]. 2010, no. 2(26), pp. 223–225. (In Russian)
38. Levykin S.V., Kazachkov G.V., Yakovlev I.G., Grudin D.A. Steppe agrolandscapes development and management as an axis of convergence of fundamental sciences and nature-like technologies. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceedings of the Orenburg State Agrarian University]. 2017, no. 3(65), pp. 194–196. (In Russian)
39. Torekhanov A.A., Alimaev I.I., Orazbaev S.A. *Lugopastbishchnoe kormoproizvodstvo* [Grassland forage production]. Almaty, Gylim Publ., 2008, 446 p. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Ахан А. Тургумбаев предложил идею кластеризации, собрал полевые данные, выполнил оценку антропогенной нагрузки. Александр А. Чибилёв корректировал концепцию кластеризации и рукопись для подачи в редакцию. Сергей В. Левыкин и Григорий В. Казачков интерпретировали полевые данные с позиций степеведения и готовили рукопись. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Akhan A. Turgumbaev proposed the idea of clustering, collected field data and performed an assessment of anthropogenic load. Alexander A. Chibilev corrected the clustering concept and the manuscript for submission to the Editor. Sergey V. Levykin and Grigory V. Kazachkov interpreted the field data from the standpoint of steppe studies and prepared the manuscript. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Ахан А. Тургумбаев / Akhan A. Turgumbaev <https://orcid.org/0000-0003-2685-5085>
Сергей В. Левыкин / Sergey V. Levykin <https://orcid.org/0000-0003-0949-9939>
Григорий В. Казачков / Grigory V. Kazachkov <https://orcid.org/0000-0001-6779-8334>
Александр А. Чибилёв / Alexander A. Chibilev <https://orcid.org/0000-0002-6214-1437>

Оригинальная статья / Original article

УДК 528.8

DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-19



Опыт картографирования ландшафтов Макажойской котловины на основе данных дистанционного зондирования Земли

Виталий В. Братков^{1,2}, Рашия Х. Бекмурзаева², Надира О. Гусейнова³¹Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия²Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова, Грозный, Россия³Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия**Контактное лицо**

Виталий В. Братков, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой географии, Московский государственный университет геодезии и картографии; 105064 Россия, г. Москва, Гороховский пер., 4.

Тел. +74994041220 доб. 3211

Email ybratkov@mail.ruORCID <https://orcid.org/0000-0001-5072-1859>**Формат цитирования**

Братков В.В., Бекмурзаева Р.Х., Гусейнова Н.О. Опыт картографирования ландшафтов Макажойской котловины на основе данных дистанционного зондирования Земли // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 207-217. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-19

Получена 7 сентября 2025 г.

Прошла рецензирование 14 октября 2025 г.

Принята 25 октября 2025 г.

Резюме

Цель: составление среднемасштабной ландшафтной карты Макажойской котловины, в которой располагается карбоновый полигон ЧГУ им. А.А. Кадырова, на основе данных дистанционного зондирования Земли среднего и высокого пространственного разрешения.

Анализ разнообразных данных дистанционного зондирования Земли в среде ГИС. Для анализа и оценки вклада рельефа в формирование ландшафтов использованы цифровая модель рельефа и производные растровые изображения, полученные на ее основе (крутизна и экспозиция склонов, горизонтальное и вертикальное расчленение, распределение солнечной радиации по изучаемой территории). Оценка термических условий дана на основе температуры земной поверхности. Общие черты увлажнения территории и пространственного размещения растительного покрова определялись на основе спектральных/вегетационных индексов. Составленная карта является одной из основных в формирующейся ГИС карбонового полигона ЧГУ им. А.А. Кадырова.

На основе цифровой модели рельефа и мультиспектральных снимков с использованием ГИС-технологий создан ряд тематических карт. Серия карт, полученная на основе цифровой модели рельефа, позволила оценить его вклад в процессы дифференциации и интеграции ландшафтов различных классификационных единиц. Выявленные относительно однородные участки далее сопоставлялись со спектральными снимками, которые позволили оценить пространственное распределение растительного покрова. В результате создана ландшафтная карта до уровня видов ландшафтов. Итогом комплекса исследований, сочетающих полевые наблюдения и обработку данных дистанционного зондирования Земли, стала ландшафтная карта Макажойской котловины, на которой нашли отражение 3 типа, 3 подтипа, 3 рода и 9 видов ландшафтов, относящихся к классу горных.

Ключевые слова

Природный ландшафт, классификация ландшафтов, дистанционное зондирование Земли, цифровая модель рельефа, спектральные/вегетационные индексы, ГИС-технологии, Макажойская котловина.

Experience in mapping landscapes of the Makazhoy basin, Chechnya, Russia based on remote sensing data

Vitaly V. Bratkov^{1,2}, Rashia Kh. Bekmurzaeva² and Nadira O. Guseynova³

¹Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

²A.A. Kadyrov Chechen State University, Grozny, Russia

³Dagestan State University, Makhachkala, Russia

Principal contact

Vitaly V. Bratkov, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Department of Geography, Moscow State University of Geodesy and Cartography; 4 Gorokhovskiy Lane, Moscow, Russia 105064.

Tel. +74994041220 add 3211

Email vbratkov@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5072-1859>

How to cite this article

Bratkov V.V., Bekmurzaeva R.Kh., Guseynova N.O. Experience in mapping landscapes of the Makazhoy basin, Chechnya, Russia based on remote sensing data. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):207-217. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-19

Received 7 September 2025

Revised 14 October 2025

Accepted 25 October 2025

Abstract

The objective was to compile a medium-scale landscape map of the Makazhoy basin, in which the Kadyrov CHSU carbon landfill is located, based on data from remote sensing of the Earth of medium and high spatial resolution.

Analysis of various Earth remote sensing data in the GIS environment was performed. To analyse and evaluate the contribution of relief to the formation of landscapes, a digital relief model and derived raster images obtained on its basis (steepness and exposure of slopes, horizontal and vertical dissection and distribution of solar radiation over the studied area) were used. The thermal conditions were estimated based on the temperature of the Earth's surface. The general features of humidification of the territory and spatial distribution of vegetation cover were determined on the basis of spectral/vegetation indices. The compiled map compiled is one of the main undertakings in the emerging GIS of the carbon polygon of the A.A. Kadyrov Chechnyan State University.

A number of thematic maps have been created based on a digital relief model and multispectral images using GIS technologies. A series of maps obtained on the basis of a digital relief model made it possible to assess its contribution to the processes of differentiation and integration of landscapes of various classification units. The relatively homogeneous areas identified were then compared with spectral images, which made it possible to estimate the spatial distribution of vegetation cover. As a result, a landscape map has been created up to the level of landscape types.

The result of a complex of studies combining field observations and processing of Earth remote sensing data was a landscape map of the Makazhoy basin, which reflected 3 types, 3 subtypes, 3 genera and 9 types of landscapes belonging to the class of mountainous.

Key Words

Natural landscape, classification of landscapes, remote sensing of the Earth, digital relief model, spectral/vegetation indexes, GIS technologies, Makazhoy basin.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования ландшафтов, независимо от задач и охвата территории, обязательно сопровождаются разработкой ландшафтной карты. Данная карта отображает размещение природно-территориальных комплексов (от наиболее низких до наиболее высоких их рангов) и их пространственное соотношение [1]. Ландшафтные карты являются синтетическими, поскольку отражают типологическое районирование территории по комплексу показателей. Их составляют для решения как теоретических проблем, так и для прикладных и образовательных целей. В настоящее время эти карты широко используются для территориального планирования и рационального использования природных ресурсов.

Ландшафтное картографирование представляет собой выявление на местности границ и структуры ландшафтного комплекса и нанесение их на карту. Традиционно оно опирается на полевые исследования, в ходе которых объектом изучения являются наименьшие морфологические части ландшафта (фации, урочища). Эти карты обычно составляются в крупном масштабе и при их разработке используются соответствующие топографические и тематические карты, а основным полевым методом является профилирование. Также при полевом ландшафтном картографировании применялись данные дистанционного зондирования Земли, первоначально в виде аэрофотоснимков. Во второй половине XX века для целей ландшафтного картографирования стали использоваться данные дистанционного зондирования Земли – космические снимки. Они считаются одними из наиболее эффективных источников получения информации о земной поверхности и представляют собой результат измерений ее физических свойств в различных спектральных каналах. Использование космических снимков позволяет оперативно получать объективную, массовую, разнообразную информацию о природных комплексах и их состояниях, дает возможность изучать пространственно-временные изменения, а также современную структуру и динамику ПТК.

Еще одним достоинством применения космических снимков для исследования ландшафтов является также то, что для изучения малодоступных территорий не требуется организация традиционных полевых экспедиций, а после предварительной обработки снимков необходимо провести вместо затратного по времени и ресурсам полевого профилирования проверочные маршрутные исследования для уточнения отдельных деталей ландшафтной структуры района.

Как и карты, космические снимки с точки зрения пространственного разрешения подразделяются на низкого, среднего, высокого и сверхвысокого разрешения. Снимки низкого разрешения характеризуются обширным охватом территории и позволяют осуществлять мелкомасштабное картографирование обширных территорий, охватывающих одну или несколько физико-географических стран. Снимки среднего пространственного разрешения полезны для выделения ландшафтов в пределах физико-географической карты страны и ее провинций. Наконец, снимки высокого пространственного разрешения (10 м в пикселе) позволяют осуществлять картографирование на локальном уровне с выделением низких классификационных единиц ландшафта.

Еще одним важным вопросом картографирования ландшафтов является выбор их классификационной системы с обоснованием критериев выделения тех или иных единиц. Коллектив авторов под руководством Н.А. Гвоздецкого составил в масштабе 1:600 000 ландшафтную карту Азербайджанской [2]. Разработанную систему классификационных единиц в дальнейшем использовали для составления ландшафтной карты Кавказа в масштабах 1:1 000 000 [3] и 1:500 000. Она включает в себя следующие единицы: класс – тип – подтип – род – вид ландшафтов [4]. При выделении классов ландшафтов определяющим является рельеф, в связи с чем выделяются горные и равнинные ландшафты. Тип ландшафтов определяется общими чертами морфоструктуры рельефа, находящей свое выражение в ярусности гор и наиболее общими чертами климата, который классифицируется по термическим условиям и условиям увлажнения. Эти факторы находят свое отражение в почвенно-растительном покрове и наиболее общем характере гидрологических условий. Род ландшафтов идентифицируется по ведущему типу рельефа в границах морфоструктурного яруса, где распространена конкретная геологическая формация. Дополнительными дифференцирующими признаками выступают локальные климатические особенности, предопределяющие состав растительных сообществ и почвенный покров. Особую роль в этой классификации играет характер пространственного размещения элементарных ПТК, обусловленный градиентами увлажнения, тепла и мезоформ рельефа. При дифференциации ландшафтов на роды обязательным условием является специфичность этой схемы, заключающаяся в отличии характера принципиального распределения элементарных ПТК одного рода от другого. Дальнейшая систематика ландшафтов связана с детализацией указанных условий.

Данная система классификационных единиц соответствует взглядам Н.А. Солнцева [5], который считал, что ландшафтообразующие факторы по своей структуре сложны и разнообразны. Он считал их неравнозначными и в порядке убывания «силы» подразделял на 3 группы: 1) литогенную (геологическое строение, литология поверхностных пород и рельеф); 2) гидроклиматическую (климат, воды); 3) биогенную (почвы, растительность, животный мир). Н.Л. Беручашвили [6] применительно к Кавказу выделял ороклиматические, высотные, высотно-гипсометрические, экспозиционные, структурно-петрографические, локальные и антропогенные факторы ландшафтной дифференциации. При этом он отмечал, что данный вопрос для этого региона еще окончательно не проработан.

В этой связи на первом этапе составления ландшафтной карты необходим анализ рельефа, который в горах является основным фактором дифференциации ландшафтов. В настоящее время анализ рельефа удобно осуществлять на основе его цифровой модели. При выделении наиболее высоких классификационных единиц ландшафтов необходим анализ прежде всего высотных отметок, которые отмечаются в пределах изучаемой территории и обуславливают, прежде всего, высотный ярус рельефа, от которых, в свою очередь, зависит структура высотной поясности. Рельеф, как следует из приведенных выше аргументов, оказывает влияние на климат в связи с наличием склонов разной экспозиции и крутизны в пределах ярусов, что приводит к перераспределению потоков тепла и влаги. Наконец, при

выделении более мелких классификационных единиц ландшафтов имеет значение горизонтальное и вертикальное расчленение рельефа, которое также в настоящее время довольно просто выявить на основе ЦМР.

Что касается анализа климатических условий, то общее представление о распределении солнечной энергии на изучаемой территории также можно получить на основе цифровой модели рельефа: в среде ГИС при помощи соответствующего инструментария можно построить растровые изображения, отражающие пространственное распределение солнечной радиации и ее составляющих как на отдельные временные отрезки, так и на любой день в течение года. Таким образом, данные такого рода позволяют оценить энергетический потенциал территории и провести ее районирование. Данные о пространственном распределении температуры можно получить, используя соответствующие каналы космических аппаратов. Например, аппаратура спутников серии Landsat содержит диапазоны TIRS, которые измеряют температуру земной поверхности на момент съемки. Если на изучаемой территории имеются метеорологические станции, можно получить представление о температуре воздуха.

Прямых данных о величине осадков высокого пространственного разрешения в настоящее не имеется. Поэтому для оценки увлажнения территории можно использовать различные спектральные индексы. К числу индексов такого рода можно отнести, например, NDWI (Normalized Difference Water Index, нормализованный разностный водный индекс). Он позволяет выявить собственно водные объекты, а также оценить запас влаги в растительном покрове. MSI (Moisture Stress Index) — спектральный индекс, который показывает уровень содержания влаги в листьях растений.

Среди спектральных индексов, которые позволяют оценить различные параметры растительного покрова, традиционными являются NDVI и SAVI. Однако, как показал предварительный анализ, они довольно слабо отражают картину распределения растительного покрова на изучаемой территории, поэтому вместо них мы использовали спектральный/вегетационный индекс LAI (Leaf Area Index) — листовой индекс, или индекс листовой поверхности. Он показывает, какая площадь листьев приходится на единицу площади земли или субстрата (м^2 листьев на 1 м^2 поверхности) и в нашем случае адекватно отражает характер растительного покрова на территории Макажойской котловины.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве исходных материалов при составлении ландшафтной карты Макажойской котловины использовались цифровая модель рельефа Европейского космического агентства с разрешением 27 м для района исследования, а также мультиспектральные данные дистанционного зондирования среднего (20 м) и высокого (10 м) пространственного разрешения в оптическом диапазоне Sentinel-2, отражающие состояние местности на середину августа. Наряду с ними использовались данные Landsat, имеющие разрешение 30 м. При работе с растровыми изображениями использовался инструментарий ArcGis (модуль Spatial Analyst Tools). При обработке мультиспектральных снимков использовался модуль Sentinel Index Toolbox, который устанавливается в программу ArcGis и позволяет выполнять такие операции, как вычисление различных спектральных/вегетационных

индексов, доступных при обработке снимков данного сенсора. Далее полученные растровые изображения использовались для оценки природных условий территории Макажойской котловины для формирования классификационных единиц ландшафтов. Составление и оформление собственно ландшафтной карты проводилось при помощи пакета MapInfo, который позволяет работать как с растровой, так и с векторной графикой и осуществлять тематическое картографирование.

Территория Макажойской котловины располагается в юго-восточной части Чеченской Республики на границе с Республикой Дагестан. Ее природные условия довольно хорошо изучены, а характеристики приведены в целом ряде работ [7–10]. Данная котловина представляет интерес также в связи с тем, что здесь располагается карбоновый полигон Чеченского государственного университета им. А.А. Кадырова, на котором отрабатываются технологии регенеративного животноводства.

Макажойская котловина является частью обширной тектонической депрессии. Большая часть границ котловины приурочена к хребтам: на севере — Кашкерлам с максимальной высшей точкой всей котловины (2805 м); на востоке — отроги Гаготытлоры; на юго-востоке безымянный хребет с вершиной Абдалзабазуль (2604 м). Каньон р. Ансалта является выходом котловины на юго-восток. Юго-западной границей является хребет Хиндойлам, который в крайней юго-западной точке практически под прямым углом поворачивает на север, а далее, от вершины Басхойлам поворачивает на запад-северо-запад до второго выхода из котловины, который проходит по ущелью реки Келой-ахк, являющейся притоком Шаро-Аргун. Далее водораздел выражен не столь отчетливо и уходит на северо-запад к хребту Кашкерлам. Площадь котловины составляет 144 км^2 (рис. 1).

На данную территорию имеются разномасштабные ландшафтные карты, составленные различными авторами [11–13]. Наиболее детальными на данный момент являются карты, составленные на основе ландшафтной карты Кавказа [14].

На территории Кавказа традиционно выделяются низогорный (до 1000 м), среднегорный (1000–2000 м) и высокогорный (более 2000 м) ярусы рельефа. Причем, отметка 2000 м связана не только с рельефом, но и с тем, что выше начинается свободная атмосфера, где на движение воздушных масс подстилающая поверхность оказывает меньшее влияние. Эти показатели довольно просто определяются по цифровой модели рельефа, в связи с чем на территории Макажойской котловины выделяются средне- и высокогорный ярусы. Кроме того, котловинность изучаемой территории определяется тем, что имеется симметрия распределения абсолютных высот на противоположных склонах р. Ахкете.

Следующим значимым параметром рельефа при выделении ландшафтов является преобладающий тип рельефа в пределах морфоструктурного яруса, где преобладает одна или нескольких геологических формаций, которые принимаются во внимание при выделении родов ландшафтов. Территория Макажойской котловины складывается верхнемеловыми отложениями — преимущественно известняками, а в наиболее низких частях присутствуют гравитационные четвертичные отложения. Для более точного подразделения рельефа на типы возможно применение карты густоты

горизонтального расчленения рельефа, при этом наиболее расчлененные участки будут соответствовать эрозионно-аккумулятивному рельефу, а наименее расчлененные – карстово- или эрозионно-денудационному (рис. 2). Участки с максимальной величиной горизонтального расчленения приурочены, во-первых, к наиболее низким частям бассейна в центральной его части, и, во-вторых, к днищу долины реки Ахкете в ее верхней части. Основной ареал участков с максимальным эрозионным расчленением соответствует абсолютным высотам до 1800

м, при этом здесь же наиболее широко распространены склоны с крутизной до 10° , и при этом здесь же характерны наименьшие величины вертикального расчленения рельефа. Участки с данным рельефом характерны для горно-котловинных ландшафтов. Фактически здесь происходит аккумуляция материала, сносимого с более высоких гипсометрических уровней и его накопление с постепенным увеличением толщи. При этом она остается довольно рыхлой и способствует фильтрации влаги.

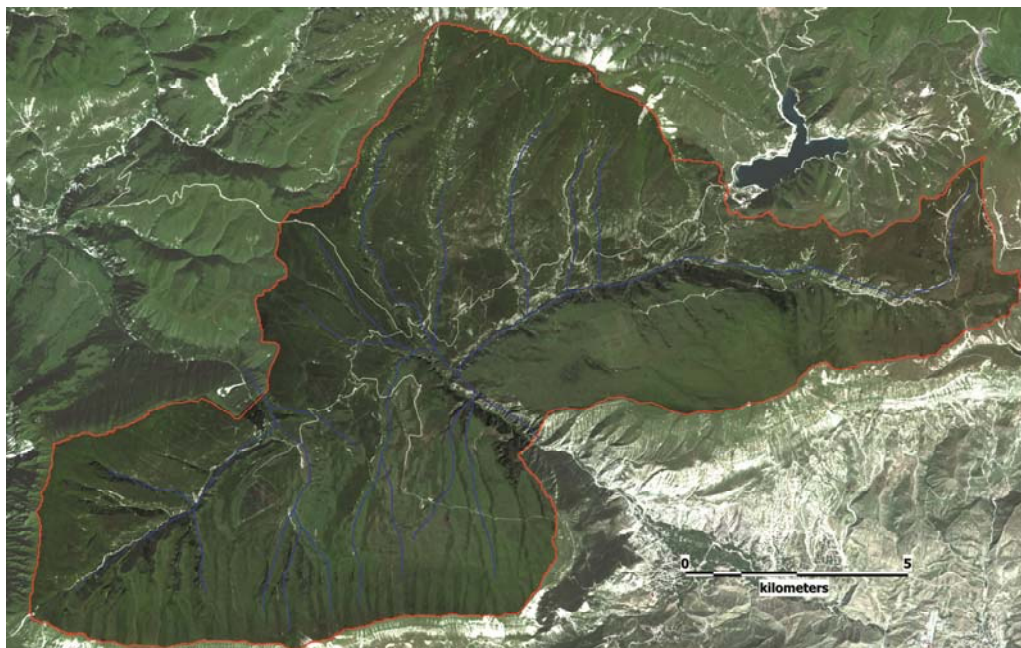


Рисунок 1. Географическое положение и границы Макажойской котловины (космический снимок в естественных тонах на 6 августа 2025 г.)

Figure 1. Geographical location and boundaries of the Makazhoy basin (satellite image in natural colours on August 6, 2025)

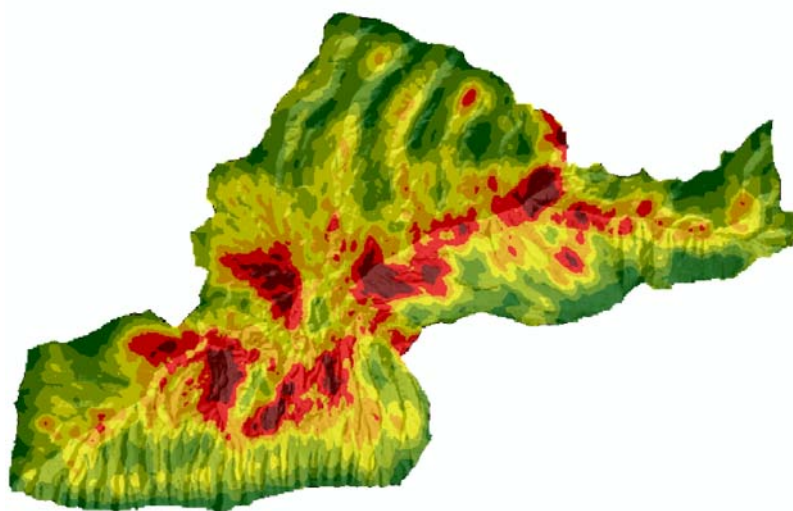
По мере поднятия от днища котловины к наиболее возвышенным частям снижается горизонтальное расчленение, но увеличивается вертикальное, что характерно для высокогорного яруса рельефа. Некоторая поляризация связана с тем, что в этой части Макажойской котловины характерно сочетание относительно пологих привершинных поверхностей с глубоко врезанными местными водотоками, для которых характерны крутые ($30\text{--}45^\circ$) склоны. В этой связи данный рельеф следует отнести к карстово-эрозионному и карстово-денудационному, которые характерны для ландшафтов высокогорного яруса рельефа.

Представление о климатической дифференциации ландшафтов позволяют получить карты экспозиция склонов, а также распределения солнечной радиации (рис. 3). В силу того, что котловина вытянута с востока на запад, основные макросклоны имеют северо-западную и юго-восточную ориентации. В условиях умеренного климатического пояса здесь выделяются солярная и циркуляционная экспозиции. Солярные юго-восточные склоны характеризуются максимальной освещенностью, но минимальным количеством осадков. Циркуляционные северо-западные склоны являются их антиподами: в силу преобладания ветров западных румбов они наиболее влажные, но при этом наименее прогреваемые. Эта поляризация хорошо отражена на схеме распределения суммарной солнечной радиации. Максимальные ее величины характерны для наиболее возвышенных частей хребта Кашкер-лам, где преобладают

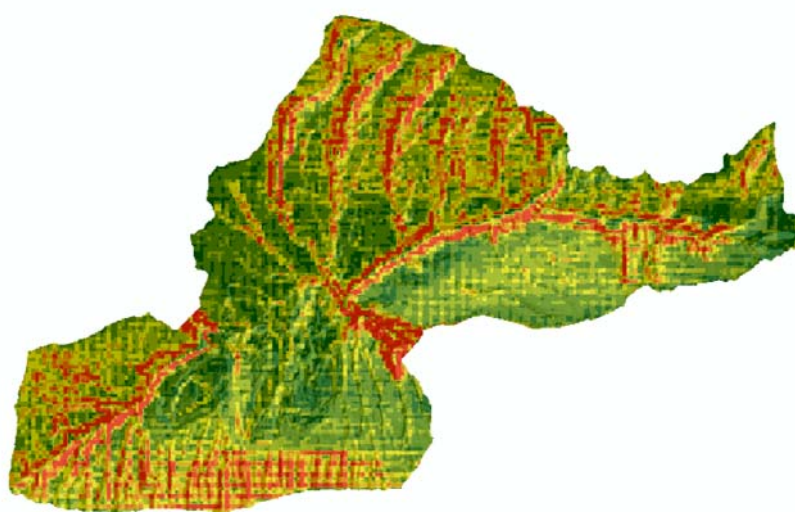
склоны южной и юго-западной экспозиции. На противоположных ему северных склонах хребта Хиндой-лам отмечается минимальная величина суммарной солнечной радиации. Локальные ее снижения отмечаются также в наиболее затененных участках, приуроченных к днищу долины и верховьям р.Ахкете, а также расчлененным участкам в верхних частях склона хребта Кашкер-лам.

Данные экспозиционные различия объясняют распределение температуры земной поверхности по территории Макажойской котловины (рис. 4) в холодный и теплый периоды года. В обоих случаях хорошо видно, что наиболее прогретыми являются юго-восточные склоны от реки Ахкете до наиболее возвышенных частей хребта Кашкер-лам. Второй наиболее теплый участок отмечается в средней части долины р.Келойахк и нижним частях склонов восточной экспозиции хребта Хиндой-лам. Наиболее холодными являются северные склоны хребта Хиндой-лам и весь левый, северо-западный склон р.Ахкете, причем температура понижается от долины реки к наиболее возвышенным частям, хотя в теплое время года более прогретыми являются пологие склоны, прилегающие к долине реки.

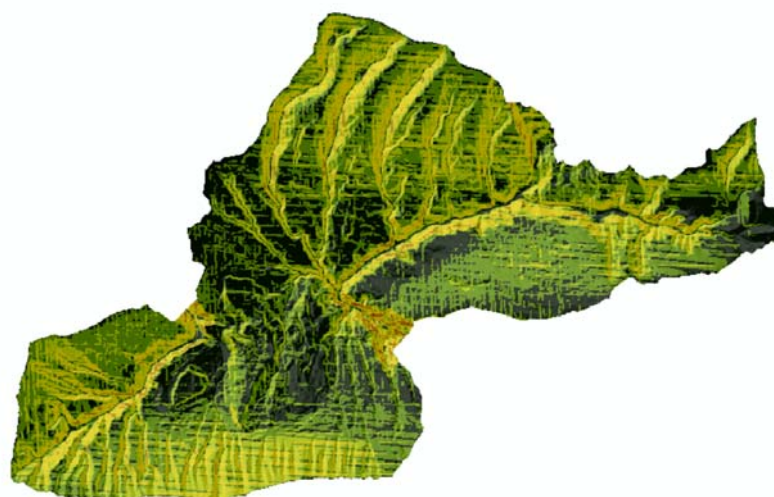
Еще одним довольно надежным источником для составления ландшафтной карты являются различные спектральные индексы, часть из которых позволяет классифицировать растительный покров. Для этих целей мы использовали такие индексы, как NDWI, MSI и LAI (рис. 5).



a/a



б/б



в/в

Рисунок 2. Растровые изображения густоты горизонтального (а) и вертикального (б) расчленения рельефа и крутизны склонов (в) Макажойской котловины

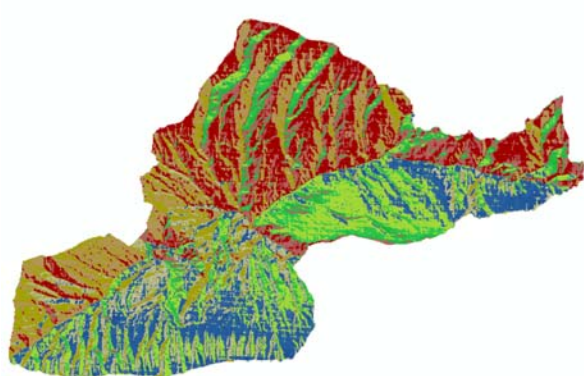
Figure 2. Raster images of the density of the horizontal (a) and vertical (b) divisions of the relief and the steepness of the slopes (c) of the Makazhoy basin

Водный индекс и индекс засушливости в общих чертах зеркально противоположны, поэтому минимальные значения одного соответствуют максимальным значениям другого. Тем не менее они отражают общие черты

распределения растительного покрова на изучаемой территории. Так, наиболее влажными являются наиболее возвышенные части Макажойской котловины, где распространены субальпийские луга. Южные и юго-

восточные склоны хребта Кашкер-лам заняты растительностью сухостепного типа, для которой характерно минимальное содержание воды в растительном покрове. Остальная часть котловины занята группировками травянистой растительности, содержание влаги в которых изменяется в зависимости от

местоположения. Древесная растительность данной местности находит свое отражение только в случае применения индекса листовой поверхности, поэтому его можно применять не только для косвенной оценки условий формирования растительного покрова ландшафтов, но и для целей картографирования.



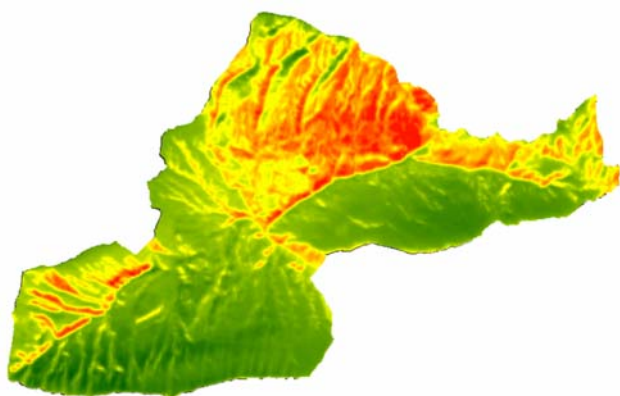
а/а



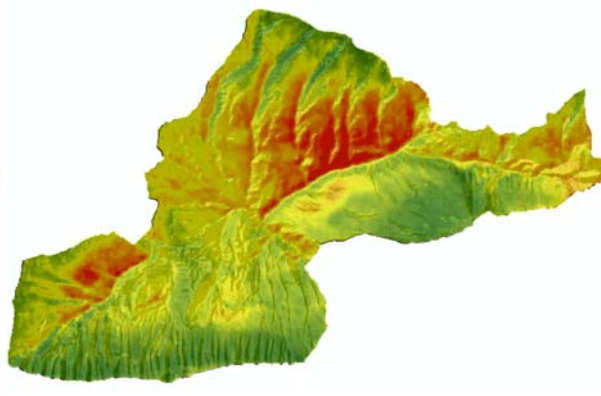
б/б

Рисунок 3. Растровые изображения экспозиции склонов (а) и годовой величины суммарной солнечной радиации (б) на территории Макажойской котловины

Figure 3. Raster images of slope exposure (a) and annual total solar radiation (b) in the Makazhoy basin



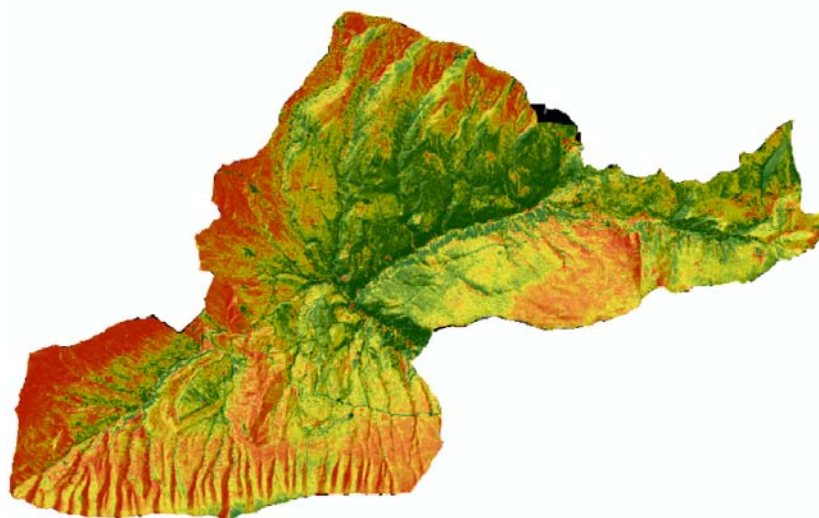
а/а



б/б

Рисунок 4. Растровые изображения температуры земной поверхности на 15 февраля (а) и 3 августа (б) 2025 г.

Figure 4. Raster images of the Earth's surface temperature in the Makazhoy basin on February 15 (a) and August 3 (b), 2025



а/а

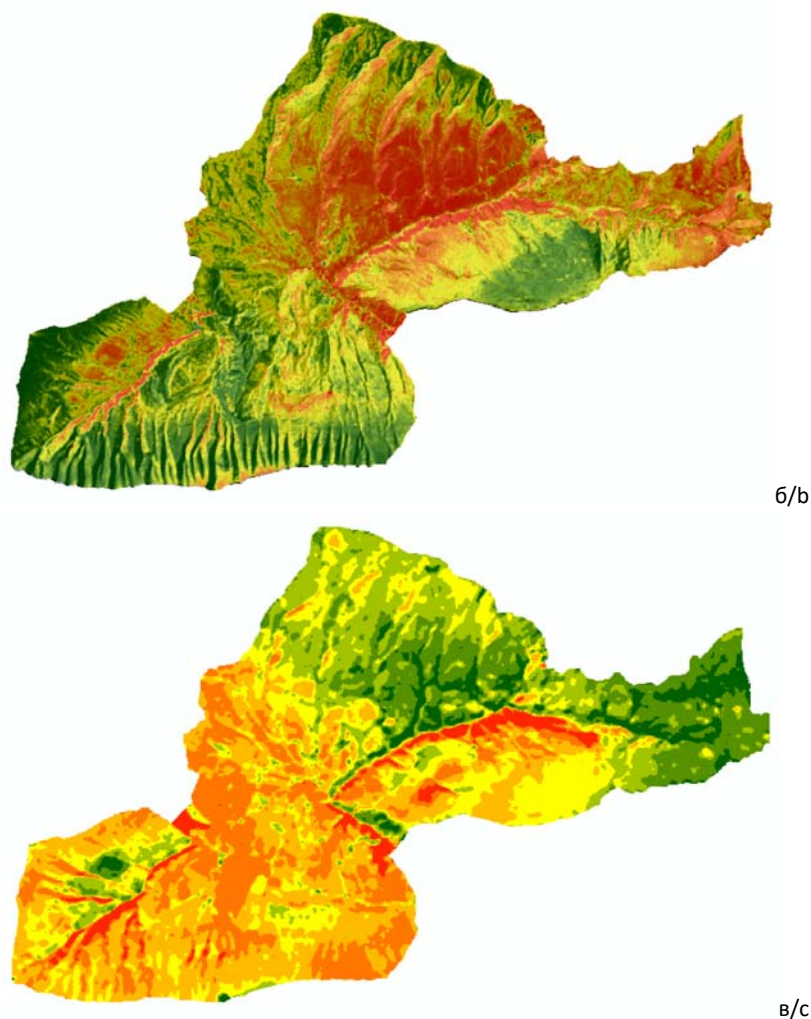


Рисунок 5. Растровые изображения индексов NDWI (а), MSI (б) и LAI (в) территории Макажойской котловины
Figure 5. Raster images of the NDWI (a), MSI (b) and LAI (c) indexes of the Makazoy basin

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результатом последовательных операций, связанных с выделением различных классификационных единиц ландшафтов на основе данных дистанционного зондирования Земли, стала ландшафтная карта Макажойской котловины (рис.6), на которой отражены типы, подтипы, роды и виды ландшафтов.

Высокогорные луговые ландшафты (1) представлены на территории Макажойской котловины высокогорными субальпийскими лесо-кустарниково-луговыми ландшафтами, которые занимают наиболее возвышенные части хребтов, начиная с высоты 1800–2000 м. Как и в остальных частях, здесь представлены карбонатные отложения, поэтому наиболее широко распространен карстово-денудационный и карстово-эрозионный рельеф. Климат здесь более холодный и влажный по сравнению с нижерасположенными частями котловины. Для таких климатических условий типичной является травянистая растительность лугостепного и лугового типов. Имеются также кустарниковые заросли, сформированные можжевельниками. Под лугами развиты горно-луговые почвы различной мощности и щебнистости.

Дифференциация данного ландшафта на виды обусловлена разнообразием местоположений. На хребте Кашкерлам более типичны лугостепи, тогда как на противоположном макросклоне – типичные субальпийские злаково-разнотравные луга на горно-

луговых почвах, в связи с чем выделяется 2 вида ландшафтов.

Горные холодноумеренные ландшафты (2) на территории Макажойской котловины представлены одним подтипом – верхнегорные лесные сосновые и березовые. Данные ландшафты представляют собой верхнюю границу горно-лесной зоны, но здесь они оторваны от основного массива лесов, наиболее широко распространенного на северном склоне Андийского хребта. Данные ландшафты занимают собственную экологическую нишу, связанную с более влажными условиями на северо-западном, наиболее влажном и холодном борту котловины в интервале высот от 1600 до 1800–2000 м. Кроме природных факторов, на распространение этих ландшафтов оказала влияние антропогенная рубка: населению нужны были сенокосы и пастбища. В последние десятилетия, и, особенно в последние несколько лет, в связи с климатическими изменениями наблюдается усиленное лесовосстановление. Кроме того, данные сосновые и березовые леса занимают наиболее крутые склоны в разных частях ущелья р. Ахкете и ее наиболее крупных притоков. Как остальные части бассейна, здесь преобладают выходы карбонатов, поэтому рельеф представлен карстово-денудационными и карстово-эрозионными формами. По сравнению с другими частями котловины здесь отмечаются наиболее влажные и относительно теплые условия, что приводит к

формированию древесной/лесной растительности, среди которой наиболее часто встречаются хвойные (сосна) и мелколиственные (береза) виды. В связи с рубками здесь довольно большие площади занимают послелесные луга, которые, как отмечалось выше, в настоящее время активно осваиваются преимущественно сосновым подростом даже на сравнительно пологих склонах. То есть, коренные леса сохранились в наиболее труднодоступных

местах. Горно-лесные почвы, характерные для лесов, в настоящее время существенно трансформировались.

В связи с тем, что коренная растительность данного типа ландшафтов сохранилась лишь в наиболее труднодоступных местоположениях, дифференциация на виды связана с особенностями послелесных лугов, процессов и стадий лесовосстановления, зависящих от экспозиции и крутизны склонов. В этой связи в пределах данного рода ландшафтов выделяется 3 вида.

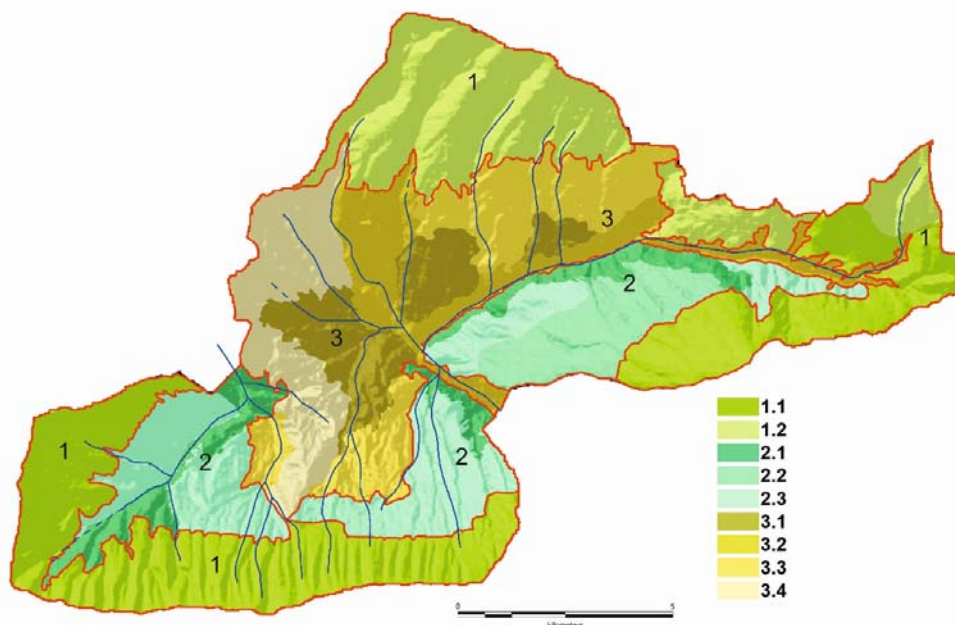


Рисунок 6. Ландшафтная карта Макажойской котловины
Figure 6. Landscape map of the Makazhoy basin

Горные умеренные семиаридные ландшафты приурочены к наиболее низкой части Макажойской котловины в интервале высот от 1300–1600 м, хотя могут подниматься до 1800 м и даже выше. Основной ареал этих ландшафтов связан с юго-восточными склонами, наиболее широко представленными на хребте Кашкерлам. Также они тяготеют к солёным экспозициям в долине р. Ахкете. Господство карбонатных пород приводит к формированию эрозионно-аккумулятивного рельефа, характерного для днища котловины. Здесь наиболее широко представлены склоны крутизной до 10°, хотя в днище долины их крутизна может быть существенно больше. Климатические условия отличаются более высокими по сравнению с другими частями котловины температурами воздуха, что в сочетании с недостатком влаги, приводит к формированию ценозов с ярко выраженными чертами ксероморфизма: шибляков и сообществ горных степей. Шибляки формируются барбарисом, крушиной и др. Горные степи представлены типчаково-ковыльными сообществами, иногда с участием полыни и бородача. На склонах, где увлажнение лучше, распространены луговые степи и остепненные луга. Под такой растительностью развиты горные лугово-степные почвы и рендины. Для пойменных участков в наиболее нижних частях котловины характерны аллювиальные почвы.

В пределах данного типа ландшафтов выделяется 1 подтип – горно-котловинные степные и шибляковые, который подразделяется на 1 род – горно-котловинные эрозионно-аккумулятивные с горными степями, нередко в комплексе с шибляком. В зависимости от местоположения, определяющего характер

растительности, данный род ландшафта подразделяется на 4 вида, которые приурочены либо к наиболее расчлененным частям котловины в нижней ее части, либо к наиболее расчлененным южным склонам в верхнем течении р. Ахкете. Положение сказывается на характере растительного покрова.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ландшафтная карта Макажойской котловины составлена на основе данных дистанционного зондирования Земли среднего и высокого пространственного разрешения. Анализ рельефа осуществлялся на основе цифровой модели рельефа, которая позволяет оперировать не только качественными, но и количественными параметрами, такими как горизонтальное или вертикальное расчленение. Также на основе ЦМР можно оценить распределение солнечной радиации по изучаемой территории и ее роль в формировании ландшафтов. Для оценки влияния термических условий удобно применять каналы TIRS, которые характеризуют температуру земной поверхности. Что касается количества осадков и режима увлажнения территории, то, несмотря на отсутствие таких данных, их можно получить посредством спектральных индексов (NDWI, MSI и др.). Наиболее сложным при составлении ландшафтной карты является дифференциация растительного покрова, поскольку в названии ландшафтов фигурируют растительные ассоциации или формации растительности, выделяемые на основе геоботанических исследований. Спектральные индексы, такие как LAI и аналогичные им, позволяют разделять древесную, кустарниковую и

травянистую растительность. Далее на основе полевых исследований уточняются название выделов на ландшафтной карте. Практически невозможно определить методами дистанционного зондирования также тип почв, поэтому эти данные также получают в ходе полевых наблюдений.

Итогом комплекса исследований, сочетающих полевые наблюдения и обработку данных дистанционного зондирования Земли, стала ландшафтная карта Макажойской котловины, на которой нашли отражение 3 типа, 3 подтипа, 3 рода и 9 видов ландшафтов, относящихся к классу горных. Дальнейшая детализация ландшафтов может быть осуществлена на основе учета таких факторов, как экспозиция и крутизна склонов, на основе чего возможно создать карту, отражающую морфологические части ландшафта, для чего необходимы данные дистанционного зондирования Земли более высокого пространственного разрешения.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках госзадания ЧГУ им. А.А. Кадырова FEGS-2023-0008.

ACKNOWLEDGMENT

The work was carried out within the framework of the state tasks FEGS-2023-0008.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щукин И.С. Четырехязычный энциклопедический словарь терминов по физической географии. Москва: Советская энциклопедия, 1980. 703 с.
2. Мусеилов М.А., Керемов Н.К., Керимов Ш.Б., Сулейманов М.А. Азербайджанская ССР. Ландшафтная карта. Масштаб 1:600000. Баку: Азербайджанский Ордена Трудового Красного Знамени Государственный Университет им. С.М. Кирова, 1975.
3. Беручашвили Н.Л., Арutyонов С.Р., Тедиашивили А.Г. Ландшафтная карта Кавказа. Масштаб 1:1000000. Тбилиси, 1979.
4. Беручашвили Н.Л. Объяснительная записка к Ландшафтной карте Кавказа. Тбилиси: Изд-во ТГУ, 1980. 54 с.
5. Солнцев Н.А. О взаимоотношении «живой» и «мертвой» природы // Вестник Московского университета. Серия 5 География. 1960. Т. 6. С. 7–11.
6. Беручашвили Н.Л. Кавказ: ландшафты, модели, эксперименты. Тбилиси: Изд-во ТГУ, 1995. 315 с.
7. Бекмурзаева Р.Х., Скрипицына Т.Н., Братков В.В., Булаева Н.М. Морфометрические характеристики рельефа Макажойской котловины (Чеченская Республика) // Мониторинг. Наука и технологии. 2024. Т. 59. N 1. С. 47–54. <https://doi.org/10.25714/MNT.2024.59.007>
8. Братков В.В., Бекмурзаева Р.Х., Бекмурзаева Л.Р. Возможности ГИС-технологий для оценки и мониторинга климатических условий Макажойской котловины (Чеченская Республика) // Юг России: экология, развитие. 2024. Т. 19. N 2. С. 160–169. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2024-2-14>
9. Гуня А. Н., Хасанов Т. С., Ермакова Ю. И., Мацаев С. Б. Ландшафтно-экологические условия и факторы динамики растительности Макажойской котловины // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2024. Т. 9. N 3. С.17–24. <https://doi.org/10.25744/genb.2024.37.3.003>
10. Бекмурзаева Р., Баранов И., Братков В. Assessment of The Influence of Relief On Terracing of the Slopes of The Makazhoy Basin in The Chechen Republic (Based On The Materials Of Air Laser Scanning) // Reliability: Theory & Applications. 2024. V. 19. N S6 (81). P. 773–782. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2024-681-773-782>
11. Братков В.В., Салпагаров Д.С. Ландшафты Северо-Западного и Северо-Восточного Кавказа. Москва: Илекса, 2001. 256 с.
12. Волюнкин И.Н. Физико-географические комплексы Андийского хребта в окрестностях озера Кезеной-Ам // Природа и природные ресурсы центральной и восточной части Северного Кавказа, Орджоникидзе, 1981. С. 142–144.
13. Волюнкин И.Н., Доценко В.В. Ландшафты и физико-географическое районирование Чечено-Ингушетии // Проблемы

физической географии Северо-Восточного Кавказа, Грозный, 1979. С. 132–170.

14. Идрисова Р.А. Комплексная оценка современного состояния ландшафтов Чеченской Республики // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского". 2008. Т. 2. N 4. С. 47–51.

REFERENCES

1. Shchukin I.S. *Chetyrekh'yazychnyi ehntsiklopedicheskiy slovar' terminov po fiziche-skoi geografii* [A four-lingual encyclopedic dictionary of terms on physical geography]. Moscow, Soviet Encyclopedia Publ., 1980, 703 p. (In Russian)
2. Museibov M.A., Keremov N.K., Kerimov SH.B., Suleimanov M.A. *Azerbaijanskaya SSR. Landshaftnaya karta. Masshtab 1:600000* [Azerbaijan SSR. Landscape map. Scale 1:600000]. Baku, Azerbaijan Order of the Red Banner of Labor State University named after S.M. Kirov Publ., 1975. (In Russian)
3. Beruchashvili N.L., Arutyunov S.R., Tediashvili A.G. *Landshaftnaya karta Kavkaza. Masshtab 1:1000000* [Landscape map of the Caucasus. Scale 1:1000000]. Tbilisi, 1979. (In Russian)
4. Beruchashvili N.L. *Ob "yasnitel'naya zapiska k Landshaftnoi karte Kavkaza* [Explanatory note to the Landscape map of the Caucasus]. Tbilisi, TSU Publ., 1980, 54 p. (In Russian)
5. Solntsev N.A. On the relationship between "living" and "dead" nature. Bulletin of the Moscow University. Series 5 Geography [Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5 Geografiya]. 1960, vol. 6, pp. 7–11. (In Russian)
6. Beruchashvili N.L. *Kavkaz: landshafty, modeli, ehksperimenty* [The Caucasus: landscapes, models, experiments]. Tbilisi, TSU Publ., 1995, 315 p. (In Russian)
7. Bekmurzaeva R.Kh., Skrypitsyna T.N., Bratkov V.V., Bulaeva N.M. Morphometric characteristics of the relief of the Makazhoy depression (Chechen Republic). *Monitoring. Science and Technologies*, 2024, vol. 59, no. 1, pp. 47–54. (In Russian) <https://doi.org/10.25714/MNT.2024.59.007>
8. Bratkov V.V., Bekmurzaeva R.H., Bekmurzaeva L.R. The possibilities of GIS technologies for assessing and monitoring the climatic conditions of the Makazhoy Depression (Chechen Republic, Russia). *South of Russia: ecology, development*. 2024, vol. 19, no. 2, pp. 160–169. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2024-2-14>
9. Gunya A.N., Khasanov T.S., Ermakova Y.I., Matsaev S.B. Landscape and ecological conditions and factors of vegetation dynamics in the Makazhoy basin. *Grozny Natural Science Bulletin*, 2024, vol. 9, no. 3, pp. 17–24. (In Russian) <https://doi.org/10.25744/genb.2024.37.3.003>
10. Bekmurzaeva R., Baranov I., Bratkov V. [Assessment Of The Influence Of Relief On Terracing Of The Slopes Of The Makazhoy Basin In The Chechen Republic (Based On The Materials Of Air Laser Scanning)]. *Reliability: Theory & Applications*, 2024, vol. 19, no. S6 (81), pp. 773–782. (In Russian) <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2024-681-773-782> Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/assessment-of-the-influence-of-relief-on-terracing-of-the-slopes-of-the-makazhoy-basin-in-the-chechen-republic-based-on-the> (accessed 19.02.2025)
11. Bratkov V.V., Salpagarov D.S. *Landshafty Severo-Zapadnogo i Severo-Vostochnogo Kavkaza* [Landscapes of the North-Western and North-Eastern Caucasus]. Moscow, Ilexa Publ., 2001, 256 p. (In Russian)
12. Volinkin I.N. *Fiziko-geograficheskie kompleksy Andiiskogo khrebt v okrestnostyakh ozera Kezenoi-Am* [Physico-geographical complexes of the Andean range in the vicinity of Lake Kezenoy-Am]. *Priroda i prirodnye resursy tsentral'noi i vostochnoi chasti Severnogo Kavkaza*, [Nature and natural resources of the central and eastern part of the North Caucasus]. Ordzhonikidze, 1981, pp. 142–144. (In Russian)
13. Volinkin I.N., Dotsenko V.V. *Landshafty i fiziko-geograficheskoe raionirovanie Checheno-Ingushetii* [Landscapes and physico-geographical regionalization of Checheno-Ingushetia]. *Problemy fizicheskoi geografii Severo-Vostochnogo Kavkaza* [Problems of physical geography of the North-Eastern Caucasus]. Grozny, 1979, pp. 132–170. (In Russian)
14. Idrisova R.A. Complex Evaluation of Present-Day Conditions of the Chechen Republic Landscapes. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki*. Universitet im. V. I. Vernadskogo [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University]. 2008, vol. 2, no. 4, pp. 47–51. (In Russian) http://vernadsky.tstu.ru/pdf/2008/04/08t_14.pdf

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Виталий В. Братков осуществил литературный обзор, интерпретировал данные дистанционного зондирования Земли при составлении ландшафтной карты, написал рукопись статьи. Рашия Х. Бекмурзаева выполнила все полевые исследования и провела верификацию контуров на местности. Надира О. Гусейнова провела подготовку и обработку данных дистанционного зондирования Земли. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Vitaly V. Bratkov conducted a literary review, interpreted the data from remote sensing of the Earth when compiling a landscape map and wrote the article. Rashia Kh. Bekmurzaeva completed all field studies and verified the contours on the ground. Nadira O. Guseynova conducted the preparation and processing of Earth remote sensing data. All authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Виталий В. Братков / Vitaly V. Bratkov <https://orcid.org/0000-0001-5072-1859>

Рашия Х. Бекмурзаева / Rashia Kh. Bekmurzaeva <https://orcid.org/0000-0001-5936-7235>

Надира О. Гусейнова / Nadira O. Guseynova <https://orcid.org/0000-0003-3979-4293>

Оригинальная статья / Original article

УДК 556.114:550.461

DOI: 10.18470/1992-1098-2025-3-20



Гидрохимические особенности водосбора реки Мзымта

Юлия А. Моисеева¹, Дарья В. Пургина¹, Андрей С. Торопов², Ульяна В. Главная³, Пётр Т. Ситников⁴, Айгуль Ф. Шигапова⁵, Вероника В. Бояркина⁶, Андрей А. Гринько¹

¹Научно-технологический университет «Сириус», Федеральная территория «Сириус», Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Биотехнологический лицей № 21, Новосибирская область, Россия

⁴Академический лицей «Физико-техническая школа» им. Ж. И. Алфёрова, Санкт-Петербург, Россия

⁵Лицей-интернат для одаренных детей с углубленным изучением химии – филиал ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Республика Татарстан, Россия

⁶Белоярская средняя общеобразовательная школа, Новосибирская область, Россия

Контактное лицо

Юлия А. Моисеева, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Международный научный центр в области экологии и вопросов изменения климата Научно-технологического университета «Сириус»; 354340 Россия, Федеральная территория «Сириус», Олимпийский пр-т, 1. Тел. +79138037501

Email moiseeva.ya@talantiuspeh.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8166-1040>

Формат цитирования

Моисеева Ю.А., Пургина Д.В., Торопов А.С., Главная У.В., Ситников П.Т., Шигапова А.Ф., Бояркина В.В., Гринько А.А. Гидрохимические особенности водосбора реки Мзымта // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 3. С. 218-230. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-3-20

Получена 14 марта 2025 г.

Прошла рецензирование 16 июня 2025 г.

Принята 25 июля 2025 г.

Резюме

Химический состав рек определяется особенностями бассейна водосбора, климатическими условиями и антропогенной нагрузкой. Данное исследование посвящено выявлению основных природных и антропогенных факторов и закономерностей, обуславливающих формирование химического состава р. Мзымта и её притоков в среднем и нижнем течении. В статье представлены данные гидрохимических параметров, содержания биогенных соединений и микроэлементов, в том числе тяжелых металлов реки Мзымты и её притоков от места слияния р. Пслух с р. Мзымтой до впадения в Чёрное море. В результате было выявлено, что нижнее течение относительно среднего характеризуется более высокими концентрациями всех биогенных соединений. Была выделена группа микроэлементов (V, Al, Ti, Mn, Fe, Co, Cu, Pb и РЗЭ), концентрации которых имеют однонаправленные изменения по мере движения вод вниз по течению. Воды р. Пслух, р. Мзымта в зоне её слияния с рр. Пслух и Кепша, а также в зоне влияния сточных вод и устье р. Мзымта существенно обогащены микроэлементами относительно кларка речных вод. В целом, изменения в химическом составе р. Мзымта происходят под воздействие двух факторов: природного и антропогенного, а именно из-за различных геологических условий её основных притоков, режима и уклона реки в среднем и нижнем течении, а также из-за влияния строительных работ в руслах рек и сброса сточных вод.

Ключевые слова

Химический состав вод, микроэлементы, биогенные соединения, поверхностные воды, р. Мзымта, притоки.

Hydrochemical features of the Mzymta River catchment area

Yulia A. Moiseeva¹, Daria V. Purgina¹, Andrey S. Toropov², Ulyana V. Glavnaya³, Peter T. Sitnikov⁴, Aigul F. Shigapova⁵, Veronika V. Boyarkina⁶ and Andrey A. Grinko¹

¹Sirius University of Science and Technology, Federal Territory «Sirius», Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³Biotechnological Lyceum No. 21, Novosibirsk Region, Russia

⁴Academic Lyceum, J. I. Alfeyorov Physico-Technical School, St. Petersburg, Russia

⁵Boarding Lyceum for Gifted Children with Advanced Study of Chemistry, Branch of Kazan National Research Technological University, Republic of Tatarstan, Russia

⁶Beloyarskaya Secondary General Education School, Novosibirsk Region, Russia

Principal contact

Yulia A. Moiseeva, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, International Research Centre for Ecology and Climate Change Issues, Sirius University of Science and Technology; 1 Olympiysky Ave, Sirius Federal Territory, Russia 354340.

Tel. +79138037501

Email moiseeva.ya@talantiuspeh.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8166-1040>

How to cite this article

Moiseeva Yu.A., Purgina D.V., Toropov A.S., Glavnaya U.V., Sitnikov P.T., Shigapova A.F., Boyarkina V.V., Grinko A.A. Hydrochemical features of the Mzymta River catchment area. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(3):218-230. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-3-20

Received 14 March 2025

Revised 16 June 2025

Accepted 25 July 2025

Abstract

The chemical composition of rivers is determined by catchment basin features, climatic conditions and anthropogenic influence. This study is devoted to the identification of the main natural and anthropogenic factors and patterns that determine the formation of the chemical composition of the Mzymta River and its tributaries in its middle and lower reaches. Data on hydrochemical parameters, content of biogenic compounds and trace elements, including heavy metals of the Mzymta River and its tributaries from the confluence of the Pslukh River with the Mzymta River to the confluence with the Black Sea, are presented. The result revealed that the lower reaches were characterised by higher concentrations of all nutrient compounds than the middle reaches. A group of trace elements (V, Al, Ti, Mn, Fe, Co, Cu, Pb and REE) whose concentrations have unidirectional changes as the waters move downstream has been identified. The waters of the Pslukh River and the Mzymta River in the area of its confluence with the Pslukh and Kepsha Rivers, as well as in the zone of influence of sewage and its estuary, are significantly enriched in trace elements relative to the median chemical constituents of river waters. In general, changes in the chemical composition of the Mzymta River are influenced by two factors, natural and anthropogenic, namely due to the different geological conditions of its main tributaries, the regime and gradient of the river in its middle and lower reaches and the impact of construction works in the river channels and wastewater discharge.

Key Words

Water chemistry, trace elements, biogenic compounds, surface water, Mzymta River, tributaries.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение химического состава рек является важным инструментом для понимания как естественных, так и антропогенных процессов, влияющих на состояние водной экосистемы и происходящих геохимических процессов [1–10]. В свою очередь природно-климатические особенности региона (количество атмосферных осадков, температурный режим, тип почв и растительности) и конкретные условия водосбора (состав пород, геоморфологические особенности и др.) являются первоочередным фактором в формировании химического состава речных вод [11–13]. Антропогенное воздействие относится к косвенному фактору, но для некоторых регионов является определяющим в химическом составе и оценке качества вод [14–19]. Изучение химического состава рек имеет также важное значение с точки зрения влияния стока рек на прибрежные экосистемы, так как материковый сток является основным поставщиком взвешенных и растворенных веществ, биогенных элементов и тяжелых металлов в море [1; 4; 5; 7; 20].

Река Мзымта – одна из самых крупных и многоводных рек, впадающих в Чёрное море на территории России с площадью водосбора 885 км² и годовым объемом стока 1,6 км³ [3; 21]. На всем протяжении реки в неё впадают множество притоков (р. Пслух, р. Лаура, р. Чвижепсе, р. Кепша и др.), протекающие на территориях Кавказского государственного биосферного заповедника и Сочинского Национального парка. В пределах водосбора р. Мзымта имеются многочисленные выходы минеральных источников, в том числе на р. Чвижепсе, воды которого также изучались в данной работе. Характерной особенностью района исследования является неоднородность и контрастность слагающих его геологических пород. В целом для водосбора р. Мзымта характерно развитие сульфидного, полиметаллического (свинец, цинк, медь) и золоторудного оруденения, имеющих площадное распространение на десятках и сотнях квадратных километров [22]. Исследуемые речные воды подвержены активной и растущей антропогенной нагрузке (урбанизация территории, в том числе рост водопотребления, сброс сточных вод) и их химический состав, в том числе микроэлементный, служит интегральным показателем воздействия хозяйственной деятельности. В свою очередь изучение микроэлементного состава поверхностных вод в зависимости от факторов является актуальным направлением гидрохимических исследований.

Не смотря на уникальность объекта исследования как с точки зрения природных факторов, так и растущей антропогенной нагрузки опубликованные к настоящему времени материалы о химическом составе реки Мзымта и её устьевой области весьма ограничены и посвящены преимущественно изучению биогенных соединений прибрежной зоны [1; 3; 5; 20]. На сегодняшний день имеются единичные работы полного микроэлементного состава на всем течении реки [2] и в устьевой зоне [4]. С 2006 года до 2014 регулярно проводились экспедиционные исследования сотрудниками ИО РАН с целью изучения стока малых и средних рек на прибрежные воды Чёрного моря [20]. Ряд работ, посвящен подземным водам [23–24] и особенностям геологии водосбора реки Мзымты [21; 25].

Из опубликованных работ было установлено, что изменение химического состава вод реки Мзымты от истоков до устья определяется в основном химическим

составом её притоков, а в нижнем течении химический состав вод определяется, главным образом, интенсивностью антропогенного воздействия [3]. Однако подробного и полного представления о формировании химического состава реки Мзымты в опубликованных работах не приводится. В связи с этим целью данного исследования является актуализация данных и выявление основных природных и антропогенных факторов и закономерностей, обуславливающих формирование химического состава р. Мзымта и её притоков в среднем и нижнем течении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования включает в себя среднее (т.1–8) и нижнее (т.9–14) течение р. Мзымта (рис. 1). Всего было отобрано 14 проб воды. Точки отбора проб были выбраны в зоне слияния реки Мзымты с её основными притоками (рр. Пслух, Чвижепсе, Лаура, Кепша), в том числе исследовались отдельно сами притоки, а также некоторые участки, условно подверженные антропогенному воздействию: в зоне влияния городской ливневой канализации (ГЛК) (т. 11–12) и вблизи базы отдыха (БО) около Ахштырского Каньона (т. 10). Здесь стоит также отметить, что в 300 м выше устья р. Кепша велись ремонтные работы опор моста, из-за которых воды сильно были взмучены и в зоне слияния с р. Мзымта наблюдалось большое количество взвеси. Отдельно также был изучен химический состав минерального источника, расположенного в водосборе самого крупного притока – р. Чвижепсе.

По типу водного режима река Мзымта относится к паводочному с ярко выраженным половодьем в теплый период года со средним годовым расходом 49,5 м³/с [24]. В верховьях реки Мзымты средний уклон реки составляет 34,6 ‰ и ширину русла 8 м, по мере движения вниз по течению к устью на участке после впадения р. Пслух уклон становится 30,5 ‰ (переход от верхнего к среднему течению), русло реки расширяется до 50–60 м и в районе между устьями рр. Чвижепсе и Кепша уклон падает до 7–8 ‰ с шириной русла 35 м. При выходе на имеретинскую низменность р. Мзымта течет по широкой долине и характеризуется многочисленными протоками, заполненными осередками и побочными [24].

На участке исследования согласно [22; 25] выделяют следующий состав горных пород, слагающих долину р. Мзымта: от места впадения р. Пслух (т.1–2) до Лауры (т.3) в основном, породы представлены юрскими аргиллитами с прослоями алевролитов, песчаников, сидеритов с конкрециями пиритов, редко пирокластические породы и лавы кислого, среднего и основного составов. В районе от места слияния с Мзымтой р. Чвижепсе (т. 5–6) до р. Кепша (т. 7–8) русло реки залегает в породах, представленных аргиллитами с прослоями песчаников, алевролитов, мергелей, известняками с прослоями мергелей, гравелитов и песчаников. В нижнем течении (т. 9–13) преимущественно в основании современных аллювиальных отложений залегают палеогеновые и неогеновые глины, мергелистые глины с алевролитами и песчаниками. В породах на территории водосбора, как уже говорилось выше, широко развиты зоны сульфидной минерализации (медь, золото, полиметаллы) [22; 25] и в среднем течении реки распространены субщелочные породы основного и среднего состава с редкометалльно-редкоземельным составом [21–22].

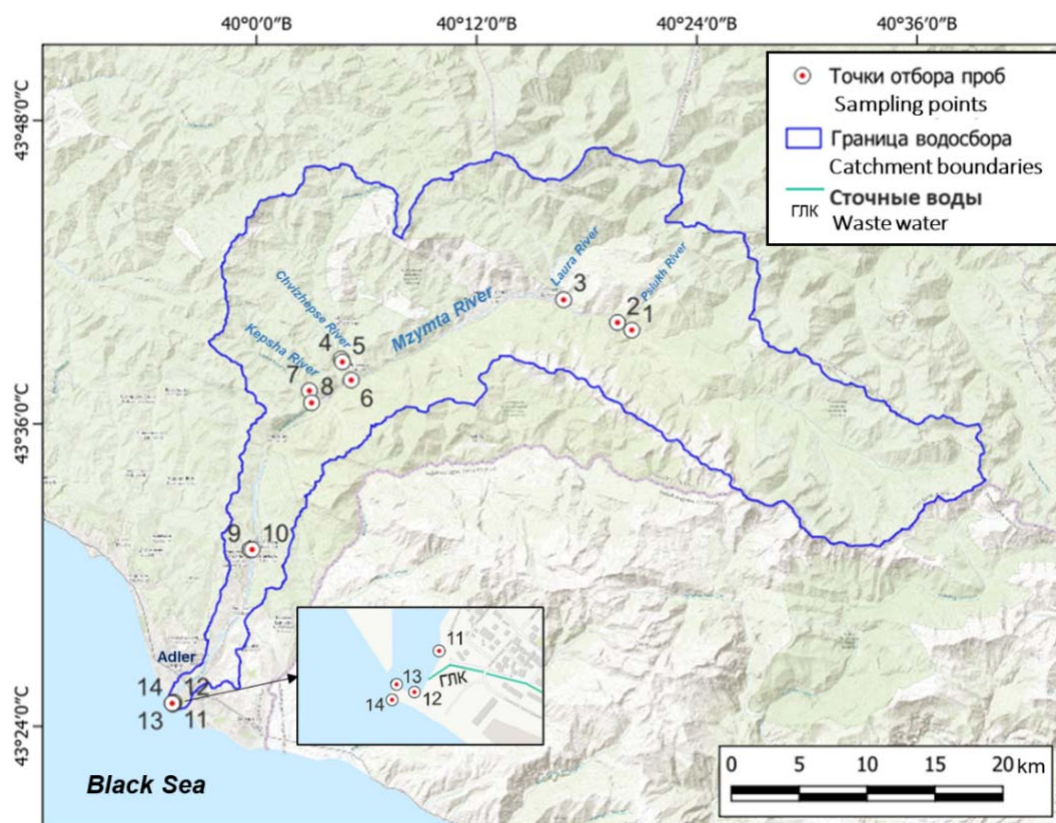


Рисунок 1. Карта – схема расположения точек отбора проб в водосборе р. Мзымта

Figure 1. Location map of sampling points in the Mzymta River catchment

Отбор проб осуществлялся в начале июля в сезон с наименьшим стоком реки в течении 3х дней в одинаковых погодных условиях. На месте определялись pH, Eh, TDS, с помощью портативных влагозащищенных pH/EC/TDS-метра HI991300 и ОВП метра HM Digital ORP-200, температура воды определялась температурным датчиком. Пробы отбирались в соответствии с ГОСТ 31861-2012 в 1.5 литровые бутылки для определения биогенных элементов (Si, PO₄, NO₂, NO₃), сульфатов и общей щелочности и в 50 мл пробирки фирмы Eppendorf для определения микроэлементного состава. Определение растворенного кислорода проводилось методом Винклера [28]. Общая щелочность (A_T) определялась в лаборатории методом обратного титрования [29; 30]. Измерения биогенных элементов проводились спектрофотометрическими методами в течение нескольких часов после отбора проб, азот аммонийный фиксировался сразу при отборе и хранился в темном месте [28–29]. Массовая концентрация сульфатов в водах проводилась турбидиметрическим методом [31], основанное на измерении интенсивности помутнения растворов при добавлении хлорида бария в кислой среде. Определение микроэлементного состава вод выполнялось масс-спектрометрическим методом с индуктивно-связанной плазмой (Plasma Quant MS Elite). Аномалии церия и европия был рассчитаны следующим образом: $\text{Log}((2\text{-Ce/Ce}_{\text{NASC}})/(\text{La/La}_{\text{NASC}}+\text{Pr/Pr}_{\text{NASC}}))$ и $\text{Eu/Eu}_{\text{NASC}} = \text{Log}((2\text{-Eu/Eu}_{\text{NASC}})/(\text{Sm/Sm}_{\text{NASC}}+\text{Gd/Gd}_{\text{NASC}}))$, соответственно.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гидрохимические параметры

В распределении гидрохимических показателей прослеживается четкая закономерность влияния притоков на изменения pH по мере движения водных масс вниз по течению реки Мзымты (табл. 1). На момент пробоотбора в

водосборе реки Мзымты не выявлено превышения предельно допустимых значений pH.

В пространственной динамике температура вод в среднем и нижнем течении р. Мзымта существенно различается (средние значения составили 14,2 и 20,2 °C, соответственно), не смотря на теплые притоки среднего течения (р. Чвижепсе и р. Кепша) холодные воды с верховьев Мзымты в меньшей степени подвергаются влиянию температурного режима её притоков в среднем течении, а из-за наименьшего уклона и широкого русла реки в низовьях вода быстрее прогревается и достигает более высоких значений. Величина A_T в р. Мзымта изменяется в пределах от 0,60 мг-экв/л до 1,46 мг-экв/л и подвержена пространственной изменчивости. Воды крупных притоков р. Мзымта – реки Пслух, Лаура, Чвижепсе системно встраиваются в речную систему водосбора без контрастных отличий. Исключением является р. Кепша, воды которой дренируют карбонатные породы и в нижнем своем течении становится щелочной с pH – 8,05 и насыщенной гидрокарбонатами A_T – 2,30 мг-экв/л (A_{HCO3} – 2,26 мг-экв/л). Для подземных вод скважины Чвижепсе характерно высокое значение A_T (28,02 мг-экв/л), что определяется условиями их формирования.

Макрокомпонентный состав

Химический состав реки Мзымты вниз по течению сменяется с преобладания гидрокарбонат иона на сульфат и хлорид ионов, переходя от ультрапресных и пресных вод до солоноватых и соленых в прибрежной части Чёрного моря (рис. 2). Соответственно воды прибрежной зоны Черного моря характеризуется наибольшей степенью минерализации и представлены хлоридно-сульфатом натриевым составом. Притоки реки Мзымты по минерализации ультрапресные и по химическому составу

являются гидрокарбонатно-сульфатные кальциевые (магниево-кальциевые) – р. Пслух, р. Лаура и р. Кепша сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые, р. Чвижепсе гидрокарбонатные кальциевые (магниево-кальциевые). Воды скважины Чвижепсе солоноватые и по химическому составу характеризуются как гидрокарбонатно-сульфатные

кальциевые (магниево-кальциевые) и являются мышьяковистыми (4,1 мг/л). Общая жесткость исследуемых вод изменяется в пределах от 0,5 (т.8) до 8,1 (т.11) мг-экв/л, исключая точки отбора в Чёрном море и скважине Чвижепсе.

Таблица 1. Основные характеристики вод р. Мзымта и её притоков

Table 1. Main water characteristics of the Mzymta River and its tributaries

№*	Место отбора Sampling point	С.Ш. N. lat.	В.Д. E. long.	Т, °С	рН, ед. рН, units	А _т , мг- экв/л А _т , mg-eq/l	Мин-ия, мг/л Mineralisat ion, mg/l
1	р. Пслух / Pslukh River	43°39'43"	40°20'28"	11,1	7,69	0,46	83,6
2	р. Пслух – р.Мзымта Pslukh River – Mzymta River	43°39'60"	40°19'39"	10,0	7,45	0,60	62,9
3	р. Лаура / Laura River	43°40'57"	40°16'44"	13,9	6,73	0,54	63,0
4	Скв. Чвижепсе Chvizhepse well	43°38'35"	40°4'37"	17,1	6,40	28,02	3166,8
5	р. Чвижепсе / Chvizhepse River	43°38'27"	40°4'39"	18,5	6,50	0,74	62,3
6	р. Чвижепсе – р. Мзымта Chvizhepse River – Mzymta River	43°37'45"	40°5'8"	18,1	6,88	0,86	97,7
7	р. Кепша / Kepscha River	43°37'18"	40°2'53"	17,5	8,05	2,30	241,2
8	р. Кепша – р.Мзымта Kepscha River – Mzymta River	43°36'49"	40°2'60"	12,6	7,70	0,60	57,2
9	Скв. Форелевое хозяйство Trout Farm well	43°31'1"	39°59'37"	11,7	7,40	1,66	188,5
10	р. Мзымта (БО Ахштырский Каньон) / Mzymta River (Akhshtyrsky Canyon)	43°31'3"	39°59'46"	16,1	7,43	0,68	100,9
11	р. Мзымта (60 м выше от сброса ГЛК) Mzymta River (60 m upstream of wastewater discharge)	43°24'57"	39°55'30"	24,2	8,25	1,10	1280,6
12	р. Мзымта (80 м ниже от сброса ГЛК) /Mzymta River (80 m downstream of wastewater discharge)	43°24'55"	39°55'25"	21,8	7,73	1,46	932,2
13	р. Мзымта – устье Mzymta River – estuary	43°24'57"	39°55'23"	18,6	7,83	0,74	316,8
14	Чёрное море (берег) Black Sea (shore)	43°24'56"	39°55'24"	24,6	8,19	2,02	18960,5

Примечание: * Номер точки отбора в соответствии с рис. 1.

Note: * Sampling point number in accordance with Fig. 1.

Биогенные соединения и растворенный кислород

Нижнее течение р. Мзымта относительно среднего характеризуется более высокими концентрациями всех биогенных соединений (табл. 2). Это обусловлено влиянием ГЛК и более высоким уровнем температур в нижнем течении, который возникает из-за меньшей скорости течения и широкого русла реки на этом участке. При этом, если рассматривать только воды р. Мзымта в местах слияния притоков и ограничивая зону влияния ГЛК, то концентрации только азотистых соединений выше в нижнем течении, чем в среднем, а содержание фосфатов и кремния приблизительно одинаковое. Повышенные концентрации азотистых соединений в нижнем течении и содержания азота аммонийного, превышающего ПДК до 3 раз, подтверждают влияние сточных вод. Концентрация растворенного кислорода на участке исследования изменялась в пределах от 0,00 мг/л (Скв. Чвижепсе) до 14,29 мг/л (р.Мзымта 50 м выше от сброса ГЛК). Непосредственно в самой реке Мзымте и её притоках,

исключая пиковые значения, концентрация растворенного кислорода варьировалась от 7,86 мг/л до 9,84 мг/л, при среднем значении 8,76 мг/л (табл. 2). В случае с пиковым значением растворенного кислорода на участке влияния сброса ГЛК (насыщение кислородом составляет 184 %), здесь также выявлены высокие значения азота нитритного, нитратного и аммонийного и повышенные значения фосфатов, что возможно связано с процессом эвтрофикации. Так как отношение N:P составило 5,8 (менее 16) это говорит о том, что содержание фосфора достаточно высокое, чтобы сдерживать рост фитопланктона, поэтому процесс эвтрофикации может быть замедлен или быть на начальной стадии [32–34]. На основании гидрохимических показателей (рН, нитратный азот, фосфатный фосфор) можно отнести точки 11–12, которые находятся в зоне влияния ГЛК к эвтрофному уровню слабозагрязненных вод с выраженной тенденцией к гипертрофности, который соответствует статусу весьма загрязненного водоема.

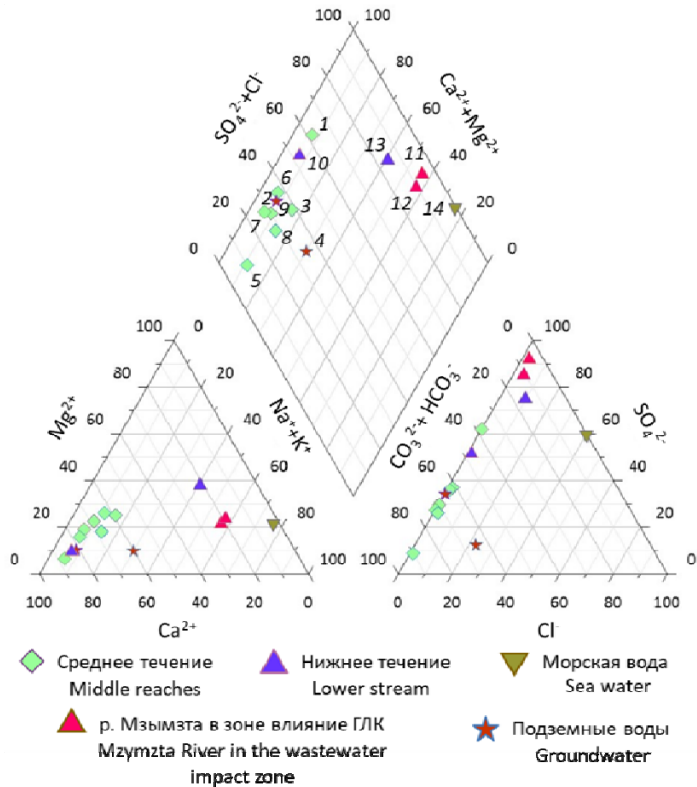


Рисунок 2. Химический состав р. Мзымта и её притоков в среднем и нижнем течении на диаграмме Пайпера
Figure 2. Chemical composition of the Mzymta River and its tributaries in the middle and lower reaches on Piper diagram

Таблица 2. Содержание растворенного кислорода и биогенных элементов р. Мзымта и её притоков в среднем и нижнем течении
Table 2. Dissolved oxygen and nutrient content of the Mzymta River and its tributaries in its middle and lower reaches

№	O ₂	N–NO ₂ ⁻	N–NO ₃ ⁻	N–NH ₄ ⁺	P–PO ₄ ³⁻	Si
	мг/л / mg/l					
1	9,18	< п.о.*	0,15	< п.о.	0,08	2,62
2	9,84	< п.о.	0,21	0,01	0,07	2,58
3	8,65	0,0004	0,14	0,07	< п.о.	1,74
4	0,00	< п.о.	< п.о.	0,05	0,64	9,37
5	8,07	< п.о.	0,16	< п.о.	< п.о.	1,94
6	8,40	0,003	0,20	0,003	< п.о.	2,05
7	8,80	< п.о.	0,27	0,01	0,10	3,05
8	7,86	< п.о.	0,10	0,01	0,08	2,78
9	9,41	< п.о.	0,38	< п.о.	< п.о.	1,93
10	9,19	0,002	0,06	0,002	0,02	1,71
11	14,29	0,133	1,17	1,21	0,43	3,89
12	9,50	0,011	0,45	0,51	0,11	2,44
13	8,86	0,004	0,30	0,15	0,07	2,24
14	7,04	0,010	0,07	< п.о.	0,04	0,83

Примечание: *<п.о. – ниже предела обнаружения
Note: *<po. – below detection limit

Зафиксированное высокое насыщение кислородом можно объяснить тем, что в дневное время в период высоких температур из-за высокой интенсивности радиации процесс фотосинтеза водорослей становится сильным и генерирует большое количество растворенного кислорода. Кислород удерживается, в основном в виде крошечных пузырьков воздуха в водорослях. При этом в ночное время насыщение кислородом может падать до 20 % [32; 35]. Такое явление может оказать сильное влияние на водную биоту, которые не способны адаптироваться к этим резким колебаниям, и привести к кислородному шоку и в последующем к их гибели, что напрямую способствует к

развитию эвтрофикации на данном участке. Стоит отметить также т.12, расположенная в зоне влияния ГЛК здесь также зафиксированы повышенные значения азотистых соединений и насыщение кислородом составляет 108,8 %, а соотношение N:P равно 9, что также может свидетельствовать об антропогенной эвтрофикации на этом участке. Сравнивая концентрации кремния в основных притоках Мзымты, где наибольшие значения были выявлены в р. Кепша (3,05 мг/л), а наименьшие в рр. Лаура и Чвижепсе (1,74 и 1,94 мг/л, соответственно) (табл. 2), наблюдается такая же закономерность влияния притоков

на содержания кремния в р. Мзымта как и для всех биогенных соединений. Также стоит отметить, что выявленные повышенные значения кремния в т.11 связаны вероятно с влиянием ГЛК и протекающими процессами эвтрофикации, а в скважине Чвижепсе такие значения концентраций являются характерными для подземных вод.

Микроэлементный состав

По результатам анализа микроэлементного состава поверхностных вод реки Мзымты и её притоков были выделены группы микроэлементов, концентрации которых имеют однонаправленные изменения по мере движения вод вниз по течению. К ней относятся некоторые из тяжелых металлов – V, Mn, Fe, Co, Cu, Pb, а также Al, Ti и Cs. В р. Пслух и в зоне слияния с р. Мзымта концентрации выделенных элементов имеют пиковые значения, затем резко уменьшаются в р. Лаура и до р. Кепши, далее вновь увеличиваются, преимущественно в точках 8 и 13 (рис. 3). Поведение Cr, Cd, и Th имеет схожий характер с предыдущей группой, однако концентрации этих элементы имеют однонаправленную тенденцию к уменьшению в сторону моря. Стоит отметить, что воды р. Пслух (т.1), р. Мзымта в зоне её слияния с рр. Пслух (т.2) и Кепша (т.8), а также в зоне влияния ГЛК (т. 11–12) и устье р. Мзымта (т. 13) существенно обогащены микроэлементами ($C_i/K_k > 1$, где C_i – концентрация элемента, K_k – кларк концентрации речных вод) относительно кларка речных вод (более 50 % элементов) (тяжелые металлы, РЗЭ и др.). В остальных случаях геохимическую специализацию вод определяют менее 20 % микроэлементов. Так как для участка р. Пслух и зоны его впадения в р. Мзымта антропогенное влияние сведено к минимуму, поступление этих элементов может происходить в результате химического выветривания горных пород (имеющих вкрапления полиметаллической и сульфидной минерализации), сопровождающиеся их механическим разрушением и растворением.

В водах р. Мзымта в месте впадения р. Пслух и непосредственно в самом притоке зафиксированы превышения ПДК (питьевых вод) по Al (1,3–1,7 ПДК), Mn (1,1 ПДК) и Fe (4 ПДК) (табл. 3), а также в устье р. Мзымты по Al (1,3 ПДК) и Fe (2,7 ПДК). В обоих случаях превышение не связано с антропогенным влиянием, поскольку в верховьях реки такое влияние отсутствует, а повышенные концентрации алюминия и железа в устье реки вероятнее всего транспортируются со взвесью, высокое содержание которого характерно для устьевых участков. В остальных случаях превышения по ПДК питьевых вод для тяжелых металлов не зафиксировано, кроме участка слияния р. Кепша и р. Мзымта, где было выявлено превышение только по Fe (1,8 ПДК), которое скорее всего поступает также со взвешенным веществом из-за строительных работ выше по течению в русле р. Кепша. На рисунке 3 также видно, что в этой точке происходит увеличение концентраций всех тяжелых металлов.

Отдельное внимание требует уделить скважине Чвижепсе, подземная вода в которой обогащена большим спектром микроэлементов. Отличаются высокими содержанием такие элементы как Fe (7140 мкг/л), As (4510 мкг/л), Mn (320 мкг/л). Так как это минеральные подземные воды они обусловлены отличительной геохимической обстановкой (6,4 ед. рН, Eh = 0 мВ), способствующей к накоплению, и усиливающей миграционную способность этих элементов. При этом в

самой р. Чвижепсе и слияния её с Мзымтой выявлены минимальные концентрации всех тяжелых металлов, в том числе и мышьяка, что свидетельствует об отсутствии влияния минеральных вод с речными.

Для группы тяжелых металлов (Cr, Mn, Fe, Co, Ni), кремния и фосфатов, а также Cu с Co и Zn по результатам корреляционного анализа были выявлены статистические значимые связи ($R^2 > 0,532$, $p < 0,05$) (табл. 4). Вероятнее всего все эти элементы поступают в процессе растворения горных пород (алюмосиликатов, сульфидов и др.) и транспортируются со взвешенной частью.

Стоит также отметить, что никель имеет высокие корреляционные связи со всеми биогенными соединения, кроме азота-аммонийного, а нитриты имеют высокую корреляцию еще с Cu и Zn, что можно объяснить тем, что Cu и Zn являются биологически значимыми элементами, которые обеспечивают функции фотосинтеза и азотного обмена [35].

Редкоземельные элементы (РЗЭ). Распределение РЗЭ в воде могут служить индикаторами геохимических процессов, происходящих в системе вода–порода, а также отражать изменения водной среды при антропогенном воздействии [27; 38–45].

Концентрации РЗЭ в исследуемых водах (как Σ РЗЭ) варьируются от 0,02 до 6,72 мкг/л. Наибольшие значения обнаружены в водах р. Пслух (6,2 мкг/л), так же, как и многие тяжелые металлы в результате выщелачивания подстилающих пород. Наименьшие значения зафиксированы на участке от р. Лаура до р. Кепша (0,02–0,1 мкг/л). Некоторые микроэлементы (V, Al, Ti, Pb, Th) имеют положительную корреляцию ($R^2 > 0,532$, $p < 0,05$) с Σ РЗЭ, что говорит об их общем источнике, в том числе сильно высокие корреляционные связи с алюминием ($R^2 = 0,91$) свидетельствует о преимущественном переносе РЗЭ в составе глинистых частиц и свинцом ($R^2 = 0,96$) поступление в процессе выщелачивания горных пород с полиметаллическим орудением (медно-свинцовая минерогенная зона в среднем течении). Для всех исследуемых вод характерно преобладание легких РЗЭ над тяжелыми: доля легких РЗЭ в общем количестве составляет 68,6–80,9 %.

Для оценки степени проявления РЗЭ в речных водах пробы исследуемых вод были нормализованы к Северо-Американскому сланцу (NASC). Профили распределения РЗЭ, нормированные к сланцу, демонстрируют ярко выраженный европейский максимум для рр. Чвижепсе (и в зоне смешения с Мзымтой), Лаура и Кепша и цериевый минимум для них же, кроме р. Кепша (рис. 4). Графики распределения других речных вод относительно однотипны и имеют относительную обогащенность вод средними РЗЭ (от Sm до Dy) и согласуется с предыдущими исследованиями для данной территории [2].

Во всех изученных водах наблюдается дефицит церия (Ce/Ce_{NASC} составляет -0,34– -0,01). Рассчитанные значения европейской аномалии варьируются в пределах 0,04–0,75, при этом максимальная величина характерна для вод р. Чвижепсе и места слияния её с р. Мзымта. Отрицательная цериевая аномалия свидетельствует о частичном окислении Ce^{3+} до Ce^{4+} , который растворим, чем $Ce(III)$, поэтому он может выпадать в осадок, уменьшая концентрацию церия в воде. Также ионы церия могут адсорбироваться на частицах, таких как глина, кремний и оксиды железа, которые распространены в речных отложениях.

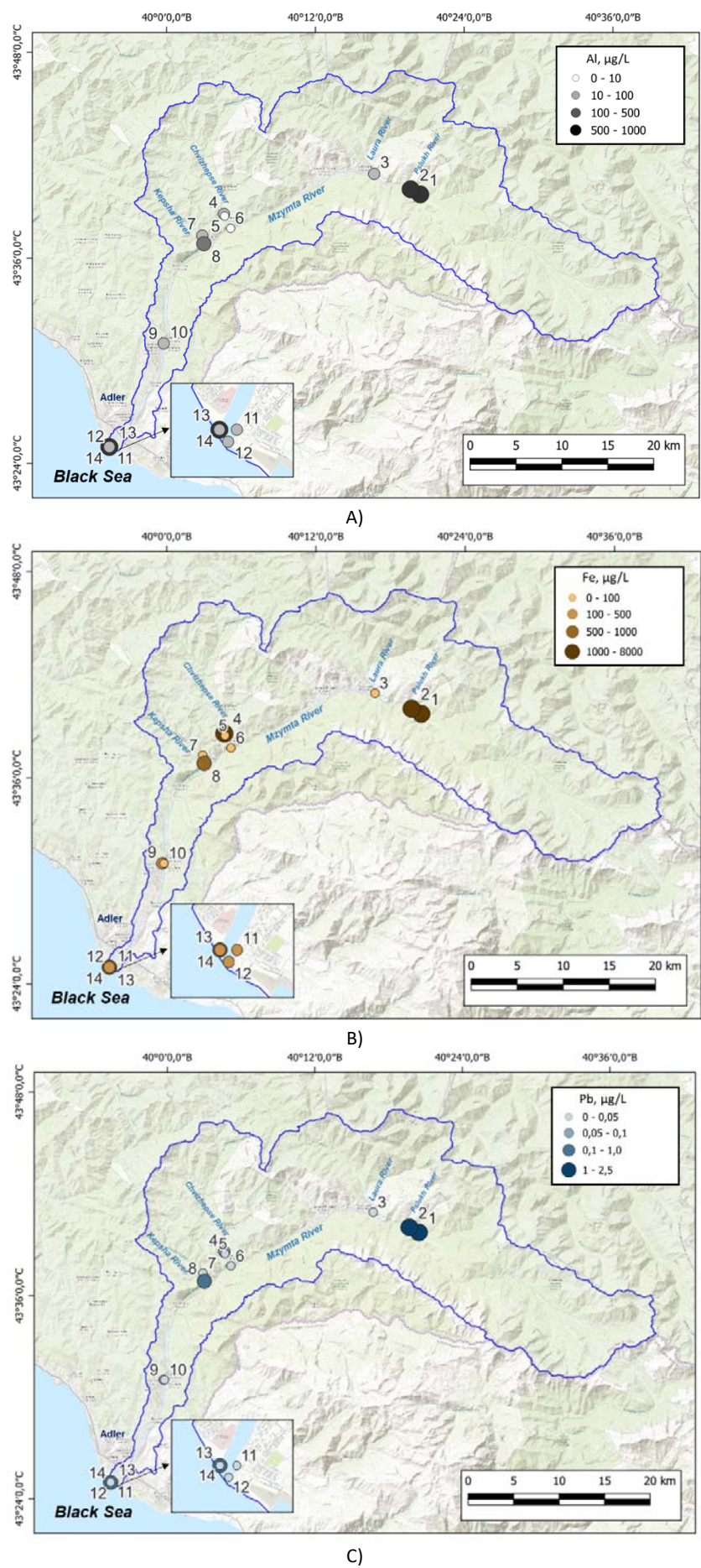


Рисунок 3. Концентрации Al (A), Fe (B), Pb (C) в р. Мзымта и её притоках
Figure 3. Concentrations of Al (A), Fe (B), Pb (C) in the Mzymta River and its tributaries

Таблица 3. Концентрации тяжелых металлов р. Мзымта и её притоков
Table 3. Concentrations of heavy metals in the Mzymta River and its tributaries

№	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
	мкг/л / µg/L								
1	114,4	1170,8	1,58	1,12	2,71	5,58	1,22	0,020	2,24
2	103,2	1208,7	1,29	1,42	2,25	5,35	4,35	0,017	2,01
3	2,4	25,4	<п.о.	0,12	1,20	1,60	9,60	0,006	<п.о.
5	3,8	52,1	<п.о.	0,81	1,40	4,80	2,37	0,008	0,02
6	1,2	56,4	<п.о.	0,43	0,30	0,30	1,45	0,019	<п.о.
7	2,7	59,7	0,07	0,12	0,56	0,19	1,10	0,002	0,04
8	39,3	534,5	0,49	0,96	1,65	2,11	2,21	0,007	0,73
10	2,3	71,4	0,01	0,23	0,30	0,40	2,20	0,004	0,03
11	37,4	359,5	0,57	4,20	2,70	6,10	4,40	0,013	0,05
12	47,3	386,3	0,25	1,87	1,20	1,50	5,90	0,010	<п.о.
13	74,0	819,8	0,59	0,88	1,46	2,70	2,23	0,007	0,65
ПДКпитательных вод MPCdrinking water	100	300	100	100	1000	5000	50	1	30

Таблица 4. Корреляционная матрица микроэлементов и биогенных соединений
Table 4. Correlation matrix of trace elements and nutrient compounds

	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Si
Cr	1											
Mn	0,96	1										
Fe	0,96	0,97	1									
Co	0,91	0,96	0,90	1								
Ni	0,93	0,90	0,96	0,79	1							
Cu	0,11	0,21	0,20	0,53	0,17	1						
Zn	0,13	0,23	0,24	0,51	0,24	0,92	1					
NH ₄ ⁺	0,10	-0,09	-0,13	-0,09	0,08	0,61	0,58	1				
NO ₂ ⁻	0,65	0,17	0,17	0,58	0,94	0,84	0,91	0,94	1			
NO ₃ ⁻	0,52	0,02	0,01	0,05	0,91	0,42	0,42	0,97	0,95	1		
PO ₄ ³⁻	0,87	0,74	0,80	0,68	0,92	0,27	0,38	0,38	0,98	0,97	1	
Si	0,94	0,87	0,94	0,83	0,96	0,25	0,27	0,07	0,82	0,70	0,92	1

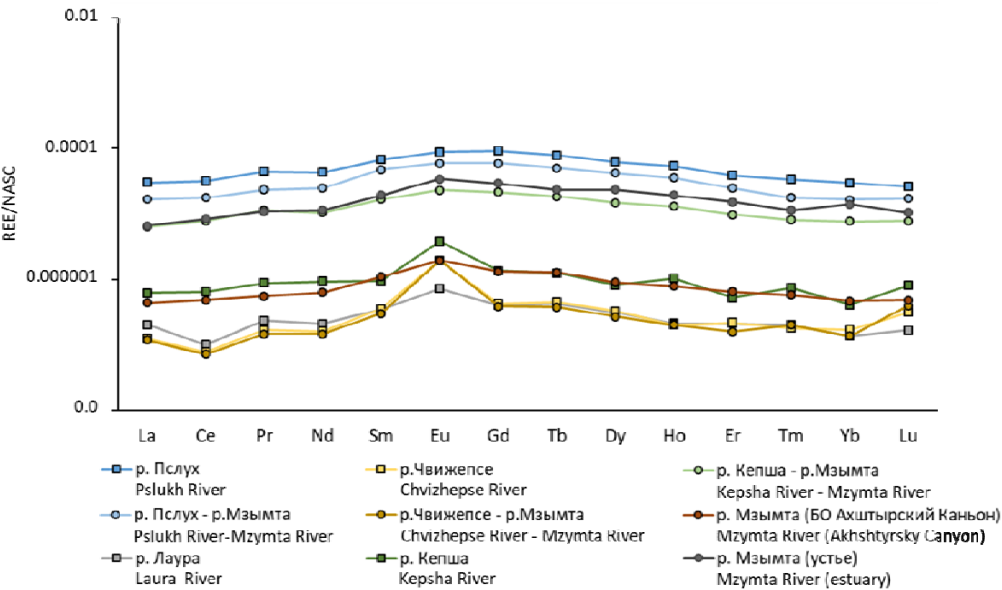


Рисунок 4. Профили распределения РЗЭ р. Мзымта и её притоков, нормализованные по отношению к NASC
Figure 4. REE distribution profiles of the Mzymta River and its tributaries normalised with respect to NASC

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные черты механизма особенностей химического состава р. Мзымта определяются, с одной стороны, различными геологическими условиями притоков, режимом вод на этих участках, уклоном реки, с другой стороны, повышенной антропогенной загруженностью в нижнем течении.

В распределении гидрохимических показателей прослеживается ярко выраженная закономерность влияния притоков на изменения pH и общей щелочности по мере движения водных масс вниз по течению реки Мзымты. Также нижнее течение реки, по сравнению со средним, отличается более высокими концентрациями всех биогенных соединений. из-за характерного более высокого уровня температур, а также локального влияния сточных вод.

Выделены группы микроэлементов (V, Al, Ti Mn, Fe, Co, Cu, Pb, Cs и PЗЭ), концентрации которых имеют однонаправленные изменения по мере движения вод вниз по течению. В том числе, для р. Пслух и в зоне слияния её с р. Мзымта установлены превышения ПДК по Al, Fe и Mn, которые не связаны с антропогенным воздействием и поступают в результате химического выветривания горных пород, что подтверждается их обогащенностью относительно кларка речных вод. На участках слияния р. Кепша с р. Мзымта и в устье р. Мзымта выявленные повышенные концентрации группы микроэлементов, в том числе тяжелых металлов, поступающие со взвешенным веществом как из-за естественных процессов – высокого содержания взвести в устьевых зонах, так и антропогенного вмешательства – в результате строительных работ в русле реки.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20125, <https://rscf.ru/project/24-27-20125/>.

ACKNOWLEDGMENT

The study was supported by Russian Science Foundation grant No. 24-27-20125, <https://rscf.ru/project/24-27-20125/>.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костылева А.В. Распределение растворенного органического углерода в приустьевых районах Большого Сочи (северо-восточная часть Черного моря) // *Океанология*. 2015. Т. 55. N 2. С. 224–230. <https://doi.org/10.7868/S0030157415020082>
2. Литвиненко Ю.С., Захарихина Л.В. Геохимия и радиоэкология вод и донных отложений р. Мзымты черноморского побережья // *Геохимия*. 2022. Т. 67. N 4. С. 376–393. <https://doi.org/10.31857/S0016755222030049>
3. Маккавеев П.Н., Завьялов П.О. Геохимия речного стока в Чёрное море. Глава 3.2 Сток малых и средних рек российского побережья Черного моря и его влияние на характеристики вод. Москва: Научный мир, 2018. С. 287–321.
4. Савенко А.В., Покровский О.С. Трансформация макро- и микроэлементного состава стока растворенных веществ в устьях средних и малых рек Черноморского побережья России // *Океанология*. 2022. Т. 62. N 3. С. 380–402. <https://doi.org/10.31857/S003015742203011X>
5. Маккавеев П.Н., Полухин А.А., Степанова С.В. Работы по изучению приустьевых областей малых и средних рек в прибрежной зоне российского сектора Черного моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2013. С. 412–417.
6. Savenko A.V., Savenko V.S. Trace Element Composition of the Dissolved Matter Runoff of the Russian Arctic Rivers // *Water*. 2024. V. 16. N. 4 (565). <https://doi.org/10.3390/w16040565>

7. Савенко А.В., Савенко В.С., Ефимов В.А., Покровский О.С. Микроэлементный состав вод устьевого участка р. Колымы // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2023. Т. 509. N 2. С. 272–275. <https://doi.org/10.31857/S2686739722602800>
8. Комаров Р.С., Решетняк О.С. Пространственно-временная изменчивость ионного стока в бассейне р. Кубани // *Геология и геофизика Юга России*. 2024. Т. 14. N 3. С. 191–203. <https://doi.org/10.46698/q44917472-5566-w>
9. Шестеркина Н.М., Шестеркин В.П. Микроэлементы в речных водах побережья Татарского пролива (восточный макросклон северного Сихотэ-Алиня) // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. 2024. Т. 69. N 3. С. 509–527. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.307>
10. Sharma M.K., Kumar P., Prajapati P., Bhanot K., Wadhwa U., Tomar G., Goyal R.K., Prasad B., Sharma B. Study of hydrochemical and geochemical characteristics and solute fluxes in Upper Ganga Basin, India // *Journal of Asian Earth Sciences*. X. 2022. V. 8. Article number 100108. <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2022.100108>
11. Лесникова П.С. Изменение макроэлементного состава речных вод в контрастных геологических условиях, река Сочи Черноморского побережья России // *Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология*. 2023. N 3. С. 47–56. <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/3/47-56>
12. Durán A.V., Velasquez J.L., Neculqueo G., Deckart K., Lillo D.D., Frez L.N., Trogger D., Quezada A.C., Solé M.B., Escobar M.E. Extreme climatic events in northern Chile and their impact on the geochemical composition of the Huasco River // *Journal of South American Earth Sciences*. 2022. V. 118. Article number: 103927. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103927>
13. Huang L., Luo Q., Wei G., Jia Z., Sun K., Zhao C., Yang M., Fang H., Fan Z., Zeng F. Different impacts of natural and anthropogenic factors on dissolved organic matter chemistry in coastal rivers: Implications for water management // *Journal of Environmental Management*. 2024. V. 368. Article number: 122236. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122236>
14. Ansari A.J., Sen I.S., Sinha R. Trends of water composition and discharge in the Ramganga River, Ganga Basin over the last 40 years signal enhanced nitrate flux // *Journal of Hydrology*. 2024. V. 641. Article number: 131822. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131822>
15. Liu Y., Su B., Mu H., Zhang Y., Chen L., Wu B. Effects of point and nonpoint source pollution on urban rivers: From the perspective of pollutant composition and toxicity // *Journal of Hazardous Materials*. 2023. V. 460. Article number: 132441. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132441>
16. Basnet N., Sitaula S., Bohara R., Bhattarai S., Rawal S., Uprety M.P., Awasthi M.P., Varol M., Kayastha S.P., Pant R.R. Hydro-chemical characteristics of Biring and Tangting Rivers (Nepal) and evaluation of water quality for drinking and irrigation purposes // *Environmental Research*. 2024. V. 261. Article number: 119697. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119697>
17. Dippong T., Török I., Tănăsia C., Resz M.-A. Impact of water and sediment pollution in Valea Viseu river, Romania // *Process Safety and Environmental Protection*. 2025. V. 195. Article number: 106796. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.106796>
18. Ali G., Chaudhari M.P., Syed S., Rajpurohit D., Sanyal M., Shrivastav P.S., Hydrogeochemical investigation and water quality assessment of the Indus River in the semiarid region of Ladakh, India // *Marine Pollution Bulletin*. 2025. V. 211. Article number: 117413. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117413>
19. Trinh D.A., Do N.T., Panizzo V.N., McGowan S., Salgado J., Large A.R., Henderson A.C., Vu T.T. Anthropogenic impacts on the water chemistry of a transboundary river system in Southeast Asia // *Journal of Asian Earth Sciences*. X. 2024. V. 12. Article number: 100183. <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2024.100183>
20. Завьялов П.О., Маккавеев П.Н., Коновалов Б.В., Осадчиев А.А., Хлебопашев П.В., Пелевин В.В., Грабовский А.Б., Ижицкий А.С., Гончаренко И.В., Соловьев Д.М., Полухин А.А. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря // *Океанология*. 2014. Т. 54. N 3. С. 293–308. <https://doi.org/10.7868/S0030157414030150>
21. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Кондрашов И.А. Палеогеновая базальтрахитовая формация Западного Кавказа: геохимическая специфика, вопросы петрогенезиса, геодинамическая типизация, металлогения // *Геология и геофизика Юга России*. 2018. N 4. С. 18–32. <https://doi.org/10.23671/VNC.2018.4.20131>
22. Пруцкий И.И. Карта полезных ископаемых: К-37-V. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Новая серия. Карта полезных ископаемых. Кавказская серия, масштаб: 1:200000. ФГУП Кавказгеолсъемка, 2001. <https://www.geokniga.org/maps/32454> (дата обращения: 08.07.2024).
23. Борецкий Б.В., Ершов Г.Е., Кувыкина Ю.Ю. Условия формирования эксплуатационных запасов Нижнемзымтинского месторождения

- пресных подземных вод на Черноморском побережье Кавказа и их пространственно-временное изменение под влиянием интенсивной антропогенной нагрузки // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2012. N 6. С. 507–519.
24. Лесникова П.С., Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С., Шевелев С.Г., Варельджян Г.В. Геохимия родниковых вод бассейнов рек Мзымты и Сочи, южный склон Кавказского хребта // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2023. Т. 87. N 8. С. 1258–1274. <https://doi.org/10.31857/S258755662308010>
25. Карелина Е.В., Марков В.Е., Блоков В.И. Перспективность Краснополянского района города Сочи на благороднометалльное оруденение // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: «Инженерные исследования». 2017. Т. 18. N 4. С. 497–504. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2017-18-4-497-504>
26. Джаошвили С. Реки Черного моря. Технический отчет N 71. Европейское агентство по охране окружающей среды, 2002. 58 с.
27. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 9. Закавказье и Дагестан. Выпуск 1. Западное Закавказье. Гидрографическое описание рек и озер / ред. В.Ш. Цомая. Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. 578 с.
28. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / ред. В.В. Сапожников. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
29. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 541 с.
30. Dickson A.G., Sabine C.L., Christian J.R. Guide to best practices for ocean CO₂ measurements. PICES Special Publication 3. IOCCP Report. 2007. N 8. 196 p.
31. РД 52.24. 405–2018. Массовая концентрация сульфатов в водах. Методика измерений турбидиметрическим методом. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2018. 30 с.
32. Nguyen D.V., Nguyen A.B., Hoang T. H. Dissolved Oxygen as an Indicator for Eutrophication in Freshwater Lakes // Environmental Engineering and Management for Sustainable Development, International Conference, Proceedings. 2016. N. 47.
33. Kannel P.R., Lee S., Khan S.P. Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment // Environmental Monitoring and Assessment. 2007. V. 132. N 1–3. P. 93–110. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9505-1>
34. Yang X., Wu X., Hao H., He Z. Mechanisms and assessment of water eutrophication // Journal of Zhejiang University Science B. 2008. P. 197–209. <https://doi.org/10.1631/jzus.B0710626>
35. Addy K., Green L. Dissolved Oxygen and Temperature // Natural Resources Facts. Fact Sheet. 1997. N 96–3.
36. Mackey K.R.M., Chien Ch., Post A.F., Saito M.A. Paytan A. Rapid and gradual modes of aerosol trace metal dissolution in seawater // Frontiers in Microbiology. 2015. V. 5. Article number: 794. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00794>
37. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. Москва: Наука. 2006. 360 с.
38. Чудаев О.В., Челноков Г.А., Брагин И.В., Харитонов Н.А., Рычагов С.Н., Нуждаев А.А., Нуждаев И.А. Геохимические особенности распределения основных и редкоземельных элементов в Паратунской и Большебанной гидротермальных системах Камчатки // Тихоокеанская геология. 2016. Т. 35. N 6. С. 102–119.
39. Харитонов Н.А., Филимонова Е.А., Кортюнов Е.А., Самарцев В.Н., Дробязко Е.В., Сорокоумова Я.В., Гречушников М.Г., Прошкина А.Л., Поздняков С.П. Изотопно-геохимические характеристики природных вод юго-западной части Крымского полуострова // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. N 4. С. 474–491. <https://doi.org/10.31857/S0321059622040095>
40. Петренко Д.Б., Ерофеева К.Г., Окина О.И. Редкоземельные элементы в окружающей среде: концентрации, особенности геохимической миграции и методы определения (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2022. N 1. С. 6–16. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-006-016>
41. Ветошкина А.В., Чекрыжов И.Ю., Паничев А.М., Вах Е.А., Барановская Н.В., Луценко Т.Н. Радиоактивные (Th, U) и редкоземельные элементы в природных водах центрального Сихотэ-Алиня (Приморский край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. N 1. С. 45–56. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/1/3408>
42. Романова Т.И., Коротков М.Г., Коржов Ю.В. Распространенность редкоземельных элементов в природных водах г. Ханты-Мансийска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. N 7. С. 20–32. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/7/4546>
43. Lafrenière M., Lapierre J., Ponton D.E., Guillemette F., Amyot M. Rare earth elements (REEs) behavior in a large river across a geological and anthropogenic gradient // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2023. V. 353. P. 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2023.05.019>
44. Kim T., Kim H., Kim G. Tracing river water versus wastewater sources of trace elements using rare earth elements in the Nakdong River estuarine waters // Marine Pollution Bulletin. 2020. V. 160. Article number: 111589. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111589>
45. Song W., Wu Z., Yi W., Wang S., Zhang H., Liu J. Rare earth elements in the Yellow River estuary, China: Composition, distribution, and pollution insights, Marine Pollution Bulletin. 2025. V. 212. Article number: 117599. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117599>

REFERENCES

- Kostyleva A.V. Distribution of dissolved organic carbon in river mouth areas of the greater Sochi region (North-Eastern part of the Black Sea). *Oceanology*, 2015, vol. 55, no. 2, pp. 224–230. (In Russian) <https://doi.org/10.7868/S0030157415020082>
- Litvinenko Yu.S., Zakharikhina L.V. Geochemistry and radioecology of waters and bottom sediments of the Mzymta River, the Black Sea coast. *Geochemistry international*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 376–393. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0016752522030049>
- Makkaveev P.N., Zavyalov P.O. *Geokhimiya rechnogo stoka v Chernoe more. Glava 3.2 Stok malykh i srednikh rek rossiiskogo poberezhya Chernogo morya i ego vliyaniye na kharakteristiki vod* [Geochemistry of river runoff into the Black Sea. Chapter 3.2 Runoff of small and medium-sized rivers of the Russian Black Sea coast and its influence on water characteristics]. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2018, pp. 287–321. (In Russian)
- Savenko A.V., Pokrovskii O.S. Transformation of Major and Trace Element Composition of the Dissolved Matter Runoff in the Mouths of Medium and Small Rivers of the Black Sea Coast of Russia. *Oceanology*, 2022, vol. 62, no. 3, pp. 380–402. <https://doi.org/10.31857/S003015742203011X> (In Russian)
- Makkaveev P.N., Polukhin A.A., Stepanova S.V. Studies of the estuaries of small and medium-sized rivers in the coastal zone of the Russian sector of the Black Sea. In: *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoi i shelfovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shelfa* [Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated utilisation of shelf resources]. 2013, pp. 412–417. (In Russian)
- Savenko A.V., Savenko V.S. Trace Element Composition of the Dissolved Matter Runoff of the Russian Arctic Rivers. *Water*, 2024, vol. 16, no. 4 (565). <https://doi.org/10.3390/w16040565>
- Savenko A.V., Savenko V.S., Efimov V.A., Pokrovskii O.S. Trace element composition of the waters of the Kolyma River mouth section. *Doklady Earth Sciences*. 2023, vol. 509, no. 2, pp. 272–275. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S2686739722602800>
- Komarov R.S., Reshetnyak O.S. Spatiotemporal variability of ion flux in the Kuban River basin. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2024, vol. 14, no. 3, pp. 191–203. (In Russian) <https://doi.org/10.46698/q44917472-5566-w>
- Shesterkina N.M., Shesterkin V.P. Trace elements in the river waters of the coast of the Tatar Strait (eastern macroslope of the northern Sikhote-Alin). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2024, vol. 69, no. 3, pp. 509–527. (In Russian) <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.307>
- Sharma M.K., Kumar P., Prajapati P., Bhanot K., Wadhwa U., Tomar G., Goyal R.K., Prasad B., Sharma B. Study of hydrochemical and geochemical characteristics and solute fluxes in Upper Ganga Basin, India. *Journal of Asian Earth Sciences*: X. 2022, vol. 8, article number: 100108. <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2022.100108>
- Lesnikova P. S. Changes in the Macroelemental Composition of River Waters in Contrast Geological Conditions, Sochi River of the Black Sea Coast of Russia. *Proceedings of VSU, Series: Geography. Geoecology*, 2023, no. 3, pp. 47–56. (In Russian) <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/3/47-56>
- Durán A.V., Velasquez J.L., Neculqueo G., Deckart K., Lillo D.D., Frez L.N., Trogger D., Quezada A.C., Solé M.B., Escobar M.E. Extreme climatic events in northern Chile and their impact on the geochemical composition of the Huasco River. *Journal of South American Earth Sciences*, 2022, vol. 118, article number: 103927. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103927>
- Huang L., Luo Q., Wei G., Jia Z., Sun K., Zhao C., Yang M., Fang H., Fan Z., Zeng F. Different impacts of natural and anthropogenic factors on dissolved organic matter chemistry in coastal rivers: Implications for water management. *Journal of Environmental Management*, 2024, vol. 368, article number: 122236. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122236>
- Ansari A.J., Sen I.S., Sinha R. Trends of water composition and discharge in the Ramganga River, Ganga Basin over the last 40 years signal enhanced nitrate flux. *Journal of Hydrology*, 2024, vol. 641, article number: 131822. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131822>
- Liu Y., Su B., Mu H., Zhang Y., Chen L., Wu B. Effects of point and nonpoint source pollution on urban rivers: From the perspective of pollutant

- composition and toxicity. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, vol. 460, article number: 132441. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132441>
16. Basnet N., Sitaula S., Bohara R., Bhattarai S., Rawal S., Uprety M.P., Awasthi M.P., Varol M., Kayastha S.P., Pant R.R. Hydro-chemical characteristics of Biring and Tangting Rivers (Nepal) and evaluation of water quality for drinking and irrigation purposes. *Environmental Research*, 2024, vol. 261, article number: 119697. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119697>
 17. Dippong T., Török I., Tánáselia C., Resz M-A. Impact of water and sediment pollution in Valea Viseu river, Romania. *Process Safety and Environmental Protection*, 2025, vol. 195, article number: 106796. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.106796>
 18. Ali G., Chaudhari M.P., Syed S., Rajpurohit D., Sanyal M., Shrivastav P.S., Hydrogeochemical investigation and water quality assessment of the Indus River in the semiarid region of Ladakh, India. *Marine Pollution Bulletin*, 2025, vol. 211, article number: 117413. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117413>
 19. Trinh D.A., Do N.T., Panizzo V.N., McGowan S., Salgado J., Large A.R., Henderson A.C., Vu T.T. Anthropogenic impacts on the water chemistry of a transboundary river system in Southeast Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*: X, 2024, vol. 12, article number: 100183. <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2024.100183>
 20. Zavyalov P.O., Makkaveev P.N., Konovalov B.V., Osadchiv A.A., Khlebopashev P.V., Pelevin V.V., Grabovskii A.B., Izhitskii A.S., Goncharenko I.V., Solov'ev D.M., Polukhin A.A. Hydrophysical and hydrochemical characteristics of the sea areas adjacent to the estuaries of small rivers of the Russian coast of the Black Sea. *Oceanology*, 2014, vol. 54, no. 3, pp. 293–308. (In Russian) <https://doi.org/10.7868/S0030157414030150>
 21. Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Kondrashov I.A. Paleogenic basalt-trachytic formation of west caucasus: geochemical specialization, question of petrogenesis, geodynamic typisation, metallogeny. *Geology and Geophysics of the South of Russia*, 2018, no. 4, pp. 18–32. (In Russian) <https://doi.org/10.23671/VNC.2018.4.20131>
 22. Prutskii N.I. *Karta poleznykh iskopayemykh: K-37-V. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Novaya seriya. Karta poleznykh iskopayemykh. Kavkazskaya seriya, mashtab: 1:200000*. [Mineral map: K-37-V. State Geological Map of the Russian Federation. New series. Map of Mineral Resources. Caucasian series, scale: 1:200000]. FGUGP Kavkazgeolsemka, 2001. Available at: <https://www.geokniga.org/maps/32454> (accessed 08.07.2024)
 23. Borevskii B.V., Ershov G.E., Kuvykina Yu.Yu. Conditions of formation of operational reserves of Nizhnemymtinskoye fresh groundwater deposit on the Black Sea coast of the Caucasus and their spatial and temporal changes under the influence of intensive anthropogenic load. *Geoecology. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya [Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology]*. 2012, no. 6, pp. 507–519. (In Russian)
 24. Lesnikova P.S., Zakharikhina L.V., Litvinenko Yu.S., Shevelev S.G., Varel'dzhyan G.V. Geochemistry of Spring Water of Mzymta and Sochi River Basins, Southern Slope of the Caucasus Ridge. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2023, vol. 87, no. 8, pp. 1258–1274. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S258755662308010>
 25. Karelina E.V., Markov V.E., Blokov V.I. Prospectivity of Krasnopol'yansky district in Sochi (Russia) for precious metal mineralization. *RUDN Journal of Engineering Research*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 497–504. (In Russian) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2017-18-4-497-504>
 26. Dzhaozhvili S. *Reki Chernogo morya [Rivers of the Black Sea]*. Technical Report No. 71. European Environment Agency, 2002, 58 p. (In Russian)
 27. Tsomaya V.Sh. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Tom 9. Zakavkazie i Dagestan. Vypusk 1. Zapadnoye Zakavkaz'e. Gidrograficheskoe opisaniye rek i ozer [Surface water resources of the USSR. Volume 9. Transcaucasia and Dagestan. Issue 1. Western Transcaucasia. Hydrographic description of rivers and lakes]*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974, 578 p. (In Russian)
 28. Sapozhnikov V.V. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskoy monitoringe rybnokhozyaystvennykh vodoemov i perspektivnykh dlya promysla raionov Mirovogo okeana [Guidelines for chemical analysis of marine and fresh waters in environmental monitoring of fishery reservoirs and prospective areas of the World Ocean]*. Moscow, VNIRO Publ., 2003, 202 p. (In Russian)
 29. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu poverkhnostnykh vod sushi [Manual on chemical analysis of surface waters of land]*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1977, 541 p. (In Russian)
 30. Dickson A.G., Sabine C.L., Christian J.R. Guide to best practices for ocean CO₂ measurements. *PICES Special Publication 3*. IOCCP Report, 2007, no. 8, 196 p.
 31. RD 52.24. 405–2018. Mass concentration of sulphates in waters. Methodology of measurements by turbidimetric method. Rostov-on-Don: Roshdyromet, FGBU «GCI», 2018, 30 p. (In Russian)
 32. Nguyen D.V., Nguyen A.B., Hoang T. H. Dissolved Oxygen as an Indicator for Eutrophication in Freshwater Lakes. *Environmental Engineering and Management for Sustainable Development, International Conference, Proceedings*, 2016, no. 47.
 33. Kannel P.R., Lee S., Khan S.P. Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, vol. 132, no. 1–3, pp. 93–110. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9505-1>
 34. Yang X., Wu X., Hao H., He Z. Mechanisms and assessment of water eutrophication. *Journal of Zhejiang University Science B*, 2008, pp. 197–209. <https://doi.org/10.1631/jzus.B0710626>
 35. Addy K., Green L. Dissolved Oxygen and Temperature. *Natural Resources Facts. Fact Sheet*, 1997, no. 96–3.
 36. Mackey K.R.M., Chien Ch., Post A.F., Saito M.A. Paytan A. Rapid and gradual modes of aerosol trace metal dissolution in seawater. *Frontiers in Microbiology*, 2015, vol. 5, article number: 794. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00794>
 37. Dubinin A.V. *Geokhimiya redkozemelnykh elementov v okeane [Geochemistry of rare earth elements in the ocean]*. Moscow, Nauka Publ., 2006, 360 p. (In Russian)
 38. Chudaev O.V., Chelnokov G.A., Bragin I.V., Kharitonova N.A., Rychagov S.N., Nuzhdaev A.A., Nuzhdaev I.A. Geochemical peculiarities of distribution of major and rare earth elements in the Paratun and Bolshebanna hydrothermal systems of Kamchatka. *Tikhookeanskaya geologiya [Pacific Geology]*. 2016, vol. 35, no. 6, pp. 102–119. (In Russian)
 39. Kharitonova N.A., Filimonova E.A., Kortunov E.A., Samartsev V.N., Drobyazko E.V., Sorokoumova Ya.V., Grechushnikova M.G., Proshkina A.L., Pozdnyakov S.P. Isotope-geochemical characteristics of natural waters in the southwestern part of the Crimean Peninsula. *Water resources*, 2022, vol. 49, no. 4, pp. 474–491. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0321059622040095>
 40. Petrenko D.B., Erofeeva K.G., Okina O.I. Rare earth elements in the environment: concentrations, migration characteristics and methods of determination (review). *Theoretical and applied ecology*, 2022, no. 1, pp. 6–16. (In Russian) <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-006-016>
 41. Vetoshkina A.V., Chekryzhov I.Yu., Panichev A.M. Vakh E.A., Baranovskaya N.V., Lutsenko T.N. Radioactive (Th, U) and rare earth elements in natural waters of central Sikhote-Alin (Primorsky Krai). *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo assets engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 45–56. (In Russian) <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/1/3408>
 42. Romanova T.I., Korotkov M.G., Korzhov Yu.V. Prevalence of rare earth elements in natural waters of Khanty-Mansiysk. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo assets engineering*, 2024, vol. 335, no. 7, pp. 20–32. (In Russian) <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/7/4546>
 43. Laffrenière M., Lapierre, J., Ponton D.E., Guillemette F., Amyot M. Rare earth elements (REEs) behavior in a large river across a geological and anthropogenic gradient. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2023, vol. 353, pp. 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2023.05.019>
 44. Kim T., Kim H., Kim G. Tracing river water versus wastewater sources of trace elements using rare earth elements in the Nakdong River estuarine waters. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, vol. 160, article number: 111589. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111589>
 45. Song, W., Wu, Z., Yi, W., Wang, S., Zhang, H., Liu, J. Rare earth elements in the Yellow River estuary, China: Composition, distribution, and pollution insights. *Marine Pollution Bulletin*, 2025, vol. 212, article number: 117599. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117599>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Юлия А. Моисеева, Дарья В. Пургина предложили концепцию и дизайн исследования. Юлия А. Моисеева, Дарья В. Пургина, Андрей С. Торопов, Ульяна В. Главная, Пётр Т. Ситников, Айгуль Ф. Шигапова, Вероника В. Бояркина и Андрей А. Гринько принимали участие в отборе проб, анализе и интерпретации данных. Юлия А.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Yulia A. Moiseeva, Daria V. Purgina proposed the concept and design of the study. Yulia A. Moiseeva, Daria V. Purgina, Andrey S. Toropov, Ulyana V. Glavnaya, Peter T. Sitnikov, Aigul F. Shigapova, Veronika V. Boyarkina and Andrey A. Grinko participated in sampling, data analysis and interpretation. Yulia A. Moiseeva and Andrey S. Toropov

Моисеева и Андрей С. Торопов участвовали в написании и редактировании рукописи до подачи в редакцию. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

participated in writing and editing the manuscript before submission to the Editor. All authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Юлия А. Моисеева / Yulia A. Moiseeva <https://orcid.org/0000-0002-8166-1040>

Дарья В. Пургина / Daria V. Purgina <https://orcid.org/0000-0001-7169-8264>

Андрей С. Торопов / Andrey S. Toropov <https://orcid.org/0000-0001-7759-2831>

Ульяна В. Главная / Ulyana V. Glavnaya <https://orcid.org/0009-0003-4837-6963>

Пётр Т. Ситников / Peter T. Sitnikov <https://orcid.org/0009-0002-5979-3052>

Айгуль Ф. Шигапова / Aigul F. Shigapova <https://orcid.org/0009-0003-6826-0482>

Вероника В. Бояркина / Veronika V. Boyarkina <https://orcid.org/0009-0003-7815-8094>

Андрей А. Гринько / Andrey A. Grinko <https://orcid.org/0000-0002-8597-8475>

Сопоставление качества речной и питьевой воды инфильтрационных водозаборов по статистическим данным перманганатной окисляемости

Алина В. Ялалетдинова¹, Мария А. Малкова¹, Маргарита Ю. Вожаева^{1,2}, Ольга Г. Кантор¹, Игорь А. Мельницкий², Павел В. Серебряков², Евгений А. Кантор¹

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

²ГУП РБ «Уфаводоканал», Уфа, Россия

Контактное лицо

Алина В. Ялалетдинова, кандидат технических наук, доцент кафедры Водоснабжение и водоотведение, Уфимский государственный нефтяной технический университет; 450062 Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов 1.

Тел. +73472420718

Email hawk22.89@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0883-1856>

Формат цитирования

Ялалетдинова А.В., Малкова М.А., Вожаева М.Ю., Кантор О.Г., Мельницкий И.А., Серебряков П.В., Кантор Е.А. Сопоставление качества речной и питьевой воды инфильтрационных водозаборов по статистическим данным перманганатной окисляемости // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 231-239. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-21

Получена 29 октября 2024 г.

Прошла рецензирование 14 января 2025 г.

Принята 25 июня 2025 г.

Резюме

Цель: сопоставление качества речной и питьевой воды по перманганатной окисляемости на инфильтрационных водозаборах. В качестве исходных использованы среднемесячные значения перманганатной окисляемости за весь период наблюдений и за модельный год, отражающий изменения показателя в годовом цикле. Применены анализ временных рядов, корреляционный анализ и кросс-корреляционная функция.

Выявлены сезонные изменения показателя: вклад сезонной компоненты составил 55–59 % для речной воды и 10–30 % для питьевой. Окисляемость в реке на 84–87 % выше. Обнаружен временной сдвиг между максимальными значениями окисляемости: в реке – май, в питьевой воде – июнь и июль. Кросс-корреляционный анализ показал, что сдвиг составляет один месяц. Учет смещения максимальных значений перманганатной окисляемости усилил корреляцию с «заметной» до «высокой» и «очень высокой».

Установлено, что на инфильтрационных водозаборах увеличение перманганатной окисляемости до максимальных значений в питьевой воде запаздывает на 1 месяц по сравнению с речной, что соответствует времени добегания легко окисляющихся органических и неорганических соединений, формирующих перманганатную окисляемость речной воды.

Ключевые слова

Перманганатная окисляемость воды, инфильтрационный водозабор, анализ временных рядов, кросс-корреляционная функция, коэффициент корреляции, качество питьевой воды.

Comparison of river and drinking water quality of infiltration intakes based on statistical data of permanganate oxidisability

Alina V. Yalaletdinova¹, Maria A. Malkova¹, Margarita Yu. Vozhdaeva^{1,2}, Olga G. Kantor¹, Igor A. Melnitsky², Pavel V. Serebryakov² and Evgeny A. Kantor¹

¹Ufa State Petroleum Technological University Ufa, Russia

²Ufavodokanal, Ufa, Russia

Principal contact

Alina V. Yalaletdinova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Water Supply and Drainage Department, Ufa State Petroleum Technological University; 1 Kosmonavtov St, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia 450062. Tel. +73472420718

Email hawk22.89@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0883-1856>

How to cite this article

Yalaletdinova A.V., Malkova M.A., Vozhdaeva M.Yu., Kantor O.G., Melnitsky I.A., Serebryakov P.V., Kantor E.A. Comparison of river and drinking water quality of infiltration intakes based on statistical data of permanganate oxidisability. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):231-239. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-21

Received 29 October 2024

Revised 14 January 2025

Accepted 25 June 2025

Abstract

Comparison of river water and drinking water quality by assessment of permanganate oxidisability at infiltration water intakes.

The initial data used were the average monthly values of permanganate oxidisability for the entire observation period and for a model year, reflecting the changes in the indicator in the annual cycle. Time series analysis, correlation analysis and cross-correlation function were applied.

Seasonal changes in the indicator were revealed: the contribution of the seasonal component being 55–59 % for river water and 10–30 % for drinking water. The permanganate oxidisability in the river was 84–87 % higher. A time lag between the maximum oxidisability values was detected: in the river – in May, in drinking water – in June and July. Cross-correlation analysis showed that the lag was one month. Accounting for the shift in the maximum permanganate oxidisability values strengthened the correlation from "noticeable" to "high" and "very high".

It was established that at infiltration water intakes, the increase in permanganate oxidisability to its maximum values in drinking water lags by 1 month compared to river water. This corresponds to the travel time of easily oxidised organic and inorganic compounds that are revealed in permanganate oxidisability of river water.

Key Words

Permanganate oxidisability of water, infiltration abstraction, time series analysis, cross-correlation function, correlation coefficient, drinking water quality.

ВВЕДЕНИЕ

Экологический мониторинг качества воды водоисточника, который используется при организации водоснабжения, подразумевает количественную оценку показателей, особенно когда некоторые из них не соответствуют нормативным значениям [1; 2]. Это определяется тем обстоятельством, что технология водоподготовки строится на принципах обеспечения нормативов за счет обработки воды водоисточника реагентами, отстаивания, фильтрования и др. технических приемов [3; 4]. Таким образом, обеспечивается требуемое качество воды, предназначенной для питьевых и хозяйственно-бытовых нужд населения [5; 6].

Во многих случаях, климатические условия оказывают существенное влияние на значения анализируемых показателей, таких как мутность, окисляемость, щелочность и т.д. [7; 8]. С другой стороны, значительно на водные объекты действие антропогенных факторов, в частности в условиях обеспечения водоснабжением городских агломераций, в состав которых входят территории, насыщенные объектами производства, транспортными узлами, развитыми селитебными зонами и пр. [8–11].

Как правило, важнейшим для организации технологии водоочистки служит такой показатель, как мутность [12; 13]. Однако, на водозаборах инфильтрационного типа практически достигается снижение значений этого показателя до уровня, ниже пределов определения [14], в то время как по другим обобщенным показателям, например, по перманганатной окисляемости, отмечаются случаи, когда значения показателя приближаются к нормативным [15]. Поэтому на инфильтрационных водозаборах окисляемость является одним из наиболее информативных показателей, характеризующих качество воды, поступающей из скважин в резервуары чистой воды [5].

Перманганатная окисляемость (ПО) является результатом сочетания многочисленных факторов, ее определяющих. Так, например, поверхностные водоисточники характеризуются наличием природного органического вещества, в воде фиксируется и органические вещества техногенного происхождения, а также неорганические компоненты [11; 16; 17], которые окисляются под действием перманганата калия. Результатом окисления при аналитическом контроле является обобщенный показатель – перманганатная окисляемость [18]. Подземные воды значительно отличаются от поверхностных по качественному и количественному составу присутствующих компонентов и меньше подвержены сезонным колебаниям [19]. В скважины инфильтрационных водозаборов поступают речная вода, прошедшая через фильтрующие слои, и грунтовые (подземные) воды. Соотношение этих потоков различно в зависимости от климатических условий, расположения скважин функционирующего водозабора и других причин [20; 21].

Основным водоисточником, снабжающим питьевой водой население г. Уфы, является р. Уфа. Аллювиальный горизонт, которым сложен коренной борт речной долины, обладает хорошими фильтрационными свойствами [22] и имеет тесную гидравлическую связь с рекой, в скважинах инфильтрационных водозаборов поступающая речная вода составляет около 80 % общей производительности водозабора [23].

Представляется значимым исследовать сезонные изменения ПО в речной и в подземной воде, провести сравнение полученных результатов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования служили данные ПО воды в расположенных на расстоянии около 64 км створах (СТ1, СТ2) р. Уфа, и резервуарах чистой воды (РЧВ1, РЧВ2.1, РЧВ2.2, РЧВ2.3) инфильтрационных водозаборов (ИБ1, ИБ2). На ИБ забор воды осуществляется из водозаборных скважин, расположенных вдоль реки на расстоянии от 50 до 200 м от берега. На ИБ2 поступление подземной воды в РЧВ2.1, РЧВ2.2, РЧВ2.3 осуществляется отдельными кустами скважин, находящимися на различных расстояниях от реки.

Следует отметить, что аналитический контроль качества воды не предусматривает ежедневного определения величины ПО. Более того, измерения показателя производятся не в строго зафиксированные даты, определяемые точно установленными временными промежутками между ними. В этой связи для расчета используются значения ПО, получаемые путем вычисления среднего арифметического по значениям показателя каждого месяца (среднемесечные), и значения ПО, получаемые в результате усреднения значений при формировании модельного года, как результат деления суммы среднемесечных значений ПО каждого месяца на количество исследуемых лет (среднемесечные в модельном году):

$$C_{ir} = \sum C_{ir} / n_{ir} \quad C_{ic} = \sum C_{ic} / n_{ic} \quad C'_{ir} = \sum C_{ir} / m \quad C'_{ic} = \sum C_{ic} / m \quad (1)$$

где C_{ir} , C_{ic} – результаты аналитического контроля ПО речной и питьевой воды соответственно; n_{ir} , n_{ic} – число выполненных определений ПО в каждом месяце всего временного ряда наблюдений; C_{ir} , C_{ic} – среднемесечные значения ПО речной и питьевой воды в каждом месяце всего временного ряда наблюдений; C'_{ir} , C'_{ic} – среднемесечные значения ПО в модельном годовом цикле; m – число лет наблюдений; i – порядковый номер месяца.

Для оценки динамики показателей качества воды удобным математическим инструментом является метод анализа временных рядов [24]. Этот метод (аддитивная модель со среднегодовым методом сглаживания) применен для выделения из элементов временного ряда закономерных (детерминированных) и случайных компонент, при этом детерминированная компонента представляет собой сумму тренд-циклической и сезонной компонент [24]:

$$x_i = d_i + e_i = trc_i + s_i + e_i \quad (2)$$

где x_i – истинные значения ПО; d_i – детерминированная компонента; e_i – случайная компонента; trc_i – тренд-циклическая компонента; s_i – сезонная компонента.

При сопоставлении качества речной и питьевой воды использован корреляционный анализ, определены коэффициенты корреляции Пирсона (K_k) и критерии t -Стюдента, для определения достоверности при уровне значимости $\alpha = 0,05$ [27].

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменения перманганатной окисляемости (ПО) в створах водозаборов характеризуются аналогичными закономерностями: в зимний период ПО воды минимальна, в апреле – мае, происходит резкий рост значений ПО, вызванный в основном смывом гумусовых веществ с

ландшафта [16], в летне-осенний период значения показателя начинают снижаться (рис. 1).

Динамика изменения ПО в створах СТ1 и СТ2 практически совпадает, коэффициент корреляции между временными рядами ПО (рис. 1) составляет 0,73.

Речная вода, поступающая в скважины ИВ, составляет основную часть [23], и имеет ПО от 0,5 до

13,3 мгО/дм³ в СТ1, и от 0,9 до 8,6 мгО/дм³ в СТ2 (рис. 1). В питьевой воде ПО снижается в 6 – 7 раз по сравнению со значениями показателя в реке. Так, ПО питьевой воды изменяется от 0,2 до 1,3 мгО/дм³ в РЧВ1, и от 0,3 до 1,9 мгО/дм³ в РЧВ2 (рис. 2).

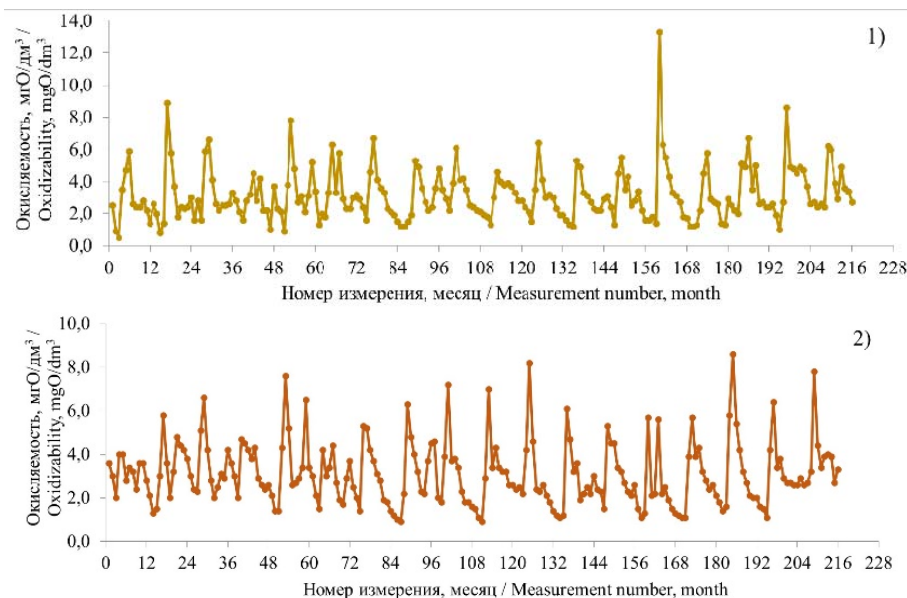
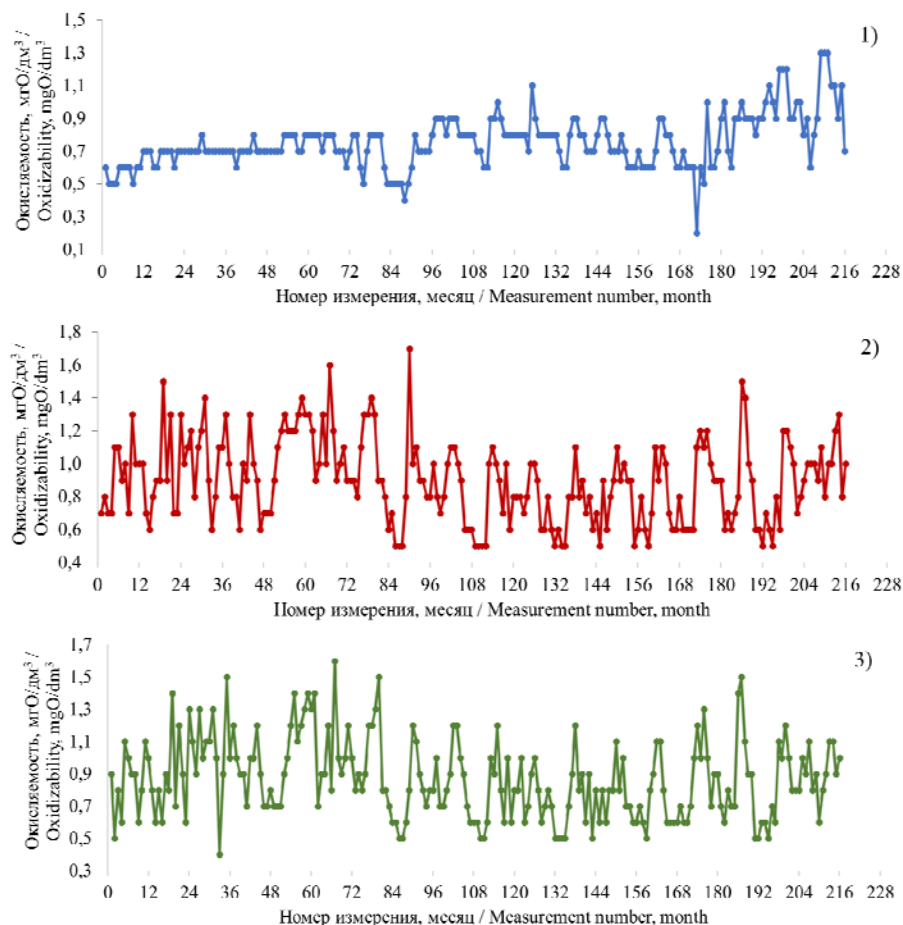


Рисунок 1. Временные ряды среднеемесячных значений перманганатной окисляемости речной воды за весь период наблюдений: 1) СТ1, 2) СТ2

Figure 1. Time series of monthly mean values of permanganate oxidisability of river water for the whole observation period: 1) ST1, 2) ST2



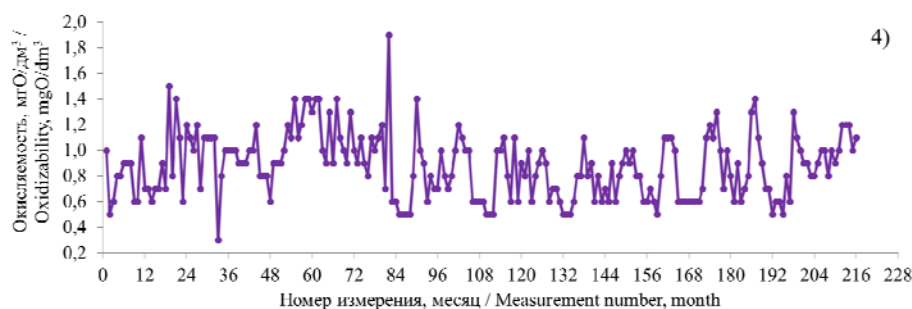


Рисунок 2. Временные ряды среднемесячных значений перманганатной окисляемости питьевой воды за весь период наблюдений: 1) РЧВ1, 2) РЧВ2.1, 3) РЧВ2.2, 4) РЧВ2.3

Figure 2. Time series of monthly mean values of permanganate oxidizability of drinking water for the whole observation period: 1) CWT1, 2) CWT 2.1, 3) CWT 2.2, 4) CWT 2.3

В целом значения ПО питьевой воде достаточно стохастичны, весной отмечается значительный рост показателя (рис. 2, 1–4).

Анализ временных рядов выявил, что изменениям ПО в речной и питьевой воде свойственна сезонность, однако вклады сезонной компоненты при переходе от речной к питьевой воде снижаются (рис. 3). В модельном годовом периоде (рис. 4, 1) динамика изменения ПО речной воды в створах СТ1 и СТ2 практически совпадает, коэффициент корреляции между временными рядами ПО составляет 0,98. Сопоставление временных изменений ПО в питьевой и речной воде показывает некоторое смещение

максимума изменения ПО во времени (рис. 4). Например, месяцем, характеризующимся максимальными значениями показателя для створов, является май, тогда как в РЧВ окисляемость максимальна в июне (РЧВ1 и РЧВ2.1) и июле (РЧВ2.2 и РЧВ2.3). С помощью кросс-корреляционной функции (ККФ) [28] по среднемесячным значениям ПО модельного годового цикла и за весь период наблюдений показано, что наилучшее совпадение между исследуемыми рядами ПО в речной и питьевой воде происходит при их сдвиге относительно друг друга на один месяц (рис. 5, 6).

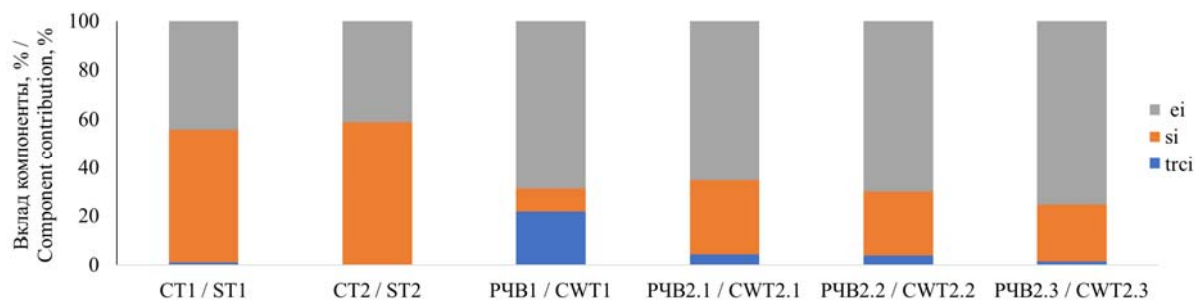
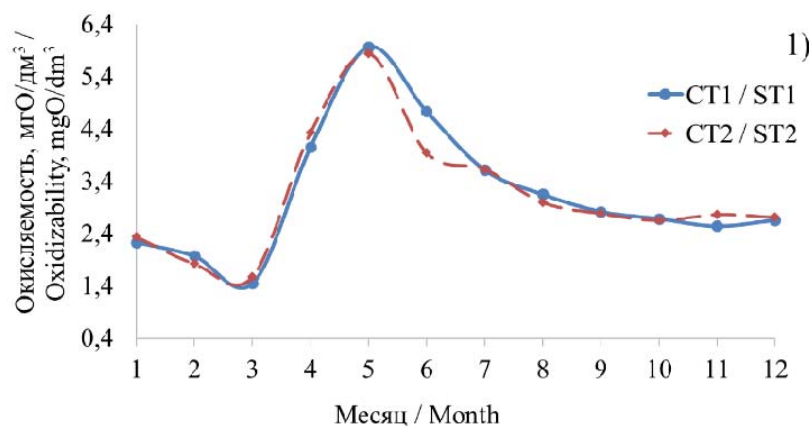


Рисунок 3. Вклады компонент (аддитивная модель, среднегодовой метод сглаживания) в изменения перманганатной окисляемости на ИВ1 (СТ1, РЧВ1) и ИВ2 (СТ2, РЧВ2.1, РЧВ2.2, РЧВ2.3); $trci$ – тренд-циклическая компонента, s_i – сезонная компонента, e_i – случайная компонента

Figure 3. Component contributions (additive model, mean annual smooth method) to changes of permanganate oxidizability at IWI1 (ST1, CWT1) and IWI2 (ST2, CWT2.1, CWT2.2, CWT2.3); $trci$ – trend-cyclic component, s_i – seasonal component, e_i – random component



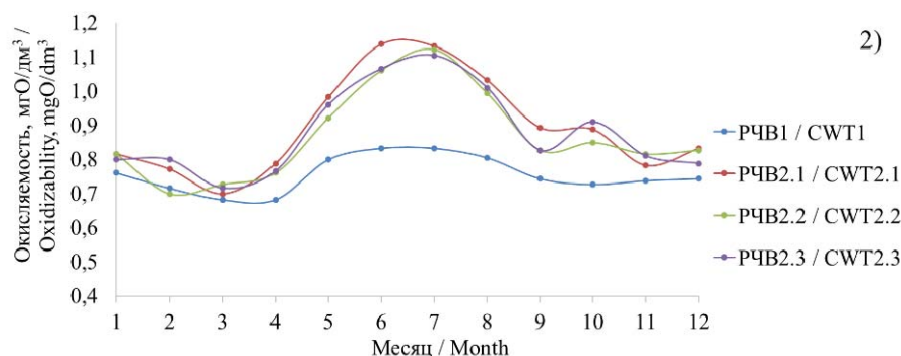


Рисунок 4. Среднемесячные в модельном году значения перманганатной окисляемости:

1) речная вода (СТ1, СТ2); 2) питьевая вода (РЧВ)

Figure 4. Monthly averages of permanganate oxidisability values in the model year:

1) river water (ST1, ST2); 2) drinking water (CWT)

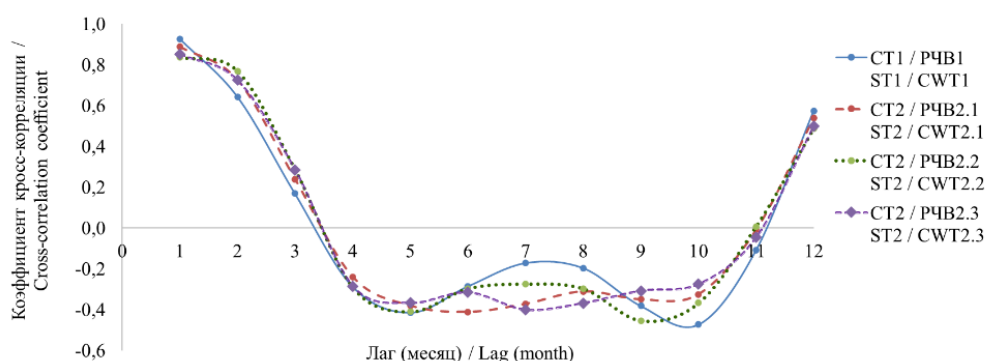


Рисунок 5. Кросс-корреляционная функция между временными рядами перманганатной окисляемости речной и питьевой воды инфильтрационных водозаборов (модельный год)

Figure 5. Cross-correlation function between time series of permanganate oxidisability of river and drinking water of infiltration intakes (model year)

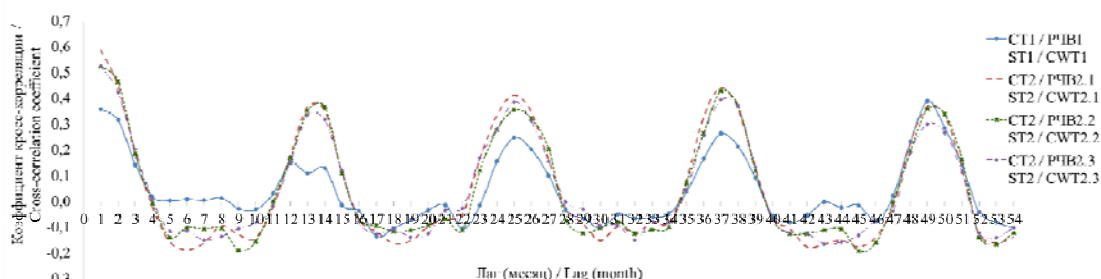


Рисунок 6. Кросс-корреляционная функция между временными рядами перманганатной окисляемости речной и питьевой воды инфильтрационных водозаборов (весь период наблюдений)

Figure 6. Cross-correlation function between time series of permanganate oxidisability of river and drinking water of infiltration intakes (whole observation period)

Таким образом, характер изменения ПО питьевой воды ИВ находится во взаимосвязи с характером изменения этого показателя в речной воде. Максимум значений ПО питьевой воды запаздывает по сравнению с максимумами показателя речной воды. Обнаруженное запаздывание в динамике изменения ПО речной и питьевой воды определяется тем обстоятельством, что в процессе миграции речной воды через фильтрующие слои водоносного горизонта многократно происходит сорбция – десорбция значительной части компонентов – примесей, присутствие которых предопределяет значение ПО.

Коэффициенты корреляции Пирсона, характеризующие связь между ПО речной и питьевой воды, вычисленные по исходным данным (за весь период наблюдений), указывают на то, что между

показателем в створах и в РЧВ существует заметная связь (по шкале Чеддока) (табл. 1).

Смещение временного ряда ПО питьевой воды по отношению к временному ряду ПО речной воды на один месяц существенно повышает силу связи между этими параметрами. Коэффициенты корреляции Пирсона, полученные с учетом смещения окисляемости в РЧВ, показывают, что по шкале Чеддока между значениями показателя в створе и РЧВ на ИВ2 связь стала высокой, а на ИВ1 – очень высокой (табл. 1).

Таким образом, характер ПО питьевой воды инфильтрационных водозаборов по величине значительно отличается от показателя в реке, однако динамика изменения ПО речной и питьевой воды подобна, и практически совпадает при учете смещения динамики изменения ПО питьевой и речной воды.

Можно считать, что в исследованных случаях время обесщечивающих перманганатную окисляемость добегаания компонентов – загрязнителей воды, составляет около одного месяца.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции Пирсона между значениями перманганатной окисляемости речной и питьевой воды

Table 1. Pearson correlation coefficients between permanganate oxidisability values of river and drinking water

Объект Object	РЧВ1 CWT1	РЧВ2.1 CWT2.1	РЧВ2.2 CWT2.2	РЧВ2.3 CWT2.3
Исходные ряды данных / Source data series				
СТ1 / ST1	0,57	-	-	-
СТ2 / ST2	-	0,54	0,49	0,50
Ряды данных, полученные в результате смещения временных рядов ПО питьевой воды относительно ПО речной воды Data series obtained by shifting the time series of permanganate oxidisability of drinking water relative to permanganate oxidisability of river water				
СТ1 / ST1	0,93	-	-	-
СТ2 / ST2	-	0,89	0,84	0,85

Полученные данные свидетельствуют о том, что по перманганатной окисляемости эффективность очистки воды на ИВ1 несколько выше, чем на ИВ2 (рис. 4, 2). В этой связи следует отметить, что на ПО питьевой воды могут оказывать влияние не только загрязнители, которые содержатся в речной воде. Площадь водосбора воды инфильтруемой в скважины водозаборов в условиях городских агломераций может быть насыщена источниками техногенных диффузных загрязнений, – транспортными узлами, строительными и промышленными предприятиями, жилыми зонами и другими объектами городской инфраструктуры. Это приводит к накоплению органических загрязнений в водоносных пластах, их химической трансформации, в результате которой образуются новые органические вещества, вымываемые в скважинную воду при увеличении доли инфильтрованной воды, а также появлению загрязнителей с восходящей фильтрацией вод из нижележащих водоносных пластов, при снижении притока в скважины речной воды. Поскольку ИВ1 расположен по течению реки выше и промышленной и зоны компактного проживания населения, чем ИВ2, можно предположить, что указанные выше причины диффузного загрязнения воды скважин в более выраженной степени проявляются на ИВ2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осуществлено сравнение качества воды в створах и резервуарах чистой воды инфильтрационных водозаборов по перманганатной окисляемости.

Методом анализа временных рядов по среднемесячным значениям перманганатной окисляемости речной воды и питьевой воды инфильтрационных водозаборов за весь период наблюдений выявлено, что показатель подвержен сезонным изменениям.

В створах вклады сезонной компоненты составили 55 % и 59 % для ИВ1 и ИВ2 соответственно, в РЧВ1 вклад сезонной компоненты составляет 10 %, тогда как для РЧВ ИВ2 колеблется от 23 до 30 %. Выявлено, что значения ПО в питьевой воде в 6–7 раз ниже, чем в речной.

Анализ временных изменений среднемесячных значений перманганатной окисляемости в створах и РЧВ в модельном году выявил сдвиги между значениями перманганатной окисляемости в месяцы, характеризующиеся повышенным значением ПО. Так, в реке окисляемость максимальна в мае, а в РЧВ в июне или июле. Посторонние кросс-корреляционной функции по

среднемесячным значениям ПО в модельном году и за весь исследуемый период, позволило определить, что максимумы кросс-корреляционных функций приходятся на 1 лаг, что свидетельствует о том, что наилучшее совпадение между исследуемыми рядами ПО происходит при их сдвиге относительно друг друга на 1 месяц. Значения коэффициентов корреляции, полученные для исходных рядов показателя, свидетельствуют о наличии заметной связи (по шкале Чеддока) между перманганатной окисляемостью речной и питьевой воды. Коэффициенты корреляции Пирсона, полученные с учетом смещения значений перманганатной окисляемости в РЧВ относительно створов на один месяц, характеризуются более высокими значениями по сравнению с коэффициентами корреляции, полученными для исходных рядов.

Таким образом, изменения содержания окисляемых примесей в питьевой воде определяются их содержанием в речной воде. Однако, в связи с тем, что переносимые водой окисляемые примеси при перемещении сквозь фильтрующие слои участвуют в процессах сорбции-десорбции, появление их в питьевой воде связано с некоторым запаздыванием изменения концентраций по сравнению с тем, как эта концентрация изменяется в речной воде.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках выполнения Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, публикационный номер FEUR–2023–0006, проект «Разработка и создание малотоннажных продуктов и реагентов (ингибиторы коррозии и солеотложения, антиоксиданты, биоциды, присадки и др.) для процессов нефтегазохимии и очистки водных сред от загрязнений, замещающих импортные вещества и материалы. Теоретические и экспериментальные подходы».

ACKNOWLEDGMENT

The work was carried out as part of a Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation State Directive in the Field of Science, publication number FEUR–2023–0006, project "Development and Creation of Low-Tonnage Products and Reagents (Corrosion and Scale Inhibitors, Antioxidants, Biocides, Additives, etc.) for Petrochemical Processes and Water Purification from Pollution, Replacing Imported Substances and Materials. Theoretical and Experimental Approaches".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вождаева М.Ю., Цыпышева Л.Г., Кантор Л.И., Труханова Н.В., Мельницкий И.А., Кантор Е.А. Экологический мониторинг органических

- загрязнителей в системе аналитического контроля качества воды. Уфа: Гилем, Башкирская энциклопедия, 2016. 200 с.
2. Новикова Ю.А., Мясников И.О., Ковшов А.А., Тихонова Н.А., Башкетова Н.С. Методические подходы к организации программ мониторинга качества питьевой воды // Здоровье населения и среда обитания - ЗНиСО. 2020. N 10(331). С. 4–8. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2020-331-10-4-8>
 3. Naser M., Khalid A., Abdulrazzaq K. Design Engineering Conventional Water Treatment Plant. Principles and Important Factors Influence on The Efficiency // *Design Engineering (Toronto)*. 2021. V. 8. N 19. P. 16009–16027.
 4. Kudryavtsev P., Kudryavtsev N. Treatment of natural surface waters using new composite flocculants-coagulants // *International Journal of Hydrology*. 2020. V. 4. N 5. P. 211–227. <https://doi.org/10.15406/ijh.2020.04.00248>
 5. СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021, N 3.
 6. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021, N 2.
 7. Zhang J., Wei Z., Jia H., Huang X. Factors influencing water quality indices in a typical urban river originated with reclaimed water // *Frontiers of Environmental Science and Engineering*. 2017. V. 11. N 4. P. 8.
 8. Злобина В.Л., Медовар Ю.А., Юшманов И.О. Источники загрязнения подземных вод в зоне активного водообмена // Восточно-Европейский научный журнал. 2018. N 2-2(30). С. 4–16.
 9. Mezentzev S.D. Ecology of Moscow urban agglomeration: problems and the ways of solving // *E3S Web Conferences*. 2021. V. 263. Article id: 05045.
 10. Маркушина Л.А. Эффективность экологических инициатив при оценке состояния окружающей среды города // Экономический вестник РГУ «Terra economica». 2010. T. 3. N 2. С. 59–65.
 11. Meyer T., Lei Y.D., Wania F. Transport of polycyclic aromatic hydrocarbons and pesticides during snowmelt within an urban watershed // *Water Research*. 2011. V. 45. N 3. P. 1147–1156. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.11.004>
 12. Парреньо К., Саласар Флорес К., Слабоспицкая А.С., Адарченко И.А. Мутность как основной показатель качества воды из поверхностных источников // Международной научно-исследовательский журнал. 2024. N 3 (141). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.141.44>
 13. Allen M.J., Brecher R.W., Copes R., Hrudey S.E., Payment P. Turbidity and microbial risk in drinking water. The Minister of Health Province of British Columbia, 2008. 68 p.
 14. Кантор Е.А., Жигалова А.В., Малкова М.А. Мутность воды в реке и резервуарах чистой воды некоторых водозаборов г. Уфы // Свидетельство о государственной регистрации базы данных N 2017620028 от 10.01.2017.
 15. Ялалетдинова А.В., Малкова М.А., Самусь А.И., Кантор Е.А. Сопоставление заболеваемости населения по некоторым зонам водоснабжения крупной городской агломерации и перманганатной окисляемости питьевой воды // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. T. 6 (146). С. 174–186. <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2023-6-174-186>
 16. Долгоносков Б.М., Власов Д.Ю., Дятлов Д.В., Сурачева Н.О., Григорьева С.В., Корчагин К.А. Статистические характеристики изменчивости качества воды, поступающей на водопроводную станцию // Инженерная экология. 2004. N 3. С. 2–20.
 17. Янин Е.П. Органические вещества техногенного происхождения в водах городских рек // Экологическая экспертиза. 2004. N 4. С. 42–67.
 18. ГОСТ Р 55684-2013 (ИСО 8467:1993). Вода питьевая. Метод определения перманганатной окисляемости. М: Стандартинформ, 2019. 20 с.
 19. Li B., Song X., Yang L., Yao D., Xu Y. Insights onto Hydrologic and Hydro-Chemical Processes of Riparian Groundwater Using Environmental Tracers in the Highly Disturbed Shaying River Basin, China // *Water*. 2020. V. 12(7). Article id: 1939. <https://doi.org/10.3390/w12071939>
 20. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. Москва: Наука, 2004. 677 с.
 21. Лехов А.В., Шваров Ю.В. Рост минерализации эксплуатируемых подземных вод при наличии пирита в покровных отложениях // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2002. N 4. С. 316–325.
 22. Абдрахманов Р.Ф. Гидрогеохимия урбанизированных территорий Южного Предуралья // Геохимия. 2019. T. 64. N 7. С. 733–741.
 23. Романовская С.Л., Кантор Л.И., Кантор Е.А., Хабибуллин Р.Р. Анализ величины общей жесткости воды водоисточника и питьевой воды водозаборов города Уфы // Экологическая химия. 2005. T. 14. N 2. С. 126–134.
 24. Якушев А.А., Горбатков С.А., Габдрахманова Н.Т. Многомерные статистические методы и нейросетевые модели в экономическом анализе. Уфа: Издательский центр «Башкирский территориальный институт профессиональных бухгалтеров», 2001. 266 с.
 25. Харабрин С.В., Кантор О.Г., Кантор Л.И., Кантор Е.А. Оценка сезонных изменений качества воды в водоисточнике // Башкирский химический журнал. 2003. T. 10. N 1. С. 87–89.
 26. Романовская С.Л., Кантор Л.И., Кантор О.Г., Куликова Ю.С., Исхакова И.И. Выявление неблагоприятных временных периодов по содержанию некоторых неорганических соединений в водоисточнике // Башкирский химический журнал. 2005. T. 12. N 1. С. 92.
 27. Гайдышев И.А. Анализ и обработка данных: специальный справочник. Санкт-Петербург: Питер, 2001. 752 с.
 28. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере. Москва: Инфра-М, Финансы и статистика, 1995. 384 с.

REFERENCES

1. Vozhdaeva M.Yu., Tsypysheva L.G., Kantor L.I., Trukhanova N.V., Melnitsky I.A., Kantor E.A. *Ehkologicheskii monitoring organicheskikh zagryaznitelei v sisteme analiticheskogo kontrolya kachestva vody* [Ecological monitoring of organic pollutants in the system of analytical control of water quality]. Ufa, Gilem Publ., Bashkir Encyclopaedia Publ., 2016, 200 p. (In Russian)
2. Novikova Yu.A., Myasnikov I.O., Kovshov A.A., Tikhonova N.A., Bashketova N.S. Methodological approaches to organization of drinking water quality monitoring programs. *Public Health and Life Environment – PH&LE*, 2020, no. 10(331), pp. 4–8. (In Russian) <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2020-331-10-4-8>
3. Naser M., Khalid A., Abdulrazzaq K. Design Engineering Conventional Water Treatment Plant. Principles and Important Factors Influence on The Efficiency. *Design Engineering (Toronto)*, 2021, vol. 8, no. 19, pp. 16009–16027.
4. Kudryavtsev P., Kudryavtsev N. Treatment of natural surface waters using new composite flocculants-coagulants. *International Journal of Hydrology*, 2020, vol. 4, no. 5, pp. 211–227. <https://doi.org/10.15406/ijh.2020.04.00248>
5. *SanPIN 2.1.3684-21. Sanitarno-ehpidemiologicheskie trebovaniya k soderzhaniyu territorii gorodskikh i sel'skikh poselenii, k vodnym ob'ektam, pit'evoi vode i pit'evomu vodosnabzheniyu, atmosfernomu vozdukh, pochvam, zhilym pomeshcheniyam, ehkspluatatsii proizvodstvennykh, obshchestvennykh pomeshchenii, organizatsii i provedeniyu sanitarno-protivoehtidemicheskikh (profilakticheskikh) meropriyatii* [SanPIN 2.1.3684-21. Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of the territories of urban and rural settlements, water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soil, living quarters, operation of industrial, public premises, organisation and conduct of sanitary and antiepidemic (preventive) measures]. Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of 28.01.2021, no. 3. (In Russian)
6. *SanPIN 1.2.3685-21. Gigenicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya* [SanPIN 1.2.3685-21. Hygienic norms and requirements to ensure safety and (or) harmlessness for humans of habitat factors]. Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of 28.01.2021, no. 2. (In Russian)
7. Zhang J., Wei Z., Jia H., Huang X. Factors influencing water quality indices in a typical urban river originated with reclaimed water. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 2017, vol. 11, no. 4, pp. 8.
8. Zlobina V.L., Medovar Yu.A., Yushmanov I.O. Sources of groundwater pollution in the zone of active water exchange. *Vostochno-Evropskii nauchnyi zhurnal* [East European Scientific Journal]. 2018, no. 2-2(30), pp. 4–16. (In Russian)
9. Mezentzev S.D. Ecology of Moscow urban agglomeration: problems and the ways of solving. *E3S Web Conferences*, 2021, vol. 263, article id: 05045.
10. Markushina L.A. Efficiency of environmental initiatives in assessing the state of the city environment. *Ehkonomicheskii vestnik RGU «Terra economica»* [Economic Bulletin of the Russian State University 'Terra economica']. 2010, vol. 3, no. 2, pp. 59–65. (In Russian)
11. Meyer T., Lei Y.D., Wania F. Transport of polycyclic aromatic hydrocarbons and pesticides during snowmelt within an urban watershed. *Water Research*, 2011, vol. 45, no. 3, pp. 1147–1156. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.11.004>
12. Parreño C., Salazar Flores C., Slabospitskaya A.S., Adarchenko I.A. Turbidity as the main indicator of water quality from surface sources.

International Research Journal, 2024, no. 3 (141).

<https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.141.44>

13. Allen M.J., Brecher R.W., Copes R., Hrudey S.E., Payment P. Turbidity and microbial risk in drinking water. The Minister of Health Province of British Columbia, 2008, 68 p.

14. Kantor E.A., Zhigalova A.V., Malkova M.A. *Mutnost' vody v reke i rezervuarakh chistoi vody nekotorykh vodozaborov g. Ufy* [Turbidity of water in the river and clean water tanks of some water intakes of the city of Ufa]. Certificate of state registration of the database no. 2017620028, 2017. (In Russian)

15. Yalaletdinova A.V., Malkova M.A., Samus A.I., Kantor E.A. Comparison of population morbidity in some water supply zones of a large urban agglomeration and permanganate oxidability of drinking water. *Problems of collection, treatment and transport of oil and oil products*, 2023, vol. 6 (146), pp. 174–186. (In Russian) <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2023-6-174-186>

16. Dolgonosov B.M., Vlasov D.Yu., Dyatlov D.V., Suracheva N.O., Grigorieva S.V., Korchagin K.A. Statistical characteristics of the variability of water quality variability coming to the water supply station. *Inzhenernaya ehkologiya* [Engineering Ecology]. 2004, no. 3, pp. 2–20. (In Russian)

17. Yanin E.P. Organic substances of anthropogenic origin in waters of urban rivers. *Ehkologicheskaya ekspertiza* [Ecological expertise]. 2004, no. 4, pp. 42–67. (In Russian)

18. *GOST R 55684-2013 (ISO 8467:1993). Voda pit'evaya. Metod opredeleniya permanganatnoi okislyaemosti* [GOST R 55684-2013 (ISO 8467:1993). Drinking water. Method for determination of permanganate oxidisability]. Moscow, Standartinform Publ., 2019, 20 p. (In Russian)

19. Li B., Song X., Yang L., Yao D., Xu Y. Insights onto Hydrologic and Hydro-Chemical Processes of Riparian Groundwater Using Environmental Tracers in the Highly Disturbed Shaying River Basin, China. *Water*, 2020, vol. 12(7), article id: 1939. <https://doi.org/10.3390/w12071939>

20. Kravynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ehkologicheskie aspekty* [Geochemistry of

groundwater. Theoretical, applied and ecological aspects]. Moscow, Nauka Publ., 2004, 677 p. (In Russian)

21. Lekhov A.V., Shvarov Yu.V. Mineralisation growth of the exploited groundwater in the presence of pyrite in the cover sediments. *Geoechekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya* [Geoeology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology]. 2002, no. 4, pp. 316–325. (In Russian)

22. Abdrakhmanov R.F. Hydrogeochemistry of urbanised territories of the Southern Urals. *Geokhimiya* [Geochemistry]. 2019, vol. 64, no. 7, pp. 733–741. (In Russian)

23. Romanovskaya S.L., Kantor L.I., Kantor E.A., Khabibullin P.P. Analysis of the value of total hardness of water source water and drinking water of water intakes of the city of Ufa. *Ehkologicheskaya khimiya* [Ecological Chemistry]. 2005, vol. 14, no. 2, pp. 126–134. (In Russian)

24. Yakushev A.A., Gorbatkov S.A., Gabdrakhmanova N.T. *Mnogomernye statisticheskie metody i neirosetevye modeli v ehkonomicheskom analize* [Multivariate statistical methods and neural network models in economic analysis]. Ufa, Publishing Centre 'Bashkir Territorial Institute of Professional Accountants', 2001, 266 p. (In Russian)

25. Kharabrin S.V., Kantor O.G., Kantor L.I., Kantor E.A. Estimation of seasonal changes of water quality in a water source. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal]. 2003, vol. 10, no. 1, pp. 87–89. (In Russian)

26. Romanovskaya S.L., Kantor L.I., Kantor O.G., Kulikova Y.S., Iskhakova I.I. Identification of unfavourable time periods by the content of some inorganic compounds in the water source. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal]. 2005, vol. 12, no. 1, pp. 92. (In Russian)

27. Gaidyshev I.A. *Analiz i obrabotka dannykh: spetsial'nyi spravochnik* [Data Analysis and Processing: Special Reference Book]. St. Petersburg, Piter Publ., 2001, 752 p. (In Russian)

28. Tyurin Y.N., Makarov A.A. *Analiz dannykh na komp'yutere* [Data Analysis on Computer]. Moscow, Infra-M Publ., Finance and Statistics Publ., 1995, 384 p. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Алина В. Ялалетдинова, автор-корреспондент, участвовала в сборе исходных данных, проведении исследования, анализе полученных результатов, внесла вклад в интерпретацию результатов и подготовку (написание и оформление) рукописи. Мария А. Малкова провела сбор исходных данных, участвовала в анализе и обобщении результатов исследования.

Маргарита Ю. Вождаева, Игорь А. Мельницкий провели экспериментальные исследования в лаборатории.

Павел В. Серебряков организовал обсуждение, дал рекомендации по улучшению результатов исследования. Ольга Г. Кантор внесла вклад в анализ данных, дала рекомендации по его улучшению.

Евгений А. Кантор участвовал в интерпретации результатов исследования, подготовке и редактировании и корректировке рукописи.

Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Alina V. Yalaletdinova, corresponding author, participated in the collection of initial data, conducted the study, analysed the results obtained, and contributed to the interpretation of the results and preparation (writing and design) of the manuscript. Maria A. Malkova conducted the collection of initial data and participated in the analysis and synthesis of the study results. Margarita Yu. Vozhdaeva, Igor A. Melnitsky carried out experimental studies in the laboratory. Pavel V. Serebryakov organised the discussion and gave recommendations for improving the results of the study. Olga G. Kantor contributed to the data analysis and gave recommendations for its improvement. Evgeny A. Kantor participated in the interpretation of the study results, preparation and editing and proofreading of the manuscript. All authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Алина В. Ялалетдинова / Alina V. Yalaletdinova <https://orcid.org/0000-0003-0883-1856>

Мария А. Малкова / Maria A. Malkova <https://orcid.org/0000-0002-3570-4062>

Маргарита Ю. Вождаева / Margarita Yu. Vozhdaeva <https://orcid.org/0000-0002-0417-074X>

Ольга Г. Кантор / Olga G. Kantor <https://orcid.org/0000-0002-3186-3285>

Игорь А. Мельницкий / Igor A. Melnitsky <https://orcid.org/0000-0002-4825-1867>

Павел В. Серебряков / Pavel V. Serebryakov <https://orcid.org/0009-0002-4148-1093>

Евгений А. Кантор / Evgeny A. Kantor <https://orcid.org/0000-0002-9629-3324>

Оригинальная статья / Original article
УДК:504.3.054
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-22



Изучение концентраций приземного озона в воздухе промышленного российского города

Татьяна Г. Крупнова¹, Ольга В. Ракова¹, Валерий М. Кочегоров²

¹Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

²Челябинский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиал ФГБУ «Уральское УГМС», Челябинск, Россия

Контактное лицо

Татьяна Г. Крупнова, кандидат химических наук, доцент, кафедра экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет; 454080 Россия, г. Челябинск, пр. Ленина, 76.
Тел. +79642444419
Email krupnovatg@susu.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0862-710X>

Формат цитирования

Крупнова Т.Г., Ракова О.В., Кочегоров В.М.
Изучение концентраций приземного озона в воздухе промышленного российского города // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 240-254. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-22

Получена 8 июня 2025 г.

Прошла рецензирование 20 сентября 2025 г.

Принята 25 октября 2025 г.

Резюме

Целью настоящей работы был анализ сезонных изменений концентраций приземного озона (ПО), изучение случаев превышения предельно допустимых концентраций (ПДК), эпизодов экстремально высоких концентраций (ЭВКО) и ночных повышений содержания озона (НПСО) для предложения механизмов описанных явлений и эффективных стратегий достижения установленных нормативов. В ходе работы были изучены концентрации приземного озона и его предиктов на посту государственного мониторинга состояния атмосферного воздуха в течение 2019–2021 гг. в городе Челябинске. Согласно результатам исследований, было выявлено, что концентрация ПО на территории города Челябинска начинает увеличиваться в марте и остается высокой в течение лета. Концентрация ПО складывается из нескольких составляющих: (1) поступающего из нижней стратосферы и верхних слоев тропосферы в результате стратосферных вторжений (СВ), которые увеличиваются в летний период; (2) фотохимически образующегося с максимумом в июне, при этом рассчитанное на основании данных наземного мониторинга соотношения НСНО/NO_x не может быть использовано в качестве надежного индикатора режима образования ПО; и (3) поступающего с низкоуровневыми мезоструйными течениями (НУМСТ), частота возникновения которых увеличивается в ночной период весной и летом, о чем свидетельствует высокая повторяемость НПСО.

Ключевые слова

Приземный озон (ПО), режим образования озона, эпизоды экстремально высоких концентраций озона (ЭВКО), ночные повышения содержания озона (НПСО), стратосферные вторжения (СВ), низкоуровневые мезоструйные течения (НУМСТ).

Study of surface ozone concentrations in the air of an industrial Russian city

Tatyana G. Krupnova¹, Olga V. Rakova¹ and Valeriy M. Kochegorov²

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

²Chelyabinsk Centre for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Rosgidromet), Chelyabinsk, Russia

Principal contact

Tatyana G. Krupnova, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Ecology and Chemical Engineering, South Ural State University; 76 Lenin Prospekt, Chelyabinsk, Russia 454080.

Tel. +79642444419

Email krupnovatg@susu.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0862-710X>

How to cite this article

Krupnova T.G., Rakova O.V., Kochegorov V.M. Study of surface ozone concentrations in the air of an industrial Russian city. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):240-254. (In Russ.)
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-22

Received 8 June 2025

Revised 20 September 2025

Accepted 25 October 2025

Abstract

The aim of this work was to analyse seasonal changes of surface ozone concentrations (SO), to study cases of exceeding maximum permissible concentrations (MPC), extreme ozone episodes (EOEs) and nocturnal ozone enhancement (NOE) in order to propose mechanisms for the phenomena described and effective strategies for achieving established standards. In the course of the work, the concentrations of SO and its predicates were studied at the state air monitoring station in the city of Chelyabinsk during 2019–2021. According to the research results, it was revealed that the SO concentration in the Chelyabinsk urban area begins to increase in March and remains high during the summer. The SO concentration consists of several components: (1) that transported from the lower stratosphere and the upper layers of the troposphere as a result of stratospheric invasions (SI), which increase in summer; (2) that formed photochemically with a maximum in June: while the HCHO/NO_x ratio calculated on the basis of ground-based monitoring data cannot be used as a reliable indicator of SO formation; and (3) that incoming with low-level jets (LLJs), the frequency of which increases during the night in spring and summer, as evidenced by the high frequency of NOE.

Key Words

Surface ozone (SO), ozone formation regime, extreme ozone episodes (EOEs), nocturnal ozone enhancement (NOE), stratospheric invasions (SIs), Low-level jets (LLJs).

ВВЕДЕНИЕ

Приземный озон (ПО) – это атмосферный загрязнитель, представляющий значительную угрозу для экосистем и здоровья человека. ПО может вызывать першение, кашель и отек горла [1]. Люди, у которых диагностирована астма, хронические респираторные заболевания, аллергии,

эмфизема, дети и пожилые – это группы населения, обладающие особой чувствительностью к повышенным концентрациям ПО. Предельно допустимые концентрации озона зависят от региона, в табл. 1 представлены некоторые из них.

Таблица 1. Нормативные значения концентраций ПО для различных регионов**Table 1.** Limit values of SO for different regions

Страна / Регион Country / Region	Допустимый уровень озона (млрд ⁻¹) Limit value of ozone (ppb)	Время усреднения, ч Time averaging, h
ВОЗ / WHO	50	8
ЕС / EU	60	8
США / USA	70	8
Соединенное королевство Великобритании United Kingdom of Great Britain	50	8
Канада / Canada	62	8
Китай China	100 80	1 8
Индия India	90 50	1 8

Европейская директива о качестве воздуха (Директива 2008/50/ЕС) устанавливает целевое значение в 60 ppb для максимальной среднесуточной 8-ми часовой концентрации (МСК8-О₃), которое не может быть превышено более чем в течение 25-ти дней в календарном году, в среднем за 3 года. В Руководящих принципах ВОЗ по качеству воздуха установлен целевой показатель МСК8-О₃ 50 ppb, который не должен быть превышен в течении 4-х дней календарного года и 30 ppb как максимальное среднее значение МСК8-О₃ за 6 месяцев [1]. Недавнее исследование показало, что примерно 12,2 % населения земного шара (261 город) проживает в районах с высокой концентрацией ПО, превышающей установленные нормативы. Таким образом, примерно 36,32 миллиона человек ежегодно подвергаются воздействию вредных концентраций ПО [2].

Уровень содержания ПО в атмосферном воздухе зависит от концентрации его прекурсоров, к которым относятся такие вещества как оксиды азота (NO_x = NO₂+NO) и летучие органические соединения (ЛОС) [3]. Методы анализа ЛОС часто являются трудоемкими, поэтому во многих исследованиях для оценки общего уровня ЛОС [4] используется концентрация формальдегида (НСНО), так как он является продуктом кратковременного окисления многих ЛОС и промежуточным продуктом окисления почти всех ЛОС [5]. Нет сомнений в том, что концентрации ПО, ЛОС и NO_x тесно взаимосвязаны. ЛОС окисляются в тропосфере с образованием ПО. Однако, чем больше выделяется NO_x, тем меньше образуется ПО, поскольку NO_x оттитровывают ПО. Таким образом, возможно увеличение содержания ПО за счет снижения выбросов NO_x. Следовательно, зависимость образования ПО от прекурсоров является нелинейной. Чувствительность к образованию озона может быть оценена с помощью показателя FNR, равного соотношению НСНО/NO_x, полученного как с помощью технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), так и наземных мониторинговых измерений [6]. Можно выделить несколько режимов образования ПО: ЛОС-лимитированный, NO_x-лимитированный и переходный. В случае режима с ограниченным содержанием ЛОС (с высоким содержанием NO_x), сокращение выбросов ЛОС

приводит к уменьшению химического образования органических радикалов. Это приводит к уменьшению круговорота NO_x и, следовательно, к снижению концентрации ПО. В случае режима с ограниченным содержанием NO_x (высоким содержанием ЛОС) сокращение выбросов NO_x приводит к уменьшению фотолиза NO₂, который является основным источником свободных атомов кислорода. В режиме с ограниченным содержанием NO_x снижение выбросов NO_x приводит к снижению содержания ПО в окружающей среде. Напротив, в режиме с ограниченным содержанием ЛОС поступление NO_x в окружающую среду способствует снижению содержания ПО, а снижение выбросов NO_x способствует образованию ПО [7]. Многие исследования, посвященные FNR, не выявили конкретного порога значений данного соотношения, который мог бы обобщить глобальный режим контроля за образованием озона, поскольку он определяется различиями в атмосферной среде, неоднородностью поверхности и региональными особенностями. Но выявление тенденций к увеличению или уменьшению НСНО/NO_x может быть полезно для определения доминирующего фактора в чувствительности ПО к NO_x-ЛОС [6]. Также, в настоящее время невозможно объяснить конкретное фоновое содержание ПО в том или ином регионе. Однако последние исследования показали, что даже если мы сведем к нулю все выбросы ЛОС, количество ПО все равно будет значимым [8]. Было показано, что атмосферный фон Восточной Азии, определяемый путем обнуления всех антропогенных выбросов, очень высок и составляет порядка 55 ppb. Причина этого явления пока неясна. Есть данные [9–11], что стратосферно-тропосферный обмен является важным процессом для обеспечения баланса озона свободной тропосфере. В качестве индикатора для оценки содержания ПО, поступающего в нижние слои атмосферы из стратосферы и верхних слоев тропосферы [12] путем так называемых стратосферных вторжений (СВ) может быть использован изотоп ⁷Ве (период полураспада 53,22 дня), природный радионуклид, который образуется в верхней тропосфере (30 %) и нижней стратосфере (70 %). На концентрацию ПО также влияют местные метеорологические факторы, такие как солнечная

радиация, температура, облачный покров, относительная влажность, скорость и направление ветра [13]. Существуют исследования, в которых сообщается об экстремальных высоких концентрациях озона (ЭВКО), фиксирующихся в разное время во всем мире [14–16]. Исследования показали, что некоторые локальные экстремальные метеорологические явления, такие как температурная инверсия (ТИ), благоприятствуют образованию и накоплению ПО, что приводит к эпизодам экстремального загрязнения [17–21]. Уровни загрязнения воздуха ПО обычно достигают максимума утром-днем, а затем к вечеру снижаются. Однако, в некоторых исследованиях сообщалось о ночном повышении содержания озона (НПСО) и ночных пиках озона (НПО) [22–24]. Концентрация ПО и ночью может оставаться на высоком уровне, повышая способность атмосферы к окислению в ночное время, и иногда даже превышать дневной пик [25; 26]. Эти явления активно изучались в последние годы, но результаты исследований крайне противоречивы, а исследования концентраций ПО в городах России крайне ограничены. В нашем предыдущем исследовании мы изучали сезонные и суточные колебания приземного содержания ПО, а также источники его прекурсоров [27]. Мы обнаружили, что для территории Южного Урала характерны весенний и летний пики озона, а суточный ход во многом определяется выбросами оксидов азота предприятиями теплоэнергетики. Уникальная возможность проверить различные гипотезы накопления в воздухе высоких концентраций ПО представилась во время локдауна 2020 года, вызванного всемирной пандемией Covid-19 [28]. В предыдущей работе [29] мы впервые использовали анализ соотношения HCHO/NO_2 (FNR), полученного на основании данных ДЗЗ.

Для разработки стратегии снижения концентрации ПО в работе были использованы данные мониторинга озона и его предиктов в доковидный 2019 год, во время локдауна (2020 год) и в последующий период в течение 2021 года. Основной целью настоящей работы был анализ сезонных изменений концентраций приземного озона (ПО), изучение случаев превышения предельно допустимых концентраций (ПДК), экстремально высоких концентраций (ЭВКО) и ночных повышений содержания озона (НПСО) для предложения механизмов описанных явлений и выработки эффективных стратегий достижения установленных нормативов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе работы были использованы данные с поста государственного мониторинга качества воздуха, расположенного вдали от основных промышленных предприятий г. Челябинска и крупных автомагистралей. Замеры ПО производились с помощью автоматического газоанализатора, принцип действия которого основан на фотометрическом анализе в УФ диапазоне Ф-105 (ОПТЭК, Россия). Калибровка осуществлялась по стандартам, полученным с помощью генератора озона. Оксиды азота NO и NO_2 измеряли с использованием хемилюминесцентного анализатора Р-310 (ОПТЭК, Россия). Замеры на автоматических газоанализаторах производились круглосуточно каждые 20 минут. Концентрацию формальдегида в воздухе определяли четыре раза в сутки фотометрическим методом анализа с фенилгидразином, используя спектрофотометр UNICO 1201 (United Products & Instruments, Inc., США). Все измерения были пересчитаны в ppb (млрд^{-1}), поскольку эта единица измерения наиболее часто используется в

международной практике, что позволило сравнивать полученные результаты с зарубежными исследованиями, так как одной из задач было определить причины аномальных увеличений концентраций озона в ночное время и эпизодов экстремально повышенных значений ПО. Российских работ в этом направлении, насколько нам известно, нет и представленная работа является пионерной, по крайней мере для промышленного города, расположенного в материковой части РФ.

Изотоп ^7Be использовался в качестве трассера (химического индикатора вторжения атмосферных воздушных масс из высокой тропосферы и низкой стратосферы в приземные слои) [30]. Измерения удельной активности ^7Be (в $\text{мБк}\cdot\text{м}^{-3}$) были получены с помощью гамма-спектрометрического анализа после того, как образцы аэрозоля были собраны на фильтровальной бумаге с использованием пробоотборников воздуха. Мы использовали гамма-спектрометр с цифровой обработкой сигналов DSPEC jr 2.0 (AMETEK (торговая марка "ORTEC"), США).

Для диагностики влияния метеорологических условий на содержание ПО использовали данные метеорологической станции Vantage Pro2 Plus (Davis Instruments, США). Проводились замеры почасовой температуры воздуха в $^{\circ}\text{C}$ (T), относительной влажности в % (RH), солнечной радиации в $\text{Вт}/\text{м}^2$ (SR), дозы УФ излучения (UVD), УФ-индекса (UVI), скорости ветра в $\text{м}/\text{с}$ (WS), направления ветра (WDIR).

Для анализа температурных инверсий (ТИ) использовались данные температурного профилимера МТП-5 (Россия) [31].

Методология исследования заключалась в следующем. Был проанализирован годовой ход ПО, оксидов азота и формальдегида за 2019–2021 гг. Для расчета среднемесячных концентраций ПО были использованы MCK8-O_3 (ppb), полученные для каждого календарных суток путем расчета 24 возможных 8-часовых средних значения концентраций ПО. При этом MCK8-O_3 принималась как наивысшая из 24-х рассчитанных значений. Для получения среднемесячных концентраций формальдегида и оксидов азота использовали среднесуточные значения, рассчитанные с использованием 72-х измерений каждые 20 минут.

Для оценки режима фотохимического образования озона использовали максимально разовые концентрации ПО, оксидов азота и формальдегида, измеренные в 13:00 по местному времени (что максимально приближено к полудню, выбор времени также обусловлен утвержденным графиком отбора проб формальдегида). Использование полуденных концентраций позволило отделить фотохимически образовавшийся ПО от фоновых значений, предположительно вызванных вертикальным и горизонтальным переносом. Для расчета наземно-измеренного FNR (соотношения HCHO/NO_x) использовали концентрацию формальдегида, измеренную фотометрически в 13:00 и суммарную концентрацию моно- и диоксида азота, в ppb. Дни, когда одна из концентраций по тем или иным причинам (ошибка измерения, не сохранившиеся данные на сервере, значение ниже предела обнаружения) отсутствовала или равнялась нулю, отбрасывали. Для каждого года наблюдения были получены регрессионные модели (линейная, логарифмическая, обратная, квадратичная, кубическая, показательная, степенная, S-кривая, растущая, экспоненциальная, логистическая) зависимости концентрации ПО от FNR. Для оценки эффективности

модели использовали значение R^2 . В каждую модель была включена константа, которая условно была принята за фоновое значение ПО. Полученные значения фоновой концентрации были сопоставлены со среднегодовой концентрацией ^{7}Be в аэрозолях, полученной путем расчета среднего значения за 12 месяцев года, для проверки гипотезы о наличии СВ.

Было изучено явление ночного повышения концентраций ПО. Данное исследование определяет событие НПСО как повышение концентрации озона в ночное время на >5 ppb в течение часа с последующим снижением на <5 ppb в последующий час. Если концентрация ПО увеличивается более чем на 5 ppb несколько раз в течение одной и той же ночи, это увеличение считается частью единичного явления НПСО. Ночной пик озона (НПО) обозначает самую высокую концентрацию ПО, наблюдаемую во время явления НПСО [26; 32]. Следует иметь в виду следующее ограничение

нашего исследования. Нами было принято, что наличие НПСО является указанием на формирование низкоуровневых мезоструйных течений (НУМСТ) в геолокации поста государственного мониторинга качества воздуха. Для точного подтверждения данной гипотезы в дальнейших исследованиях необходимо использование лидара, позволяющего измерять концентрации озона, либо запуск зонда, измеряющего концентрацию озона на различных высотах.

Для анализа повышенных концентраций озона были проанализированы два типа дней. Во-первых, это дни, когда наблюдалось превышение ПДК среднесуточных за 8-ми часовой интервал, то есть были выбраны дни с МСК8-О_3 более 50 ppb. Во-вторых, мы использовали индекс качества воздуха (ИКВ) [18], который классифицирует приземные пороговые значения содержания ПК по пяти категориям (табл. 2) [9].

Таблица 2. Индекс качества воздуха (ИКВ) на основе МСК8-О_3 и риски для здоровья (согласно [33])

Table 2. Air quality index (AQI) based on MDA8-O_3 and health risks (according to [33])

ИКВ (цветовое обозначение) AQI (Color)	Категория качества воздуха Air quality category	Величина ИКВ Value of AQI	МСК8-О_3 , млрд ⁻¹ MDA8-O_3 , ppb	Описание качества воздуха и рисков для здоровья Description of air quality and health risk
Зеленый Green	Хорошее Good	0–50	<55	Качество воздуха удовлетворительное, загрязнение воздуха практически не представляет опасности Air quality is satisfactory, air pollution is practically harmless
Желтый Yellow	Умеренная Moderate	51–100	<71	Качество воздуха приемлемое, однако, для некоторых людей, особенно для тех, кто особенно чувствителен к загрязнению воздуха, может представлять опасность Air quality is acceptable. However, there may be a risk for some people, particularly those who are unusually sensitive to air pollution
Оранжевый Orange	Вредное для здоровья чувствительных групп Unhealthy for Sensitive Groups	101–150	<86	Члены уязвимых групп населения могут испытывать последствия для здоровья, но мало вероятно, что это затронет население в целом Members of sensitive groups may experience health effects. The general public is less likely to be affected
Красный Red	Вредное для здоровья Unhealthy	151–200	<106	У представителей уязвимых групп населения могут возникнуть более серьезные последствия для здоровья Some members of the general public may experience health effects; members of sensitive groups may experience more serious health effects
Фиолетовый Purple	Очень вредное для здоровья Very Unhealthy	201–300	<201	Предупреждение для здоровья: риск последствий для здоровья повышается для всех Health alert: the health risk is increased for everyone

Отметим, что в отличие от РФ, где приняты очень жесткие стандарты качества воздуха и экологическое законодательство основывается на концепции ПДК, разработанной еще группой профессора Рязанова в 1951, в основе которой лежит набор медико-биологических показателей, за рубежом в настоящее время наблюдается больший переход на концепцию рисков. И в зарубежных публикациях к случаям экстремально высоких концентраций озона относят

красную и фиолетовую области опасности (табл. 2). Однако, в соответствии с принятыми в РФ концепциями оценки рисков, а также наблюдаемого в настоящее время тренда на увеличение уязвимых групп населения (рост количества больных с аллергией, бронхиальной астмой, малоизученные негативные последствия пандемии COVID-19) в данной работе к случаям экстремально высоким концентрациям озона (ЭВКО)

относили дни, начиная с желтого уровня опасности, которые соответствуют $\text{МСК8-О}_3 \geq 86$ ppb.

Для оценки связи между ПО и метеопараметрами использовали корреляционные коэффициенты Спирмена. Результаты всех измерений были обработаны с использованием программного обеспечения Microsoft Excel 2013 и IBM SPSS 27.0.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Годовой ход концентрации ПО и его предиктов в 2019–2021 гг. представлен на рис. 1, для него характерен рост

концентрации ПО весной и летом, и снижение – осенью и зимой. Летний максимум ПО наблюдался в июне на протяжении всех трех исследуемых лет. Он совпадает с солнечным максимумом и объясняется максимумом фотохимического синтеза озона. Весенний максимум – плавающий. В целом, рост концентрации озона весной характерен для всего Евразийского континента, его существование объясняется рядом геоклиматических и атмосферных явлений [34].

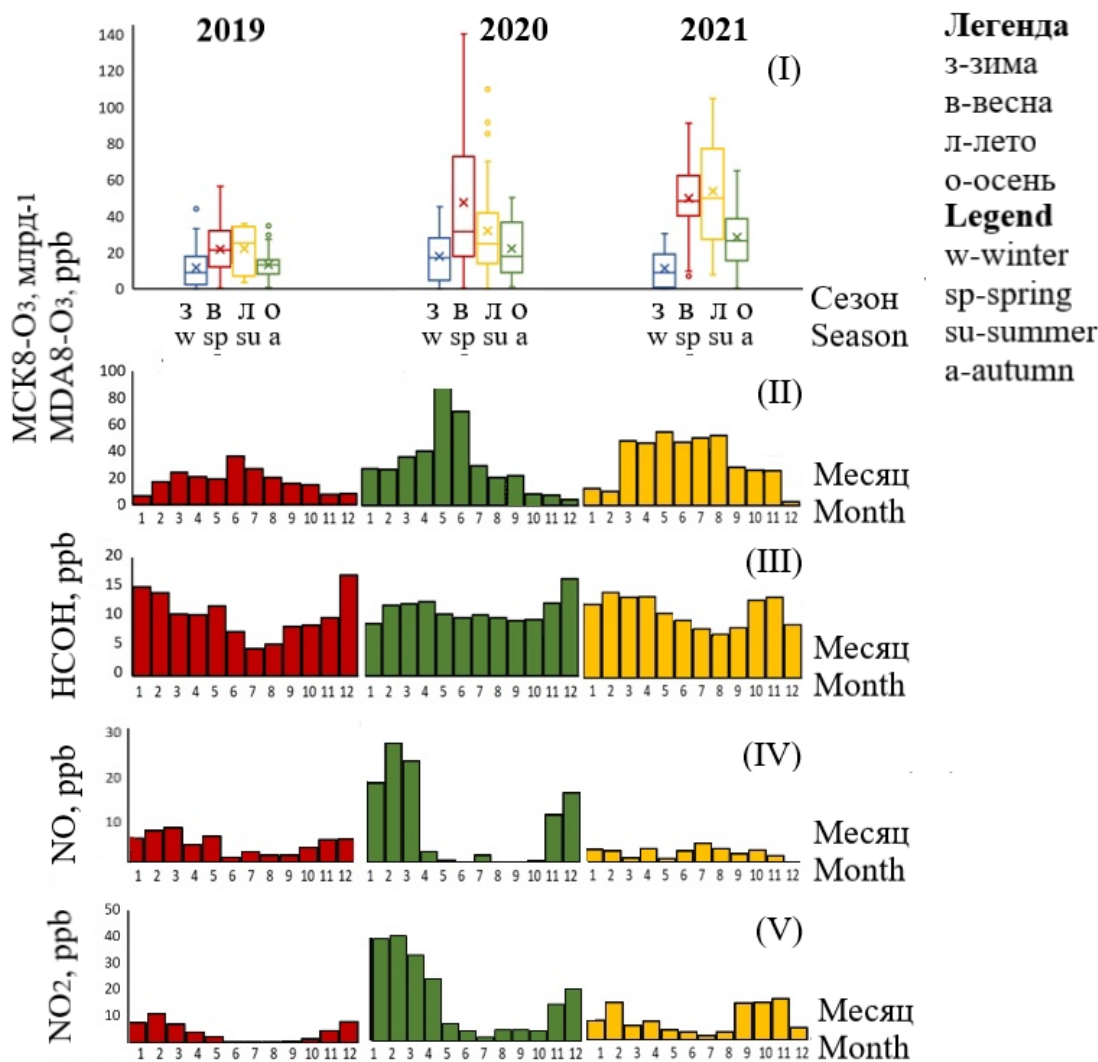


Рисунок 1. Сезонные (I) и месячные (II) значения МСК8-О_3 , среднесуточных концентраций НСОН (III), NO (IV) и NO_2 (V) в 2019–2021 гг. “Ящики” представляют 25-й процентиль (нижний край), медиану (сплошная линия), среднее значение (точка с пунктирной линией) и 75-й процентиль (верхний край). “Усы” над и под “ящиком” указывают на 90-й процентиль и 10-й процентиль

Figure 1. Seasonal (I) and monthly (II) variations of MDA8-O_3 , average daily HCOH (III), NO (IV) and NO_2 (V) concentrations in 2019–2021. The boxes represent the 25th percentile (lower edge), median (solid line), mean (dot with dashed line), and 75th percentile (upper edge). The “whiskers” above and below the box indicate the 90th percentile and 10th percentile

Высокие концентрации оксидов азота в отопительный сезон фиксировались во все годы наблюдений. Это хорошо согласуется с предыдущими исследованиями [27], где было показано, что суточный ход концентраций оксидов азота совпадает с суточным ходом производительности ТЭЦ, и не зависит от интенсивности транспортных потоков (часы пик) в городе. Таким образом, можно однозначно говорить о том, что основной вклад в эмиссию оксидов азота в городе Челябинске вносит деятельность городских и промышленных ТЭЦ.

На рис. 1 видно, что в городе Челябинске наблюдается аномальный годовой ход концентраций формальдегида с некоторым незначительным, но очевидным трендом на снижение в течение летних месяцев. Обычно, концентрация формальдегида значительно увеличивается летом из-за увеличения выбросов биогенных ЛОС и фотохимических превращений. Такой аномальный годовой ход формальдегида может быть связан с механизмом вертикального перемешивания и эффектом разбавления в

результате тепловой конвекции и увеличения планетарного пограничного слоя (ППС), который летом может простирается на несколько километров. Зимой формальдегид, выделяющийся из антропогенных и природных источников, накапливается в более низком слое перемешивания, совпадающем в большинстве

случаев с высотой нижней границы приподнятой инверсии [31; 34]. Для зимнего периода в Челябинске характерен антициклонный тип погодных условий, блокирующие длительные антициклоны провоцируют более частое образование приземных и приподнятых инверсий (рис. 2).

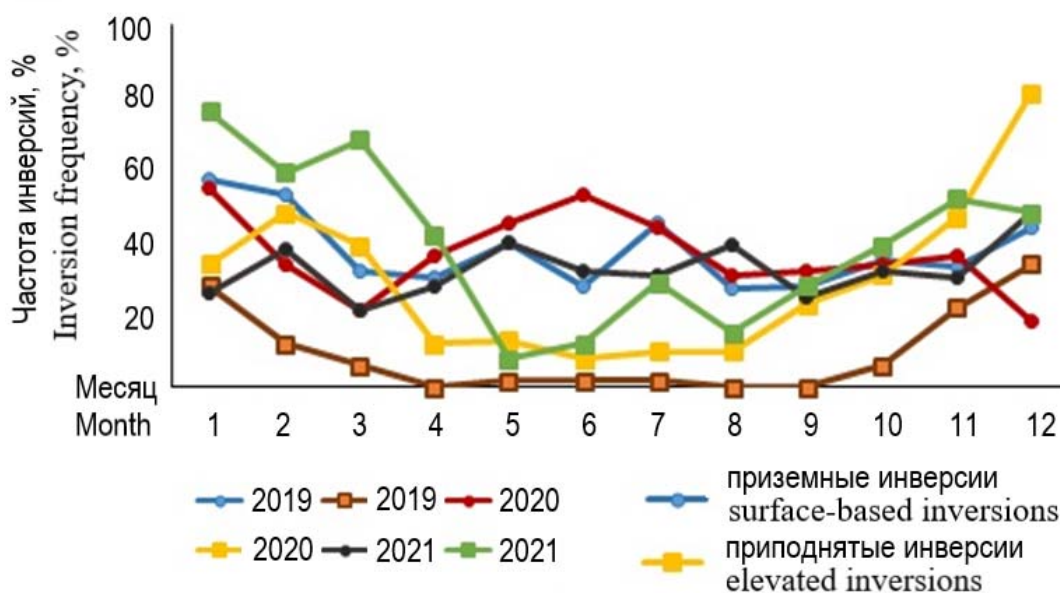


Рисунок 2. Частота температурных инверсий в Челябинске в 2019–2021 гг.

Figure 2. Frequency of temperature inversions in Chelyabinsk in 2019–2021

Температурные инверсии наблюдаются чаще зимой, чем летом (рис. 2), препятствуют разбавлению и рассеиванию загрязняющих веществ и способствуют накоплению формальдегида в приземном слое именно в зимний период. Дополнительной причиной снижения концентрации формальдегида летом могут быть процессы сухого осаждения. Усиление активности растительности летом может увеличить сухое осаждение формальдегида на поверхности листьев, что еще больше снижает его концентрацию в приземном слое [35].

Аномально высокие концентрации ПО наблюдались в 2020 году в мае-июне в период полного локдауна. Майский максимум 2020 года составил 142 ppb (рис. 1). В течение 2020 года был зафиксирован 81 день, когда концентрация ПО была выше 50 ppb, из них 15 дней ЭВКО ($\text{МСК8-О}_3 \geq 86$ ppb), тогда как в 2019 году было только два дня с МСК8-О_3 выше ПДК. В 2021 году с мая по август наблюдался весенне-летний максимум приземного озона (рис. 1), было зафиксировано 73 дня с превышением российского норматива качества воздуха, в том числе 10 дней ЭВКО, когда $\text{МСК8-О}_3 \geq 86$ ppb (табл. 3).

Согласно значениям коэффициента корреляции Спирмена, связь между МСК8-О_3 с концентрациями предиктов и метеорологическими параметрами была низкой во все сезоны (табл. 4).

Для лучшего понимания изменений концентрации ПО необходимо иметь в виду следующее. В общем случае концентрация ПО складывается из нескольких составляющих: (1) поступающего из нижней стратосферы и верхних слоев тропосферы в результате СВ озона, что, скорее всего, определяет некоторый фоновый уровень, фатальный и независимый от региональных источников предиктов; (2) фотохимически образующегося озона, с

максимумом в июне и в полуденное время; (3) озона, поступающего с НУМСТ с разных высот тропосферы. При этом каждый тип озона может переноситься горизонтально на разных высотах и увеличивать концентрацию ПО в изучаемой геолокации.

Фотохимически генерируемый озон может образовываться в двух режимах (ЛОС-ограниченный и NO_x -ограниченный), для характеристики которых мы использовали наземные измерения при расчете FNR. Для сравнения фотохимических механизмов образования озона были построены зависимости концентраций озона от полученных с помощью наземных измерений значений FNR. Зависимости плохо описываются регрессионной зависимостью, наиболее подходящей оказалась кубическая регрессия с самым высоким значением R^2 в 2020 году, равным (0,212) (табл. 5, рис. 3).

Согласно данным ДЗЗ [29] для городской территории Челябинска, мы можем с высокой надежностью использовать следующие характеристики режимов: $\text{FNR} < 1$ представляет собой ЛОС-ограниченный режим, а $\text{FNR} > 1,8$ представляет собой ограничение по NO_x . Переходный режим характеризуется интервалом значений $1 < \text{FNR} < 1,8$ (ЛОС- NO_x -ограниченный) режим, где на образование ПО влияют как выбросы ЛОС, так и выбросы NO_x [29]. Наземные данные (рис. 3) показывают существенно более высокие значения FNR, до 200 единиц в 2020 г., однако зависимости концентрации озона от значения FNR не наблюдается. Высокие значения FNR регистрируются как в дни с концентрацией ПО выше 50 ppb, так и в дни с низкими значениями ПО. Свободный член в уравнении регрессии может косвенно соответствовать среднему фоновому уровню ПО, независимого от фотохимических превращений. Он был самым высоким в 2021 г. и составил 40,9 ppb (табл. 3). Таким образом, значения FNR, полученные с помощью

методов наземного мониторинга, дают мало информации для прогнозирования концентрации ПО. Это вполне логично и обусловлено тем, что фотохимические превращения происходят на значительно большей высоте,

чем 2 м над поверхностью, оксиды азота и формальдегид могут рассеиваться и не фиксироваться наземными датчиками. Рассеивание загрязняющих веществ зависит от многих факторов, которые необходимо учитывать.

Таблица 3. Сравнительные характеристики 2019–2021 гг.

Table 3. Comparative characteristics of 2019–2021

Год Year	Среднее годовое значение ПО*, млрд ⁻¹ Average annual O ₃ *, ppb	МСК8-О ₃ , млрд ⁻¹ /MDA8-O ₃ , ppb mean±SD** min...max	Количество дней с концентрацией ПО Days with O ₃		Уравнение регрессии*** Regression equation***				Среднее годовое γBe, мБк·м ⁻³ mBq m ⁻³ Average±SD
			МСК8-О ₃ ≥ 50 ppb	МСК8-О ₃ ≥ 86 ppb	a	b	c	const****	
2019	20	$\frac{15 \pm 11}{2 \dots 55}$	2	0	-0,643	0,054	-0,001	16,3	1,6±0,2
2020	70	$\frac{44 \pm 33}{3 \dots 142}$	81	15	1,887	-0,025	8,90E-05	21,3	3,0±0,3
2021	28	$\frac{43 \pm 24}{2 \dots 104}$	73	10	0,309	0,083	-0,002	40,9	3,9±0,4

Примечание: * Усредненное значение концентрации озона, рассчитанное по всем измерениям озона на посту мониторинга в течение года; **SD – стандартное отклонение; ***O₃= aFNR+bFNR²+cFNR³+const; ****Фоновая концентрация ПО

Note: * Average of all ozone concentrations measured during the year; ** SD – standard deviation;

O₃= aFNR+bFNR²+cFNR³+const; * background O₃

Таблица 4. Коэффициенты корреляции Спирмена между концентрацией МСК8-О₃ и среднесуточными концентрациями предикторов, а также метеопараметрами в различные сезоны за период с 2019 по 2021 год

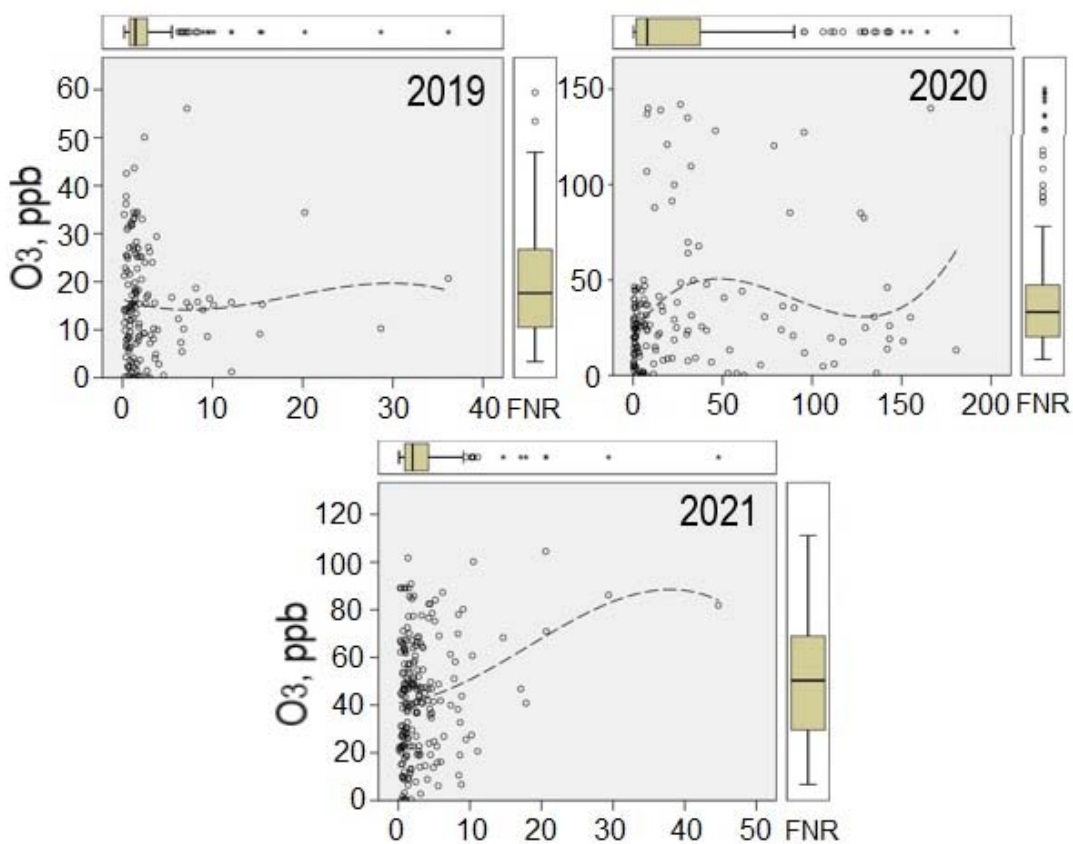
Table 4. Spearman-Rank correlation coefficient values of MDA8-O₃ with predictors and meteorological parameters 2019–2021

Параметр Parameter	Коэффициенты корреляции Спирмена Spearman correlation coefficients			
	Весна / Spring	Лето / Summer	Осень / Autumn	Зима / Winter
NO, млрд ⁻¹ (ppb)	-0,085	-0,094*	-0,101*	-0,111*
NO ₂ , млрд ⁻¹ (ppb)	-0,098*	-0,189**	-0,131*	-0,092*
НСНО, млрд ⁻¹ (ppb)	-0,104*	-0,112*	-0,067*	-0,079
FNR (=НСНО/NO _x) (наземный мониторинг) FNR (=НСНО/NO _x) (ground monitoring)	0,231**	0,178**	0,196**	0,256**
T, °C	0,274**	0,301**	0,187**	0,198**
RH, %	-0,201**	-0,201**	-0,201**	-0,201**
SR, Вт/м ² (W/m ²)	0,167**	0,171**	0,159**	0,164**
UVD	0,132**	0,154**	0,137**	0,141**
UVI	0,134**	0,156**	0,138**	0,139**
WS, м/с (m/s)	0,184**	0,194**	0,181**	0,175**
WDIR	0,059	0,035	0,046	0,051

Примечание / Note: *p<0,05; **p<0,01

Таблица 5. Значения R^2 , рассчитанные для регрессионных моделей зависимости МСК8-О₃ от наземно-измеренных FNR**Table 5.** R^2 calculated for regression models MDA8-O₃ depends from ground-based FNR

Модель Model	R^2		
	2019	2020	2021
Линейная / Linear	0,001	0,050	0,052
Логарифмическая / Logarithmic	0,010	0,163	0,038
Обратная / Inverse	0,030	0,101	0,018
Квадратичная / Quadratic	0,020	0,098	0,053
Кубическая / Cubic	0,050	0,212	0,055
Показательная / Compound	0,003	0,037	0,026
Степенная / Power	0,002	0,083	0,037
S-кривая / S-curve	0,002	0,031	0,017
Растущая / Growth	0,002	0,037	0,026
Экспоненциальная / Exponential	0,002	0,037	0,026
Логистическая / Logistic	0,002	0,037	0,026

**Рисунок 3.** Зависимости МСК8-О₃ от значений наземно-измеренных FNR в 2019–2021**Figure 3.** Dependencies of MDA8-O₃ on ground-measured FNR in 2019–2021

Для прогнозирования концентраций ПО необходимо учитывать, помимо фотохимии, приток стратосферного воздуха в тропосферу. События переноса из стратосферы в тропосферу могут быть связаны с накоплением озона в складках тропопаузы средних широт. При этом часть воздуха остается в складке и возвращается в нижнюю стратосферу, но растяжение СВ до еще более мелких масштабов может привести к необратимому переносу глубже в нижние слои тропосферы или даже на поверхность Земли. Для количественной оценки влияния стратосферного вторжения на концентрацию ПО в качестве трассера может быть применен ^7Be . Согласно данным о концентрации ^7Be в аэрозолях стратосферно-тропосферные переносы увеличиваются весной,

достигая максимума в мае-июле в зависимости от года (рис. 4). В целом весенне-летнее увеличение переноса озона хорошо согласуется с литературными данными для Северного полушария. Учитывая, что объемная доля приземного воздуха, которая могла быть перенесена из стратосферы, обычно составляет от 2–3 % (до максимальных 5 %), можно ввести коэффициент K %, который соответствует стратосферному переносу, и варьируется от 2 % до 5 %.

Было принято, что стратосферное значение для ^7Be , равное $100 \text{ МБк} \cdot \text{м}^{-3}$, находится в диапазоне уровней ^7Be в нижней стратосфере [36]. Для озона мы предположили значение в нижней стратосфере 250 ppb на основе среднегодового значения озона на высотах между 200 и 250 гПа [36]. Предполагая $K=5\%$, для среднего

значения ПО около 50 ppb, ожидается рост концентрации на 10 ppb, что соответствует увеличению ^7Be на $5 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$. В среднем, каждое увеличение ^7Be на $1 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$

соответствует вторжению озона, увеличивающему поверхностную концентрацию на 2,5 ppb [36].

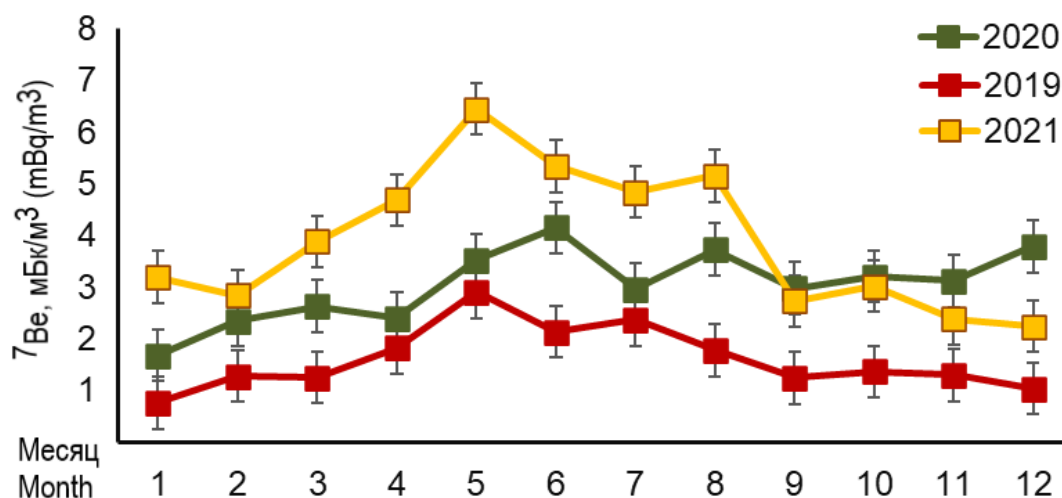


Рисунок 4. Изменение концентрации ^7Be в атмосферных аэрозолях в течение 2019–2021 гг.

Figure 4. Change of ^7Be concentration in atmospheric aerosols during 2019–2021

Из табл. 3 и рис. 4 следует, что фоновое значение ПО за трехлетний период 2019–2021 гг. изменялось пропорционально изменению концентрации ^7Be в аэрозолях и с большой долей вероятности стратосферные вторжения вносят вклад в концентрацию ПО в Челябинске от 4 до 9,8 ppb.

В дополнение к глубоким струйным течениям, которые приводят к СВ озона, увеличению концентрации ПО могут способствовать НУМСТ. Мезо- и мелкомасштабные потоки могут вызывать сложную вертикальную слоистую структуру атмосферы [37], частота возникновения их увеличивается в ночной период весной и летом. Гипотеза горизонтального переноса озона в ночной период из пригорода была опровергнута путем анализа нескольких эпизодов на восьми, расположенных в разных частях города постах государственного мониторинга (данные не приведены этой статье, так как публикация столь детальных результатов мониторинга с указанием координат постов и фактических измерений по всему городу может угрожать обеспечению государственной безопасности). Выбранный пост мониторинга, находится в центре города, если бы наблюдались горизонтальные переносы, то на постах, расположенных ближе к окраинам города концентрация озона в течение ночи росла в первую очередь, постепенно уменьшаясь к центру. Такого не наблюдалось. Также не нашла своего подтверждения первичная гипотеза о том, что эпизоды ночных повышений озона связаны с синоптическими ситуациями (гребень циклона, например), приводящими к вертикальному переносу озона, накопленного в тропосферных складках. Логично заключить, что в этом случае ночное повышение озона наблюдалось бы редко и на всех постах одновременно. В проанализированных эпизодах ночные превышения ПО наблюдались только на выборочных постах, всегда в разных районах и в разный временной интервал, при этом частота событий составляла до трети ночей в году. Таким образом, мы пришли к выводу, что в условиях стабильного ночного пограничного слоя, при отсутствии известных источников загрязнения ПО и в отсутствие фотохимических процессов, НПСО могут быть объяснены только

низкоуровневым вертикальным перемешиванием и переносом озона из верхних слоев на поверхность путем НУМСТ. За исследуемый период было зафиксировано 86, 158 и 174 эпизодов НПСО в 2019, 2020 и 2021 годах, соответственно (рис. 5; табл. 5).

В январе число дней с НПСО, как правило, незначительно, оно начинает увеличиваться в феврале, достигая высоких значений в марте-мае, в это же время увеличивается концентрация озона, что обусловлено процессами вертикального переноса за счет образования НУМСТ. В это время фотохимические процессы также ускоряются, но не вносят большого вклада в формирование весеннего максимума озона.

В период летнего фотохимического загрязнения интенсивная солнечная радиация и высокая температура окружающего воздуха днем приводят к образованию больших количеств O_3 . Фотохимический озон, синтезированный днем, может накапливаться в пределах конвективного пограничного слоя. После захода Солнца ночью формируется приповерхностный устойчивый пограничный слой, а в верхней части пограничного слоя атмосферы формируется остаточный слой, в котором еще сохраняются высокие концентрации озона. Между 21:00 и 06:00 концентрация озона в остаточном слое уменьшается из-за горизонтального и вертикального переноса, увеличивая концентрацию озона у поверхности [38]. Кроме того, следует отметить, что крупномасштабная урбанизация в регионе изменяет локальные циркуляции с ее чрезмерным тепловым потоком и повышенной шероховатостью поверхности [39]. Городской остров тепла, создаваемый тепловым контрастом между городским центром и прилегающей территорией, создает конвергентный поток в городской центр. В Челябинске крупные металлургические заводы оказывают значительное влияние на формирование городского острова тепла. Модельные расчеты показали [40], что высокие температуры в промышленных районах соответствуют области дивергенции поверхности, создающей нисходящее вертикальное движение воздуха и влияющей на концентрации загрязняющих веществ в воздухе. Таким образом, фотосинтезированный озон в

ночной период не только не разрушается полностью, но и может переноситься на некоторые расстояния, в том числе из промышленных районов, где концентрации предиктов

озона высоки, в центр города, а формирование НУМСТ способствует повышению концентрации озона в ночное время в центре города на изучаемом посту мониторинга.

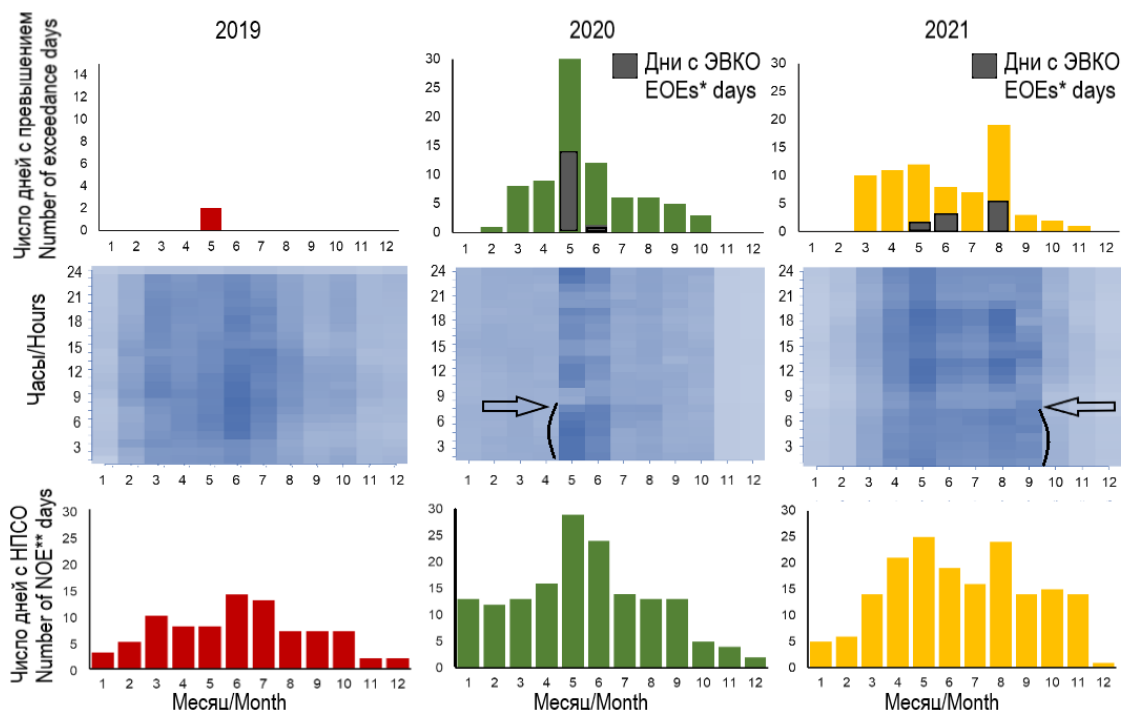


Рисунок 5. Ежемесячные события НПСО в 2019–2021 гг.

Figure 5. Monthly events of nighttime ozone increases in 2019–2021

Таблица 5. Количество дней с НПСО в 2019–2021 гг.

Table 5. Number of days with nighttime increases in ozone levels in 2019–2021

Месяц Month	2019	2020	2021
1	3	13	5
2	5	12	6
3	10	13	14
4	8	16	21
5	8	29	25
6	14	24	19
7	13	14	16
8	7	13	24
9	7	13	14
10	7	5	15
11	2	4	14
12	2	2	1
Итого / Total	86	158	174

Именно совокупностью фотохимических процессов образования озона и наличием НУМСТ обусловлено аномальное повышение концентрации ПО в мае 2020 года. Рассмотрим этот эпизод более подробно. Май стал месяцем полного карантина COVID-19 в Челябинске. Концентрация оксидов азота в приземном воздухе снизилась до значений, близких к нулю (рис. 1), из-за снижения как выбросов производства, так и автотранспорта. В период с 5 по 10 мая погоду на Урале формировал мощный высотный антициклон, центр которого длительное время располагался над северным Казахстаном, наблюдалась аномально жаркая погода, когда воздух прогревался днем до 25–27 градусов. С 12 мая циркуляция атмосферы изменилась, и Южный Урал оказался на юго-восточной периферии высотного циклона. С 25 мая Челябинская область вновь оказалась в высотном

хребте, по-летнему жаркая погода наблюдалась 24–25 и 28–31 мая, днем воздух прогревался до 28–35 градусов. В течение месяца наблюдалось 30 дней с температурными инверсиями, общей продолжительностью 269 часов. Высокие температуры способствовали активным фотохимическим процессам образования ПО, инверсии препятствовали рассеиванию предиктов и образовавшегося O_3 . На рис. 5 видно, что для мая 2020 года характерны выраженные НПСО, что косвенно согласно принятой нами методологии свидетельствует о формировании НУМСТ в ночное время и накоплению озона в приземном слое. Из-за карантина COVID-19 объем антропогенных выбросов NO_x снизился, образовавшийся озон не снижался за счет оттитровывания оксидами азота, что способствовало формированию режима красной опасности (табл. 2). В это время население Челябинска

было значительно инфицировано COVID-19, а это значит, что практически все население находилось в зоне риска по озону, так как чувствительность к нему, очевидно, возросла из-за инфекции. Это могло способствовать тому, что Челябинск попал в список городов России с самой высокой избыточной смертностью в 2020 году – 1581 человек на 100 000 населения, заняв 11-е место в списке из 83 регионов по данным [41]. В первой декаде июня 2020 года также наблюдался период антициклона с высокими температурами. Самая высокая максимальная температура была зафиксирована 11 июня (плюс 33°C). В течение июня 2020 года было 12 дней с концентрацией ПО, превышающей 50 ppb и один день ЭВКО. Интересно, что в июле 2020 года также наблюдалась высокая температура и мощная волна тепла продолжительностью 13 дней. Среднемесячная температура воздуха в Челябинске составила плюс 22,7 °С, что на 3,8° выше нормы. Самыми жаркими были конец первой и вся вторая декада месяца, 10–11, 13–19 июля днем воздух прогревался до 35–37 °С. Однако среднемесячная концентрация озона была ниже, чем в июне, и было всего 6 дней с концентрацией ПО, превышающей 50 ppb. В целом, хотя июль обычно является самым жарким месяцем в году, и было бы логично, что на него

приходится наибольшее производство фотохимического озона, но в 2019–2022 годах июль не стал месяцем летнего максимума ПО. Интенсивность солнечного света наиболее высока в период летнего солнцестояния (21 июня), но пик температуры наступает позже из-за тепловой инерции. Поскольку образование озона зависит от УФ-излучения, в июне могут быть более благоприятные фотохимические условия, несмотря на жаркий июль. Биогенные ЛОС также влияют на ПО. Деревья выделяют изопрен и терпены (природные ЛОС), которые способствуют образованию ПО. В европейских регионах пиковые биогенные выбросы происходят в июне или начале лета, когда растительность наиболее активна, а не в самую жаркую часть лета. К июлю стресс от засухи или снижение активности растений могут снизить выделение ЛОС [42].

Наши исследования показали, что случаи НПСО способствуют более высоким концентрациям озона на следующий день (рис. 6). Ночное повышение озона приводит к увеличению окислительной способности атмосферы и стимулирует образованию радикалов NO_3 , что, в свою очередь, влияет на образование и распределение вторичных загрязняющих веществ на следующий день [43].

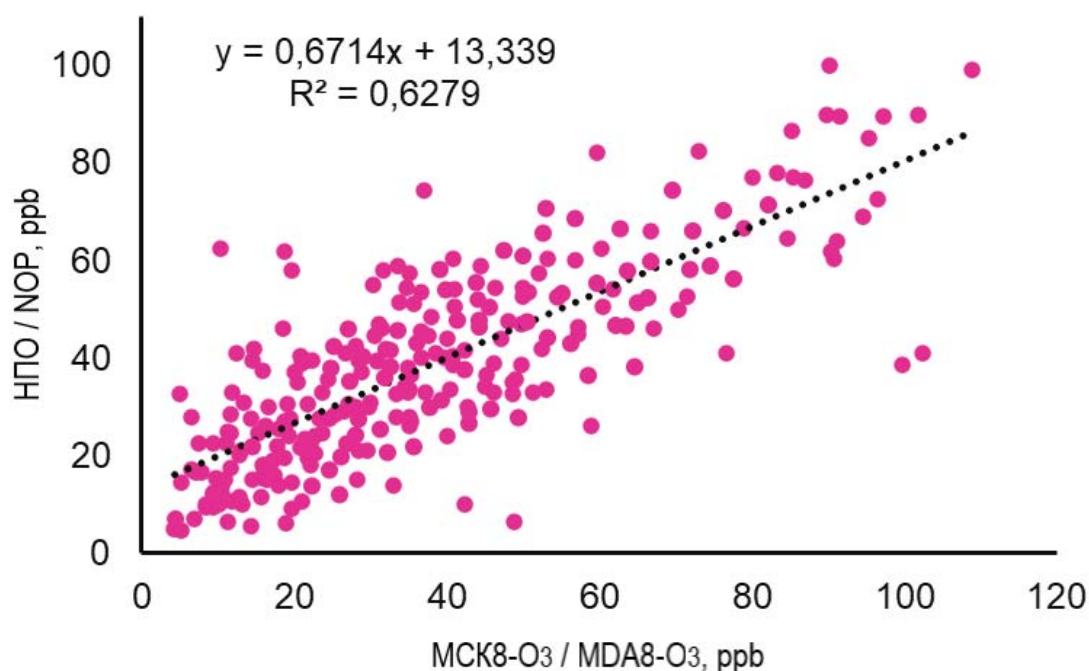


Рисунок 6. Соотношение между величинами НПО и MCK8-O₃ на следующий день

Figure 6. The relationship between NOP value and MDA8-O₃ during following days

Основываясь на предыдущих исследованиях [43], мы использовали 40 ppb в качестве порогового значения. В течение исследуемого периода 2019–2021 гг. было в общей сложности 205 дней событий НПСО, когда значения НПО превышали этот порог, что составляет 49 % от общего числа событий НПСО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были изучены закономерности изменения концентраций приземного озона в масштабе промышленного российского города в течение 2019–2021 гг. Было показано, что основными источниками озона являются: (1) стратосферные вторжения, определяющие фоновое содержание озона от 4 до 9,8 ppb; (2) фотохимический

синтез с максимумом в июне; (3) низкоуровневые переносы, являющиеся также причиной частого (до трети суток в году) ночного повышения концентрации озона. Соотношение концентраций формальдегида и оксидов азота, измеренных на станциях мониторинга качества воздуха (наземные измерения), не является надежным параметром для определения режима образования озона.

По-видимому, на существование низкоуровневых горизонтальных переносов озона оказывает значительное влияние локальный остров тепла, сформированный над крупным металлургическим предприятием в промышленной зоне города. Разности температур между центральной частью города и промышленной зоной способствуют конвективным переносам озона.

Мониторинг содержания приземного озона в период локдауна показал, что при снижении выбросов оксидов азота на территории промышленного города могут создаваться условия для накопления экстремально высоких концентраций озона. К таким условиям относятся блокирующий антициклон, температурные инверсии, длительные волны тепла, при которых в условиях насыщения воздуха биогенными ЛОС происходит синтез озона в высоких концентрациях, а при низких концентрациях оксидов азота он не успевает оттитровываться. Таким образом, хотя в период локдауна концентрация оксидов азота была низкой, создались условия накопления озона до красного уровня опасности, когда у представителей уязвимых групп населения могли возникнуть серьезные последствия для здоровья.

Существует значительная взаимосвязь между ночными пиковыми концентрациями озона и его повышенным содержанием на следующий день. Это может быть важным при формировании целевых стратегий снижения содержания приземного озона в воздухе промышленного города. Учитывая изменчивость и сложность процессов, влияющих на концентрацию приземного озона, будущие исследования должны быть сосредоточены на выявлении многомасштабных движущих факторов и использовании современных моделей искусственного интеллекта для повышения точности прогнозирования качества атмосферного воздуха. Такие усилия будут в значительной степени способствовать более эффективному управлению приземным озоном в городах, улучшению здоровья граждан и продвижению устойчивого глобального экологического развития.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20017 и при финансовой поддержке Правительства Челябинской области. Авторы хотели бы поблагодарить Екатерину Выходцеву за помощь в интерпретации синоптической ситуации. Мы благодарим сотрудников лаборатории Челябинского центра гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды за анализ бериллия-7. Наземные наблюдения и метеорологические данные предоставлены Челябинским центром гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды (<http://chelpogoda.ru>).

ACKNOWLEDGMENTS

This project was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-27-20017 and by the financial support of the Government of Chelyabinsk Region.

The authors would like to thank Ekaterina Vykhotseva for her help in interpreting the synoptic situation. We thank the laboratory of Chelyabinsk Centre for Hydrometeorology and Environmental Monitoring staff for analysis of beryllium-7. The ground-based observations and meteorological data were provided by the Chelyabinsk Centre for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (<http://chelpogoda.ru>).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization. 2021.
2. Ni J., Jin J., Wang Y., Li B., Wu Q., Chen Y., Du S., Li Y., He C. Surface ozone in global cities: A synthesis of basic features, exposure risk, and leading meteorological driving factors // *Geography and Sustainability*. 2024. V. 5. N 3. P. 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2023.09.008>

3. Khalil M.A.K. Steady states and transport processes in urban ozone balances // *Npj Climate and Atmospheric Science*. 2018. V. 1. N 22. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0035-7>
4. Fried A., Cantrell C., Olson J. et al. Detailed comparisons of airborne formaldehyde measurements with box models during the 2006 INTEX-B and MILAGRO campaigns: potential evidence for significant impacts of unmeasured and multi-generation volatile organic carbon compounds // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2011. V. 11. N 22. P. 11867–11894. <https://doi.org/10.5194/acp-11-11867-2011>
5. Schroeder J.R. et al. Formaldehyde column density measurements as a suitable pathway to estimate near-surface ozone tendencies from space // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2016. V. 121. P. 13088–13112. <https://doi.org/10.1002/2016JD025419>
6. Wang D., Pu D., De Smedt I. et al. Evolution of global O₃-NO_x-VOCs sensitivity before and after the COVID-19 from the ratio of formaldehyde to NO₂ from satellite observations // *Journal of Environmental Sciences*. 2025. V. 156. P. 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.07.029>
7. Wang W., Van der A.R., Ding J., Van Weele M., Cheng T. Spatial and temporal changes of the ozone sensitivity in China based on satellite and ground-based observations // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021. V. 21. P. 7253–7269. <https://doi.org/10.5194/acp-21-7253-2021>
8. Colombi N.K., Jacob D.J., Yang L.H. et al. Why is ozone in South Korea and the Seoul metropolitan area so high and increasing? // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2023. V. 23. P. 4031–4044. <https://doi.org/10.5194/acp-23-4031-2023>
9. Chen Z., Liu J., Qie X. et al. Stratospheric influence on surface ozone pollution in China // *Nature Communications*. 2024. V. 15. Article ID: 4064. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48406-x>
10. Chang F., Li J., Li N., Liao H. Stratospheric intrusion may aggravate widespread ozone pollution through both vertical and horizontal advections in eastern China during summer // *Frontiers in Environmental Science*. 2023. V. 10. Article ID: 1115746. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1115746>
11. Bonasoni P., Evangelisti F., Bonafe U. et al. Stratospheric ozone intrusion episodes recorded at Mt. Cimone during the VOTALP project: case studies // *Atmospheric Environment*. 2000. V. 34. N 9. P. 1355–1365. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(99\)00280-0](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(99)00280-0)
12. Gaffney J.S., Marley N.A., Cunningham M.M., Kotamarthi V.R. Beryllium-7 measurements in the Houston and Phoenix urban areas: an estimation of upper atmospheric ozone contributions // *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2005. V. 55. N 8. P. 1228–1235. <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464707>
13. Chang L., Xu J., Tie X. et al. The impact of Climate Change on the Western Pacific Subtropical High and the related ozone pollution in Shanghai, China // *Scientific Reports*. 2019. V. 9. Article ID: 16998. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53103-7>
14. Massagué J., Torre-Pascual E., Carnerero C. et al. Extreme ozone episodes in a major Mediterranean urban area // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2024. V. 24. P. 4827–4850. <https://doi.org/10.5194/acp-24-4827-2024>
15. Romero-Alvarez J., Lupaşcu A., Lowe D., Badia A. et al. Sources of surface O₃ in the UK: tagging O₃ within WRF-Chem // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022. V. 22. P. 13797–13815. <https://doi.org/10.5194/acp-22-13797-2022>
16. Alduwais A.K., Dasari H.P., Gandham H. et al. Extreme surface ozone episodes over the Arabian Gulf and their relationship with meteorological conditions // *Atmospheric Environment*. 2025. V. 352. Article ID: 121213. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2025.121213>
17. Lin X., Yuan Z., Yang L., Luo H., Li W. Impact of Extreme Meteorological Events on Ozone in the Pearl River Delta, China // *Aerosol and Air Quality Research*. 2019. V. 19. P. 1307–1324. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.01.0027>
18. Vienne M., Dore A.J., Stevenson D.S. et al. Modelling surface ozone during the 2003 heat-wave in the UK // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2010. V. 10. P. 7963–7978. <https://doi.org/10.5194/acp-10-7963-2010>
19. Yang X., Zeng G., Iyakaremye V., Zhu B. Effects of different types of heat wave days on ozone pollution over Beijing-Tianjin-Hebei and its future projection // *Science of the Total Environment*. 2022. V. 837. Article ID: 155762. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155762>
20. Kuznetsova I., Elanskii N.F., Shalygina I.Yu., Kadyrov E., Lykov A.D. Temperature inversions and their influence on surface ozone concentration in the vicinity of the town of Kislovodsk // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2002. P. 27–35.
21. Shariepour Z., Aliakbari Bidokhti A.A. Investigation of surface ozone over Tehran for 2008–2011 // *Journal of the Earth and Space Physics*. 2013. V. 39. N 3. P. 191–206. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2013.35607>
22. An C., Li H., Ji Y. et al. A review on nocturnal surface ozone enhancement: Characterization, formation causes, and atmospheric chemical effects // *Science of The Total Environment*. 2024. V. 921. Article ID: 170731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170731>

23. Agathokleous E., Feng Z., Sicard H. Surge in nocturnal ozone pollution // *Science*. 2023. V. 382. N 6675. Article ID: 1131. <https://doi.org/10.1126/science.adm7628>
24. Rohit S., Kamna S., Anu R.S. Variations of surface ozone levels in urban area of India: a focus on night-time residual concentrations // *Journal of Environmental Quality*. 2021. V. 42. P. 22–35. <https://doi.org/10.6092/issn.2281-4485/10809>
25. Li X., Ren J., Huang R. et al. The aggravation of summertime nocturnal ozone pollution in China and its potential impact on the trend of nitrate aerosols // *Geophysical Research Letters*. 2023. V. 50. Article ID: e2023GL103242. <https://doi.org/10.1029/2023gl103242>
26. He C., Lu X., Wang H. et al. The unexpected high frequency of nocturnal surface ozone enhancement events over China: characteristics and mechanisms // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022. V. 22. P. 15243–15261. <https://doi.org/10.5194/acp-22-15243-2022>
27. Krupnova T.G., Rakova O.V., Simakhina V.I., Vykhodtseva E.A., Kochegorov V.M. Surface ozone in the industrial city of Chelyabinsk, Russia // *Geography, environment, sustainability*. 2024. V. 17. N 4. P. 223–234. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2024-3364>
28. Donzelli G., Cioni L., Cancellieri M., Llopis-Morales A., Morales-Suárez-Varela M. Air Quality during Covid-19 Lockdown // *Encyclopedia*. 2021. V. 1. N 3. P. 519–526. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia1030043>
29. Крупнова Т.Г., Ракова О.В., Стручкова Г.П., Капитонова Т.А., Тихонова С.А., Выходцева Е.А., Кочегоров В.М. Обнаружение возможности оценки режимов образования приземного озона на основе данных дистанционного зондирования Земли // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2025. Т. 22. N 5. С. 385–397. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-5-385-397>
30. Fontes T., Silva L.M., Silva M.P., Barros N., Carvalho A.C. Can artificial neural networks be used to predict the origin of ozone episodes? // *Science of the Total Environment*. 2014. V. 488–489. P. 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.077>
31. Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н., Ганьшин Е.В. и др. Современный опыт использования данных наземных микроволновых радиометрических систем для измерения параметров атмосферы // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30. N 06. С. 502–508. <https://doi.org/10.15372/AOO20170609>
32. Fang C., Zhou X., Cai Y., Wang J. Characterization and atmospheric drivers of nocturnal ozone enhancement in Putian City, China // *Atmosphere*. 2025. V. 16. N 45. <https://doi.org/10.3390/atmos16010045>
33. United States Environmental Protection Agency. Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI). NC, 2024. 32 p.
34. Monks P.S. A review of the observations and origins of the spring ozone maximum // *Atmospheric Environment*. 2000. V. 34. N 21. P. 3545–3561. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00129-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00129-1)
35. Shutter J.D., Cox J.L., Keutsch F.N. Leaf-Level bidirectional exchange of formaldehyde on deciduous and evergreen tree saplings // *ACS Earth and Space Chemistry*. 2024. V. 18. N 8. P. 723–733. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.3c00325>
36. Gerasopoulos E., Zanis P., Papastefanou C. et al. A complex case study of down to the surface intrusions of persistent stratospheric air over the Eastern Mediterranean // *Atmospheric Environment*. 2006. V. 40. N 22. P. 4113–4125. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.022>
37. Couillard M.H., Schwab M.J., Schwab J.J. et al. Vertical profiles of ozone concentrations in the lower troposphere downwind of New York City during LISTOS 2018-2019 // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2021. V. 126. Article ID: e2021JD035108. <https://doi.org/10.1029/2021JD035108>
38. Pan R., Zhang K., Chen D., Huang L., Wang Y., Li H., Li L. Investigation into the nocturnal ozone in a typical industrial city in North China Plain, China // *Environmental Pollution*. 2024. V. 360. Article ID: 124627. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124627>
39. Yang H., Lu C., Hu Y., Chan P.-W., Li L., Zhang L. Effects of horizontal transport and vertical mixing on nocturnal ozone pollution in the Pearl River delta // *Atmosphere*. 2022. V. 13. N 8. Article ID: 1318. <https://doi.org/10.3390/atmos13081318>
40. Luo H., Lu C. Impacts of local circulations on ozone pollution in the New York metropolitan area: Evidence from three summers of observations // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2024. V. 129. Article ID: e2023JD039206. <https://doi.org/10.1029/2023JD039206>
41. Timonin S., Klimkin I., Shkolnikov V.M., Andreev E., McKee M., Leon D.A. Excess mortality in Russia and its regions compared to high income countries: An analysis of monthly series of 2020 // *SSM Population Health*. 2021. V. 17. Article ID: 101006. <https://doi.org/10.1016/j.ssmph.2021.101006>
42. Trimmel H., Hamer P.D., Mayer M. et al. The influence of vegetation drought stress on formaldehyde and ozone distributions over a central European city // *Atmospheric Environment*. 2023. V. 304. Article ID: 119768. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119768>
43. Zhu L., Han X., Xu L.R. et al. Nocturnal ozone enhancement in Shandong Province, China, in 2020-2022: spatiotemporal distribution and formation mechanisms // *Science of the Total Environment*. 2024. V. 925. Article ID: 171542. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.171542>

REFERENCES

1. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva, World Health Organization, 2021.
2. Ni J., Jin J., Wang Y., Li B., Wu Q., Chen Y., Du S., Li Y., He C. Surface ozone in global cities: A synthesis of basic features, exposure risk, and leading meteorological driving factors *Geography and Sustainability*, 2024, vol. 5, no. 3, pp. 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2023.09.008>
3. Khalil M.A.K. Steady states and transport processes in urban ozone balances. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 2018, vol. 1, no. 22. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0035-7>
4. Fried A., Cantrell C., Olson J. et al. Detailed comparisons of airborne formaldehyde measurements with box models during the 2006 INTEx-B and MILAGRO campaigns: potential evidence for significant impacts of unmeasured and multi-generation volatile organic carbon compounds. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, vol. 11, no. 22, pp. 11867–11894. <https://doi.org/10.5194/acp-11-11867-2011>
5. Schroeder J.R. et al. Formaldehyde column density measurements as a suitable pathway to estimate near-surface ozone tendencies from space. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, vol. 121, pp. 13088–13112. <https://doi.org/10.1002/2016JD025419>
6. Wang D., Pu D., De Smedt I. et al. Evolution of global O₃-NO_x-VOCs sensitivity before and after the COVID-19 from the ratio of formaldehyde to NO₂ from satellite observations. *Journal of Environmental Sciences*, 2025, vol. 156, pp. 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.07.029>
7. Wang W., Van der A R., Ding J., Van Weele M., Cheng T. Spatial and temporal changes of the ozone sensitivity in China based on satellite and ground-based observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, vol. 21, pp. 7253–7269. <https://doi.org/10.5194/acp-21-7253-2021>
8. Colombi N.K., Jacob D.J., Yang L.H. et al. Why is ozone in South Korea and the Seoul metropolitan area so high and increasing? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023, vol. 23, pp. 4031–4044. <https://doi.org/10.5194/acp-23-4031-2023>
9. Chen Z., Liu J., Qie X. et al. Stratospheric influence on surface ozone pollution in China. *Nature Communications*, 2024, vol. 15, article id: 4064. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48406-x>
10. Chang F., Li J., Li N., Liao H. Stratospheric intrusion may aggravate widespread ozone pollution through both vertical and horizontal advections in eastern China during summer. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, vol. 10, article id: 1115746. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1115746>
11. Bonasoni P., Evangelisti F., Bonafe U. et al. Stratospheric ozone intrusion episodes recorded at Mt. Cimone during the VOTALP project: case studies. *Atmospheric Environment*, 2000, vol. 34, no. 9, pp. 1355–1365. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00280-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00280-0)
12. Gaffney J.S., Marley N.A., Cunningham M.M., Kotamarthi V.R. Beryllium-7 measurements in the Houston and Phoenix urban areas: an estimation of upper atmospheric ozone contributions. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2005, vol. 55, no. 8, pp. 1228–1235. <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464707>
13. Chang L., Xu J., Tie X. et al. The impact of Climate Change on the Western Pacific Subtropical High and the related ozone pollution in Shanghai, China. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, article id: 16998. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53103-7>
14. Massagué J., Torre-Pascual E., Carnerero C. et al. Extreme ozone episodes in a major Mediterranean urban area. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2024, vol. 24, pp. 4827–4850. <https://doi.org/10.5194/acp-24-4827-2024>
15. Romero-Alvarez J., Lupaşcu A., Lowe D., Badia A. et al. Sources of surface O₃ in the UK: tagging O₃ within WRF-Chem. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, vol. 22, pp. 13797–13815. <https://doi.org/10.5194/acp-22-13797-2022>
16. Alduwais A.K., Dasari H.P., Gandham H. et al. Extreme surface ozone episodes over the Arabian Gulf and their relationship with meteorological conditions. *Atmospheric Environment*, 2025, vol. 352, article id: 121213. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2025.121213>
17. Lin X., Yuan Z., Yang L., Luo H., Li W. Impact of Extreme Meteorological Events on Ozone in the Pearl River Delta, China. *Aerosol and Air Quality Research*, 2019, vol. 19, pp. 1307–1324. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.01.0027>
18. Vieno M., Dore A.J., Stevenson D.S. et al. Modelling surface ozone during the 2003 heat-wave in the UK. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, vol. 10, pp. 7963–7978. <https://doi.org/10.5194/acp-10-7963-2010>
19. Yang X., Zeng G., Iyakaremye V., Zhu B. Effects of different types of heat wave days on ozone pollution over Beijing-Tianjin-Hebei and its future

- projection. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 837, article id: 155762. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155762>
20. Kuznetsova I., Elanskii N.F., Shalygina I.Yu., Kadyrov E., Lykov A.D. Temperature inversions and their influence on surface ozone concentration in the vicinity of the town of Kislovodsk. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2002, pp. 27–35.
21. Shariipour Z., Aliakbari Bidokhti A.A. Investigation of surface ozone over Tehran for 2008–2011. *Journal of the Earth and Space Physics*, 2013, vol. 39, no. 3, pp. 191–206. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2013.35607>
22. An C., Li H., Ji Y. et al. A review on nocturnal surface ozone enhancement: Characterization, formation causes, and atmospheric chemical effects. *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 921, article id: 170731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170731>
23. Agathokleous E., Feng Z., Sicard H. Surge in nocturnal ozone pollution. *Science*, 2023, vol. 382, no. 6675, article id: 1131. <https://doi.org/10.1126/science.adm7628>
24. Rohit S., Kamna S., Anu R.S. Variations of surface ozone levels in urban area of India: a focus on night-time residual concentrations. *Journal of Environmental Quality*, 2021, vol. 42, pp. 22–35. <https://doi.org/10.6092/issn.2281-4485/10809>
25. Li X., Ren J., Huang R. et al. The aggravation of summertime nocturnal ozone pollution in China and its potential impact on the trend of nitrate aerosols. *Geophysical Research Letters*, 2023, vol. 50, article id: e2023GL103242. <https://doi.org/10.1029/2023gl103242>
26. He C., Lu X., Wang H. et al. The unexpected high frequency of nocturnal surface ozone enhancement events over China: characteristics and mechanisms. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, vol. 22, pp. 15243–15261. <https://doi.org/10.5194/acp-22-15243-2022>
27. Krupnova T.G., Rakova O.V., Simakhina V.I., Vykhotseva E.A., Kochegorov V.M. Surface ozone in the industrial city of Chelyabinsk, Russia. *Geography, environment, sustainability*, 2024, vol. 17, no. 4, pp. 223–234. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2024-3364>
28. Donzelli G., Cioni L., Cancellieri M., Llopis-Morales A., Morales-Suárez-Varela M. Air Quality during Covid-19 Lockdown. *Encyclopedia*, 2021, vol. 1, no. 3, pp. 519–526. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia1030043>
29. Krupnova T.G., Rakova O.V., Struchkova G.P., Kapitonova T.A., Tikhonova S.A. Vykhotseva E.A., Kochegorov V.M. Discovery of the possibility of assessing surface ozone formation regimes based on Earth remote sensing data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, vol. 22, no. 5, pp. 385–397. (In Russian) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-5-385-397>
30. Fontes T., Silva L.M., Silva M.P., Barros N., Carvalho A.C. Can artificial neural networks be used to predict the origin of ozone episodes? *Science of the Total Environment*, 2014, vol. 488–489, pp. 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.077>
31. Kadyrov E.N., Kuznetsova I.N., Ganshin E.V. et al. Modern experience of using ground-based microwave radiometric systems for the study of atmospheric parameters. *Optika Atmosfery i Okeana*, 2017, vol. 30, no. 06, pp. 502–508. (In Russian) <https://doi.org/10.15372/AOO20170609>
32. Fang C., Zhou X., Cai Y., Wang J. Characterization and atmospheric drivers of nocturnal ozone enhancement in Putian City, China. *Atmosphere*, 2025, vol. 16, no. 45. <https://doi.org/10.3390/atmos16010045>
33. United States Environmental Protection Agency. Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI). NC, 2024, 32 p.
34. Monks P.S. A review of the observations and origins of the spring ozone maximum. *Atmospheric Environment*, 2000, vol. 34, no. 21, pp. 3545–3561. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(00\)00129-1](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(00)00129-1)
35. Shutter J.D., Cox J.L., Keutsch F.N. Leaf-Level bidirectional exchange of formaldehyde on deciduous and evergreen tree saplings. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2024, vol. 18, no. 8, pp. 723–733. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.3c00325>
36. Gerasopoulos E., Zanis P., Papastefanou C. et al. A complex case study of down to the surface intrusions of persistent stratospheric air over the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment*, 2006, vol. 40, no. 22, pp. 4113–4125. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.022>
37. Couillard M.H., Schwab M.J., Schwab J.J. et al. Vertical profiles of ozone concentrations in the lower troposphere downwind of New York City during LISTOS 2018–2019. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, vol. 126, article id: e2021JD035108. <https://doi.org/10.1029/2021JD035108>
38. Pan R., Zhang K., Chen D., Huang L., Wang Y., Li H., Li L. Investigation into the nocturnal ozone in a typical industrial city in North China Plain, China. *Environmental Pollution*, 2024, vol. 360, article id: 124627. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124627>
39. Yang H., Lu C., Hu Y., Chan P.-W., Li L., Zhang L. Effects of horizontal transport and vertical mixing on nocturnal ozone pollution in the Pearl River delta. *Atmosphere*, 2022, vol. 13, no. 8, article id: 1318. <https://doi.org/10.3390/atmos13081318>
40. Luo H., Lu C. Impacts of local circulations on ozone pollution in the New York metropolitan area: Evidence from three summers of observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2024, vol. 129, article id: e2023JD039206. <https://doi.org/10.1029/2023JD039206>
41. Timonin S., Klimkin I., Shkolnikov V.M., Andreev E., McKee M., Leon D.A. Excess mortality in Russia and its regions compared to high income countries: An analysis of monthly series of 2020. *SSM Population Health*, 2021, vol. 17, article id: 101006. <https://doi.org/10.1016/j.ssmph.2021.101006>
42. Trimmel H., Hamer P.D., Mayer M. et al. The influence of vegetation drought stress on formaldehyde and ozone distributions over a central European city. *Atmospheric Environment*, 2023, vol. 304, article id: 119768. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119768>
43. Zhu L., Han X., Xu L.R. et al. Nocturnal ozone enhancement in Shandong Province, China, in 2020–2022: spatiotemporal distribution and formation mechanisms. *Science of the Total Environment*, 2024, vol. 925, article id: 171542. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.171542>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Татьяна Г. Крупнова написала первоначальный черновик статьи, провела визуализацию, валидацию, методологическую работу, исследование, формальный анализ и концептуализацию. Ольга В. Ракова отрецензировала и отредактировала статью, занималась валидацией, исследованием и концептуализацией. Валерий М. Кочегоров отрецензировал и отредактировал статью, участвовал в концептуализации. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Tatyana G. Krupnova undertook writing of original draft, visualisation, validation, methodology, investigation, formal analysis and conceptualisation. Olga V. Rakova writing undertook review and editing, validation, investigation and conceptualisation. Valeriy M. Kochegorov undertook writing, review and editing and conceptualization. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Татьяна Г. Крупнова / Tatyana G. Krupnova <https://orcid.org/0000-0003-0862-710X>

Ольга В. Ракова / Olga V. Rakova <https://orcid.org/0000-0002-5788-5933>

Валерий М. Кочегоров / Valeriy M. Kochegorov <https://orcid.org/0009-0003-5238-099X>

Теоретические и методические основы организационно-экономического обеспечения и экологическая эффективность внедрения возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан

Лейла Ш. Ахмедова¹, Наида А. Амадзиева², Гаджимурад И. Идзиев², Раисат Т. Раджабова¹,
Залимхан М. Султанов¹

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

²Институт социально-экономических исследований, Дагестанский федеральный исследовательский центр
Российской академии наук, Махачкала, Россия

Контактное лицо

Лейла Ш. Ахмедова, кандидат биологических наук, доцент, кафедра рекреационной географии и устойчивого развития, Дагестанский государственный университет; 367000 Россия, г. Махачкала, ул. Дахадаева, 21.

Тел. +79154706260

Email geoleyla@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1347-1429>

Формат цитирования

Ахмедова Л.Ш., Амадзиева Н.А., Идзиев Г.И., Раджабова Р.Т., Султанов З.М. Теоретические и методические основы организационно-экономического обеспечения и экологическая эффективность внедрения возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 255-261.
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-23

Получена 1 октября 2025 г.

Прошла рецензирование 15 октября 2025 г.

Принята 31 октября 2025 г.

Резюме

Данное исследование посвящено комплексному анализу теоретических и методических основ организационно-экономического обеспечения внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в Республике Дагестан, а также оценке экологической эффективности их использования. На основе критического обзора актуальной литературы выявлены ключевые пробелы в изучении данной проблематики и обоснована необходимость развития методологического аппарата для адекватной оценки потенциала ВИЭ в регионе. С использованием эконометрического моделирования и сравнительного анализа на репрезентативной выборке данных за период 2010–2023 гг. выявлены основные факторы, определяющие экономическую и экологическую эффективность ВИЭ в Дагестане. Показано, что ключевыми барьерами для масштабного внедрения ВИЭ являются высокие начальные капитальные затраты, недостаточно развитая институциональная среда и низкий уровень осведомленности населения. В то же время, использование ВИЭ позволяет существенно снизить выбросы парниковых газов и других загрязняющих веществ, диверсифицировать энергобаланс региона и создать новые рабочие места. Полученные результаты имеют значимую теоретическую ценность для развития концепции устойчивой энергетики и практическую применимость для оптимизации региональной энергетической политики.

Ключевые слова

Возобновляемые источники энергии, организационно-экономическое обеспечение, экологическая эффективность, устойчивое развитие, региональная энергетика, Республика Дагестан.

Theoretical and methodological foundations of organisational and economic support and environmental efficiency of the introduction of renewable energy sources in the Republic of Dagestan

Leyla Sh. Akhmedova¹, Naida A. Amadzieva², Gadzhimurad I. Idziev², Raisat T. Radzhabova¹ and Zelimkhan M. Sultanov¹

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia

²Institute for Social and Economic Research, Dagestan Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia

Principal contact

Leyla Sh. Akhmedova, PhD (Biology), Associate Professor, Department of Recreational Geography and Sustainable Development, Dagestan State University, 21 Dakhadaeva St, Makhachkala, Russia 367000.

Tel. +79154706260

Email geoleyla@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1347-1429>

How to cite this article

Akhmedova L.Sh., Amadzieva N.A., Idziev G.I., Radzhabova R.T., Sultanov Z.M. Theoretical and methodological foundations of organisational and economic support and environmental efficiency of the introduction of renewable energy sources in the Republic of Dagestan. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):255-261. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-23

Received 1 October 2025

Revised 15 October 2025

Accepted 31 October 2025

Abstract

This study is devoted to a comprehensive analysis of the theoretical and methodological foundations of organisational and economic support for the introduction of renewable energy sources (RES) in the Republic of Dagestan, as well as an assessment of the environmental efficiency of their use. Based on a critical review of relevant literature, key gaps in the study of this issue are identified and the need to develop a methodological apparatus for an adequate assessment of the RES potential in the region is substantiated. Using econometric modeling and comparative analysis on a representative sample of data for the period 2010–2023, the main factors determining the economic and environmental efficiency of RES in Dagestan are identified. It is shown that the key barriers to large-scale introduction of RES are high initial capital costs, an insufficiently developed institutional environment and a low level of public awareness. At the same time, the use of RES can significantly reduce emissions of greenhouse gases and other pollutants, diversify the energy balance of the region and create new jobs. The results obtained would have significant theoretical value for the development of the concept of sustainable energy and practical applicability for the optimisation of regional energy policy.

Key Words

Renewable energy sources, organizational and economic support, environmental efficiency, sustainable development, regional energy, Republic of Dagestan.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема перехода к устойчивой низкоуглеродной энергетике является одной из наиболее актуальных в современной экономической науке и практике [1]. Многочисленные исследования показывают, что масштабное внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) способно не только снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду, но и стимулировать инновационное развитие, создавать новые рабочие места, повышать энергетическую безопасность [2]. Однако, несмотря на очевидные преимущества ВИЭ, их доля в глобальном энергобалансе остается относительно невысокой, что во многом обусловлено комплексом экономических, институциональных и социальных барьеров [3].

Особую актуальность проблема развития ВИЭ приобретает для регионов, обладающих значительным потенциалом возобновляемой энергетики, к которым относится и Республика Дагестан. Уникальное географическое положение и природно-климатические условия региона создают предпосылки для эффективного использования солнечной, ветровой, гидро- и геотермальной энергии [4]. Вместе с тем, несмотря на декларируемые приоритеты «зеленого» роста, фактические масштабы внедрения ВИЭ в Дагестане остаются крайне незначительными, а их влияние на динамику социально-экономического развития и качество окружающей среды – малоизученным [5].

Критический анализ литературы показывает, что существующие исследования организационно-экономического обеспечения ВИЭ в Дагестане носят преимущественно фрагментарный и описательный характер, не позволяя комплексно оценить эффективность альтернативной энергетики в контексте устойчивого регионального развития [6]. Остаются нераскрытыми вопросы оптимальных механизмов государственной поддержки ВИЭ, баланса интересов различных стейкхолдеров, адаптации передовых зарубежных практик к региональной специфике [7]. Недостаточная проработанность методологии оценки экологических эффектов ВИЭ затрудняет обоснование их приоритетности в системе целей устойчивого развития региона [8].

Таким образом, целью данного исследования является развитие теоретических и методических основ организационно-экономического обеспечения ВИЭ и оценка эколого-экономической эффективности их внедрения в Республике Дагестан. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проведен систематический обзор современных научных подходов к определению сущности, функций и классификации организационно-экономического обеспечения ВИЭ.

2. Разработан методологический подход к оценке экологической и экономической эффективности ВИЭ на региональном уровне.

3. На основе авторской методики выполнен эконометрический анализ ключевых факторов развития ВИЭ в Республике Дагестан за 2010–2023 гг.

4. Предложен алгоритм оптимизации региональной энергетической политики с учетом императивов низкоуглеродного развития и ресурсных ограничений региона.

Решение поставленных задач позволит не только восполнить пробелы в теоретическом осмыслении организационно-экономического обеспечения ВИЭ, но и сформировать надежную доказательную базу для принятия эффективных управленческих решений в сфере региональной энергетической политики.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения цели исследования и решения поставленных задач использовался комплекс взаимодополняющих методов, адекватных специфике изучаемой проблематики. Теоретико-методологическую основу работы составили фундаментальные положения концепции устойчивого развития, теории региональной экономики, а также современные научные подходы к анализу организационно-экономического обеспечения ВИЭ [2; 4; 6].

В процессе исследования применялись как общенаучные методы (анализ и синтез, индукция и дедукция, абстрагирование, обобщение, сравнение, систематизация), так и специальные методы экономического анализа (экономико-статистический, расчетно-конструктивный, графический, экспертных оценок, SWOT-анализ). Ключевая роль отводилась эконометрическому моделированию на основе панельных данных с использованием программного пакета Stata 14.0.

Информационно-эмпирическую базу исследования составили официальные данные Федеральной службы государственной статистики РФ, Министерства экономики и территориального развития РД, Министерства энергетики РФ, аналитические материалы международных организаций (МЭА, IRENA, WWF) за период 2010–2023 гг. Выборка регионов для сравнительного анализа включала субъекты СКФО, сопоставимые с Республикой Дагестан по уровню социально-экономического развития и структуре энергобаланса.

Для обеспечения надежности и валидности результатов использовался ряд статистических критериев (t-статистика, F-критерий Фишера, коэффициент детерминации, тест Хаусмана). Анализ на мультиколлинеарность и гетероскедастичность не выявил нарушений базовых эконометрических предпосылок. Репрезентативность выборки подтверждена результатами тестов Стьюдента и Колмогорова-Смирнова.

Представленная эконометрическая модель в развернутом виде выглядит следующим образом:

$$SHARE_{i,t,RES} = \beta^0 + \beta^1 INV_{i,t,RES} + \beta^2 PRICE_{i,t} + \beta^3 CO2_{i,t,CAP} + \beta^4 INST_{i,t,QLT} + \beta^5 EMPL_{i,t,RES} + \beta^6 EI_{i,t,GRP} + \beta^7 DIV_{i,t,IND} + u_{i,t}$$

где: $SHARE_{i,t,RES}$ – доля возобновляемых источников энергии в общем объеме производства электроэнергии в регионе i в период времени t ; $INV_{i,t,RES}$ – объем инвестиций в основной капитал в сфере ВИЭ; $PRICE_{i,t}$ – средневзвешенный тариф на электроэнергию; $CO2_{i,t,CAP}$ – объем выбросов CO_2 на душу населения;

$INST_{i,t,QLT}$ – индекс качества институциональной среды; $EMPL_{i,t,RES}$ – уровень занятости в секторе ВИЭ; $EI_{i,t,GRP}$ – энергоемкость валового регионального продукта; $DIV_{i,t,IND}$ – индекс диверсификации экономики региона; β_0 – константа; $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_7$ – коэффициенты при

соответствующих объясняющих переменных; u_i – случайная ошибка.

Данная модель является расширенной версией базовой модели и включает в себя ключевые факторы, определяющие динамику развития возобновляемой энергетики на региональном уровне. Ее значимость обусловлена несколькими фундаментальными аспектами:

1. Комплексный учет экономических, экологических и институциональных детерминант внедрения ВИЭ. Модель позволяет оценить влияние инвестиционной активности, ценовых сигналов рынка, экологических экстерналий и качества регуляторной среды на масштабы использования ВИЭ в регионе. Это дает возможность выявить узкие места и точки роста в развитии «зеленой» энергетики.

2. Отражение структурных характеристик региональной экономики. Включение в модель показателей занятости в секторе ВИЭ, энергоемкости ВРП и уровня диверсификации экономики позволяет учесть отраслевую специфику региона и оценить потенциальный вклад ВИЭ в структурную трансформацию хозяйственного комплекса.

3. Возможность сценарного прогнозирования и оценки регулирующих воздействий. На основе оцененных коэффициентов модели можно построить сценарные прогнозы динамики развития ВИЭ при различных параметрах экономической политики и институциональных изменениях. Это позволяет обосновывать выбор конкретных механизмов и инструментов стимулирования «зеленых» инвестиций и оценивать их эффективность.

4. Сопоставимость результатов и возможность межрегиональных сравнений. Использование панельной структуры данных и единой спецификации модели для регионов СКФО дает возможность проводить сравнительный анализ факторов развития ВИЭ в разных субъектах, выявлять лучшие практики и формировать

общие рекомендации для региональной энергетической политики.

5. Междисциплинарный синтез и учет современных трендов устойчивого развития. Модель интегрирует в себе достижения экономической, энергетической, экологической науки и позволяет комплексно оценивать процессы низкоуглеродной трансформации на региональном уровне. Она органично вписывается в общий контекст Целей устойчивого развития ООН и отвечает приоритетам Парижского соглашения по климату [9].

Предложенный методический инструментарий позволил комплексно оценить эколого-экономическую эффективность ВИЭ в разрезе ключевых параметров (выработка энергии, выбросы CO₂, инвестиции, рабочие места) и обосновать приоритетные направления «зеленой» энергетической политики региона. Апробация разработанных методик на реальных данных Республики Дагестан показала их практическую применимость для поддержки управленческих решений в сфере устойчивой энергетики.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный эконометрический анализ панельных данных по регионам СКФО за 2010–2023 гг. позволил выявить ключевые факторы, определяющие эколого-экономическую эффективность использования ВИЭ в Республике Дагестан. В таблице 1 представлены результаты оценивания базовой модели с фиксированными эффектами, где в качестве зависимой переменной выступает доля ВИЭ в общем объеме производства электроэнергии (SHARE_RES), а в качестве объясняющих переменных – уровень инвестиций в основной капитал ВИЭ (INV_RES), средневзвешенный тариф на электроэнергию (PRICE), выбросы CO₂ на душу населения (CO₂_CAP) и индекс качества институциональной среды (INST_QLT).

Таблица 1. Результаты оценивания базовой эконометрической модели

Table 1. Results of the evaluation of the basic econometric model

Переменная Variable	Коэффициент Coefficient	Статистическая ошибка Statistical error	t-статистика t-statistic	P-значение P-value
INV_RES	0.218***	0.052	4.17	0.000
PRICE	-0.087*	0.049	-1.76	0.081
CO ₂ _CAP	-0.142***	0.033	-4.35	0.000
INST_QLT	0.094**	0.041	2.27	0.025
Константа Constant	0.035	0.028	1.26	0.210

Примечание / Note: *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$

Полученные оценки показывают, что увеличение инвестиций в ВИЭ на 1 % приводит к росту их доли в энергобалансе региона в среднем на 0.22%, при этом эффект является статистически значимым на 1 %-ном уровне. Данный результат согласуется с выводами ряда зарубежных исследований [4; 10] и подтверждает ключевую роль инвестиционной активности в развитии «зеленой» энергетики. В то же время, повышение среднего тарифа на электроэнергию оказывает ограничивающее влияние на распространение ВИЭ, хотя и менее выраженное по сравнению с инвестициями.

Как и ожидалось, экологический фактор является значимым драйвером внедрения ВИЭ – при росте эмиссии CO₂ на душу населения на 1 % доля ВИЭ снижается на 0.14 %. Данный результат отражает возрастающую роль

экологических императивов в системе приоритетов региональной энергетической политики и соответствует логике концепции устойчивого развития [1]. Кроме того, выявлено позитивное влияние качества институтов на развитие ВИЭ, что свидетельствует о важности формирования благоприятной регуляторной среды и согласуется с результатами современных институциональных исследований [7].

Для более глубокого понимания экономических эффектов ВИЭ была оценена расширенная модель, дополненная показателями занятости в секторе ВИЭ (EMPL_RES), энергоемкости ВРП (EI_GRP) и индекса диверсификации экономики региона (DIV_IND). Результаты оценивания расширенной модели представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты оценивания расширенной эконометрической модели
Table 2. Results of estimation of the extended econometric model

Переменная Variable	Коэффициент Coefficient	Статистическая ошибка Statistical error	t-статистика t-statistic	P-значение P-value
INV_RES	0.203***	0.054	3.74	0.000
PRICE	-0.079	0.051	-1.54	0.127
CO ₂ _CAP	-0.137***	0.034	-4.08	0.000
INST_QLT	0.088**	0.042	2.09	0.039
EMPL_RES	0.062*	0.036	1.70	0.091
EI_GRP	-0.111**	0.045	-2.46	0.015
DIV_IND	0.015	0.029	0.52	0.602
Константа Constant	0.041	0.032	1.28	0.202

Примечание / Note: *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$

Как видно из таблицы 2, учет дополнительных факторов не меняет принципиально выводы базовой модели, но позволяет получить ряд содержательных результатов. В частности, обнаружено, что рост занятости в секторе ВИЭ на 1 % соответствует увеличению доли ВИЭ в энергобалансе на 0.06 %. Данный эффект значим на 10 %-ном уровне и указывает на позитивное влияние ВИЭ на региональный рынок труда, что согласуется с выводами ряда авторов [3; 5]. При этом снижение энергоемкости

экономики региона также способствует развитию ВИЭ – эластичность доли ВИЭ по энергоемкости ВРП составляет -0.11.

Анализ описательных статистик основных переменных модели (табл. 3) показывает, что за период 2010–2023 гг. доля ВИЭ в энергобалансе Республики Дагестан выросла более чем в 2 раза (с 1.8 % до 3.9 %), однако по-прежнему существенно отстает от среднероссийского уровня (5.2 % в 2023 г.).

Таблица 3. Описательные статистики основных переменных модели
Table 3. Descriptive statistics of the main variables of the model

Переменная Variable	Единица измерения Unit measurements	2010	2023	Измерения 2023/2010, % Measurements 2023/2010, %
SHARE_RES	%	1.8	3.9	116.7
INV_RES	млн руб. million rubles	486.2	2190.5	350.5
PRICE	руб / кВтч RUB/kWh	2.14	4.69	119.2
CO ₂ _CAP	т/человек t/person	1.98	2.48	25.3
EMPL_RES	Человек person	287	1364	375.3
EI_GRP	т.у.т./млн руб. T.U.T./million rubles	48.6	31.2	-35.8

В то же время, за рассматриваемый период наблюдается существенный рост инвестиций в ВИЭ (в 4.5 раза), занятости в секторе ВИЭ (в 4.7 раза) и значительное снижение энергоемкости ВРП (на 35.8 %). Данная динамика свидетельствует о наличии позитивных структурных сдвигов в «зеленой» энергетике региона, однако их темпы пока недостаточны для перехода к устойчивой низкоуглеродной модели развития.

В рамках исследования был также проведен сценарный анализ развития ВИЭ в Республике Дагестан на период до 2030 г. с использованием динамической CGE-модели региональной экономики. Согласно инерционному сценарию (табл. 4), при сохранении текущих трендов в инвестиционной и институциональной среде, доля ВИЭ в энергобалансе региона достигнет 5.6 % к 2030 г., что будет сопровождаться умеренным ростом занятости в отрасли (до 1.8 тыс. чел.) и снижением выбросов CO₂ на 3.8 %.

Целевой сценарий, предполагающий реализацию активной государственной политики поддержки ВИЭ (льготные тарифы, «зеленые» сертификаты, субсидирование инвестпроектов), позволит нарастить долю ВИЭ

до 10.2 % к 2030 г., создать более 3.5 тыс. «зеленых» рабочих мест и сократить эмиссию CO₂ на 8.3 % по сравнению с уровнем 2023 г. (табл. 5).

Таким образом, проведенное исследование показывает, что развитие ВИЭ в Республике Дагестан имеет значительный эколого-экономический потенциал, однако его полноценная реализация требует комплексной трансформации организационно-экономического обеспечения отрасли. Ключевыми направлениями такой трансформации должны стать:

1. Стимулирование инвестиционной активности в секторе ВИЭ путем совершенствования механизмов тарифообразования, развития рынка «зеленых» облигаций, создания специализированных фондов проектного финансирования.

2. Формирование благоприятной институциональной среды для развития ВИЭ, включая принятие регионального закона о поддержке ВИЭ, снижение административных барьеров, развитие механизмов ГЧП.

3. Интеграция приоритетов низкоуглеродного развития в региональные стратегии и программы

социально-экономического развития, отраслевые планы и инвестиционные проекты.

4. Повышение осведомленности населения и бизнеса о преимуществах ВИЭ, популяризация «зеленого» образа жизни, экологическое просвещение и образование.

Таблица 4. Прогноз развития ВИЭ в Республике Дагестан до 2030 г. (инерционный сценарий)

Table 4. Forecast for the development of renewable energy sources in the Republic of Dagestan until 2030 (inertial scenario)

Показатель Indicator	2023 (фактический) 2023 (actual)	2025	2030
Доля ВИЭ, % Share of renewable energy sources, %	3.9	4.5	5.6
Инвестиции, млн руб. Investments, million rubles	2190.5	2840.2	4250.8
Занятость, чел. Employment, people	1364	1570	1830
Выбросы CO ₂ , млн т. CO ₂ emissions, million tons	8.12	7.98	7.81

Таблица 5. Прогноз развития ВИЭ в Республике Дагестан до 2030 г. (целевой сценарий)

Table 5. Forecast for the development of renewable energy sources in the Republic of Dagestan until 2030 (target scenario)

Показатель Indicator	2023 (фактический) 2023 (actual)	2025	2030
Доля ВИЭ, % Share of renewable energy sources, %	3.9	6.2	10.2
Инвестиции, млн руб. Investments, million rubles.	2190.5	3820.0	6740.0
Занятость, чел. Employment, people	1364	2120	3560
Выбросы CO ₂ , млн т. CO ₂ emissions, million tons	8.12	7.79	7.44

Реализация предложенных мер позволит существенно повысить эколого-экономическую эффективность и устойчивость энергетического сектора Республики Дагестан, диверсифицировать региональную экономику, создать новые рабочие места и улучшить качество окружающей среды. Результаты исследования имеют важное практическое значение для обоснования региональной энергетической политики и могут быть использованы лицами, принимающими решения на разных уровнях управления.

Проведенный анализ демонстрирует наличие значительных резервов повышения эколого-экономической эффективности ВИЭ в Республике Дагестан. Оптимизация организационно-экономического обеспечения «зеленой» энергетики позволит существенно нарастить долю ВИЭ в энергобалансе региона, достигнув целевого ориентира в 10.2 % к 2030 г. Реализация комплекса мер государственной поддержки (льготное тарифообразование, субсидирование капитальных затрат, «зеленые» сертификаты) обеспечит приток инвестиций в размере 6.7 млрд. руб. и создание 3.5 тыс. новых рабочих мест в секторе ВИЭ к концу прогнозного периода. Активная декарбонизация энергетики будет также способствовать улучшению качества окружающей среды – совокупное сокращение эмиссии CO₂ может составить 8.3 % по сравнению с уровнем 2023 г.

Вместе с тем, полученные результаты указывают на необходимость глубокой трансформации институциональной среды развития ВИЭ в регионе. Оцененные коэффициенты эластичности доли ВИЭ по индексу качества институтов (0.088–0.094) свидетельствуют о наличии существенных регуляторных барьеров и издержек, препятствующих масштабированию низкоуглеродной энергетики. Устранение нормативно-правовых

пробелов, снижение административной нагрузки, внедрение механизмов ГЧП в совокупности обеспечат необходимые стимулы для «зеленых» инвестиций и позволят раскрыть потенциал ВИЭ в достижении Целей устойчивого развития региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюме результатов:

- Доля ВИЭ в энергобалансе Республики Дагестан выросла с 1.8 % в 2010 г. до 3.9 % в 2023 г., однако по-прежнему существенно отстает от среднероссийского уровня (5.2 %).
- Увеличение инвестиций в ВИЭ на 1 % приводит к росту их доли на 0.22 %, рост занятости в секторе на 1 % – к увеличению доли на 0.06 %.
- Повышение качества институтов на 1 % соответствует приросту доли ВИЭ на 0.09%, снижение энергоёмкости ВРП на 1 % – росту доли на 0.11 %.
- При инерционном сценарии доля ВИЭ достигнет 5.6 % к 2030 г., при реализации комплекса мер поддержки – 10.2 %.
- Целевой сценарий предполагает 6.7 млрд. руб. инвестиций и создание 3.5 тыс. рабочих мест в ВИЭ к 2030 г., сокращение выбросов CO₂ на 8.3 % от уровня 2023 г.

Полученные результаты вносят вклад в развитие теоретико-методологических основ организационно-экономического обеспечения ВИЭ и формируют надежную доказательную базу для принятия управленческих решений в сфере региональной энергетической политики. Разработанные эконометрические модели и сценарные прогнозы могут быть использованы для обоснования стратегий низкоуглеродного развития в регионах со

схожими социально-экономическими и природно-ресурсными характеристиками. Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на совершенствовании механизмов проектного финансирования ВИЭ, анализе лучших мировых практик поддержки "зеленой" энергетики, оценке потенциала создания региональных инновационных кластеров на базе ВИЭ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безруких П.П. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии. М.: ГНУ ВИАЭСХ, 2018. 148 с.
2. Бучукури Д.Р., Ниналалов С.А. Зеленая экономика как вектор устойчивого развития региона // Вестник Северо-Осетинского государственного университета им. К.Л. Хетагурова. 2019. N 2. С. 98–103.
3. Ермоленко Г.В., Проскурякова Л.Н., Ермоленко Б.В. Водородная экономика: потенциал развития, барьеры и драйверы // Форсайт. 2019. Т. 13. N 4. С. 23–44.
4. Зеленая экономика и цели устойчивого развития для России / Под ред. С.Н. Бобылева, П.А. Кириллова, О.В. Кудрявцевой. М.: Экономический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2019. 284 с.
5. Иванов П.П., Теняев В.А. Оценка ветроэнергетического потенциала территории России для развития ВИЭ // Теплоэнергетика. 2019. N 1. С. 80–87.
6. Копылов А.Е. Экономика ВИЭ. 2-е изд. М.: Грифон, 2018. 364 с.
7. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / Под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина. М.: ИНЭИ РАН-Московская школа управления СКОЛКОВО, 2019. 210 с.
8. Седаш Т.Н., Тютюкина Е.Б. Возобновляемые источники энергии: стимулирование инвестиций в России и за рубежом // Российский внешнеэкономический вестник. 2018. N 4. С. 94–100.
9. Углубленный обзор политики и программ России в области энергоэффективности. OECD, 2018. 299 с.
10. Гимбатов Г.М. Регулирование конфликта интересов при развитии ВИЭ с позиций государственно-частного партнерства // Вопросы структуризации экономики. 2017. N 4. С. 65–68.
11. Порфирьев Б.Н. Альтернативная энергетика как фактор экологической безопасности: особенности России // Экономика региона. 2018. Т. 14. N 4. С. 1036–1043.
12. IRENA (2019), Renewable capacity statistics 2019, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi.
13. REN21, Renewables 2019 Global Status Report, Paris: REN21 Secretariat, 2019.
14. The European Commission's science and knowledge service. JRC Wind Energy Status Report 2019. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019.
15. World Bank, State and Trends of Carbon Pricing 2019. Washington, D.C.: World Bank Group, 2019.

REFERENCES

1. Bezrukikh P.P. *Vozobnovlyayemaya energetika: strategiya, resursy, tekhnologii* [Renewable energy: strategy, resources, technologies]. Moscow, GNU VIESH Publ., 2018, 148 p. (In Russian)
2. Buchukuri D.R., Ninalalov S.A. Green economy as a vector of sustainable development of the region. *Vestnik Severo-Osetinskogo gosudarstvennogo universiteta im. K.L. Hetagurova* [Bulletin of the North Ossetian State University named after K.L. Khetagurov]. 2019, no. 2, pp. 98–103. (In Russian)
3. Ermolenko G.V., Proskuryakova L.N., Ermolenko B.V. Hydrogen economy: development potential, barriers and drivers. *Forsayt* [Foresight]. 2019, vol. 13, no. 4, pp. 23–44. (In Russian)
4. Bobylev S.N., Kirillov P.A., Kudryavtseva O.V., eds. *Zelenaya ekonomika i tseli ustoychivogo razvitiya dlya Rossii* [Green economy and sustainable development goals for Russia]. Moscow, Lomonosov Moscow State University Publ., 2019, 284 p. (In Russian)
5. Ivanov P. P., Tenyaev V. A. Assessment of wind energy potential of Russia for renewable energy development. *Teploenergetika* [Thermal power engineering]. 2019, no. 1, pp. 80–87. (In Russian)
6. Kopylov A.E. *Ekonomika VIE* [Renewable energy economy]. Moscow, Griffin Publ., 2018, 2nd ed., 364 p. (In Russian)
7. Makarov A.A., Mitrova T.A., Kulagina V.A., eds. *Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii 2019* [Forecast of the development of the energy sector in the world and Russia 2019]. Moscow, ERI RAS – Moscow school of management SKOLKOVO Publ., 2019, 210 p. (In Russian)
8. Sedash T.N., Tyutyukina E.B. Renewable energy sources: stimulating investment in Russia and abroad. *Rossiiskij vneshneekonomicheskij vestnik* [Russian foreign economic bulletin]. 2018, no. 4, pp. 94–100. (In Russian).
9. *Uglublennyy obzor politiki i programm Rossii v oblasti ehnergoeffektivnosti* [In-depth review of Russia's energy efficiency policies and programs]. OECD Publ., 2018, 299 p. (In Russian)
10. Gimbatov G.M. Regulation of conflict of interests in the development of renewable energy sources from the standpoint of public-private partnership. *Voprosy strukturizatsii ekonomiki* [Issues of structuring the economy]. 2017, no. 4, pp. 65–68. (In Russian)
11. Porfiryev B. N. Alternative energy as a factor in environmental and energy security: features of Russia. *Ekonomika regiona* [Regional Economy]. 2018, vol. 14, no. 4, pp. 1036–1043. (In Russian)
12. IRENA, Renewable capacity statistics 2019, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, 2019.
13. REN21, Renewables 2019 Global Status Report, Paris: REN21 Secretariat, 2019.
14. The European Commission's science and knowledge service. JRC Wind Energy Status Report 2019. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019.
15. World Bank, State and Trends in Carbon Pricing 2019. Washington, D.C.: World Bank Group, 2019.

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Лейла Ш. Ахмедова провела статистическую обработку. Наида А. Амадзиева предложила концепцию и дизайн исследования. Гаджимурад И. Идиев и Залимхан М. Султанов собрал и обработал материал. Раисат Р. Раджабова редактировала рукопись до подачи в редакцию. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Leyla Sh. Akhmedova performed statistical processing. Naida A. Amadzieva proposed the concept and design of the study. Gadzhimurad I. Idziev and Zalikmhan M. Sultanov collected and processed the material. Raisat R. Radzhabova edited the manuscript before submission to the Editor. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Лейла Ш. Ахмедова / Leyla Sh. Akhmedova <https://orcid.org/0000-0003-1347-1429>
 Наида А. Амадзиева / Naida A. Amadzieva <https://orcid.org/0000-0002-4176-4264>
 Гаджимурад И. Идиев / Gadzhimurad I. Idziev <https://orcid.org/0000-0002-0109-3048>
 Раисат Р. Раджабова / Raisat R. Radzhabova <https://orcid.org/0000-0002-3729-9224>
 Залимхан М. Султанов / Zalikmhan M. Sultanov <https://orcid.org/0000-0003-3675-6283>

Оригинальная статья / Original article
УДК 677:687.1
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-24



Сравнительный анализ экологических показателей и физико-механических свойств текстильных материалов растительного происхождения

Елена В. Кумпан¹, Гузель Н. Нуруллина¹, Муратхан И. Гаджибеков², Хамис К. Нурутдинова²

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

²Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

Контактное лицо

Елена В. Кумпан, кандидат технических наук, доцент, кафедра дизайна, Казанский национальный исследовательский университет; 420015 Россия, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68. Тел. +79178642860
Email elenevk@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0009-0007-4889-4292>

Формат цитирования

Кумпан Е.В., Нуруллина Г.Н., Гаджибеков М.И., Нурутдинова Х.К. Сравнительный анализ экологических показателей и физико-механических свойств текстильных материалов растительного происхождения // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 262-269.
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-24

Получена 6 октября 2025 г.

Прошла рецензирование 21 октября 2025 г.

Принята 6 ноября 2025 г.

Резюме

Цель: изучение физических и механических свойств текстильных материалов на основе волокон растительного происхождения с целью оценки их эксплуатационных характеристик и экологической безопасности, доказывающий преимущества и перспективы использования таких материалов, как крапива, лён и конопля, в качестве альтернативы традиционному хлопку.

В статье проведен исторический анализ технологии получения и применения текстильных материалов на основе растительных волокон. Особое внимание уделено сравнительной оценке ключевых характеристик и свойств таких волокон, как хлопок, лен, конопля и крапива. Проведены экспериментальные исследования физических и механических свойств текстильных материалов на основе волокон хлопка, льна и крапивы.

Исследование включает анализ физических, эксплуатационных и экологических аспектов каждого типа волокна, что позволяет выявить их преимущества и недостатки в контексте современного текстильного производства.

Из сравнительного анализа литературы и проведенных экспериментальных исследований текстильных материалов из волокон хлопка, льна и крапивы, можно сделать вывод, что наиболее экологичным, высокоурожайным, а также обладающим положительными физическими и механическими свойствами является волокно крапивы сорта «рами». Волокно крапивы сорта «рами» — наиболее экологичный, высокоурожайный и качественный материал, он обладает высокой гигроскопичностью, теплопроводностью и воздухопроницаемостью, а также прочностью, устойчивостью к ультрафиолету, гипоаллергенен. Производство тканей из крапивы не требует больших энергетических затрат и не вредит окружающей среде, что делает её экологически чистой альтернативой хлопку.

Ключевые слова

Текстильная промышленность, волокно, хлопок, лён, конопля, крапива, экспериментальные исследования, физико-механические свойства.

Comparative analysis of environmental indicators and physical and mechanical properties of textile materials of plant origin

Elena V. Kumpan¹, Guzel N. Nurullina¹, Muratkhan I. Gadzhibekov² and Khamis K. Nurutdinova²

¹Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

²Dagestan State University, Makhachkala, Russia

Principal contact

Elena V. Kumpan, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Design, Kazan National Research University; 68 Karl Marx St., Kazan, Russia 420015.

Tel. +79178642860

Email elenevk@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0009-0007-4889-4292>

How to cite this article

Kumpan E.V., Nurullina G.N., Gadzhibekov M.I., Nurutdinova Kh.K. Comparative analysis of environmental indicators and physical and mechanical properties of textile materials of plant origin. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):262-269. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-24

Received 6 October 2025

Revised 21 October 2025

Accepted 6 November 2025

Abstract

The aim was to study the physical and mechanical properties of textile materials based on plant fibres in order to assess their performance and environmental safety, proving the advantages and prospects of using materials such as nettle, flax and hemp as an alternative to traditional cotton.

The article provides a historical analysis of the technology of production and application of textile materials based on vegetable fibres. Special attention is paid to the comparative assessment of the key characteristics and properties of fibre such as cotton, flax, hemp and nettle. Experimental studies of the physical and mechanical properties of textile materials based on cotton, flax and nettle fibre have been carried out.

The study includes an analysis of the physical, operational and environmental aspects of each type of fibre, which allows us to identify their advantages and disadvantages in the context of modern textile production.

From a comparative analysis of the literature and experimental studies of textile materials made from cotton, flax and nettle fibres, it can be concluded that the most environmentally friendly, high-yielding, as well as possessing positive physical and mechanical properties is the rami nettle fibre. Rami nettle fibre is the most environmentally friendly, high — yielding and high-quality material. It has high hygroscopicity, thermal conductivity and breathability, as well as strength and UV resistance and is hypoallergenic. The production of nettle fabrics does not require high energy costs and does not harm the environment, which makes it an environmentally friendly alternative to cotton.

Key Words

Textile industry, fibre, cotton, flax, hemp, nettle, experimental research, physical and mechanical properties.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в современном мире продукция текстильной и легкой промышленности должна соответствовать высоким стандартам и отвечать комплексу требований. С развитием полимерной химии и технологий, синтетические волокна стали доминировать в структуре волокон натурального происхождения и для многих стран являются инновационной частью текстильной промышленности, так как обладают значительными показателями механических свойств, включая высокую прочность и износостойкость, а также высокую рентабельность [1].

Рынок синтетических волокон и нитей демонстрирует устойчивый рост с 1970-х годов, достигнув более 50 % от общего объема мирового текстильного производства. Однако в последнее время наблюдается тенденция к возвращению к натуральным волокнам растительного происхождения, и их доля в общем потреблении неуклонно растет. Говоря о натуральных текстильных материалах, важно отметить, что производство детской одежды, постельного и нательного белья должно изготавливаться из материалов на основе волокон растительного происхождения, таких как хлопок, лён, крапива и конопля, так как данные материалы обеспечивают необходимое тепловое состояние организма путем создания оптимального микроклимата под одежным слоем и являются гипоаллергенными [2].

Анализ рынка производства и потребления натуральных тканей, показывает, что самым популярным в мире волокном, используемым для производства одежды и различных текстильных изделий, является хлопок. По последним данным (на 2023–2024 годы) во всём мире производство хлопчатобумажных тканей исчисляется миллионами тонн около 25 миллионов тонн хлопка. Производство хлопка по странам в 2025 году, что составляет примерно 40 % от общего объёма текстиля. Согласно статистическим данным, в глобальном масштабе на каждого жителя планеты ежегодно приходится потребление не менее 7 килограммов хлопка.

Данная востребованность текстильных изделий из волокон хлопка обусловлена их положительными эксплуатационными характеристиками, такими как гигроскопичность, воздухопроницаемость и мягкость, а также универсальность использования в различных сферах жизнедеятельности. Также в целях привлечения потребителей некоторые производители одежды используют термин «экологичный хлопок». Однако данное понятие является некорректным, так как при производстве хлопка применяются удобрения, реагенты, а для отбеливания и окрашивания волокон и пряжи используются химические вещества.

Необходимо подчеркнуть, что массовое производство хлопкового волокна оказывает значительное негативное воздействие на окружающую среду. В частности, для выращивания одного килограмма хлопкового волокна требуется от 500 до 2500 литров пресной воды. Интенсивное культивирование хлопчатника в регионе Средней Азии стало основной причиной экологической катастрофы в регионе Аральского моря.

Аральское море, которое еще 80 лет назад являлось четвертым по величине озером в мире и благодаря своим размерам получило статус моря, несмотря на отсутствие выхода к океану щедро одаривало жителей прибрежных районов морепродуктами. На его берегах располагалось несколько портов и рыбозаводов. Однако с 1960-х годов уровень воды в Аральском море

начал стремительно падать из-за увеличения забора воды из двух главных питающих рек водоём – Амударьи и Сырдарьи, так как они активно использовались для орошения хлопковых плантаций. В результате, уровень воды в море снизился на 22 метра, а площадь водоёма сократилась на 90 %. Это привело к разделению Аральского моря на несколько изолированных водоёмов. Концентрация соли в воде выросла в 2,5 раза, что вызвало гибель рыбы и упадок рыболовного промысла.

Высыхание дна Аральского моря привело к образованию обширных солончаковых пустынь, которые распространяются на сотни километров вокруг. Ветер разносит соль и токсичные частицы, загрязняя почву и негативно влияя на биоразнообразие региона. Засоление почв привело к деградации сельскохозяйственных угодий и пастбищ, что, в свою очередь, затруднило разведение домашних животных.

Более того, ирригация хлопковых плантаций с применением пестицидов для уничтожения вредителей, а также внесение минеральных удобрений, которые впоследствии сбрасывались в акваторию моря, существенно ухудшили экологическую обстановку. В 2014 году объем воды в Аральском море достиг своего исторического минимума, после чего начались меры по его восстановлению. Однако полное восстановление моря потребует десятилетий и значительных усилий. Нерациональное и чрезмерное производство хлопка привело к экологической катастрофе, к утрате уникального природного ландшафта и экосистемы Аральского региона. Несмотря на принятые меры по восстановлению уровня воды в море, полное восстановление экосистемы потребует десятилетий и значительных усилий [3].

Необходимо также подчеркнуть еще один существенный аспект, связанный с выращиванием хлопка: данная культура характеризуется высокой уязвимостью к воздействию различных фитопатогенов и насекомых-вредителей. В результате, в процессе агрономической практики широко применяются пестициды и инсектициды, что составляет значительную долю от общего объема химических средств защиты растений в мировом масштабе [4]. Несмотря на то, что хлопчатник занимает лишь около 3 % мировых сельскохозяйственных угодий, тем не менее, потребляет значительную часть мировых пестицидов – примерно 11 %, и инсектицидов – 26 %. Химические вещества, используемые в его производстве, наносят серьёзный ущерб почве, снижая её плодородие [5]. Применение пестицидов и инсектицидов также представляет значительную угрозу для здоровья работников плантаций. Кроме того, чрезмерный полив, необходимый для выращивания хлопка, приводит к засолению почвы, ухудшая её качество [6; 7].

Таким образом, традиционное производство хлопкового волокна противоречит принципам экологичности. Следовательно, необходимо стремиться к снижению негативного воздействия на окружающую среду во всех сферах сельскохозяйственного производства хлопка, а именно за счет сокращения объемов производства и стимулирование развития альтернативных источников сырья, таких как лубяные волокна (лен, конопля, крапива), так как эти материалы обладают потенциалом для снижения экологического следа и улучшения устойчивости агроэкосистем.

В результате изучения литературных источников можно сделать вывод, что льняное волокно и изделия из него стали важной частью жизни современного человека. История культивирования льна как сельскохозяйственной

культуры начинается в эпоху неолита (VIII–III века до нашей эры), что подтверждается археологическими находками в древних поселениях и указывает на его широкое распространение. Некоторые исследователи предполагают, что лен возник на западе Персии, а затем был завезен в Индию, Китай, Среднюю Азию, Вавилон и Египет. Существует гипотеза, что Рим и Греция переняли культуру выращивания льна из Египта. В России лен имеет глубокие корни, так как множество славянских племен на территории Восточной Европы активно занимались его возделыванием.

В период правления Петра I производство льна приобрело промышленный характер, а экспорт льняного полотна и нитей стал одной из ключевых статей внешней торговли и важным источником пополнения государственной казны. К IX веку Россия занимала лидирующие позиции в мировом производстве льна и льняных изделий. На начало XX века на юге и в центральной части России приходилось более половины всех мировых посевных площадей льна, что составляло около 1,5 миллиона гектаров [8].

Льняные ткани остаются востребованными благодаря своим уникальным свойствам, включающим как физико-механические, так и медико-биологические характеристики. Научные исследования подтверждают положительное воздействие льняного волокна на физическое и эмоциональное состояние человека. Одежда из льна выделяется высокими гигиеническими качествами, отличной влаго- и воздухопроницаемостью, а также значительной механической стойкостью. Льняные материалы для домашнего использования привлекают своей эстетикой и функциональностью, в то время как технические льняные ткани находят широкое применение в автомобильной, обувной, оборонной и других отраслях промышленности [9].

Важно отметить, что лен является неприхотливой культурой, устойчивой к засухе и вредителям, не требующей большого количества воды и использования химических средств защиты. Отходы производства льняных тканей находят повторное применение в качестве сырья для целлюлозы, пеньки и масел.

На современном мировом рынке значительное распространение получили лубяные волокна, такие как конопля и крапива сорта рами. Эти материалы традиционно используются в текстильной промышленности для создания одежды, но также находят применение в автомобилестроении, производстве изоляционных материалов, медицине, изготовлении лечебного белья и геотекстиля, а также в ряде других отраслей [7].

Производство конопли получило широкое распространение в VIII веке, когда начался активный процесс строительства парусного флота. Наибольший объем посевных площадей был достигнут в 1920-х годах, тогда было отведено около 1 миллиона гектаров. Однако с течением времени площади начали постепенно сокращаться из-за конкуренции со стороны более дешевого хлопкового волокна. Волокна конопли имеют грубый стебель длиной до 2 метров, а также высокой устойчивостью к различным климатическим условиям. Она не требует особого ухода в период роста и известна своей неприхотливостью. Технология переработки конопли практически идентична технологии переработки льна, что позволяет использовать аналогичные методы обработки и переработки сырья.

В настоящее время конопля является источником для более чем трехсот различных продуктов, которые востребованы в различных отраслях промышленности. Ее применение охватывает медицину, текстильную, легкую, пищевую, бумажную, строительную, авиационно-космическую, топливную и другие сферы. В медицинских целях используется сорт конопли *Cannabis Indica*, который содержит большое количество тетрагидроканнабинола и используется для создания препаратов, влияющих на психоэмоциональное состояние. Для текстильного производства чаще всего используется сорт *Cannabis Sativa*.

Основными поставщиками конопляного волокна на сегодняшний день являются Италия, Германия, Румыния, Нидерланды и некоторые страны Азии. Несмотря на технологические сложности, связанные с производством одежды из конопли, конопляный текстиль отличается высокой прочностью, износостойкостью, гигроскопичностью и гипоаллергенностью. Он также обеспечивает эффективный теплообмен и на 95 % защищает от ультрафиолетового излучения. Важно отметить экологические преимущества производства конопляных тканей.

Конопля не нуждается в пестицидах и других химических веществах для защиты и стимуляции роста, что делает её выращивание экологически безопасным. В условиях растущего интереса к устойчивому развитию и экологически ответственным методам производства, конопляное волокно становится перспективным направлением для современной текстильной промышленности [7].

При рассмотрении волокон растительного происхождения важно отметить крапиву, которая была одним из первых материалов, используемых человеком. В Средние века изделия из крапивы пользовались большим спросом, но в XVI веке её вытеснил хлопок.

В настоящее время основным производителем крапивы сорта рами является Китай, также её выращивают в небольших количествах в США, Бразилии, Таджикистане и других странах Средней Азии. Волокна крапивы рами отличаются особой длиной, достигая 150–500 мм. Их природный цвет – белый, они легко поддаются окрашиванию и обладают естественным блеском. В современном текстиле волокно крапивы часто используется вместе с натуральным шёлком, мерсеризованным хлопком и вискозой.

Сравнивая лубяные волокна, можно отметить, что материал из крапивы обладает рядом преимуществ по сравнению с льняным волокном. Волокно крапивы обладает более мягкой, тонкой, эластичной и шелковистой текстурой, что обусловлено его строением. Длина волокон крапивы может достигать 50 см, а их трубчатая форма с перегородками обеспечивает устойчивость к многократным деформациям знакопеременного изгиба. Несмотря на недостаток лабораторных исследований, подтверждающих фактические данные о степени извитости волокна, среднем диаметре трубки и способности взаимодействовать с влагой, исторические примеры использования крапивного волокна в быту продолжают привлекать внимание современных учёных [9].

Важно отметить, что производство волокна крапивы является значительно более экологичным и экономически выгодным по сравнению с льном. Крапива «рами» имеет развитую корневую систему, которая способна значительно снизить эрозию почвы за счет глубокого проникновения корней в грунт, укрепляя его

структуру и предотвращают вымывание верхнего плодородного слоя. Растение крапивы устойчиво к вредителям, так как ее листья выделяют вещества, обладающие инсектицидными свойствами, что позволяет исключить необходимость использования пестицидов. В технологическом процессе производства ткани из волокна рами не используются химические реагенты для обработки волокон, что минимизирует негативное воздействие на окружающую среду. В целом, волокна крапивы представляют собой доступное и неприхотливое в выращивании сырье. При соблюдении оптимальных агротехнических условий растение демонстрирует высокую урожайность, достигая от двух до шести циклов вегетации в год, при этом затраты на его производство ниже, чем на выращивание льна [10].

На основе выше сказанного можно сделать вывод, что человек всегда тянулся к единению с природой, но несмотря на огромное количество новых и традиционных синтетических волокон современный потребитель предпочитает натуральные материалы, которые имеют древнюю историю применения и влияние положительных свойств которых доказано веками.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

За объект исследования взяты текстильные материалы на основе волокон хлопка, льна и крапивы, выбор данных материалов объясняется широкой ассортиментной группой, свободно представленной в продаже online и offline магазинов.

Как показало исследование самыми значимыми показателями, характеризующими комфортное состояние под одёжным микроклиматом, являются гигиенические характеристики, к которым можно отнести показатель смачиваемости. Также немаловажным для потребителей являются прочностные характеристики материала, а именно истирание, разрывная нагрузка, которые отвечают требованиям износостойкости.

В работе для экспериментальных исследований выбраны стандартные методы, отвечающие требованиям

ГОСТа. Результаты экспериментов сравнивались и сопоставлялись с известными теоретическими и экспериментальными данными.

Измерения краевого угла смачивания текстильных материалов определяли на приборе OCA 15 Pro Package. Прибор снабжён видео поддержкой OCA 15EC, которая позволяет измерить краевой угол смачивания и выполнить анализа контура капли. За окончательный результат испытания принималось среднее арифметическое пяти измерений диаметра капли, и времени поглощения-впитывания капли, вычисленное с погрешностью не более 0,01 %.

Испытания к истиранию и пиллингуемости материалов проводились с использованием прибора МТ-191 в рамках стандартов ГОСТ 51552-99 и ГОСТ 14326-73. Образцы, диаметр которых составлял 82 ± 1 мм, подвергались циклу истирания до тех пор, пока не появлялись сквозные дефекты. Результаты тестирования выражались в виде среднего арифметического значения выносливости десяти образцов с допуском погрешности $\pm 0,97$.

Для измерения разрывной нагрузки и относительного удлинения при разрывных испытаниях текстильных материалов применялись методики, установленные ГОСТ 3813-72 (ИСО 5081-77, ИСО 5082-82). Одноосные разрывные испытания проводились на машине модели МТ 110-2/5. Результаты измерений разрывного усилия и относительного удлинения регистрировались по шкале прибора в момент разрушения образца.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работе представлены экспериментальные исследования измерения краевого угла смачивания текстильных материалов на приборе OCA 15 Pro Package. На рисунке представлены результаты исследований измерения краевого угла смачивания для трех вида материала: льняной, хлопчатобумажной и крапивы (рис. 1).

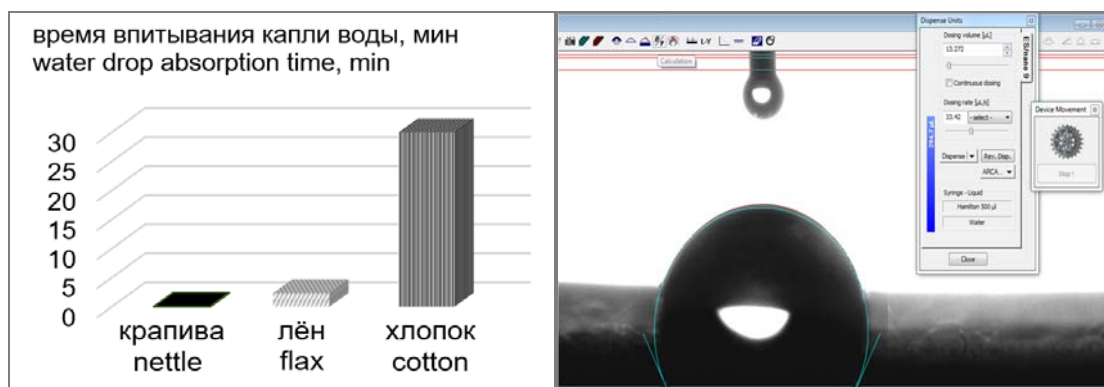


Рисунок 1. Результат экспериментального исследования краевого угла смачиваемости в зависимости от времени впитывания капли воды

Figure 1. The result of an experimental study of the contact angle of wettability as a function of the time it takes for a drop of water to be absorbed

Пред проведением эксперимента, для чистоты показателей текстильные материалы были подвержены стирке моющим средством, с целью удаления поверхностной грязи и аппретов, нанесенных на поверхность текстильного материала в процессе производства.

Из представленного графика (рис. 1) видно, что текстильный материал из волокон крапивы сорта «рами»

обладает наилучшим значением впитываемости воды, капля воды моментально впиталась, что является положительным показателем. Быстрое впитывание воды, свидетельствует о том, что материал в процессе производства не гидрофобизирован, не покрыт химическими реагентами, что является положительным критерием гигиенических показателей для производства одежды и постельного и нательного белья.

Механические характеристики текстильных материалов являются ключевым параметром в индустрии швейного производства и служат важным индикатором их качества. Они определяют способность материала адаптироваться и сохранять свои геометрические параметры в готовом изделии, а также прогнозируют его износостойкость и долговечность. В процессе эксплуатации швейных изделий текстильные материалы подвергаются разнообразным

механическим воздействиям, таким как растяжение, изгиб, сжатие и кручение, а также трение при контакте с другими поверхностями. На представленном графике (рис. 2) отражены результаты исследования относительного разрывного удлинения текстильных материалов при максимальной нагрузке, что позволяет объективно оценить их прочностные свойства и надежность в условиях повседневного использования.

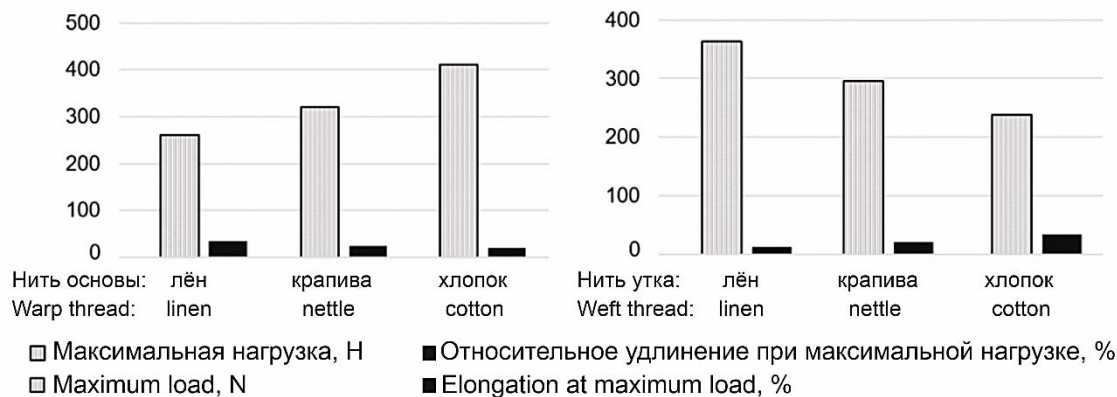


Рисунок 2. Результат экспериментального исследования относительного разрывного удлинения текстильных материалов по нити основы и утка

Figure 2. The result of an experimental study of the relative tensile elongation of textile materials along the warp and weft threads

Из графика видно, что максимальной прочностью при разрывной нагрузке обладает хлопчатобумажная ткань по нити основы и льняная ткань по нити утка. Относительное удлинение при максимальной нагрузке наибольшее значение по нити основы показала льняная ткань, по нити утка хлопчатобумажная ткань. Ткань из волокон крапивы показала средние результаты. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что исследуемые материалы обладают достаточной прочностью и незначительным удлинением, что свидетельствует о том, что одежды выполненная из рассматриваемых тканей,

будет в меньшей степени вытягиваться в области локтя, колен и сидения.

Немаловажным показателем для одежды являются показатели истирания и пillingуемости. Рассматриваемые характеристики наиболее значимы для детской одежды, так как дети во время игры сидят на полу, ползают на коленях, сидят за столом, в следствии чего происходит истирание одежды в области локтей и коленей. Стойкость материалов к истиранию и пillingуемости определяли по числу циклов истирания на приборе МТ-191 в соответствии с требованиями ГОСТ. Результаты исследования представлены на рисунке 3.

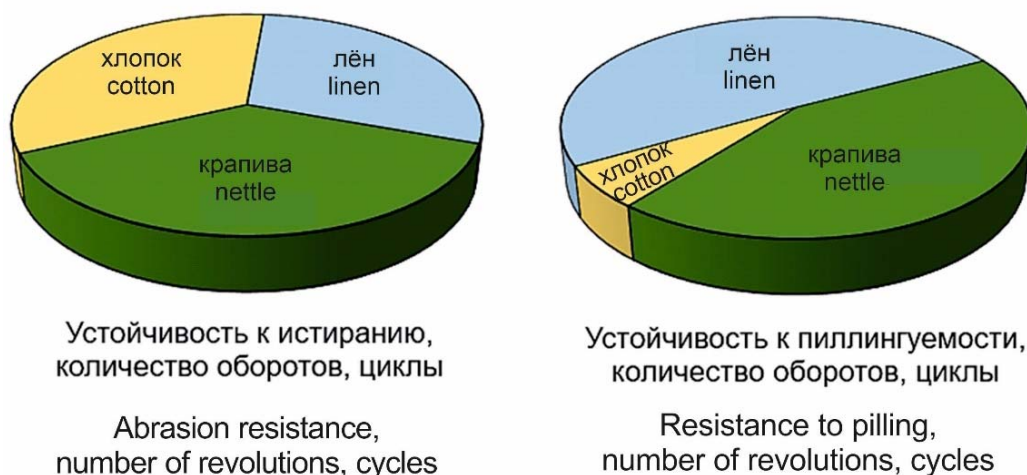


Рисунок 3. Результат экспериментального исследования устойчивости истирания и пillingуемости текстильных материалов

Figure 3. The result of an experimental study of the abrasion and pilling resistance of textile materials

Исследования показали, что наибольшей прочностью к истиранию обладает материал из волокон крапивы и льна, также крапива и лен устойчивы к пillingуемости, по отношению к материалу из хлопковых волокон. Устойчивость волокон льна и крапивы к истиранию и

пillingуемости объясняется природой волокон, а именно содержанием лигнина, который придаёт волокнам повышенную жёсткость, прочность. При этом содержание лигнина делает волокно льна и крапивы устойчивым к действию света, погоды и микроорганизмов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучая структуру строения и свойства волокон хлопка, льна и крапивы, можно утверждать, что содержание основного вещества целлюлозы в волокнах растительного происхождения придаёт ему различные свойства. Волокна хлопка, растут на поверхности семян хлопчатника, относящегося к семейству мальвовых. Лён относится к лубяным волокнам, которые залегают в стебле растения. Крапива относится к травянистому растению с противоположными пальчатыми листьями. Все виды волокон в своём составе содержат целлюлозу, гемицеллюлозу, пектиновые веществ и лигнин, благодаря целлюлозе волокна приобретают прочность, гибкость и эластичность.

Так как волокна льна и крапивы получают из стеблей и в их химическом составе содержится лигнин, который содержится в клеточных стенках растений и придаёт им прочность и устойчивость к разложению и действует как связующий клей, заполняя пространство между клетками и соединяя волокна целлюлозы в

прочную сеть. Благодаря лигнину стебли обретает прочность и упругость, а также жесткость, что подтверждается исследования прочности на истирание и пиллингуемости (рис. 3).

Лигнин придаёт волокну гидрофобность – отталкивает воду, что помогает растениям сохранять водный баланс и предотвращает гниение, а также защищает от патогенов. Лигнин создаёт барьеры для микроорганизмов и патогенов, защищая растения от инфекций

В волокнах льна лигнин содержится в количестве около 5 % (из общего состава волокна, где 80 % – целлюлоза, 20 % – примеси). Лигнин придаёт волокнам повышенную жёсткость. При этом содержание лигнина делает льняное волокно устойчивым к действию света, погоды и микроорганизмов. В волокнах крапивы рами доля лигнина составляет до 1 % (целлюлозы – 45 %, зольности – 9 %, смол и жиров – 0,85 %), поэтому волокно крапивы более мягкое и эластичное в отличии от волокна льна (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав растительных волокон
Table 1. Chemical composition of plant fibres

Волокно Fiber	Целлюлоза, % Cellulose, %	Гемицеллюлоза, % Hemicellulose, %	Пектин, % Pectin, %	Лигнин, % Lignin, %	Влага, % Moisture, %
Хлопок Cotton	93 – 96	23,0	2,0	0	8,0 – 9,0
Лён Linen	71 – 80	18,5	0,9	2,2 – 5,0	9,0
Крапива «Рами» Rami Nettle	68 – 76	13,1 – 16,7	2,0	0,6 – 1,0	8,0

Из сравнительного анализа волокон хлопка, льна и крапивы, а также данных, представленных в таблице, можно сделать вывод, что наиболее экологичным, высокоурожайным, а также обладающим положительными физическими и механическими свойствами отвечающим требованиям СанПиН 2.4.7/1.1.1286-03 «Гигиенические требования к одежде для детей, подростков и взрослых» является волокно крапивы сорта «рами».

Материал, полученный из волокна крапивы, обладает уникальными физико-химическими характеристиками, что делает его привлекательным для различных областей применения. Прежде всего, следует отметить его высокую гигроскопичность, позволяющую эффективно поглощать влагу и воду, так как это свойство играет ключевую роль в процессе окрашивания волокон, обеспечивая равномерное распределение красящих веществ и улучшая конечный результат.

С точки зрения механических характеристик, волокна крапивы обладают прочностью, что способствует их долговечности и износостойкости. Кроме того, они обладают устойчивостью к ультрафиолетовому излучению, что делает их пригодными для использования в условиях интенсивного солнечного света.

Важно отметить биологическую безопасность, волокна крапивы гипоаллергенны и обладают выраженными антисептическими свойствами, что снижает риск развития патогенных микроорганизмов на поверхности ткани. В сравнении с льняными волокнами, крапивные материалы демонстрируют большую

пластичность и мягкость, что положительно сказывается на комфорте при их использовании.

Теплопроводные свойства волокон крапивы также заслуживают внимания. Зимой одежда из этого материала обеспечивает эффективное сохранение тепла, а летом способствует поддержанию оптимальной температуры тела благодаря высокой воздухопроницаемости.

Наконец, с экологической точки зрения, волокна крапивы представляют собой экологически чистую альтернативу хлопку. Производство тканей из крапивы не требует значительных энергетических затрат и не оказывает негативного воздействия на окружающую среду.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ruiz L., McCue M. Cotton: Review of the World Situation is published every quarter by the Secretariat of the International Cotton Advisory Committee Cotton Production by Country 2025 // COTTON Review of the World Situation. 2025. V. 78. N 4. P. 1–17.

2. Клементьева М.В., Кумпан Е.В. Анализ и преимущества текстильных материалов из лубяных волокон // Жить в XXI веке – 2024: сборник конкурсных работ на лучшую научно-исследовательскую работу студентов и аспирантов КНИТУ, 2024. С. 535–540.

3. Арапова Е.Г. Хлопок, история, производство хлопкового волокна // Аврора. 2025. N 2. С. 10–17.

4. Азанова А.А., Нуруллина Г.Н., Никитина А.А., Башарова А.Т. Плазменная модификация структуры хлопчатобумажных трикотажных полотен // Вестник Казанского технологического университета. 2011. N 4. С. 283–284.

5. Абдуллин И.Ш., Г.Н. Нуруллина, А.А. Азанова и др. Крашение трикотажных полотен, обработанных неравновесной низкотемпературной плазмой // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. N 3. С. 27–29.

6. Nayak R., Jajpura L., Khandual A. Traditional fibres for fashion and textiles: Associated problems and future sustainable fibres // *Sustainable Fibres for Fashion and Textile Manufacturing*. 2023. P. 3–25.
7. Анташкова Е.А. Потенциал текстильных материалов из лубяных волокон на российском рынке // *Молодые исследователи – современной России*. МЦНП «Новая наука», 2023. С. 15–19.
8. Пантюшина О.В. О потребительских свойствах новых лубяных волокон // *Вестник Торгово-технологического института*. 2010. N 3. С. 36–41.
9. Сакошев Е.Г., Блазнов А.Н. Анализ свойств и области применения растительных волокон // *Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности*. 2021. С. 169–179.
10. Гребнева Д., Шпирный Г., Петрище Ф.А. Потребительские свойства крапивы как натурального волокна // *Путь модернизации России: партнерство государства, бизнеса и кооперации*. 2011. С. 218–223.

REFERENCES

1. Lorena Ruiz, Mike McCue. Cotton: Review of the World Situation is published every quarter by the Secretariat of the International Cotton Advisory Committee Cotton Production by Country 2025. COTTON Review of the World Situation. 2025, vol. 78, no. 4, pp. 1–17.
2. Klementyeva M.V., Kumpan E.V. Analysis and advantages of textile materials from bast fibers. In: *Zhit' v XXI veke – 2024: sbornik konkursnykh rabot na luchshuyu nauchno-issledovatel'skuyu rabotu studentov i aspirantov KNITU* [Living in the XXI century – 2024: collection of competitive papers for the best research work of students and postgraduates of KNRTU]. 2024, pp. 535–540. (In Russian)
3. Arapova E.G. Cotton, history, production of cotton fiber. *Avrora* [Aurora]. 2025, no. 2, pp. 10–17. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Елена В. Кумпан и Гузель Н. Нуруллина провели экспериментальные исследования, проанализировали данные, написали рукопись. Муратхан И. Гаджибеков и Хамис К. Нурутдинова провели редактирование рукописи до подачи в редакцию. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

4. Azanova A.A., Nurullina G.N., Nikitina A.A., Basharova A.T. Plasma modification of the structure of cotton knitted fabrics. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University]. 2011, no. 4, pp. 283–284. (In Russian)
5. Abdullin I.Sh., Nurullina G.N., Azanova A.A. et al. Dyeing of knitted fabrics treated with nonequilibrium low-temperature plasma. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University]. 2012, vol. 15, no. 3, pp. 27–29. (In Russian)
6. Nayak R., Jajpura L., Khandual A. Traditional fibers for fashion and textiles: Associated problems and future sustainable fibers. *Sustainable Fibres for Fashion and Textile Manufacturing*, 2023, pp. 3–25.
7. Antashkova E.A. The potential of textile materials from bast fibers on the Russian market. In: *Molodye issledovateli – sovremennoi Rossii. MTSNP «Novaya nauka»* [Young researchers – modern Russia. ICNP "New Science"]. 2023, pp. 15–19. (In Russian)
8. Pantyushina O.V. On consumer properties of new bast fibers. *Vestnik Torgovo-tekhnologicheskogo instituta* [Bulletin of the Trade and Technology Institute]. 2010, no. 3, pp. 36–41. (In Russian)
9. Sakoshev E.G., Blaznov A.N. Analysis of properties and applications of plant fibers. In: *Tekhnologii i oborudovanie khimicheskoi, biotekhnologicheskoi i pishchevoi promyshlennosti* [Technologies and equipment of the chemical, biotechnological and food industries]. 2021, pp. 169–179. (In Russian)
10. Grebneva D., Shpirny G., Petrishche F.A. Consumer properties of nettle as a natural fiber. In: *Put' modernizatsii Rossii: partnerstvo gosudarstva, biznesa i kooperatsii* [Path of modernization of Russia: partnership between government, business and cooperation]. 2011, pp. 218–223. (In Russian)

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Elena V. Kumpan and Guzel N. Nurullina conducted experimental studies, analysed the data and wrote the manuscript. Muratkhan I. Gadzhibekov and Khamis K. Nurutdinova undertook editing the manuscript before submission to the Editors. All authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Елена В. Кумпан / Elena V. Kumpan <https://orcid.org/0009-0007-4889-4292>

Гузель Н. Нуруллина / Guzel N. Nurullina <https://orcid.org/0009-0000-6352-4504>

Муратхан И. Гаджибеков / Muratkhan I. Gadzhibekov <https://orcid.org/0000-0002-9953-4429>

Хамис К. Нурутдинова / Khamis K. Nurutdinova <https://orcid.org/0009-0004-5119-8122>

Оригинальная статья / Original article
УДК 504.05
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-25



Экологически ориентированная технология улучшения эксплуатационных свойств обувных низкосортных натуральных кож с использованием плазменной обработки

Татьяна В. Жуковская, Лилия Р. Ханнанова-Фахрутдинова, Гузель И. Гарипова, Лейсан Р. Фатхуллина
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

Контактное лицо

Татьяна В. Жуковская, кандидат технических наук, доцент, кафедра конструирования одежды и обуви, Казанский национальный исследовательский технологический университет; 420015 Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, 68.
Тел. +78432314196
Email zhukovskayatv@corp.knrtu.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4006-6691>

Формат цитирования

Жуковская Т.В., Ханнанова-Фахрутдинова Л.Р., Гарипова Г.И., Фатхуллина Л.Р. Экологически ориентированная технология улучшения эксплуатационных свойств обувных низкосортных натуральных кож с использованием плазменной обработки // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 270-277. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-25

Получена 3 сентября 2025 г.
Прошла рецензирование 14 октября 2025 г.
Принята 25 октября 2025 г.

Резюме

Цель: устойчивое развитие кожевенно-обувной отрасли требует внедрения ресурсосберегающих, экологически безопасных методов модификации кожи, позволяющих повысить её качественные характеристики без применения агрессивных химикатов, снижающих гигиенические и биосовместимые свойства материала. Одной из перспективных технологических альтернатив в данном контексте выступает применение неравновесной низкотемпературной плазмы (ННТП).

В работе показано, что данная технология позволяет устранить распространённые дефекты натуральных обувных кож – отдушистость и отмин – без ухудшения гигиенических свойств и с существенным повышением прочностных и эстетических характеристик заготовки верха обуви.

Представлены экспериментальные данные, подтверждающие эффективность обработки, а также обсуждаются экологические и ресурсные аспекты повторного использования кожевенного сырья. Сделан вывод о высокой технологической и экологической целесообразности внедрения ННТП на предприятиях обувной промышленности.

В условиях дефицита кожевенного сырья и роста требований к экологической ответственности производства, предложенный способ позволяет повысить степень использования низкосортных материалов, снизить процент брака и отходов, а также реализовать принципы устойчивого развития и экономики замкнутого цикла. Плазменная модификация не требует применения токсичных реагентов, не нарушает гигиенические характеристики кожи и обеспечивает стабильность полученного результата при промышленном тиражировании.

Ключевые слова

Экологическая эффективность, переработка сырья, натуральная кожа, дефект, заготовка верха обуви, низкотемпературная неравновесная плазма, обработка.

Environmentally oriented technology for improving the performance properties of low-grade natural leather for footwear using plasma modification

Tatiana V. Zhukovskaya, Liliya R. Khannanova-Fakhrutdinova, Guzel I. Garipova and Leysan R. Fatkhullina

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

Principal contact

Tatiana V. Zhukovskaya, PhD, Associate Professor,
Department of Clothing and Footwear Design,
Kazan National Research Technological University;
68 K. Marks St, Kazan, Russia 420015.

Tel. +78432314196

Email zhukovskayatv@corp.knrtu.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4006-6691>

How to cite this article

Zhukovskaya T.V., Khannanova-Fakhrutdinova L.R.,
Garipova G.I., Fatkhullina L.R. Environmentally
oriented technology for improving the performance
properties of low-grade natural leather for
footwear using plasma modification. *South of
Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):270-277.
(In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-25

Received 3 September 2025

Revised 14 October 2025

Accepted 25 October 2025

Abstract

The objective was to research the sustainable development of the leather and footwear industry which requires the introduction of resource-saving, environmentally friendly methods of leather modification, allowing the improvement of its quality characteristics without the use of aggressive chemicals that reduce the hygienic and biocompatible properties of the material. One of the promising technological alternatives in this context is the use of nonequilibrium low-temperature plasma (NLTP).

Examination of this technology which allows the elimination of common defects of natural shoe leather - odour and indents - without deterioration of hygienic properties and with a significant increase in the strength and aesthetic characteristics of the shoe upper blank.

Experimental data confirming the effectiveness of the treatment are presented, and environmental and resource aspects of the reuse of raw leather are discussed. A conclusion is made about the high technological and environmental feasibility of introducing NLTP at footwear industry enterprises.

In the conditions of shortage of leather raw materials and growing requirements for environmental responsibility in production, the method proposed allows increase in the degree of use of low-grade materials, reduction in the percentage of defects and waste and implementation of the principles of sustainable development and closed-loop economy. Plasma modification does not require use of toxic reagents, does not violate the hygienic characteristics of leather and ensures the stability of the obtained result during industrial replication.

Key Words

Eco-efficiency, raw material processing, genuine leather, defect, shoe upper preparation, low-temperature nonequilibrium plasma, processing.

ВВЕДЕНИЕ

Экологичность производственно-технологических процессов кожевенно-обувной промышленности в современных условиях неразрывно связана с рациональным использованием ресурсов, минимизацией отходов и внедрением экологически чистых методов обработки сырья [1]. При этом одной из наиболее острых проблем остаётся значительный удельный вес технологических потерь [2], связанных с переработкой кож низкого качества, особенно при производстве заготовок верха обуви [3]. До 26 % площади кож хромового дубления может уходить в отходы в процессе раскроя [4], причём на долю дефектов отдушистости и отмина приходится до 8 % от общего объёма утрат [5–6]. Такие цифры свидетельствуют не только о существенных экономических убытках, но и об экологической нагрузке, обусловленной необходимостью утилизации отходов биологического происхождения, обладающих остаточной токсичностью и склонностью к биodeградации с образованием соединений аммония и сульфидов.

Современное развитие кожевенно-обувной промышленности характеризуется растущими требованиями к эстетическим и эксплуатационным свойствам изделий на фоне интенсивного потребления и сезонности спроса. Несмотря на появление новых синтетических материалов, натуральная кожа по-прежнему остаётся предпочтительным материалом для изготовления заготовки верха обуви благодаря своей воздухопроницаемости, пластичности и высокому уровню комфорта в носке. Однако в условиях дефицита высококачественного сырья и необходимости удешевления производственного цикла всё чаще в оборот вовлекается низкосортное кожевенное сырьё, отличающееся наличием таких лицевых дефектов, как отдушистость и отмин.

Изготовление обуви из кожи с дефектами, такими как отдушистость, неизбежно ведёт к быстрому разрушению её структуры при эксплуатации, потере товарного вида и, как следствие, возврату продукции. Массовый характер таких возвратов обусловлен не только физическим износом, но и психологическим восприятием ухудшения внешнего облика изделия, особенно в контексте современных потребительских ожиданий, где эстетическая составляющая приобретает равное значение с эксплуатационными характеристиками. Таким образом, дефектные изделия, поступившие на рынок, также формируют обратный поток отходов, увеличивая углеродный след и производственную нагрузку на логистику и сортировочные центры.

В условиях растущих требований к экологической отчётности предприятий и дефицита высококачественного кожевенного сырья становится актуальным поиск технологий, позволяющих вовлекать в производство низкосортные материалы без ухудшения качества конечного продукта [6]. Повышение сортности и площади выхода годного материала за счёт устранения или маскировки лицевых дефектов не только снижает производственные издержки [7], но и способствует снижению общего объёма отходов, направляемых на утилизацию. Это особенно важно с учётом того, что отходы кожевенного и обувного производства, содержащие остатки хрома, жиров и поверхностно-активных веществ, оказывают неблагоприятное влияние на почвенные и водные экосистемы при нарушении регламентов захоронения.

Устойчивое развитие отрасли требует внедрения ресурсосберегающих, экологически безопасных методов модификации кожи, позволяющих повысить её качественные характеристики без применения агрессивных химикатов, снижающих гигиенические и биосовместимые свойства материала. Одной из перспективных технологических альтернатив в данном контексте выступает применение низкотемпературной низкоэнергетической плазмы (ННТП), позволяющей производить объёмную модификацию структур кожи, повышая их прочность, эластичность, формоустойчивость и адгезионные свойства.

В отличие от химических методов, ННТП воздействует на материал на уровне надмолекулярных структур без разрушения его внутренней организации, что делает эту технологию особенно актуальной для обработки сложных волокнистых и пористых биополимерных материалов. В работах последних лет доказано, что применение ННТП позволяет не только улучшить механические свойства кожевенных материалов [8–10], но и существенно сократить проявление дефектов отдушистости и отмина [10; 11], сохраняя при этом гигиенические и эстетические параметры изделия.

Таким образом, целью настоящего исследования является разработка экологически ориентированной технологии повышения эксплуатационных свойств заготовки верха обуви из низкосортной натуральной кожи путём последовательной плазменной модификации в условиях высокочастотного индукционного и емкостного разрядов. Обоснование выбранной технологии, её физико-химические основы, результаты лабораторных и натурных испытаний, а также анализ эксплуатационных показателей образцов до и после модификации представлены в последующих разделах статьи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Применение низкотемпературной низкоэнергетической плазмы при обработке кожевенных материалов базируется на механизмах направленного физико-химического воздействия на макромолекулярную структуру коллагеновых волокон, в том числе и на сопутствующие компоненты лицевого покрытия [12]. В условиях вакуумной плазменной среды при пониженном давлении и заданных энергетических режимах происходит ионизация плазмообразующего газа — аргона или смеси аргона с пропан-бутаном, в результате чего формируются низкоэнергетические ионы, обладающие достаточной кинетической энергией для воздействия на поверхностные и подповерхностные слои кожевенного материала.

Особенность воздействия ННТП заключается в локальном нагреве поверхностного покрытия, особенно в зонах с выраженным отмином или отдушистостью, что позволяет материалу, уже содержащему декоративно-защитную плёнку, частично заплавлять микротрещины, щели и каверны, образовавшиеся в процессе дубления, сушки или хранения. В результате такого контролируемого термодинамического воздействия покрытие распределяется более равномерно и заполняет дефектные участки, стабилизируя лицевой слой кожи без необходимости нанесения дополнительных химических компонентов.

Экспериментально подтверждено, что при обработке в условиях высокочастотного индукционного (ВЧИ) разряда с параметрами $W_p = 2,2$ кВт, $\tau = 3$ мин, $G_{ар} = 0,04$ г/с, $P = 26,6$ Па происходит формирование плазменного потока с высокой плотностью заряженных

частиц, что способствует активации молекулярных связей в зоне дефекта и частичному испарению. Это особенно важно для устранения дефекта отдушистости, связанного с избыточным содержанием летучих фракций поверхностного покрытия. Полученные данные

свидетельствуют о существенном снижении интенсивности дефекта уже после первой стадии обработки, о чём свидетельствуют материалы, представленные на рисунках 1 и 2.

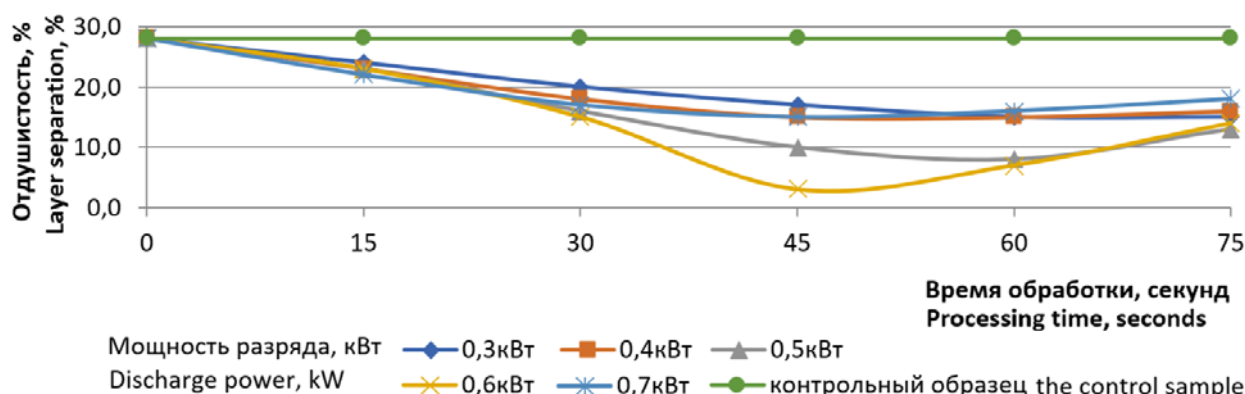


Рисунок 1. Зависимость проявления отдушистости при модификации заготовки верха обуви в ННТП индукционного разряда от продолжительности плазменной обработки и мощности разряда ($G=0,04$ г/с, $P_k=60$ Па)
Figure 1. Dependence of the manifestation of layer separation modification of the shoe upper blank in the NNTP induction discharge on the duration of plasma treatment and discharge power ($G=0.04$ g/s, $P_k=60$ Pa)

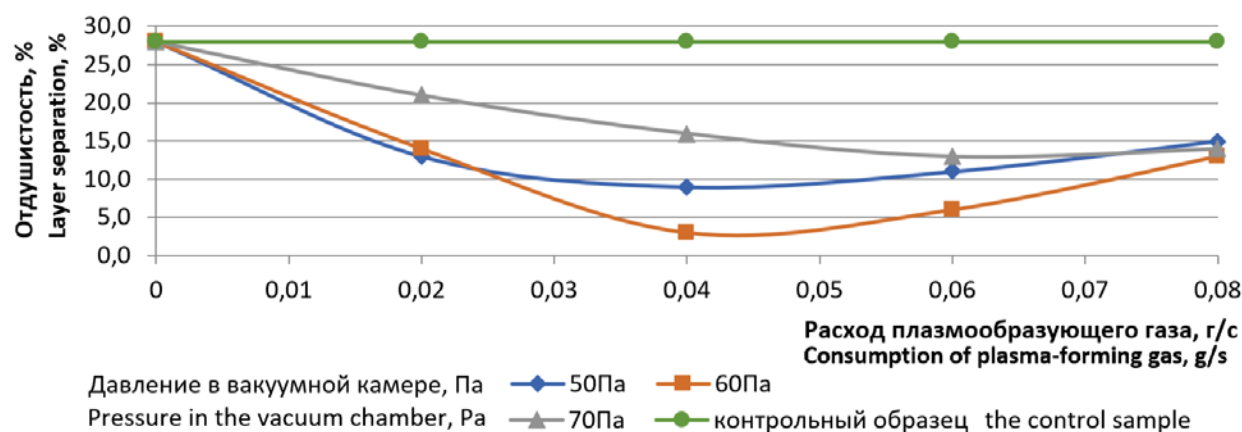


Рисунок 2. Зависимость проявления отдушистости при модификации заготовки верха обуви в ННТП индукционного разряда от расхода плазмообразующего газа и давления в вакуумной камере ($W_p=0,6$ кВт, $\tau=45$ с)
Figure 2. Dependence of the manifestation of layer separation modification of the shoe upper blank in the NNTP induction discharge on plasma-forming gas flow rate and pressure in the vacuum chamber ($W_p=0.6$ kW, $\tau=45$ s)

На следующем этапе применялся режим высокочастотного емкостного (ВЧЕ) разряда, обеспечивающий более глубокое проникновение воздействия в пористую структуру кожи. В данном случае плазменное воздействие сопровождалось частичной субдеструкцией нежелательных включений и улучшением межволоконного сцепления в поверхностной зоне, что подтверждается результатами тестов на устойчивость к многократному изгибу и мокрому трению, представленными в таблице 1. Одновременно с этим происходило увеличение поверхностной энергии материала, что положительно влияло на адгезию клеевых соединений и стойкость декоративных покрытий.

Сопоставление контрольных и модифицированных образцов показало также статистически достоверное повышение гигиенических, что обусловлено не только разволокнением, но и формированием на поверхности кожи кислородсодержащих функциональных групп (карбоксильных, гидроксильных), характер которых подтверждён данными ИК-спектроскопии. Наряду с этим, наблюдается усреднение и перераспределение объема пор, что дополнительно усиливает сцепление между

слоями обувного заготовочного материала и стабилизирует его форму при эксплуатации (рис. 3).

Таким образом, применение ННТП в условиях строго контролируемого плазменного воздействия обеспечивает комплексное улучшение характеристик низкосортной натуральной кожи, устраняя выраженные лицевые дефекты, восстанавливая её однородность и улучшая её технологическую совместимость с другими конструкционными компонентами обуви. На основании полученных результатов можно утверждать, что описанные процессы не нарушают целостность структуры коллагена и не требуют использования дополнительных реагентов, что подчёркивает экологическую обоснованность предлагаемого подхода.

С позиции циклической экономики и зелёных технологий, важнейшей задачей становится поиск способов глубокой регенерации структур кожного материала на микро- и наноуровне, позволяющих использовать его повторно с сохранением или улучшением исходных параметров. Применение ННТП позволяет значительно расширить спектр пригодности кож с дефектами, ранее списываемых в брак. Так, согласно

результатам, полученным в ходе проведённого эксперимента, после двукратной плазменной обработки образцы с дефектом отдушистости демонстрируют снижение степени выраженности данного дефекта более

чем на 25 % (см. рис. 1 и 2), а по итогам опытной носки – более чем в три раза по сравнению с контрольными полупарами (см. рис. 3).

Таблица 1. Влияние двукратной обработки ННТП на физико-механические характеристики заготовки верха обуви (ВЧИ: G=0,04г/с, P=60Па, Wp=0,6кВт, τ=45с.; ВЧЕ: GAr=0,04г/с, P=26,6Па, Wp=0,2кВт, τ=500с)
Table 1. Effect of double processing of NNTP on the physico-mechanical characteristics of the shoe top blank (HH: G=0.04g/s, P=60Pa, Wp=0.6kW, τ=45с; HH: GAr=0.04g/s, P=26.6Pa, Wp=0.2kW, τ=500с)

Наименование показателя Naming of the indicator	Контрольный образец Control sample	Опытный образец Prototype
Предел прочности при растяжении, МПа Tensile strength, MPa	19,1	31
Напряжение при появлении трещин лицевого слоя, МПа Stress at the appearance of cracks in front layer, MPa	11,7	15,9
Удлинение при напряжении 10МПа, % Elongation at 10MPa voltage, %	30	39,7
Относительное удлинение при разрыве, % Elongation at break, %	35	54
Адгезия покрытия к коже, Н/м Adhesion of the coating to the skin, N/a	440	690
Устойчивость покрытия на коже к многократному изгибу, баллы Resistance of the coating on the skin to repeated bending, points	2,7	4
Устойчивость покрытия на коже к мокрому трению, циклы Resistance of the coating on the skin to wet friction, cycles	82	98
Прочность термосклеивания, Н/м Thermal bonding strength, N/m	211	318
Прочность при расслаивании клеевого соединения, Н/см Delamination strength of adhesive joint, N/cm	59	66
Жесткость, сН Stiffness, cN	54	74
Упругость, % Elasticity, %	64	61
Гигроскопичность, % Hygroscopicity, %	19,6	19,6
Влагоотдача, % Moisture loss, %	9,4	9,8
Водопроницаемость в динамических условиях, мин. Water permeability in dynamic conditions, min.	>120	>120



Рисунок 3. Влияние двукратной ННТП обработки на устойчивость верха обуви в период опытной эксплуатации: а – контрольный образец; б – опытный образец

Figure 3. Effect of double NNTP treatment on the stability of the shoe upper during the trial operation: a – control sample; b – trial sample

Повышение прочности, эластичности, устойчивости к внешним воздействиям и формоустойчивости,

зафиксированное в результате обработки, позволяет рассматривать ННТП как технологию не только улучшения

потребительских характеристик изделия, но и инструмент экологической трансформации кожевенно-обувного производства. Таблица 1 подтверждает рост значений ключевых механических и технологических показателей, таких как предел прочности, адгезия покрытия, прочность склеивания и устойчивость к изгибу, что напрямую влияет на снижение процентного содержания брака и удлинение срока службы изделий.

Следовательно, исследуемая технология может рассматриваться как составная часть более широкой стратегии ресурсосбережения в отрасли, направленной на уменьшение отходов, снижение нагрузки на экосистему и повышение эффективности использования биологических материалов, ранее считавшихся непригодными для обувного производства. Именно в этом контексте решающее значение приобретает дальнейшее изучение механизмов плазменной модификации структур кожи, их взаимодействие с внешними покрытиями и клеящими слоями, а также возможности масштабирования данных процессов в условиях действующего промышленного оборудования.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обоснование применения низкотемпературной плазменной обработки в качестве средства повышения потребительской ценности кожевенного материала требует не только рассмотрения физико-химических механизмов, но и подтверждения эксплуатационной результативности на уровне целевого изделия – обуви. Проведённые испытания показали, что воздействие ННТП на дефектные участки лицевого слоя обеспечивает комплексное улучшение свойств кожи, ранее считавшейся низкосортной, и позволяет использовать её в производстве обуви среднего и высокого ценового сегмента без видимого ухудшения качества.

Одним из ключевых показателей технологической состоятельности метода стало снижение выраженности дефекта отдушистости: уже после первой обработки в режиме ВЧИ- и ВЧЕ-разрядов интенсивность запаха снижалась более чем на 25 %, а после повторной обработки — до уровней, неотличимых от образцов из кожи высшего сорта, что подтверждено по результатам экспертной органолептической оценки (см. рис. 1–2). Это стало возможным благодаря испарению остаточных летучих компонентов замасливателя и герметизации поверхностных каверн, в которых накапливались ароматические соединения.

На фоне устранения эстетических дефектов также зафиксированы значительные улучшения по ряду эксплуатационных характеристик. Так, прочность на растяжение модифицированной кожи возросла в среднем на 22 % по сравнению с контрольными образцами, а предел прочности на изгиб увеличился на 26 %, что особенно важно при формировании и длительном ношении обуви в условиях высоких деформационных нагрузок (табл. 1). В дополнение к этому повысилась устойчивость к многократному сухому изгибу, что свидетельствует о восстановлении эластичности и стабилизации структуры лицевого слоя.

Увеличение капиллярной активности и удельной поверхности, ранее зафиксированное на микроскопическом уровне, обусловило значительный рост адгезии к клеящим слоям: прочность на отрыв соединений увеличилась на 35–40 % (см. рис. 3). Такой эффект особенно актуален для обеспечения надёжности и долговечности соединения заготовки верха с нижними

деталью обуви. Кроме того, важно подчеркнуть, что обработка ННТП не вызвала закупорки пор и не ухудшила гигиенических свойств материала, в отличие от традиционных методов химической маскировки дефектов, применение которых нередко сопровождается снижением воздухо- и паропроницаемости.

Сравнение полученных результатов с характеристиками немодифицированной кожи, а также с кожей, подвергнутыми традиционной корректирующей финишной отделке, демонстрирует преимущество плазменной технологии не только в плане повышения эксплуатационных показателей, но и в аспекте экологической безопасности. Отсутствие дополнительных химикатов, возможность локального воздействия, а также точное воспроизведение режимов обработки обеспечивают воспроизводимость процесса и технологическую гибкость.

Таким образом, проведённый комплекс испытаний доказывает, что применение ННТП позволяет существенно повысить форму устойчивости, надёжность и срок службы обуви, произведённой из ранее бракованного сырья. Учитывая высокую долю кож с дефектами, поступающих в производство, данная технология способна стать экономически и экологически целесообразной альтернативой традиционным корректирующим методам, расширяя доступ к сырьевым ресурсам и снижая общий уровень производственных отходов.

Современная практика экологического нормирования в лёгкой промышленности предполагает переход от анализа отдельных стадий производства к оценке полного жизненного цикла (LCA – Life Cycle Assessment) сырья, полуфабрикатов и готовых изделий. В этой связи обращение с низкосортной кожей, имеющей выраженные лицевые дефекты, приобретает особую значимость, так как затрагивает не только этап переработки, но и стадии распределения, потребления и утилизации.

Наиболее распространёнными сценариями обращения с кожевенным браком остаются физическая утилизация в виде захоронения на промышленных свалках либо вторичная переработка с использованием агрессивных химических реагентов для маскировки дефектов. Первый путь, несмотря на простоту, сопряжён с высоким экологическим риском: деградация белково-волоконных структур кожи на полигонах сопровождается выделением аммиака, сульфидов и формальдегида, что способствует загрязнению почвы и подземных вод. Согласно данным отраслевых отчётов [13], средняя масса неиспользованной дефектной кожи, образующейся на кожевенном предприятии в течение одного производственного цикла, может достигать 3,5–4 тонн, из которых не менее половины отправляется на захоронение.

Альтернативный подход, предполагающий повторную финишную отделку с применением полиуретановых и акрилатных композиций, повышает коммерческую ценность материала, но ухудшает его паропроницаемость и биоразлагаемость. Кроме того, химическая дообработка снижает гигиеническую безопасность обуви и влечёт за собой увеличение углеродного следа, связанного с синтезом и транспортировкой компонентов финишной отделки. В этом контексте предложенная технология плазменной модификации позволяет значительно смягчить негативное воздействие на окружающую среду.

Сравнительный анализ трёх сценариев обращения с кожей с дефектами – захоронение, химическая

корректировка и плазменная регенерация – показывает, что ННТП-обработка обеспечивает наиболее благоприятный экологический профиль. Благодаря отсутствию агрессивных веществ, низкому уровню остаточного загрязнения, повторному использованию исходного сырья и повышению эксплуатационного ресурса изделий, снижается общий объём отходов и замедляется темп потребления природных ресурсов. Учитывая, что срок службы обуви из плазменно-модифицированной кожи увеличивается в среднем на 30–40 % по сравнению с изделием из исходного низкосортного материала, можно говорить о снижении частоты покупок, объёма текстильных и кожаных отходов и логистических издержек.

На уровне жизненного цикла предложенная технология трансформирует отход в полноценный ресурс, создавая условия для реализации принципов экономики замкнутого цикла (Circular Economy). Она позволяет минимизировать воздействие на окружающую среду без ущерба для качества продукции и экономических показателей предприятия. В условиях растущего дефицита высококачественного сырья и ужесточающихся требований к углеродной отчётности такие решения становятся не только желательными, но и необходимыми для устойчивого развития кожевенно-обувной отрасли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование показало, что устранение дефектов лицевой поверхности низкосортной натуральной кожи с использованием низкотемпературной низкоэнергетической плазменной модификации (ННТП) позволяет существенно улучшить не только эстетические, но и эксплуатационные характеристики обуви. Установлено, что при двукратной обработке комплексного материала заготовки верха обуви в условиях ВЧИ и ВЧЕ разрядов наблюдаются значительные изменения физико-механических свойств, включая повышение предела прочности при растяжении, адгезии, устойчивости к многократному изгибу и снижению проявления таких дефектов, как отдушистость и отмин. Визуальный анализ опытных образцов в процессе носки подтвердил устойчивость модифицированной поверхности к образованию морщин, трещин и потёртостей, что особенно важно для повышения потребительской удовлетворённости и эстетического восприятия обуви.

В условиях дефицита кожевенного сырья и роста требований к экологической ответственности производства, предложенный способ позволяет повысить степень использования низкосортных материалов, снизить процент брака и отходов, а также реализовать принципы устойчивого развития и экономики замкнутого цикла. Плазменная модификация не требует применения токсичных реагентов, не нарушает гигиенические характеристики кожи и обеспечивает стабильность полученного результата при промышленном тиражировании.

Результаты исследования подтверждают перспективность применения ННТП для повышения качества обуви из натуральной кожи и расширения сферы использования ранее трудно применимого кожевенного сырья. В дальнейшем предполагается разработка детализированной модели управления режимами плазменной обработки в зависимости от характеристик исходного материала и требований к готовой обуви, а также проведение ресурсно-экономической оценки внедрения технологии на предприятиях обувной отрасли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богомолова И.П., Кривенко Е.И., Попов В.Н. Роль и особенности ресурсосберегающих процессов в современных условиях хозяйствования национальной экономики и реализации государственных стратегических инициатив // Экономика и управление: проблемы, решения. 2020. Т. 2. N 11. С. 4–15.
2. Navarro D., Wu J., Lin W., Fullana-i-Palmer P., Puig R. Life cycle assessment and leather production // Journal of Leather Science and Engineering. 2020. V. 2. P. 1–13.
3. Joseph K., Nithya N. Material flows in the life cycle of leather // Journal of Cleaner Production. 2009. V. 17. N 7. P. 676–682.
4. Sundar V.J., Raghavarao J., Muralidharan C., Mandal A.B. Recovery and utilization of chromium-tanned proteinous wastes of leather making: a review // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2011. V. 41. N 22. P. 2048–2075.
5. Thanikaivelan P., Rao J.R., Nair B.U., Ramasami T. Recent trends in leather making: processes, problems, and pathways // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2005. V. 35. N 1. P. 37–79.
6. Кулевцов Г.Н., Вознесенский Э.Ф., Абдуллин И.Ш. Сокращение структурных дефектов в производстве кожи при использовании плазменной технологии // Вестник Казанского технологического университета. 2010. N 11. С. 571–572.
7. Чурсин В.И. Технологические и экологические аспекты кожевенного производства // сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Современные задачи инженерных наук», Москва, 11–12 октября, 2017. С. 25–29.
8. Абдуллин И.Ш., Кулевцов Г.Н., Жуковская Т.В. Улучшение механических характеристик натуральных обувных кож в результате воздействия неравновесной низкотемпературной плазмы // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. N 20. С. 70–71.
9. Кулевцов Г.Н., Жуковская Т.В. Получение нового кожевенного материала и исследование его технологических свойств для получения качественной обуви // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. N 8. С. 176–178.
10. Тихонова Н.В. Абдуллин И.Ш., Махоткина Л.Ю., Жуковская Т.В. Разработка технологии производства обуви с верхом из низкосортной натуральной кожи с использованием ВЧ-плазмы пониженного давления // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. N 5. С. 67–68.
11. Тихонова Н.В., Жуковская Т.В., Абдуллин И.Ш., Махоткина Л.Ю. Применение неравновесной низкотемпературной плазмы для повышения качества комплексного обувного материала на основе низкосортной натуральной кожи // Вестник Казанского технологического университета. 2011. N 22. С. 28–30.
12. Абдуллин И.Ш., Мухаметшин А.М., Красина И.В. Применение плазменного метода модификации свойств высокомолекулярных материалов в производстве натуральных кож // Вестник Казанского технологического университета. 2004. N 1. С. 383–387.
13. Rivel B., Moreira M.T., Bornhardt C., Méndez R., Feijoo G. Life cycle assessment as a tool for the environmental improvement of the tannery industry in developing countries // Environmental science & technology. 2004. V. 38. N 6. P. 1901–1909.

REFERENCES

1. Bogomolova I.P., Krivenko E.I., Popov V.N. The role and features of resource-saving processes in the modern conditions of managing the national economy and implementing state strategic initiatives. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya* [Economy and Management: Problems, Solutions]. 2020, vol. 2, no. 11, pp. 4–15. (In Russian)
2. Navarro D., Wu J., Lin W., Fullana-i-Palmer P., Puig R. Life cycle assessment and leather production. *Journal of Leather Science and Engineering*, 2020, vol. 2, pp. 1–13.
3. Joseph K., Nithya N. Material flows in the life cycle of leather. *Journal of Cleaner Production*, 2009, vol. 17, no. 7, pp. 676–682.
4. Sundar V.J., Raghavarao J., Muralidharan C., Mandal A.B. Recovery and utilization of chromium-tanned proteinous wastes of leather making: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, vol. 41, no. 22, pp. 2048–2075.
5. Thanikaivelan P., Rao J.R., Nair B.U., Ramasami T. Recent trends in leather making: processes, problems, and pathways. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2005, vol. 35, no. 1, pp. 37–79.
6. Kulevtsov G.N., Voznesensky E.F., Abdullin I.Sh. Reduction of structural defects in leather production using plasma technology. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2010, no. 11, pp. 571–572. (In Russian)
7. Chursin V. I. Tekhnologicheskie i ekologicheskie aspekty kozhevennogo proizvodstva [Technological and environmental aspects of leather production]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo simpoziuma «Sovremennye zadachi inzhenernykh nauk»*,

Moskva, 11–12 oktyabrya, 2017 [Collection of scientific papers of the International Scientific and Technical Symposium “Modern Problems of Engineering Sciences”, Moscow, October 11–12, 2017]. Moscow, 2017, pp. 25–29. (In Russian)

8. Abdullin I.Sh., Kulevtsov G.N., Zhukovskaya T.V. Improvement of mechanical characteristics of natural shoe leather as a result of exposure to nonequilibrium low-temperature plasma *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2014, vol. 17, no. 20, pp. 70–71. (In Russian)

9. Kulevtsov G.N., Zhukovskaya T.V. Obtaining a new leather material and studying its technological properties for producing high-quality footwear. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2015, vol. 18, no. 8, pp. 176–178. (In Russian)

10. Tikhonova N.V., Abdullin I.Sh., Makhotkina L.Yu., Zhukovskaya T.V. Development of a technology for producing footwear with an upper made of low-grade genuine leather using low-pressure RF plasma. *Vestnik*

Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2013, vol. 16, no. 5, pp. 67–68. (In Russian)

11. Tikhonova N.V., Zhukovskaya T.V., Abdullin I.Sh., Makhotkina L.Yu. Application of nonequilibrium low-temperature plasma to improve the quality of complex shoe material based on low-grade natural leather. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2011, no. 22, pp. 28–30. (In Russian)

12. Abdullin I.Sh., Mukhametshin A.M., Krasina I.V. Application of the plasma method for modifying the properties of high-molecular materials in the production of natural leather. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2004, no. 1, pp. 383–387. (In Russian)

13. Rivela B., Moreira M.T., Bornhardt C., Méndez R., Feijoo G. Life cycle assessment as a tool for the environmental improvement of the tannery industry in developing countries. *Environmental science & technology*, 2004, vol. 38, no. 6, pp. 1901–1909.

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Татьяна В. Жуковская собрала данные, проанализировала результаты экспериментов и подготовила рукопись. Лилия Р. Ханнанова-Фахрутдинова разработала научную концепцию и корректировала рукопись до подачи в редакцию. Гузель И. Гарипова и Лейсан Р. Фатхуллина провели экспериментальные исследования и описали их. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Tatiana V. Zhukovskaya collected data, analysed the experimental result and prepared the manuscript. Liliya R. Khannanova-Fakhrutdinova developed the scientific concept and corrected the manuscript before submission to the Editor. Guzel I. Garipova and Leysan R. Fatkhullina conducted the experimental studies and described them. All authors have equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Татьяна В. Жуковская / Tatiana V. Zhukovskaya <https://orcid.org/0000-0002-4006-6691>

Лилия Р. Ханнанова-Фахрутдинова / Liliya R. Khannanova-Fakhrutdinova <https://orcid.org/0000-0003-3478-7369>

Гузель И. Гарипова / Guzel I. Garipova <https://orcid.org/0000-0002-8432-2044>

Лейсан Р. Фатхуллина / Leysan R. Fatkhullina <https://orcid.org/0000-0002-5861-6487>

Оригинальная статья /Original article

УДК 332.12, 338.1

DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-26

The article is published in author's edition / Статья публикуется в авторской редакции



Legal and Economic Basis of Western Sanctions and their Impact on Food Security and Russian National Independence

Natalia E. Buletova^{1,3}, Eida V. Golomanchuk², Mikhail G. Polozkov¹, Svetlana A. Skachkova³, Ekaterina V. Stepanova², Galina V. Timofeyeva¹ and Rashida I. Yabbarova¹

¹Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russia

²Volgograd Institute of Management, branch of RANEPa, Volgograd, Russia

³St. Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Principal contact

Natalia E. Buletova, Doctor of Sciences (Economics), Professor, Department of State Regulation of the Economy, Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation; 84 bld.1 Prospekt Vernadskogo, Moscow, Russia 119606.

Tel. +79033702216

Email buletova-ne@ranepa.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4808-906X>

How to cite this article

Buletova N.E., Golomanchuk E.V., Polozkov M.G., Skachkova S.A., Stepanova E.V., Timofeyeva G.V., Yabbarova R.I. Legal and Economic Basis of Western Sanctions and their Impact on Food Security and Russian National Independence. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):278-288. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-26

Received 25 November 2025

Revised 6 December 2025

Accepted 8 December 2025

Abstract

Aim. Develop an algorithm to diagnose the consequences of Western sanctions on Russian agricultural development, considering state priorities for independence and import substitution. The need stems from agriculture's localization and the imperative to ensure food security/national independence via domestic resources or trade.

Utilized statistical databases on agriculture in Russian regions. Employed statistical analysis, indicative planning, security diagnostics, and algorithm-based modeling.

The outcomes include legal identification of the nature and expected goals of Western sanctions in the sphere of food security and national independence; a methodology for assessing sanctions' impact on agricultural activity and its independence; proposals to improve planning for regional independence from sanctions' negative effects within national food market.

Presents the results of developing a methodology for assessing the impact of sanctions on the development of Russian agriculture, based on the function of food independence for meta-group food products (Russian Food Security Doctrine). An original system of indicators for diagnosing the level of agricultural dependence/independence on sanctions was proposed, spanning from micro to macro levels. Testing the original methodology for assessing the sanctions impact on agricultural development yielded evaluation results at both regional and national levels, covering individual meta-group food products and their aggregate.

Key Words

Food independence function, level of sanctions independence, agricultural sensitivity (elasticity) of sanctions, food independence multiplier.

Правовая и экономическая основа западных санкций и их влияние на продовольственную безопасность и независимость страны

Наталья Е. Булетова^{1,3}, Эйда В. Голоманчук², Михаил Г. Полозков¹, Светлана А. Скачкова³,
Екатерина В. Степанова², Галина В. Тимофеева¹, Рашида И. Яббарова¹

¹Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, Москва, Россия

²Волгоградский институт управления – филиал РАНХиГС, Волгоград, Россия

³Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Контактное лицо

Наталья Е. Булетова, доктор экономических наук, профессор кафедры государственного регулирования экономики, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ; 119606 Россия, г. Москва, проспект Вернадского, 84, строение 1.

Тел. +79033702216

Email buletova-ne@ranepa.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4808-906X>

Формат цитирования

Buletova N.E., Golomanchuk E.V., Polozkov M.G., Skachkova S.A., Stepanova E.V., Timofeyeva G.V., Yabbarova R.I. Legal and Economic Basis of Western Sanctions and their Impact on Food Security and Russian National Independence // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 270-277. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-26

Получена 25 ноября 2025 г.

Прошла рецензирование 6 декабря 2025 г.

Принята 8 декабря 2025 г.

Резюме

Цель: состоит в проработке алгоритма диагностики последствий влияния санкций на состояние и перспективы развития сельского хозяйства в РФ с учетом приоритетов независимости и импортозамещения, реализуемых в государственной политике. Локальность сельского хозяйства и возможность формировать продовольственную безопасность и независимость собственными ресурсами и мощностями или за счет внешнеэкономической деятельности определяют необходимость выстраивания алгоритма диагностики состава, ожидаемых целей и возможных последствий западных санкций для АПК России.

Использовались статистические базы данных по состоянию сельского хозяйства ряда субъектов РФ для апробации авторских методов и подходов. В ходе исследования были использованы методы статистического анализа, индикативного планирования, диагностики уровня безопасности, моделирование с помощью алгоритма.

Результаты исследования включают: правовую идентификацию природы и ожидаемых целей западных санкций в области продовольственной безопасности и независимости государства; разработку методики оценки влияния санкций на состояние сельскохозяйственной деятельности и ее независимость от этих мер; предложения по совершенствованию подходов к планированию и обеспечению независимости регионов от негативных последствий западных санкций как части национального продовольственного рынка.

В работе представлены результаты разработки методики оценки влияния санкций на развитие сельского хозяйства РФ, в основе которой заложена функция продовольственной независимости по продовольственным товарам мета-группы (в соответствии с Доктриной продовольственной безопасности РФ); предложена оригинальная система показателей диагностики уровня санкционной зависимости/независимости сельского хозяйства от микро- до макроуровня; проведенная апробация оригинальной методики оценки влияния санкций на развития сельского хозяйства позволила получить результаты оценки на региональном и национальном уровне реализации сельскохозяйственной деятельности по отдельным продовольственным товарам мета-группы и по их совокупности.

Ключевые слова

функция продовольственной независимости, уровень санкционной независимости, чувствительности (эластичности) сельского хозяйства к санкциям, мультипликатор продовольственной независимости.

INTRODUCTION

The continuous escalation of western sanctions targeting Russia's and several other nations' economies, which pose significant competition in global and domestic markets for mineral or financial resources, raw materials, food products, etc., demonstrates the incorporation of such measures into western nations' economic practices. These countries aim to preserve their post-industrial economic model, secure markets for their own production and consumers, maintain technological advantages, and ensure high living standard and access to benefits.

Academic literature has developed a substantial body of research on the use of environmental norms and "green" rhetoric as tools for gaining competitive advantages. For instance, Lyon and Montgomery (2015) [1] analyze how companies leverage a "green" image to suppress competitors. Clapp and Dauvergne (2010) [2] examine environmental standards as instruments of economic competition. Articles by Fuchs and Kalfagianni (2010) [3], Levy and Egan (2003) [4], and Banerjee (2008) [5] explore the policies of large corporations imposing "green standards" to marginalize smaller competitors. The works of Porter (e.g., [6]) also investigate the relationship between environmentalism and competition, including market players' exploitation of sustainable development factors.

International studies of this issue (e.g., Bergenäs & Knight, 2017 [7]) predominantly promote the carbon neutrality agenda, aligning with state policy priorities such as the EU Green Deal. The European Green Deal's 2050 targets [8] include reducing imports of oil, natural gas, and coal, on which European industry has long depended, thus carrying significant geopolitical implications, reshaping Europe's energy security and trade relations with neighboring oil- and gas-producing nations. In this context, it is noteworthy that 73.2 % of global greenhouse gas emissions are attributed to energy production, while agriculture accounts for only 18.4 % (with livestock and manure contributing 5.8 % of total emissions) [9].

Russian research from 2018–2024 frequently examines the impact of Western sanctions on Russia's food security (e.g., Gorbunova & Shcheglov, 2020 [10]; Bartenev, 2021 [11]; Perekhodov, 2022 [12]; Lysnikov, 2023 [13]; Timofeeva, Bulekova, & Skachkova, 2024 [14]), as well as other economic sectors (e.g., Sinichenko, 2021 [15]; Zhiryaeva & Svetlov, 2022 [16]) and specific territories (countries, regions), examples include Mirabyan (2020) [17], Tian (2021) [18], and Glinskaya & Polezhaev (2023) [19].

MATERIALS AND METHODS

The study employed traditional methods of statistical analysis (comparison, systematization, and trend analysis). In order to determine the contribution of individual regions and federal districts to ensuring the independence of agricultural activities from Western sanctions, the authors applied the index method, an indicative approach, and developed formulas for calculating the coefficient of agricultural sensitivity to Western sanctions and the food independence multiplier. Additionally, the modeling method was used through the construction of an algorithm for diagnosing the consequences of western sanctions on the development of Russian national agriculture.

RESULTS AND DISCUSSION

Sanctions, as a legal instrument, constitute coercive measures applied against a state or other subjects of international law to influence their behavior or actions. The legal nature of sanctions lies in their capacity to impose specific legal consequences aimed at altering undesirable actions or political

courses. Crucially, the determination of what constitutes "desirable" or "undesirable" is defined not by legal norms – international or domestic – but almost exclusively by the political will of specific individuals or groups. Sanctions may vary in nature: economic, political, military, or social. Depending on their objectives and scope, they may be individual or collective. The legal mechanism of sanctions ensures their legitimacy and lawfulness, enabling states and international organizations to implement them within established legislation or international norms.

The essence of the legal mechanism of sanctions is to ensure the legitimacy and justification of restrictive measures. It encompasses both the legal grounds for imposing sanctions and their juridical consequences. Within this framework, it is essential to recognize that sanctions must target specific (at least declared) objectives, such as restoring international legal order, halting human rights violations, or preventing aggression. International organizations like the UN play a pivotal role in this mechanism by establishing rules and procedures governing sanction implementation. They create a relative, constructive legal framework defining when and how sanctions may be imposed.

The legal mechanism of sanctions also includes monitoring and evaluation to assess the effectiveness of imposed measures and their impact on the target state. Thus, the legal mechanism of sanctions can be defined as an organized set of juridical rules and procedures regulating the imposition and execution of restrictive measures against states. Its purpose is to modify behavior according to the will of those imposing sanctions, aligning with declared objectives and compliance with international norm, while balancing the efficacy of such measures against the protection of fundamental rights and freedoms.

Each country pursues its own approach to overcoming sanctions. China's response, for instance, was the enactment of the Law of the People's Republic of China on Countering Foreign Sanctions, which establishes grounds for adopting "countermeasures" recognized under international law. Despite China's partial successes, unresolved issues persist—such as further clarifying the division of responsibility regarding the implementation of countermeasures under this law and ensuring their consistency with China's international obligations [20, p. 48].

In Russia, beyond measures introduced by Presidential Decree No. 79 of February 28, 2022 (On Special Economic Measures in Response to Unfriendly Actions by the United States and Affiliated Foreign States and International Organizations) and Decree No. 81 of March 1, 2022 (On Additional Temporary Economic Measures to Ensure Financial Stability of the Russian Federation), Presidential Decree No. 100 of March 8, 2022 (On Special Economic Measures in Foreign Trade to Ensure the Security of the Russian Federation) established the following measures until December 31, 2025, to safeguard national security, industrial continuity and its uninterrupted functioning:

a) A ban on exporting from and/or importing into the Russian Federation products and/or raw materials specified on the lists determined by the Government of the Russian Federation;

b) Restrictions on exporting from and/or importing into the Russian Federation products and/or raw materials specified in lists determined by the Government of the Russian Federation;

c) Increased export and/or import customs duty tariffs for products and/or raw materials exported from and/or

imported into the Russian Federation, as per lists determined by the Government of the Russian Federation.

Additionally, under Russian legislation, force majeure exempts parties from liability for breaches of obligations in commercial activities. This provision may be overridden by contractual agreement (Clause 3, Article 401 of the Civil Code of the Russian Federation).

The legal avenue for contesting sanctions constitutes a set of juridical mechanisms and procedures enabling states or their entities to challenge the legality and validity of restrictive measures imposed against them, utilizing norms of international and domestic law. This process involves access to legal remedies—such as litigation, appeals, and petitions to international bodies vested with the authority to assess the lawfulness of sanctions.

The economic basis of Western sanctions rests primarily on implementing the European model of competitive struggle against the largest "adversary" in global markets for grain and other commodities. Through this, the EU and other Western nations seek not only preferential access to resource markets but also advantages in finished goods and services markets. This includes establishing price monopolization for their exported products and protecting against the dissemination of new technologies, which are sourced and utilized for these purposes by their residents.

If we analyze self-sufficiency indicators across Russian regions before and after 2022, we observe increased food production (according to "The Level of Self-Sufficiency in Basic Food Products in the Russian Federation for 2019–2023" Rosstat materials). These food products can be categorized into three groups based on observed changes in self-sufficiency levels over time:

Group I: Products for which Russia has restored self-sufficiency levels regardless of sanctions applied from 2014 up to present, indicating high food independence. This group includes: meat, milk, eggs, potatoes, vegetables.

Group II: Products demonstrating stable self-sufficiency during the analysis period (since 2010), with no significant growth, reflecting stagnant domestic demand and high external competition (primarily among former Soviet republics). This group includes: milk and eggs.

Group III: Products of combined nature, characterized by dependence on Western sanctions and imported components. We propose including foods that showed negative growth in self-sufficiency levels in 2023 compared to 2022: grain, fish, fruits, berries.

Fig. 1 shows the distribution results of these agricultural products across Russia.

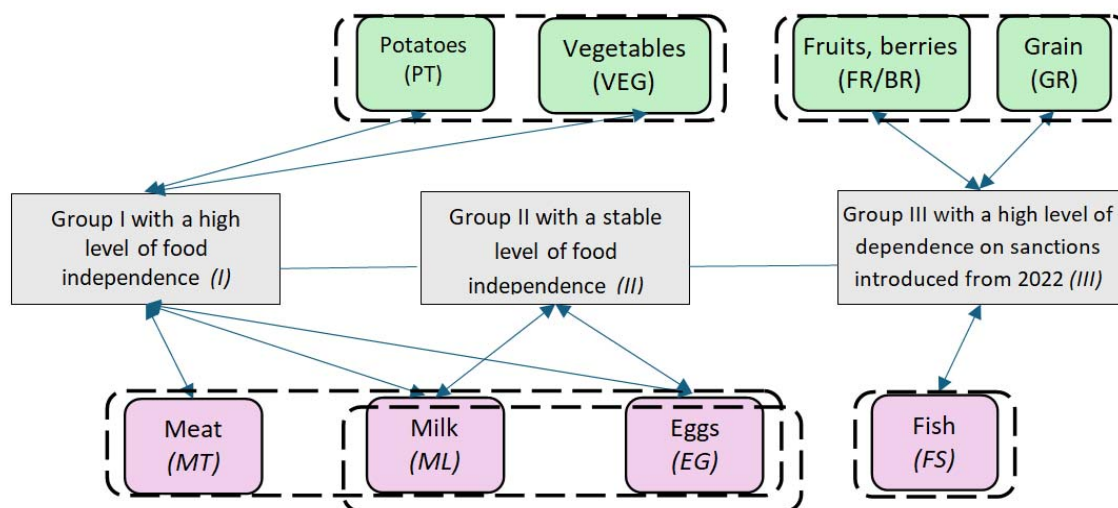


Figure 1. Distribution of meta-group food products into 3 groups by Russia's food independence level

Source: Compiled by the authors

In order to systematize the distribution of these food products across groups, we present the results in matrix form (Table 1). This matrix enables the identification of combinations for dual-product production models and varying levels of import dependency.

The Matrix notations carry the following core interpretations:

1) Alphabetic numerics (GR, MT, ML, etc.): Identify meta-group food products and classify them as crop/livestock origin;

2) x_1 and x_2 : Denote the factor's role and position in the food independence function (sanctions resilience, import dependency, etc.);

3) "-" and "+" signs: indicate negative (inverse) or positive (direct) impact of sanctions on the meta-group product's contribution to food independence;

4) V_i values (weights of x_i in achieving food independence): Expert-assigned, sum to 1 (100 %).

Consequently, the food independence function for meta-group products takes the form:

$$F(\text{food_Ind}) = a + V_1 \cdot x_1 + V_2 \cdot x_2 \quad (1)$$

where:

a : Equation parameter (theoretical minimum food independence threshold when x_1 and $x_2 = 0$) (it is a theoretical value and cannot be measured in practice);

V_1 : Weight of x_1 in achieving food independence;

x_1 : Tier-1 meta-group product (prioritized by agricultural output share, domestic/export demand, sustainable price growth, etc.);

V_2 : Weight of x_2 in achieving food independence;

x_2 : Tier-2 meta-group product (secondary influence by share, demand, price dynamics, etc.).

The authors propose a sanctions impact assessment methodology using this two-factor food independence function to optimize production structures from micro to macro levels:

Phase 1: Apply multiple food independence functions (from 56 combinations) to identify optimal meta-group production structures at enterprise, municipal, regional, and national

levels (universality of application within the framework of the scale-invariant approach). This yields context-appropriate production strategies accounting for sanctions.

Table 1. Matrix of multi-scenario interpretation for the two-factor food independence function $F(\text{food_Ind})$ for meta-group food products (56 combinations)

Meta-group products	Grain (GR), x_2	Meat (MT), x_2	Milk (ML), x_2	Eggs (EG), x_2	Fish (FS), x_2	Potatoes (PT), x_2	Vegetables (VEG), x_2	Fruits, berries (FR/BR), x_2	Value V_i
Grain (GR), x_1	I III*	x_1^- x_2^+	x_1^- x_2^+	x_1^- x_2^+	x_1^- x_2^-	x_1^- x_2^+	x_1^- x_2^+	x_1^- x_2^-	0,02
Meat (MT), x_1	x_1^+ x_2^-	I	x_1^+ x_2^+	x_1^+ x_2^+	x_1^+ x_2^-	x_1^+ x_2^+	x_1^+ x_2^+	x_1^+ x_2^-	0,02
Milk (ML), x_1	x_1^+ x_2^-	x_1^+ x_2^+	II	x_1^+ x_2^+	x_1^+ x_2^-	x_1^+ x_2^+	x_1^+ x_2^+	x_1^+ x_2^-	0,02
Eggs (EG), x_1	x_1^+ x_2^-	x_1^+ x_2^+	x_1^+ x_2^+	II	x_1^+ x_2^-	x_1^+ x_2^+	x_1^+ x_2^+	x_1^+ x_2^-	0,01
Fish (FS), x_1	x_1^- x_2^-	x_1^- x_2^+	x_1^- x_2^+	x_1^- x_2^+	III	x_1^- x_2^+	x_1^- x_2^+	x_1^- x_2^-	0,01
Potatoes (PT), x_1	x_1^+ x_2^-	x_1^+ x_2^+	x_1^+ x_2^+	x_1^+ x_2^+	x_1^+ x_2^-	I	x_1^+ x_2^+	x_1^+ x_2^-	0,01
Vegetables (VEG), x_1	x_1^+ x_2^-	x_1^+ x_2^+	x_1^+ x_2^+	x_1^+ x_2^+	x_1^+ x_2^-	x_1^+ x_2^+	I	x_1^+ x_2^-	0,005
Fruits, berries (FR/BR), x_1	x_1^- x_2^-	x_1^- x_2^+	x_1^- x_2^+	x_1^- x_2^+	x_1^- x_2^-	x_1^- x_2^+	x_1^- x_2^+	I III**	0,005

* Meta-product with highest global grain market competition level

** Meta-products with highest import dependency in domestic production

Phase 2: Conduct graphical analysis (correlation field for x_1 and x_2) with interpretations of each combination's optimal production structure under sanctions and other factors (state protectionism, falling domestic demand, high storage/transport costs, etc.).

Phase 3: Determine sanctions dependency/independence level for the meta-group for an

agricultural enterprise, municipal economy, regional or national economy using Table 2 formulas:

If $0 < U_{san} < 1$ is an acceptable sanctions independence.

If $U_{san} > 1$ is high sanctions dependency.

Phase 4: Additional calculations of the elasticity (sensitivity) of food independence to sanctions pressure on meta-products and the food independence multiplier (see Table 3).

Table 2. Formula system for calculating sanctions dependency/independence level of meta-group food products

Indicator	Calculation Formula	Formula Breakdown
Level of sanction dependence/independence for the micro level:	$U_{san_farmer} = \frac{D_{x\ san_farmer}}{D_{x\ no/san_farmer}}$	U_{san_farmer} is a level of dependence/independence of agricultural producer on sanctions; $D_{x\ san_farmer}$ is a share of meta-level food products showing dependence on the introduction of sanctions through a decrease in production volume; $D_{x\ no/san_farmer}$ is a share of meta-level food products not showing dependence on the introduction of sanctions and not reducing the rate of growth of production volume
Level of sanction dependence/independence for the municipal/regional/national level:	$U_{san\ mun} = \frac{D_{x\ san\ mun}}{D_{x\ no/san\ mun}}$ $U_{san\ reg\ econ} = \frac{D_{x\ san\ reg}}{D_{x\ no/san\ reg}}$ $U_{san\ nat.\ econ} = \frac{D_{x\ san\ nat}}{D_{x\ no/san\ nat}}$	$U_{san\ mun}$ is a level of dependence/independence of municipal economy/regional economy/national economy; $D_{x\ san\ mun}$ is a share of meta-level food products showing dependence on the introduction of sanctions through a decrease in production volume over the period; $D_{x\ no/san\ mun}$ is a share of meta-level food products not showing dependence on the introduction of sanctions and not reducing the rate of growth of production volume over the period

Source: Compiled by the authors

Consequently, the algorithm for diagnosing the consequences of sanctions on food security and independence is structured as follows (Fig. 2).

The developed approach to assessing import substitution levels and sanctions' impact on national agricultural development complements official tools and

methods of state and private agricultural anti-sanctions policy. strategies in the global meta-group food market.
It enables proactive responses to Western competitive

Table 3. Indicators for assessing food independence elasticity and the multiplier effect from meta-group food production dynamics

Indicators	Calculation Formula	Formula Breakdown
1. Coefficient of agricultural sensitivity (elasticity) to sanctions	$ E = \frac{Y_1 - Y_0}{Y_0} \div \frac{X_1 - X_0}{X_0}$ $I > E > 0$	Measures agriculture’s sensitivity (Y) to changes in sanctions composition (X). Represents the percentage change in Y when X changes by 1%.
2. Food independence multiplier	$m_{food_ind} = \frac{\Delta FInd_{lev}}{\Delta Q_{meta}} > 1$	Measures how food independence ($\Delta FInd_{lev}$) changes based on self-sufficiency level data when the production volume of meta-group food products (ΔQ_{meta}) changes.

Source: Compiled by the authors

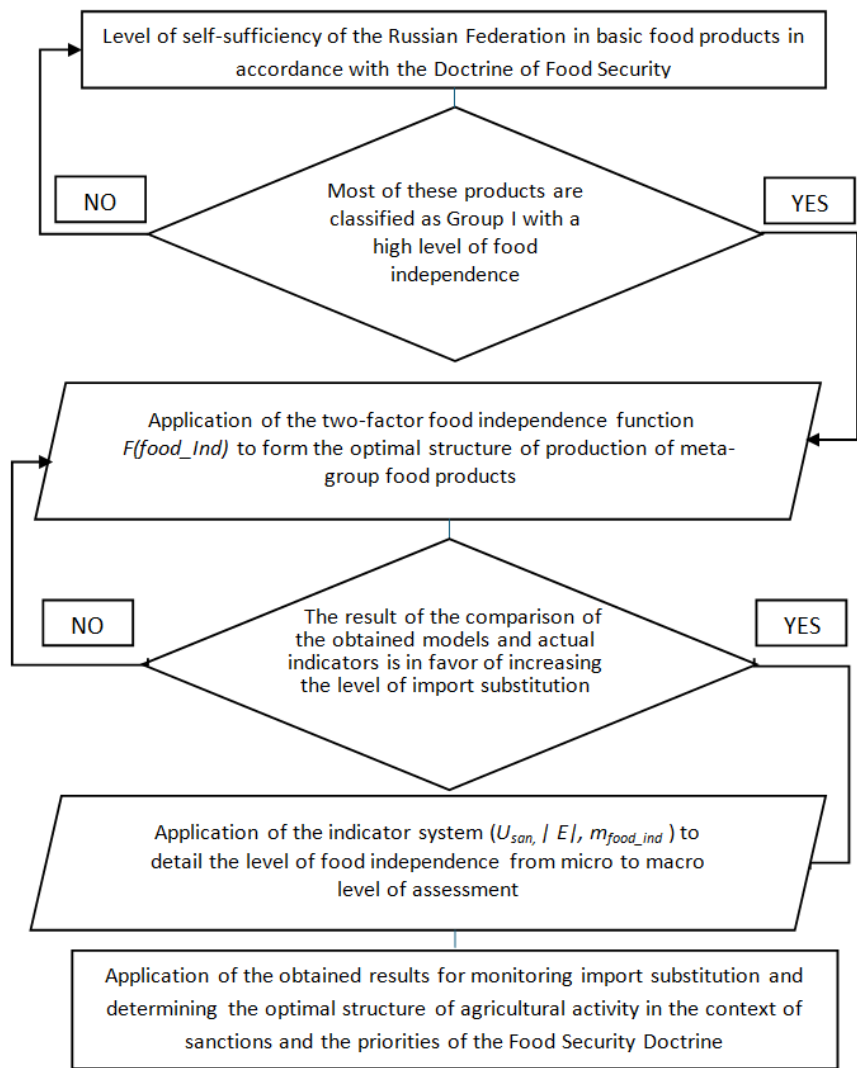


Figure 2. Algorithm for diagnosing the consequences of sanctions on food security and independence
Source: Compiled by the authors

In order to test the proposed framework, we utilized regional classification results by food independence level from the authors’ 2024 study [14]:
Type I: "Low food independence" (0–50 % of the Food Security Doctrine threshold);
Type II: "Medium food independence" (50 % to the Doctrine threshold);

Type III: "High food independence" (Doctrine threshold and above).
Table 4 presents the 2023 distribution of Russian regions across these three types for meta-group food self-sufficiency.

Table 4. Distribution of Russian regions by meta-group food self-sufficiency level (2023)

Russian constituent entity type	Grain		Meat		Milk		Eggs		Potatoes		Vegetables		Fruits/Berries	
	Quantity	%	Quantity	%	Quantity	%	Quantity	%	Quantity	%	Quantity	%	Quantity	%
Type I	23	28,0%	21	25,6%	13	15,9%	24	29,3%	10	12,2%	28	34,1%	46	56,1%
Type II	12	14,6%	25	30,5%	30	36,6%	25	30,5%	32	39,0%	35	42,7%	19	23,2%
Type III	47	57,3%	36	43,9%	39	47,6%	33	40,2%	40	48,8%	19	23,2%	17	20,7%
Total	82	100%	82	100%	82	100%	82	100%	82	100%	82	100%	82	100%

Source: Compiled by the authors using Rosstat data "The Level of Self-Sufficiency in Basic Food Products in the Russian Federation for 2019–2023"

The following key conclusions can be made from Table 4:

- Grain production is concentrated in 47 regions (Type III, exceeding the Food Security Doctrine threshold), representing 57.3 % of all regions;
- Similar trends appear for a number of other food products - meat, milk, eggs, and potatoes;
- Vegetables show the highest concentration in Type II constituent entities (with a share of 42.7 % of regions);
- Fruits/berries exhibit the lowest threshold compliance: only 17 constituent entities (20.7 %) achieve

Type III status, while 46 constituent entities (56.1 %) fall into Type I.

Using the Rostov region as an example, we present the procedure for applying the algorithm for diagnosing the consequences of sanctions on food security and independence of this territory:

1) based on data on changes in the level of self-sufficiency of the Rostov region in basic food products for 2019–2023 (Table 5), the following conclusions can be drawn:

We demonstrate the sanctions impact diagnosis algorithm using Rostov region:

Table 5. Self-sufficiency level dynamics for basic food products in Rostov region (2019–2023, %)

Food products from Doctrine	Threshold value	Self-sufficiency level for basic food products, %					Growth rate 2023 vs. 2022, %	Growth rate 2023 vs. 2019, %
		2019	2020	2021	2022	2023		
Grain	95	450,3	463,0	500,0	549,1	612,8	136,1%	111,6%
Meat	85	60,5	59,3	73,5	91,8	89,0	147,1%	96,9%
Milk	90	99,1	98,9	98,3	98,0	96,2	97,1%	98,2%
Eggs	-	116,2	115,9	94,1	109,1	106,2	91,4%	97,3%
Fish	85	no data	no data	no data	no data	no data	no data	no data
Potatoes	95	88,4	86,1	87,9	102,7	102,0	115,4%	99,3%
Vegetables/melon crop:	90	96,7	89,4	88,0	91,8	96,0	99,3%	104,6%
Fruits and berries	60	36,4	35,9	34,9	33,4	27,3	75,0%	81,7%

Source: Compiled by the authors based on Doctrine of Food Security of the Russian Federation (approved by Presidential Decree No. 20 of 21.01.2020)

- Group I with a high level of food independence (I) includes *grain*, *meat*, and *potatoes* (eggs and vegetables did not enter this group compared to nationwide results);
- Group II includes, in addition to the above food products, milk, eggs, and vegetables (contrary to milk and eggs in the nationwide baseline);
- Group 3 was assigned *milk*, *eggs*, and *fruits/berries* (versus fruits/berries, grain, and fish for Russia overall (Fig. 3)).

2) To apply the two-factor food independence function for meta-group food products $F(\text{food_Ind}) = a + V_1 \cdot x_1 + V_2 \cdot x_2$, considering Phase 1 results, we select two combinations with the most positive and negative positions regarding sanctions and sustainable self-sufficiency growth:

- First combination: "Grain-Meat"
- Second combination: "Eggs-Fruits"

Grain (GR), x_1
Eggs (EG), x_1

Meat (MT), x_2
 x_1+ / x_2+
-

Fruits, berries (FR/BR), x_2
-
 x_1+ / x_2-

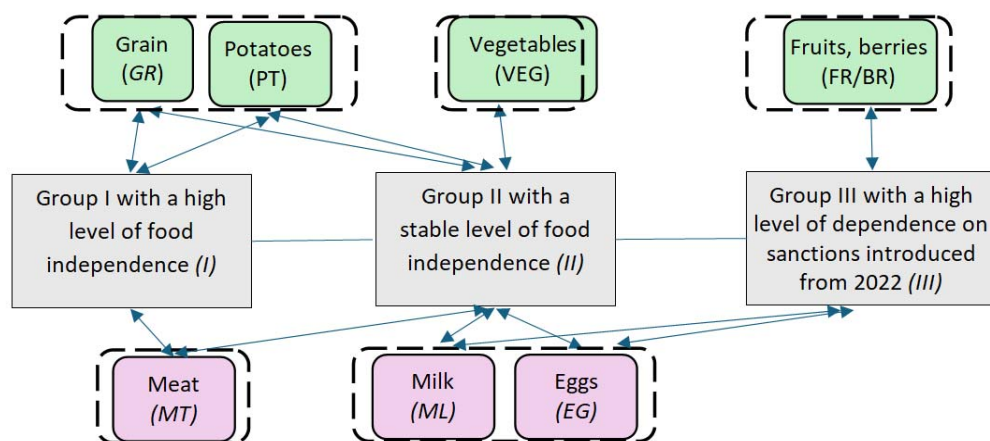


Figure 3. Result of distributing meta-group food products into 3 groups for Rostov region in 2023

Source: Compiled by the authors based on Table 5 data

The data source for $F(\text{food_Ind})$ comes from official materials of the Rostov region territorial branch of Rosstat for 2023 (Table 6).

The calculation results for $F(\text{food_Ind})$ for these two combinations are as follows:

- Grain-Meat:

$$F(\text{food_Ind}) = a + V_1 \cdot x_1 + V_2 \cdot x_2 = 0 + 0,02 \cdot 16170,3 + 0,02 \cdot 287,0 = 329,15$$

- Eggs-Fruits/Berries:

$$F(\text{food_Ind}) = a + V_1 \cdot x_1 + V_2 \cdot x_2 = 0 + 0,01 \cdot 1629,7 + 0,005 \cdot 89,4 = 16,74$$

Using the "Grain-Meat" combination, we present the correlation field for the structural shift in food independence during 2022–2023. The vector shows a pronounced positive direction in both the growth of produced goods and the enhancement of the region's food independence (Fig. 4).

Table 6. Data for applying the two-factor function $F(\text{food_Ind})$ for Rostov region

	2023	Reference – 2022	Self-sufficiency level in 2023, %	Weight values (V_i)
<i>First combination x_1 and x_2</i>				
Grain, thousand tons (x_1)	16170,3	15252,0	612,8	0,02
Meat, thousand tons (x_2)	287,0	286,3	89,0	0,02
<i>Second combination x_1 and x_2</i>				
Eggs, million pcs. (x_1)	1629,7	1673,6	106,2	0,01
Fruits/Berries, thousand tons (x_2)	89,4	н/д	27,3	0,005

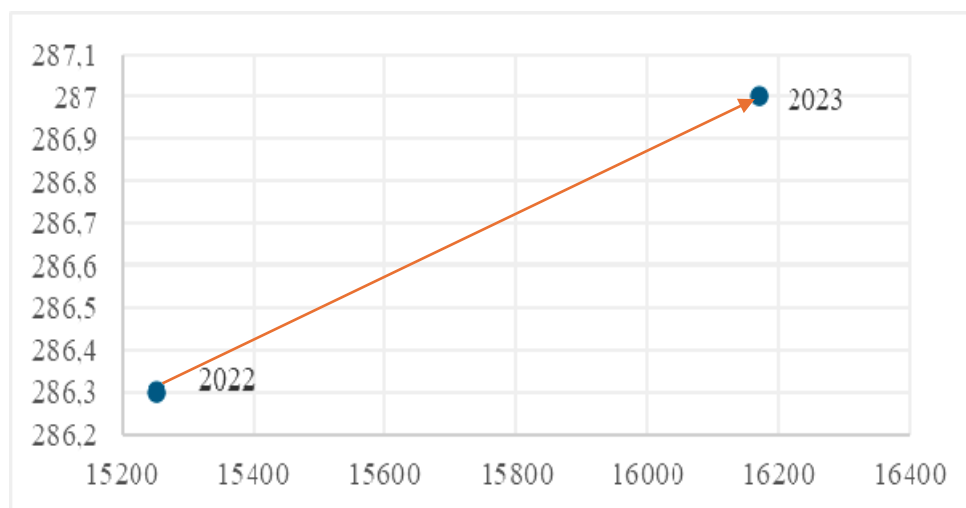


Figure 4. Correlation field for determining the structural shift in the "grain-meat" combination for 2022 and 2023 regarding the increase/decrease in food independence of Rostov region

Source: Compiled by the authors

4) To calculate the level of sanctions dependency/independence of the Rostov region economy in 2023, we use the formula $U_{\text{sanregeconC}}$ with the determination of its components:

- $D_{\text{san_t}}$ includes 3 products – milk, eggs, and fruits/berries (see Fig. 1);

- $D_{\text{xno/sant}}$ includes other products – grain, meat, potatoes, vegetables.

Due to limited author access to detailed databases for calculations, we will use simulated dynamic indicators:

Parameters of the equation $U_{\text{san reg econ}}$ $D_{x \text{ no/san}0} (2022) = 0,85$ $D_{x \text{ no/san}1} (2023) = 0,82$	$D_{x \text{ san}0} (2022) = 0,15$ $D_{x \text{ san}1} (2023) = 0,18$ $U_{\text{san reg econ}} (2022) = \frac{D_{x \text{ san}_t}}{D_{x \text{ no/san}_t}} = \frac{0,15}{0,85} = 0,18$ $U_{\text{san reg econ}} (2023) = \frac{D_{x \text{ san}_t}}{D_{x \text{ no/san}_t}} = \frac{0,18}{0,82} = 0,22$
---	---

Despite $U_{\text{san reg econ}}$ values being less than 1, the trend shows the indicator approaching the threshold value of 1, indicating increasing sanctions impact on the production structure of these meta-group food products.

The elasticity of food independence to sanctions pressure represents the degree of the national agricultural sector's responsiveness to external restrictions, manifested in changes to the volume and structure of food production under negative factors. This definition encompasses both quantitative and qualitative aspects, reflecting the system's ability to promptly adapt to sanctions-induced changes.

Legal foundations for assessing this elasticity include regulations governing agriculture, food security, and sanctions policy. A key element is the existence and content of strategies aimed at supporting and developing domestic agricultural production. These strategies should account for both the current state of the agricultural sector and forecast its development under instability.

Tools for determining the sensitivity of food independence to sanctions pressure may include economic indicators such as food self-sufficiency levels, domestic

market price dynamics, agricultural import/export volumes, consumption structure analysis. The food independence multiplier can be measured through quantitative indicators illustrating how changes in one agro-economic sector affect related industries, including processing and product distribution.

To determine the elasticity (sensitivity) of food independence to sanctions pressure on meta-products and the food independence multiplier, we simulate a calculation database and result interpretation procedure:

- For the sensitivity (elasticity) coefficient $|E|$, we assert that:

o Tracking changes in X (% sanctions growth vs. prior period) is feasible at the national level by the relevant ministry;

o Values of agricultural development results Y should align with regional/national self-sufficiency levels for basic food products (according to Rosstat data);

o For the simulated X and Y database dynamics, it can be presented as:

Parameters for E equation $X_0 (2022) = 1500^*$ $X_1 (2023) = 1650^*$	$Y_0 (2022) = 109,06^{**}$ $Y_1 (2023) = 105,93^{**}$ $E = \frac{Y_1 - Y_0}{Y_0} \div \frac{X_1 - X_0}{X_0} =$ $= 0,2856 > 0$ Sensitivity exists but is closer to 0 than 1 (moderate)
--	---

* Hypothetical examples

** Average self-sufficiency level for meta-group food products across all eight categories in 2022–2023

- Regarding the food independence multiplier $m_{\text{food ind}}$ the following comments are necessary:

o The numerator value in the multiplier formula $FInd_{lev}$ is taken from meta-group food self-sufficiency results (Rosstat);

o Production volume dynamics are determined based on the selected entity (national, regional, or agricultural producer level);

o To demonstrate the formula testing results, we utilize nationwide data due to limited access to regional-level information:

Parameters for equation $m_{\text{food ind}}$ $Q_{\text{meta}0} (2022) = 157,67^*$ $Q_{\text{meta}1} (2023) = 144,9^*$	$FInd_{lev0} (2022) = 191,4\%^{**}$ $FInd_{lev1} (2023) = 173,5\%^{**}$ $m_{\text{food ind}} = \frac{\Delta FInd_{lev}}{\Delta Q_{\text{meta}}} > 1 = \frac{-17,9\%}{-12,77 \text{ млн.т.}} = 1,4$ Multiplier effect is a 1-ton change in Q_{meta} yields a 1.4-fold change in self-sufficiency for this meta-group product
--	---

* Grain production in Russia, million tons

** Average grain (meta-group product) self-sufficiency level in 2022–2023

CONCLUSION

Ensuring agricultural development independent of the global economy and financial market processes entails risks and threats that may significantly undermine it – and sanctions undoubtedly constitute such factors. Western sanctions represent a set of measures aimed at restricting economic and financial capabilities of targeted countries, often implemented through market closures, asset freezes, and technology export restrictions. The legal basis for such sanctions typically stems

from international agreements and national laws driven by political expediency and strategic interests of initiating states.

Food security remains a cornerstone of national long-term security, a factor preserving statehood and sovereignty, a vital component of social and economic policy, and a prerequisite for implementing the strategic national priority: enhancing Russian citizens' quality of life through guaranteed high living standards.

The consequences of sanctions pressure on Russian agricultural development manifest through reduced

availability of certain goods, price increases, and supply chain restructuring, necessitating diversification of food sources and domestic production expansion. In response to external challenges, Russia actively pursues import substitution, enhancing food independence. Simultaneously, this situation demands flexibility and innovative approaches to agricultural policy focused on sustainable development, which could reduce vulnerability to external economic pressures.

Testing of the methodology on the example of the Rostov region confirmed its effectiveness for identifying product groups with critical import dependence (Fruits/Berries), recording positive shifts (Grain and Meat cluster) and calculating multiplier effects when redistributing resources. The developed algorithm for diagnosing the consequences of sanctions, based on a two-factor function of food independence $F(\text{food_Ind})$ and a system of indicators from micro- to macro-level, allows for a quantitative assessment of sanctions risks and prompt adjustment of regional anti-crisis strategies. Thus, Western sanctions, acting as a catalyst for agro-political reforms, form an imperative for the transition to an adaptive model of agro-industrial complex management, where the proposed diagnostic system becomes a tool for scenario planning in the context of global market volatility.

REFERENCES

1. Lyon T.P., Montgomery A.W. The Means and End of Greenwash. *Organization & Environment*, 2015, vol. 28(2), pp. 223–249. DOI: 10.1177/1086026615575332
2. Clapp J., Dauvergne P. Paths to a Green World: The Political Economy of the Global Environment". MIT Press. 2011. <https://doi.org/10.7551/mitpress/5265.001.0001>
3. Fuchs D., Kalfagianni A. The Causes and Consequences of Private Food Governance. *Business and Politics*, 2010, vol. 12(3). <https://doi.org/10.2202/1469-3569.1319>
4. Levy D.L., Egan D.A. Neo-Gramscian Approach to Corporate Political Strategy: Conflict and Accommodation in the Climate Change Negotiations. *Journal of Management Studies*, 2003, vol. 40(4), pp. 803–829. <https://doi.org/10.1111/1467-6486.00361>
5. Banerjee S.B. Corporate Social Responsibility: The Good, the Bad and the Ugly. *Critical Sociology*, 2008, vol. 34(1), pp. 51–79. <https://doi.org/10.1177/0896920507084623>
6. Porter M.E., van der Linde C. Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship. *Journal of Economic Perspectives*, 1995, vol. 9, no. 4, pp. 97–118.
7. Bergenas J., Knight A. Green Terror: Environmental Crime and Illicit Financing. SAIS Review of International Affairs Johns Hopkins University Press., 2015, vol. 35, no. 1, pp. 119–131. <https://doi.org/10.1353/sais.2015.0004>
8. Leonard M., Pisani-Ferry J., Shapiro D., Tagliapietra S., Wolf G. Geopolitika «Zelenoj sdelki» Evropejskogo soyuza [Geopolitics of the European Union's Green Deal]. *Bulletin of International Organizations*, 2021, vol. 16, no. 2, pp. 204–235. (In Russian) DOI: 10.17323/1996-7845-2021-02-10
9. Our World In Data, Climate Watch, the World Resources. Available at: <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector> (accessed 22.05.2025)
10. Gorbunova A.O., Shcheglov V.Yu. The Impact of Sanctions on Russia's Food Security. *Ekonomicheskiye otnosheniya*, 2018, vol. 8, no. 3, pp. 381–388. (In Russian) <http://dx.doi.org/10.18334/eo.9.3.41004>
11. Bartenev V.I. The Impact of Sanctions Pressure on Food Security: Traditional and New Dimensions. *Puti k miru i bezopasnosti*, 2022, no. 2, pp. 11–37. (In Russian). DOI: 10.20542/2307-1494-2022-2-11-37
12. Perekhodov P.P. Food Security of the Country in the Context of Sanctions Pressure and Geopolitical Instability. *Bulletin of the Volgograd State University. Economics*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 55–64. (In Russian) <https://doi.org/10.15688/ek.jvolsu.2023.4.5>
13. Lyasnikov N.V. Threats to food security of the Russian Federation in the context of a new round of sanctions tension. *Food policy and security*, 2023, vol. 10, no. 3, pp. 393–408. (In Russian) <https://doi.org/10.18334/ppib.10.3.118331>
14. Timofeeva G.V., Buletova N.E., Skachkova S.A. Development of the potential of Russia's agriculture in the context of Western sanctions and priorities of food independence. *Bulletin of the Volgograd State University. Economics*, 2024, vol. 26, no. 3, pp. 97–109. (In Russian) <https://doi.org/10.15688/ek.jvolsu.2024.3.8>
15. Sinichenko O.A. The Impact of Sanctions Policy on the State of the Russian Banking Sector. *Bulletin of the Saratov University. New Series. Series: Economics. Management. La*, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 11–20. (In Russian) <https://doi.org/10.18500/1994-2540.2024-24-1-11-20>
16. Zhiryaeva E.V., Svetlov N.M. The Effect of Sanctions on Russian Agricultural Imports. *St Petersburg University Journal of Economic Studies*, 2020, vol. 36, no. 4, pp. 653–674. <https://doi.org/10.21638/spbu05.2020.405>
17. Mirabyan D.G. Assessing the Impact of Sanctions on the Development of the Kaluga Region and Ways to Overcome this Impact. *Kaluga Economic Bulletin*, 2023, no. 3, pp. 11–14. (In Russian)
18. Tian Sh. The Impact of Western Sanctions on the Economic Development of the Republic of Belarus: Current Trends. *Theories and Problems of Political Research*, 2023, vol. 12, no. 5a-6a, p. 32–42. (In Russian) <https://doi.org/10.34670/AR.2023.47.17.006>
19. Glinskaya M.V., Polezhaev M.A. Vliyaniye zapadnykh sanktsiy na dinamiku ekonomicheskogo razvitiya: opyt Irana dlya Rossiyskoy Federatsii [The Impact of Western Sanctions on the Dynamics of Economic Development: Iran's Experience for the Russian Federation]. *Russia and Asia*, 2024, no. 1 (27), pp. 16–30. (In Russian)
20. Bolotova A.B. Anti-foreign Sanctions Law of the PRC in the Context of US Unilateral Economic Sanctions. *Eurasian Law Journal*, 2023, no. 12 (187), pp. 48–51. <https://doi.org/10.46320/2073-4506-2023-12-187-48-51>

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Rashida I. Yabbarova, Eida V. Golomanchuk and Natalia E. Buletova collected factual material on the research topic (theoretical and empirical data). Svetlana A. Skachkova and Galina V. Timofeyeva aligned the authors' ideas with fundamental principles of economic theory regarding sensitivity indicators and multipliers. Ekaterina V. Stepanova and Mikhail G. Polozkov analyzed the consistency of the authors' ideas with foreign sources and compared conclusions and results. All authors participated in analyzing the collected materials, drafting the manuscript, writing the abstract, and compiling the reference list. All authors are equally accountable for any identified plagiarism, self-plagiarism, or other unethical practices.

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Рашида И. Яббарова, Эйда В. Голоманчук, Наталья Е. Булетова собирали фактический материал по теме исследования (теория и эмпирические данные), Светлана А. Скачкова и Галина В. Тимофеева проводили соотношение идей авторов с основными положениями экономической теории по показателям чувствительности, мультипликаторам; Екатерина В. Степанова и Михаил Г. Полозков проводили анализ соответствия идей авторов зарубежным источникам, сравнение выводов и результатов; все авторы принимали участие в анализе собранных материалов, написании рукописи, ее аннотации, списка литературы. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ORCIDНаталья Е. Булетова / Natalia E. Buletova <http://orcid.org/0000-0003-4808-906X>Эйда В. Голоманчук / Ada V. Golomanchuk <http://orcid.org/0000-0003-0962-3901>Михаил Г. Полозков / Mikhail G. Polozkov <https://orcid.org/0000-0002-8763-6284>Светлана А. Скачкова / Svetlana A. Skachkova <http://orcid.org/0000-0003-1555-9360>Екатерина В. Степанова / Ekaterina V. Stepanova <http://orcid.org/0000-0003-4860-0956>Галина В. Тимофеева / Galina V. Timofeyeva <https://orcid.org/0000-0002-3582-4590>Рашида И. Яббарова / Rashida I. Yabbarova <https://orcid.org/0009-0005-4854-4079>

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации: серия ПИ № ФС77-77994 от 03.03.2020 г.

Учредитель (соучредители) журнала:

ООО Издательский Дом «КАМЕРТОН»
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет»

Издатель:

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет»
Адрес издателя: 367000, Россия, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 59е

Адрес редакции: 367000, Россия, г. Махачкала, ул. Дахадаева, 21,
Институт экологии и устойчивого развития ДГУ,
Email dagecolog@mail.ru, моб. тел. +79285375323

Главный редактор

Шестопалов Александр Михайлович, доктор биологических наук, профессор

По всем интересующим Вас вопросам обращаться в редакцию журнала
по контактам:

Гусейнова Надира Орджоникидзева, к.б.н., доцент,
Email dagecolog@mail.ru, моб. тел. +79285375323

Иванушенко Юлия Юрьевна, магистр экологии, Email dagecolog@mail.ru

С ПРАВИЛАМИ ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА «ЮГ РОССИИ: ЭКОЛОГИЯ, РАЗВИТИЕ»
можете ознакомиться на сайте <http://ecodag.elpub.ru>

Founders of journal:

The limited liability company Publishing House «Kamerton»
Dagestan State University

Publisher:

Dagestan State University
367000, Russia, Makhachkala, 59e M. Yaragskogo str.,

Editorial address: 367001, Russia, Makhachkala, 21 Dakhadaeva st.
Email dagecolog@mail.ru, tel. +79285375323

Editor-in-Chief

Alexander M. Shestopalov, Doctor of Biological Sciences, Professor

CONTACT INFORMATION: SCIENTIFIC JOURNAL "SOUTH RUSSIA: ECOLOGY, DEVELOPMENT"

If you have any questions, please contact the editorial office:

Nadira O. Guseynova, Candidate of Biological Sciences, Associate
Professor, Email dagecolog@mail.ru, tel. +79285375323

Yuliya Yu. Ivanushenko, master of ecology, Email dagecolog@mail.ru

Подписные индексы в каталоге «Газеты и журналы» Агентства «Роспечать»:
36814 (полугодовой) и 81220 (годовой).
Цена свободная.

Перепечатка без разрешения редакции запрещена, ссылки на журнал при цитировании обязательны.
Оригинал-макет подготовлен в Институте экологии и устойчивого развития ДГУ.

Подписано в печать 26.01.2026 г.
Объем 289 стр. Тираж 100. Заказ № 57
Формат 70х90%. Печать офсетная.
Бумага офсетная № 1.
Тиражировано в типографии издательства ДГУ
по адресу: г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 59е