

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



ISSN 1992-1098

e-ISSN 2413-0958

Том 21 № 2 2026

ЮГ РОССИИ:

ЭКОЛОГИЯ, РАЗВИТИЕ

SOUTH OF RUSSIA:

ECOLOGY, DEVELOPMENT

Vol. 21 no. 2 2026

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)

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

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)

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)
Игнатьев Г. М., ФГАНУ "ФНЦИРИП им. М.П. Чумакова РАН"
(Институт полиомиелита), Москва, 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)
Онипченко 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 Т.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 (Syktvykar, 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)
George M. Ignatyev, Chumakov Federal Scientific Center for
Research and Development of Immune and Biological Products,
RAS (Moscow, 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)

ГЕОЭКОЛОГИЯ

<i>Федотова Г.В., Ахмедова Х.Г., Капустина Ю.А., Козенко Т.Е., Максютин И.А., Джанчаров Т.М.</i> Влияние климатических подвижек на качество жизни населения южных регионов России.....	6-19
<i>Седнев В.А., Хончев М.А.</i> Методика оценки потерь продукции растениеводства и животноводства после аварии на атомной электростанции.....	20-26
<i>Чибилёв А.А., Падалко Ю.А., Левыкин С.В., Гулянов Ю.А., Ильютчик Д.А., Садертдинов Р.Р., Казачков Г.В.</i> Геоэкологические предпосылки экологической оптимизации степного природопользования в постцелинном районе Оренбургского Зауралья.....	27-39

БОТАНИКА

<i>Мишвелов Е.Г., Панков Н.В., Гусейнова Н.О., Аров Х.Н.</i> Особенности географического распространения сорных растений на территории Ставропольского края.....	40-47
---	-------

ВИРУСОЛОГИЯ

<i>Гогина С.С., Цыганова Г.М., Черепович Б.С., Оксанич А.С.</i> Валидация иммуноферментной тест-системы на основе рекомбинантного антигена d34 для мониторинга протективного гуморального ответа к вирусу денге при иммунизации мышей вакцинным препаратом MVA-d34.....	48-62
<i>Казачинская Е.И., Зибарева Л.Н., Величко В.В., Круглов Д.С., Прокушева Д.Л., Кононова Ю.В., Гуляева М.А., Щелканов М.Ю., Чепурнов А.А.</i> Биохимическая специфика и ингибирующий потенциал этанольных экстрактов кипрея узколистного в отношении вируса простого герпеса 2 типа <i>in vitro</i>	63-80
<i>Моисеенко Д.С., Чернышев Р.С., Пузанкова О.С., Гаврилова В.Л., Иголкин А.С.</i> Выделение вируса африканской чумы свиней в первичной культуре клеток тестикул свиньи.....	81-89

ЗООЛОГИЯ

<i>Мануков Ю.И., Щелканов Е.М., Жбанкова Н.А.</i> Орнитофауна центральной части Верхнеяузского водно-болотного комплекса национального парка «Лосиный остров» в послегнездовой период.....	90-100
---	--------

ЭКОЛОГИЯ

<i>Маленкина К.А., Аринжанов А.Е.</i> Фитохимические соединения: свойства, экологическая безопасность и перспективы применения.....	101-113
<i>Кочкина М.В., Карпунина Д.А., Леонова Д.С., Пушкин В.В., Ольчев А.В., Полухин А.А., Гулев С.К.</i> Сезонная и суточная изменчивость потоков CO ₂ и CH ₄ у поверхности почвы в лесных и травянистых экосистемах черноморского побережья Краснодарского края.....	114-124
<i>Сидорова Т.М., Астахов М.М., Гогина Н.Н., Асатулова А.М.</i> Потенциал штаммов <i>Pseudomonas chlororaphis</i> BZR 245-F и <i>Pseudomonas</i> sp. BZR 523-2 для биоконтроля гриба <i>Fusarium graminearum</i> и его микотоксинов.....	125-133

БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

<i>Хрипко О.П., Коновалов Д.И., Глуценко А.В., Шестопалов М.А., Алексеев А.Ю.</i> Адьюванты в ветеринарии и механизмы их действия.....	134-145
<i>Морковина С.С., Яковенко Н.В., Комов И.В., Макаренко Н.Н., Нацентова Е.А.</i> Комплексная оценка потенциала агролесоводства на землях лесного и сельскохозяйственного назначения (на примере Центральной лесостепи).....	146-161
<i>Мамонтова Т.В., Юрочка С.С., Владимиров Ф.Е., Базаев С.О., Хакимов А.Р.</i> Прогнозирование рахита у молодняка крупного рогатого скота с помощью интеллектуальной системы бесконтактной оценки экстерьерных показателей взрослых животных.....	162-173

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

<i>Гаджиев Н.Г., Коноваленко С.А., Трофимов М.Н., Бекмурзаева Р.Х., Манукян Г.Т.</i> Управление экологическими рисками как элемент системы экономической безопасности современной компании.....	174-186
<i>Дзятковская Е.Н., Лытов М.С.</i> Антропоэкосистема как смысловая единица образования для устойчивого развития.....	187-192
<i>Антонова М.В., Ибатуллина А.Р., Красина И.В.</i> Трансформация образования с учётом экологического тренда на примере одной дисциплины: модернизация процесса подготовки специалистов текстильной промышленности.....	193-199

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ.....200

GEOECOLOGY

- Fedotova G.V., Akhmedova Kh.G., Kapustina Yu.A., Kozenko T.E., Maksyutin I.A., Jancharov T.M.*
The impact of climate change on the quality of life of the population of the southern regions of Russia.....6-19
- Sednev V.A., Khonchev M.A.*
Methodology for estimating losses of crop and livestock production after a nuclear power plant accident.....20-26
- Chibilev A.A., Padalko Yu.A., Levykin S.V., Gulyanov Yu.A., Ilyutichik D.A., Sadertdinov R.R., Kazachkov G.V.*
Geo-ecological prerequisites for steppe land-use optimisation and landscape-ecological framework development in the post-virgin lands region of the Orenburg Trans-Urals, Russia.....27-39

BOTANY

- Mishvelov E.G., Pankov N.V., Guseynova N.O., Arov Kh.N.*
Features of the geographical distribution of weeds in Stavropol Territory, Russia.....40-47

VIROLOGY

- Gogina S.S., Tsyganova G.M., Cherepovich B.S., Oksanich A.S.*
Validation of a d34 recombinant antigen-based ELISA for monitoring protective humoral immunity to dengue virus in MVA-d34-immunized mice.....48-62
- Kazachinskaya E.I., Zibareva L.N., Velichko V.V., Kruglov D.S., Prokusheva D.L., Kononova Yu.V., Gulyaeva M.A., Shchelkanov M.Yu., Chepurinov A.A.*
Biochemical specificity and inhibitory potential of ethanol extracts of *Epilobium angustifolium* against herpes simplex virus type 2 *in vitro*.....63-80
- Moiseenko D.S., Chernyshev R.S., Puzankova O.S., Gavrilova V.L., Igolkin A.S.*
Isolation of the African swine fever virus in primary cultures of pig testicular cells.....81-89

ZOOLOGY

- Manukov Yu.I., Shchelkanov E.M., Zhabankova N.A.*
Avifauna of the central part of the High Yauza wetland complex of the Losiny Ostrov National Park, Russia in the post-breeding period.....90-100

ECOLOGY

- Malenkina K.A., Arinzhyanov A.E.*
Properties and prospects of using phytochemicals.....101-113
- Kochkina M.V., Karpunina D.A., Leonova D.S., Pushkin V.V., Olchev A.V., Polukhin A.A., Gulev S.K.*
Seasonal and daily variability of CO₂ and CH₄ fluxes at the soil surface in forest and grassland ecosystems of the Black Sea coast of Krasnodar Territory, Russia114-124
- Sidorova T.M., Astakhov M.M., Gogina N.N., Asaturova A.M.*
Potential of *Pseudomonas chlororaphis* BZR 245-F and *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 strains for biocontrol of *Fusarium graminearum* and its mycotoxins.....125-133

BIOLOGICAL RESOURCES

- Khripko O.P., Kononov D.I., Glushchenko A.V., Shestopalov M.A., Alekseev A.Yu.*
Adjuvants in veterinary medicine and their mechanisms of action.....134-145
- Morkovina S.S., Yakovenko N.V., Komov I.V., Makarenko N.N., Natsentova E.A.*
Comprehensive Assessment of the Potential for Agroforestry on Forest and Agricultural Lands (Using the Central Forest Steppe of Russia as an Example).....146-161
- Mamontova T.V., Yurochka S.S., Vladimirov F.E., Bazaev S.O., Khakimov A.R.*
Prediction of rickets in young cattle using an intelligent system for contactless assessment of the external parameters of adult animals.....162-173

GENERAL PROBLEMS

- Gadzhiev N.G., Kononov S.A., Trofimov M.N., Bekmurzaeva R.Kh., Manukyan G.T.*
Environmental risk management as an element of the economic security system of a modern company.....174-186
- Dzyatkovskaya E.N., Lytov M.S.*
Anthropoecosystem as a semantic unit of education for sustainable development.....187-192
- Antonova M.V., Ibatullina A.R., Krasina I.V.*
The transformation of education, taking into account the environmental trend, using the example of one discipline: modernisation of the training process for specialists in the textile industry.....193-199

- CONTACT INFORMATION**.....200

Влияние климатических подвижек на качество жизни населения южных регионов России

Гилян В. Федотова¹, Хамида Г. Ахмедова², Юлия А. Капустина³, Татьяна Е. Козенко⁴, Илья А. Максютин⁴, Турмушбек М. Джанчаров⁵

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия

²МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

³Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

⁴Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия

⁵Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, 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

Федотова Г.В., Ахмедова Х.Г., Капустина Ю.А., Козенко Т.Е., Максютин И.А., Джанчаров Т.М. Влияние климатических подвижек на качество жизни населения южных регионов России // Юг России: экология, развитие. 2026. Т.21, N 2. С. 6-19. DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-1

Получена 26 января 2026 г.

Прошла рецензирование 21 февраля 2026 г.

Принята 25 апреля 2026 г.

Резюме

Провести анализ климатических изменений в глобальном мире и определить уровень влияния данных трансформаций на качество жизни населения Юга России. Южные регионы России традиционно специализировались на сельскохозяйственном производстве, что иллюстрирует высокую степень зависимости экономического благосостояния от агроклиматических параметров.

В процессе написания статьи были использованы методы систематизации, обобщение, классификации, сопоставление цифровых данных, статистического анализа динамических рядов, методы прогнозирования и логического анализа.

Авторами были проанализированы параметры современного социально-экономического положения регионов Южного Федерального Округа России в контексте климатических контрастов, наблюдаемых на протяжении ряда лет. Проведены оценки динамики изменения некоторых параметров и сделаны прогнозы об их будущем состоянии. По результатам оценок были сделаны выводы о необратимости глобальных климатических подвижек и их косвенном влиянии на здоровье и благополучие населения различных регионов.

По итогам проведенного исследования были разработаны рекомендации по пересмотру практики и подходов к организации сельскохозяйственного производства в южных регионах России и внедрению технологий адаптационного растениеводства и животноводства для сохранения устойчивой производственной базы.

Ключевые слова

Климат, изменения, сельское хозяйство, качество жизни, население, параметры, здоровье, доходы.

The impact of climate change on the quality of life of the population of the southern regions of Russia

Gilyan V. Fedotova¹, Khamida G. Akhmedova², Yulia A. Kapustina³, Tatyana E. Kozenko⁴, Ilya A. Maksyutin⁴ and Turmushbek M. Jancharov⁵

¹Federal Research Centre, Informatics and Control, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

³Ural State Forestry University, Yekaterinburg, Russia

⁴Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia

⁵Russian State Agrarian University-Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

Principal contact

Gilyan V. Fedotova, Doctor of Economics, Associate Professor, Leading Researcher, Informatics and Control Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences; bldg 2 44 Vavilov St, Moscow, Russia 119333.

Tel. +79033757374

Email g_evgeeva@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2066-8628>

How to cite this article

Fedotova G.V., Akhmedova Kh.G., Kapustina Yu.A., Kozenko T.E., Maksyutin I.A., Jancharov T.M. The impact of climate change on the quality of life of the population of the southern regions of Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2026; 21(2):6-19. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-1

Received 26 January 2026

Revised 21 February 2026

Accepted 25 April 2026

Abstract

To analyse global climate change and determine the impact of these transformations on the quality of life of the population of southern Russia. Russia's southern regions have traditionally specialised in agricultural production, illustrating the high dependence of economic well-being on agroclimatic parameters.

In the process of writing the article, methods of systematisation, generalisation, classification, comparison of digital data, statistical analysis of dynamic series, forecasting methods and logical analysis were used.

The authors analysed the current socioeconomic conditions of the regions of Russia's Southern Federal District in the context of climate contrasts observed over several years. They assessed the dynamics of change in several parameters and made forecasts for their future state. Based on these assessments, they concluded that global climate change is irreversible and has an indirect impact on the health and well-being of the populations of various regions.

Based on the results of the study, recommendations were developed for revising practices and approaches to organising agricultural production in the southern regions of Russia and introducing adaptive crop and livestock production technologies to maintain a sustainable production base.

Key Words

Climate, change, agriculture, quality of life, population, parameters, health, income.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема изменения климата в последние десятилетия приобретает актуальность в связи с ростом народонаселения в развивающихся странах и необходимостью обеспечения достаточного количества продовольствия и товаров для удовлетворения основных потребностей людей в пище, в услугах, в жилье. Масштабы нашей страны дают возможность наблюдать последствия изменения климата практически во всех климатических зонах и поясах. Эпоха глобального потепления, которая сегодня набирает обороты, отражается на многих аспектах жизни населения страны. Как правило, данные последствия имеют экономическую составляющую в виде дополнительных расходов на бюджеты всех уровней и субъектов экономики [1]. Дополнительным фактором риска в сложившейся ситуации становится нестабильность климатических прогнозов и сезонные колебания температур и количества выпадаемых осадков.

К примеру, заморозки в мае 2025 г. привели к тому, что в ряде регионов Юга России замерзли посевы зерновых и бобовых, что привело в конечном итоге к сокращению валового сбора урожая на 20–25 % в зависимости от уровня потерь; последние 2 года растениеводы отмечают продолжительные периоды засухи, что также отражается на объемах сбора сельскохозяйственных культур.

Другой пример, регионы Сибири и Дальнего Востока также подвергаются продолжительным засушливым периодам ежегодно, что отражается на росте количества лесных пожаров в тайге. Так, в 2024 году по оперативным данным служб огнем были охвачены сотни тысяч гектаров леса, что существенно снижает экологический фон территории, нарушает транспортную логистику, создает рост заболеваемости в городах регионов. Сдвинулись в 2024 году даты схода

снега на 2–3 недели раньше традиционных дат, что со временем меняет увлажнение почвы и провоцирует весенние паводки.

Если рассматривать Арктический регион, то глобальное потепление отражается в изменчивости ледяной обстановки: льды то тают с высокой скоростью, то нарастают и усиливают нагрузку на почву. Под такими движениями льдов сильно деформируется почва и грунт, потому что смена циклов промерзания-протаивания имеют последствия в форме просадки, размывов и движения грунта. Неустойчивость грунта ведет к нарушениям транспортной коммуникации и логистики, устойчивости зданий и сооружений.

Климатические подвижки невозможно остановить, так как они имеют масштабы планетарного характера: будут устанавливаться новые температурные рекорды, резко меняться погода и темпы изменений будут только нарастать, что отразится на общем качестве жизни населения. По данной причине сегодня происходит переход к новым моделям рационального и бережливого потребления и производства, разрабатываются и запускаются в практику работы стратегические документы и национальные проекты, направленные на адаптацию всех социально-экономических сфер к новым окружающим условиям жизни [2; 3].

Мировые исследования, проводимые различными международными научными школами климатологов, на протяжении десятков лет пришли к выводу о том, что процесс повышения температуры поверхности Мирового океана имеет устойчивый повышательный тренд и в 2025 году составила $18,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, выше среднегодового уровня на $0,49 \pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$. Исследователи доказали, что на протяжении последние 20 лет, в южной акватории Океана темп нагрева увеличился в 4 раза (рис. 1).

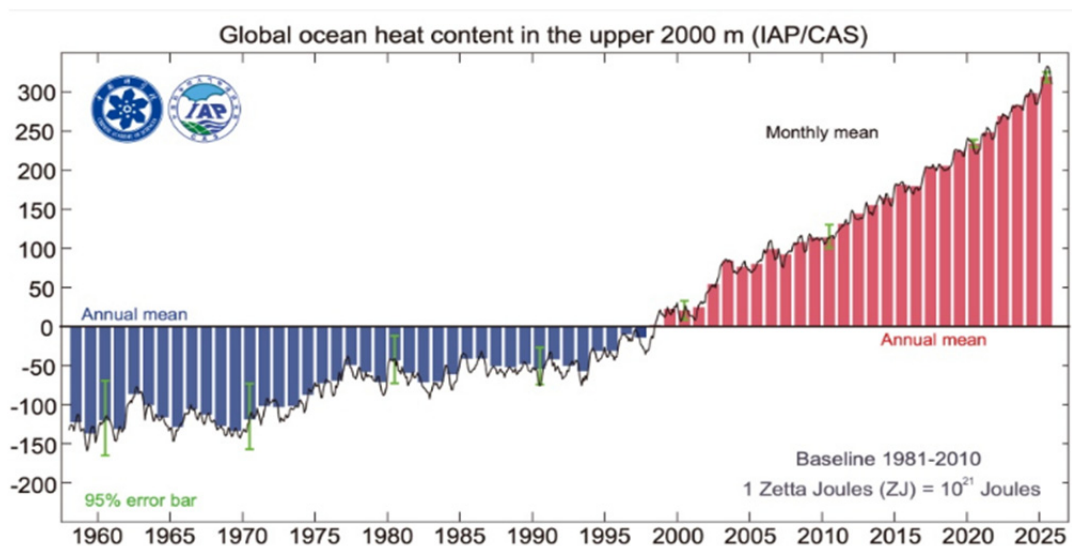


Рисунок 1. Скорость нагрева Мирового океана до глубины 2000 метров в 2025 году [2; 3; 4]

Figure 1. The rate of warming of the World Ocean to a depth of 2000 metres in 2025 [2; 3; 4]

На рисунке 1 представлены результаты исследований ученых Китайской академии наук, которые с помощью данных температурных профилей World Ocean Database, флотилии Argo и микроволновых радиометров на спутниках FengYun-3 доказали, что происходит планомерный рост нагрева поверхности Мирового океана, в 2025 году его теплоёмкость выросла на

величину от 13 до 70 зеттаджоулей. Таким образом, в 2025 году океан поглотил рекордное количество антропогенного тепла, что негативно отразилось на его экосистеме и сократило видовое биоразнообразие прибрежных акваторий [4; 5].

Повышение общего температурного фона поверхности океана вызвано высокими выбросами

углекислого газа в атмосферу, которое почти на 90 % поглощает океан, но при этом растет его температура, и повышается уровень воды. В краткосрочной перспективе данные подвижки не являются критичными, но в стратегическом горизонте планирования от 20–50 лет эти тенденции будут трансформировать не только региональное перераспределение ресурсов, но и отразится на плотности и локализации населения Земли [6].

Изменчивость климата – реальность, в которой нам придется жить и работать. Россия с ее огромной и разнообразной территорией проходит климатические подвижки через абсолютно различные погодные аномалии (жара, засуха, сход снегов, паводки, движение и таяние льдов), которые отражаются на экономике страны. Поэтому необходимо разрабатывать подходы к оценке устойчивости сфер общественной жизни, формирующих общее качество жизни населения на определенной территории [7; 8].

Качество жизни населения в современных стратегических документах выступает основной генеральной целью реализации программ государственного социально-экономического развития. Особенности измерения качества жизни заключаются в его сложности как социального и экономического явления, которое имеет сугубо индивидуальную направленность и восприятие. Качество затрагивает практически все аспекты общественного развития и отражает общее состояние и уровень удовлетворения окружающей средой и социально-экономической инфраструктурой граждан определенной территории [9]. Наше исследование сфокусировано на южных регионах России, так как именно данные территории в настоящее время испытывают максимальное влияние климатических изменений, так как деятельность населения данных территорий связана с отраслями АПК и от их производительности и эффективности будет зависеть качество жизни в данных регионах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Глобальные проблемы климатических подвижек, происходящие сегодня во всем мире, заставляют мировое научное сообщество активно дискутировать о потенциальных рисках и трансформационных изменениях в структуре народнохозяйственного производства. Оценка трудов исследователей различных стран доказала, что фокус научных результатов сконцентрирован на изучении исключительно общемировых тенденций глобального потепления и общего фона сокращения биологического разнообразия планеты. Поэтому необходимо дополнительно изучать экономические, демографические, социальные последствия климатических изменений в связи с изменением комфортности и качества проживания людей определенной территории.

Проблемы глобального климатического перехода изучались многими исследовательскими группами из различных стран мира. Так, в 2025 году группа из Китайской академии наук под руководством Cheng L.J. пришла к выводу об устойчивости температурного нагрева Мирового океана, другие исследователи Chen L.F., Xu W.H., Zhou Z.J., Cao L.J., Yang S., Xu C.D. доказали наличие нового глобального тренда на повышение уровня Мирового океана под воздействием антропогенных факторов [2–6]. В работе для оценки потенциала производственной базы отраслей

АПК был использован метод контент-анализа для оценки особенностей работы предприятий отрасли.

Анализ структуры качества жизни населения был проведен с помощью методов сопоставления, аналогии, систематизации, в рамках которого были определены основные параметры влияния на уровень качества жизни населения Юга России. Поэлементный анализ структуры качества жизни населения был проведен методами статистического и экономического анализа индексов и показателей темпов роста по ряду периодов. С применением метода тройного экспоненциального сглаживания (метод Холта-Винтерса) были рассчитаны прогнозы по показателям среднедушевых доходов населения Юга России и темпов производства в отраслях сельского хозяйства. Оценка безопасности населения была проведена на основе статистики роста общего фона заболеваемости по всем видам болезней в регионах ЮФО.

По итогам проведенного аналитического обзора параметров качества жизни населения в регионах Южного Федерального Округа были сделаны выводы о косвенном влиянии глобальных факторов климатического и природного характера на структуру производства, социальную инфраструктуру территорий, уровень безопасности населения и его здоровье.

Информационной основой проведенного исследования послужили труды российских и иностранных ученых об изменениях климата на Земле и влиянии климатических подвижек на различные процессы в регионах. Цифровые материалы были заимствованы из статистических сборников и отчетов официальных публикаций Росстата из открытых Интернет-источников. Аналитическая обработка эмпирического материала была проведена с использованием пакета программ «Microsoft Office».

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сельское хозяйство Юга России как основа благополучия населения

Южный макрорегион России традиционно специализируется на сельскохозяйственном производстве благодаря уникальным и благоприятным климатическим особенностям местности. Широкие равнинные ландшафты, мягкие осенне-зимние периоды, большое количество природных водных объектов, высокая плотность населения – все эти потенциалы находят эффективную реализацию в различных отраслях сельского хозяйства территории [9; 10].

Сельскохозяйственная специализация предприятий Юга России направлена как на производство сельскохозяйственного сырья, так и на его переработку для конечного потребления. Основная доля населения территории занята в отраслях АПК и смежных с ними производственных и обслуживающих организациях, поэтому рентабельность предприятий данной сферы выступает ключевым фактором экономического благополучия региона.

Сельское хозяйство подвержено значительному влиянию климатических факторов (засухи, заморозки, наводнения, суховеи и т.п.), которые самым непосредственным образом отражаются на результативности работы аграриев. Прибыльность сельскохозяйственных предприятий влияет на развитие сельских территорий, их специфику развития в современных условиях хозяйствования. Более того, во многих южных регионах сельскохозяйственное производство выступает

базисом для формирования социально-экономической инфраструктуры территории. Экстремальные климатические подвижки несут серьезные последствия для аграрных отраслей, так как самым непосредственным образом отражаются на итогах работы предприятий [11; 12].

Регионы Юга России уже сегодня сталкиваются с серьезными проблемами ухудшения экономических показателей работы предприятий, что в итоге приводит к миграции населения территорий в более экономически благополучные регионы Центральной части страны или в крупные городские агломерации. Южные регионы традиционной выступали локомотивами сельскохозяйственного производства благодаря уникальному почвенному покрову (чернозем), мягким климатическим температурным режимам в течение осенне-зимнего периода, которые на протяжении многих лет формировали прочную производственную базу и служили источником доходов для местного населения.

Климатические сдвиги, которые периодически повторяются последние 10–15 лет, резко снижают комфортность проживания населения данных территорий, сокращают доходы от традиционного сельского хозяйства и приводят к вынужденной внутренней миграции [13]. Перемещение в другие регионы не станет решением экономических проблем мигрантов, так как это будет означать смену профессии и в целом ухудшение условий труда, потерю квалификации, поэтому данные факторы не позволят компенсировать необходимое или утраченное качество жизни трудовым переселенцам. Регионы Центральной части России или Севера даже в условиях глобального потепления и масштабного таяния ледников не будут выдавать объемы сельскохозяйственной продукции сопоставимые с продуктивностью южных регионов по причине ограниченности производительности местных почв.

Итоги 2025 года показали снижение урожайности по ряду сельскохозяйственных культур в хозяйствах Ставропольского и Краснодарского краев по причине накопленного дефицита осадков, возвратных весенних заморозков, отразившихся на культурах в период вегетации, общего засушливого фона атмосферы. Именно данные причины указывают фермеры южных регионов, объясняя причины падения урожая от 10–15 % по различным культурам. Снижение урожайности и падение рентабельности отражаются на экономическом благополучии население региона, которое выступает основным производительным фактором во многих сельскохозяйственных организациях. Для решения данных проблем нужны новые решения и подходы к организации производства [13–15].

Резкие климатические переходы – это современная реальность, которая с течением времени будет только нарастать, поэтому простой уход от данной проблемы не решит ее. В данной ситуации необходимо комплексная адаптация всего ответственного производства и потребления, а также полная системная адаптация к новой модели жизни. Нужны комплексные государственные программы и инициативы для разработки и применения новых адаптивных технологий ресурсосбережения и рационального земледелия, которые позволяют в условиях ухудшенных агроэкологических условий реализовывать экономический

потенциал территории, который создает базу для качественного и комфортного проживания людей [16].

Качество жизни населения и его структура

Основная цель любой государственной юрисдикции – обеспечение своим гражданам достойного и комфортного проживания на всей территории страны. При этом понятие качества настолько субъективное, что сложно оценить его уровень, даже в сопоставлении между странами, расположенными по соседству. По этой причине мы будем в нашем исследовании брать за основу общеизвестные подходы к оценке качества и анализировать влияние на него климатических факторов риска.

Цифровое измерение качества жизни включает в себя числовую характеристику основных направлений деятельности: абсолютные показатели (количество населения или экономически активного населения в организациях, объемы выпуска продукции предприятия определенной отрасли, валовая выручка территории и т.п.), относительные показатели (отношение доходов и расходов населения, прожиточный минимум данной территории, уровень смертности или возраст дожития и т.п.). Рассмотрим более подробно основные параметры измерения качества жизни населения, принятые в научно-методической литературы и активно продвигаемые на уровне законодателя (рис. 2).

На рисунке 2 представлена структура качества жизни населения как совокупность взаимосвязанных параметров, формирующих общий фон проживания на конкретной территории. Основными базовыми элементами, в рамках которых существует территориальное образование, будут выступать климатические особенности и географическое положение. Именно данные параметры неизменны и создают общую атмосферу жизни и работы в данной местности. Тем не менее, изменение годовых климатических норм в последние десятилетия влияют на зависимые параметры, что моделируют новые архитектуры организации и управления производственными, социальными, бытовыми процессами территории [17].

Вторая группа параметров – экономические показатели развития и функционирования производственных систем данной территории. Если мы говорим о регионах Южного федерального округа, то в данном случае ярко выражена сельскохозяйственная направленность производства, что вполне гармонизирует с благоприятными агроклиматическими условиями большей территории Юга. Большое количество солнечных дней, обилие осадков и т.п. – все это позволяет снимать за весенне-осенний сельскохозяйственный сезон более 1 урожая и максимально реализовывать земельные потенциал региона.

Третья группа параметров – социальные показатели жизни населения территории – выступают вторичными и относятся к непроизводственной сфере экономики. Наличие развития социальной инфраструктуры (организаций образования, здравоохранения, социальной помощи и т.п.) создает комфорт для населения и способствует формированию лояльности к данной территории. При отсутствии социальной инфраструктуры, даже с условиями высоких заработков население не будет связывать свое будущее в данной территории. Поэтому очень важно, чтобы помимо рабочих мест на территории были инфраструктурные объекты.

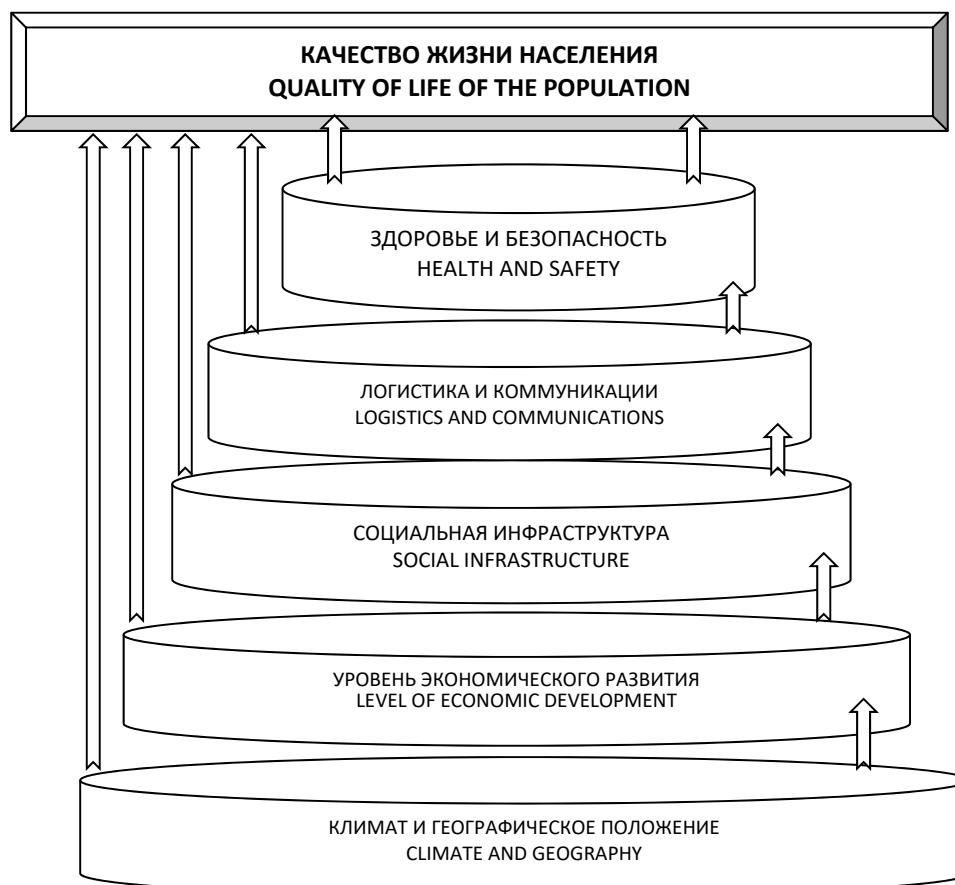


Рисунок 2. Структура качества жизни населения территории: элементный состав [7; 8]

Figure 2. Structure of the quality of life of the population of the territory studied: elemental composition [7; 8]

Четвертая группа параметров связана с логистикой и необходимыми коммуникациями, которые также должны быть реализованы на территории. В данном случае мы считаем, что коммуникации должны быть как цифровыми, так и транспортными. Люди должны иметь возможность выезда из региона несколькими видами транспорта, иметь устойчивое Интернет соединение, иметь возможность работать через платформы и получать через них услуги, а также дистанционно решать многие социальные вопросы.

Пятая группа параметров связана с безопасностью как физической, так и правовой граждан, работающих и проживающих на территории. Кроме того, важно иметь эффективную сеть медицинских учреждений, в которые при необходимости можно обратиться и получить консультацию специалистов. При наличии доступа в медицинские учреждения, возможности получения медицинских услуг широкого профиля, будут отсутствовать стремления поиска и переезда в более развитые регионы.

Таким образом, мы выстроили пирамиду структуры качества жизни населения территории, в рамках которой прослеживается взаимозависимость и иерархичность параметров моделирования качества жизни населения конкретной территории. В основании пирамиды качества жизни лежат независимые параметры климатического и географического происхождения, как данность для конкретного региона. Стабильность данных параметров на протяжении нескольких десятков лет позволила реализовать многие программы и планы социально-экономического развития территорий.

Южные регионы России, входящие в Южный Федеральный Округ, исторически предрасположены к сельскохозяйственному производству. Южные регионы сегодня высоко дифференцированы по критериям социально-экономического развития, природного климатического комфорта проживания, развитости инфраструктуры территории и т.п. параметрам. Эти показатели отразились на специализации территорий и зависимости от традиционных занятий местного населения. Так, национальные республики (Калмыкия, Адыгея) преимущественно занимаются мясным пастбищным животноводством и скотоводством, другие регионы (Краснодарский край, Ростовская область, Астраханская область) специализируются на растениеводстве и т.п. В данной связи наблюдается высокая зависимость от местных традиций и климатических условий хозяйствования [18; 19].

Безусловно, агроклиматические условия будут формировать общий производственный базис территории и его специализацию, а производные факторы дополнительно формируют общий уровень комфортности проживания на территории, что стимулирует естественные и механические миграции местного населения, которые сложно прогнозировать по причине отсутствия полной информации о причинах и факторах влияния на эти подвижки. Глобальные климатические подвижки в данном процессе выступают триггером для формирования предпосылок и условиях социально-экономического развития территорий, поэтому, с нашей точки зрения, именно изменение климата формирует общий качественный фон территории [20].

Оценка качества жизни необходима для правильного планирования развития территорий и принятия решений относительно потенциальных угроз и рисков, которые могут возникнуть при реализации программ социально-экономического развития отраслей, регионов, групп населения. Население выступает в данном случае динамичным фактором, который может трансформировать и нарушать стратегические планы развития, так как обширные территории России в Сибири, на Урале, на Севере все еще остаются малозаселенными, что дает люфт для внутренней миграции. Поэтому в сложившейся практике регионы будут стимулировать приток внутренних мигрантов и формировать условия для их постоянного проживания.

Оценка основных параметров качества жизни населения

Природно-климатические параметры

Южные регионы России, безусловно, выигрывают в сравнении с Севером по климатическим параметрам и возможностям к ведению сельского хозяйства. Но

данный вид деятельности сильно зависит от природных явлений, и при малейших изменениях условий может приводить к катастрофическим рискам или потерям. По данной причине популярность сельского хозяйства и работы в организациях АПК невысокая, что подвигает молодое поколение мигрировать в более интересные отрасли и крупные городские агломерации [10].

Исследование трудов российских и иностранных ученых относительно оценки территориальной комфортности проживания человека доказали, что наблюдается перекося в сторону учета антропогенных факторов давления на окружающую среду. При этом многие ученые забывают о том, что природа является живой и самоорганизованной системой, которая имеет возможность самоочищаться, самовосстанавливаться и т.п. По этой причине необходимо учитывать природно-климатические параметры как основу формирования социально-экономического профиля данной территории. Рассмотрим аномальные колебания температуры за последние 30 лет на территории России (рис. 3).

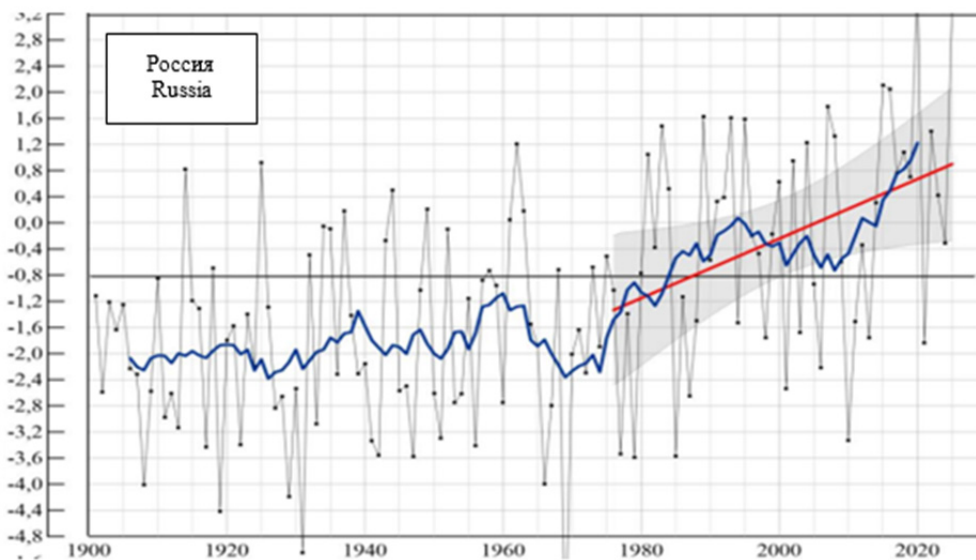


Рисунок 3. Колебания температуры за последние 30 лет на территории России [9; 11]

Figure 3. Temperature fluctuations over the past 30 years in Russia [9; 11]

На рисунке 3 временные ряды сезонных температурных аномалий, рассчитанные по станционным данным о температурах приземного воздуха ФГБУ «ИГЭ Росгидромета и РАН» представлены в форме линейного восходящего тренда колебаний от среднего значения. Оценка глубины колебаний среднегодовых температур показывает, что колебания выше стандартного отклонения (1,62 °C) более чем в 2 раза и составляют 3,80 °C. В целом за рассматриваемый период уровень среднегодовых температур растет, что сопровождается периодами тёплых зимних месяцев и аномальных периодов жары в летние месяцы.

Оценка колебаний температурных режимов на территории Южного Федерального округа подтверждает общероссийскую динамику — роста среднегодовых температур и частоты повторяющихся резких колебаний от средней годовой нормы (рис. 4). Экстремальные сезонные колебания температуры воздуха приводят к другим последствиям (нашествию насекомых, которые из-за теплых зим хорошо переживают морозы и активизируются весной, затяжные периоды засухи в летние периоды и песчаные бури). Так, лето 2025 года в

Краснодарском крае было отмечено высокими температурами на уровне 40–42 °C, при этом предшествовавшая сухая и теплая зима, бесснежная весна привели к резкому сокращению и ухудшению производственных возможностей для аграриев. Как следствие данного изменения в погодных условиях — сокращение урожая или его частичная потеря, что в конечном итоге будет приводить к деградации инфраструктурных и экономических основ Юга России.

Особенности колебаний среднегодовых температур, выявленные по всей территории России, также наблюдаются и регионах Южного Федерального Округа. При этом их экстремальные изменения отражаются неблагоприятно на общем агроклиматическом фоне территории, что приводит к потерям до 25 % урожая сельскохозяйственных культур. Данное явление можно назвать «климатические контрасты», которые оказывают давление на аграрный сектор и стимулируют сельхоз товаропроизводителей искать новые агроэкологические и технологические подходы к реализации производственных планов.

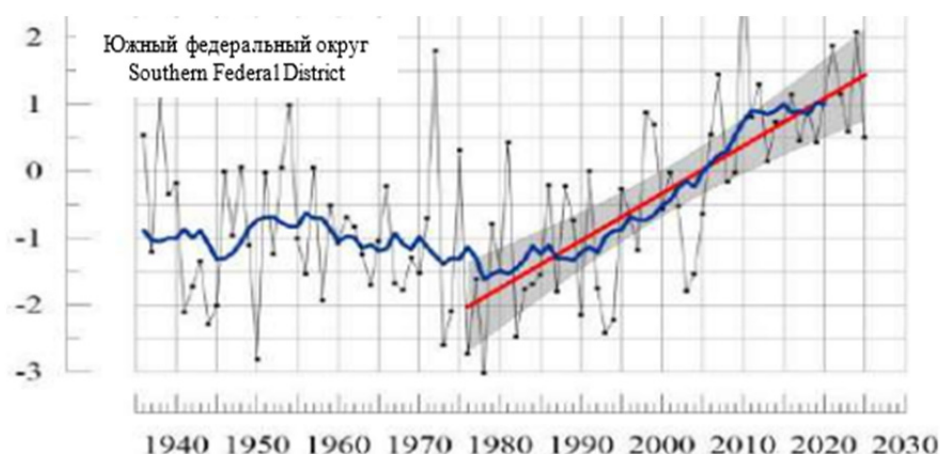


Рисунок 4. Сезонные аномальные колебания температуры приземного воздуха по регионам ЮФО, °C [9; 11]

Figure 4. Abnormal seasonal fluctuations in surface air temperature in the regions of the Southern Federal District, °C [9; 11]

Климатические контрасты становятся нормой не только для южных регионов, но и для всей территории России, тем более что постепенное сокращение плодородного слоя почвы приводит к большей зависимости от погодных условий в сельскохозяйственный сезон. Растет в данной ситуации зависимость от энергосистем и систем орошения, которые необходимо поддерживать и модернизировать. Поэтому именно данные параметры мы ставим как базу формирования инфраструктуры для качественного проживания населения территории [19; 20].

Экономические параметры территории

Важность показателей экономического развития территории зависит от уровня и состояния производственной базы, которая в регионах Юга России преимущественно выражена в сельскохозяйственных площадях [21]. Поэтому зависимость экономических

параметров развития региона прямая и определяет ее будущий рост и благополучие местного населения. Региону будущего развития и стабильного экономического роста необходимо выстраивать социальную инфраструктуру, что требует наличие сильной и рентабельной производственной базы, и значительных инвестиционных вложений со стороны, как государства, так и частного бизнеса. Поэтому сильные предприятия, стабильно работающие организации, расположенные на территории, будут формировать необходимые предпосылки для комфортного проживания населения [22].

Рассмотрим основные параметры экономического развития регионов Южного Федерального округа по укрупненным параметрам промышленного производства как в целом по округу, так и по отдельным регионам.

Таблица 1. Индексы промышленного производства в регионах ЮФО в % к предыдущему периоду

Table 1. Industrial production indices in the regions of the Southern Federal District as a percentage of the previous period

Регион Region	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Южный федеральный округ Southern Federal District	107,5	100,6	112,0	98,4	100,2	103,2	120,6	87,9	102,2	88,5
Республика Адыгея Republic of Adygea	107,6	92,1	154,9	122,7	104,8	111,6	114,5	103,8	100,1	103,1
Республика Калмыкия Republic of Kalmykia	133,9	113,0	93,5	91,0	110,8	96,7	136,4	92,9	99,2	126,3
Республика Крым Republic of Crimea	105,3	102,7	128,6	94,5	92,4	114,1	116,9	88,1	106,2	96,0
Краснодарский край Krasnodar Krai	109,6	95,6	108,0	107,3	90,7	109,0	116,5	90,2	108,0	95,0
Астраханская область Astrakhan region	119,5	124,3	113,5	99,7	97,4	93,6	97,7	92,7	108,8	44,2
Волгоградская область Volgograd region	99,4	102,8	101,2	97,4	100,3	101,2	102,9	103,3	103,6	93,2
Ростовская область Rostov region	106,4	94,8	112,3	85,5	107,8	96,2	151,3	79,2	94,9	93,7
г. Севастополь Sevastopol	102,6	88,8	152,3	147,5	134,8	239,5	60,1	88,8	107,9	173,3

Представленные в таблице 1 показатели объемов производства продукции по регионам ЮФО в целом отражают падения выпуска товаров промышленного

назначения. Так, темп роста индекса в 2025 году составил 88,5 % сравнении с 2024 годом. Даже некоторое превышение динамики роста по 2 регионам (Республика

Калмыкия – 126,3 % и г. Севастополь – 173,3 %) не компенсируют общее сокращение выпуска продукции.

Таким образом, можно в целом констатировать, что резкие климатические контрасты отразились на производстве продукции промышленного назначения общим сокращением объемов выпуска по всему федеральному округу [23]. Продолжительная динамика сокращения объемов по многим регионам должна быть изучена и разработаны меры по преломлению данной тенденции.

Социальная инфраструктура и показатели

Социальная инфраструктура регионов Юга России выстраивается в соотношении с показателями экономического развития и уровнем доходов населения регионов.

Рассмотрим объемы среднедушевых доходов населения за последние 8 лет. Динамика положительная согласно данным таблицы 2. Что свидетельствует о росте объемов производства и улучшении показателей прибыльности предприятий Юга России.

Таблица 2. Среднедушевые денежные доходы населения, руб.

Table 2. Average per capita monetary income of the population in rubles

Регион Region	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Южный федеральный округ Southern Federal District	33 091	34 766	36 275	40 142	50 509	57 957	66 975	65 372
Республика Адыгея Republic of Adygea	30 422	32 332	34 802	40 007	42 228	49 503	64 894	66 672
Республика Калмыкия Republic of Kalmykia	22 311	23 370	22 890	24 913	27 637	34 103	39 251	41 994
Республика Крым Republic of Crimea	22 794	24 027	25 932	28 971	36 912	40 732	41 566	49 564
Краснодарский край Krasnodar Krai	39 426	40 675	42 944	47 355	66 483	74 966	85 173	77 897
Астраханская область Astrakhan region	28 230	29 403	29 669	32 845	40 377	45 116	49 321	45 306
Волгоградская область Volgograd region	28 590	30 483	31 483	34 630	36 804	42 576	55 044	48 539
Ростовская область Rostov region	34 467	36 781	37 821	41 423	47 267	56 740	67 930	72 363
г. Севастополь Sevastopol	29 922	32 129	32 045	38 852	51 915	57 632	54 196	53 804

Построим прогноз динамики среднедушевых доходов населения методом метод тройного экспоненциального сглаживания (метод Хольта-Винтерса). Метод Хольта-Винтерса предназначен для моделирования временных рядов с тенденциями и сезонностью. Основные этапы метода включают:

1. Определение базового уровня (L_t) — среднего значения ряда.
2. Оценку тренда (B_t) — изменения базовой линии во времени.
3. Вычисление сезонного индекса (S_t) — циклических колебаний внутри определенного периода.

Прогноз построен на основе следующей формулы:

$$\hat{Y}_{t+m} = L_t + mB_t + S_{t-p}, \quad \text{где}$$

$\hat{Y}_{t+m}$ — прогноз на m -шаг вперед,
 L_t — оценка уровня на текущий момент,
 B_t — оценка тренда,
 S_{t-p} — сезонный индекс периода длиной p .

Перед применением метода Хольта-Винтерса мы убедились в наличии в данных тенденции и сезонности. Это сделано не только по визуальному просмотру, но и статистически с помощью использования тестов типа ACF/PACF для выявления закономерностей. Примеры расчета ACF и PACF для некоторых регионов (например, Волгоградской области) показывает отчетливую сезонность.

Теперь выполним выбор параметров сглаживания.

Основные параметры:

- α — коэффициент сглаживания уровня (рекомендуемый диапазон: 0.1–0.3),
- β — коэффициент сглаживания тренда (рекомендуемый диапазон: 0.05–0.2),
- γ — коэффициент сглаживания сезонности (рекомендуемый диапазон: 0.05–0.3).

Эти параметры настраиваются оптимизацией критерием наименьших квадратов.

Таким образом, используя уравнения Хольта-Винтерса, получаем прогнозы на периоды 2026–2028 гг. для большей наглядности оформим данные в таблицу 4. Представленные динамические ряды показывают четкую сезонность (рост к IV кварталу) и общий положительный тренд. Представленная модель Хольта-Винтерса отражает мультипликативную сезонность (так как сезонные колебания усиливаются со временем).

Тренд: прогнозируется устойчивый рост доходов с сохранением сезонной картины (пик в IV квартале). К концу 2028 года (то есть в IV квартале) среднедушевые доходы в ЮФО могут приблизиться к 100 тыс. руб.

Рассмотрим, какая динамика наблюдается в сельском хозяйстве региона. С этой целью построим прогноз индексов производства сельского хозяйства. Результаты расчета представлены в таблице 4. Этот ряд более волатильный, но имеет сезонность (обычно пик в III–IV кварталах). Использован метод Хольта-Винтерса с мультипликативной сезонностью.

Таблица 4. Прогноз среднедушевых доходов на 2026–2028 гг. по регионам ЮФО
Table 4. Per capita income forecast for 2026–2028 by region of the Southern Federal District

Год Year	Квартал Quarter	Прогноз (руб.) Forecast (rub)	Нижняя граница 95 % ДИ Lower 95% CI	Верхняя граница 95 % ДИ Upper 95 % CI	Погрешность Error
2026	I	~58 000	~54 000	~62 000	±6.6%
2026	II	~64 000	~59 000	~69 000	±6.8%
2026	III	~72 000	~66 000	~78 000	±6.9%
2026	IV	~79 000	~72 000	~86 000	±7.0%
2027	I	~65 000	~59 000	~71 000	±8.4%
2027	II	~71 000	~64 000	~78 000	±8.6%
2027	III	~80 000	~72 000	~88 000	±8.7%
2027	IV	~88 000	~79 000	~97 000	±8.8%
2028	I	~72 000	~64 000	~80 000	±10.2%
2028	II	~79 000	~70 000	~88 000	±10.4%
2028	III	~89 000	~79 000	~99 000	±10.5%
2028	IV	~98 000	~87 000	~109 000	±10.6%

Примечание: Для наглядности значения округлены
 Note: For clarity, the values are rounded

Таблица 5. Прогноз на 2025–2028 годы для Южного федерального округа
Table 5. Forecast for 2025–2028 for the Southern Federal District

Год Year	Квартал Quarter	Прогноз (%) Forecast (%)	Нижняя граница 95 % ДИ Lower 95 % CI	Верхняя граница 95 % ДИ Upper 95 % CI	Погрешность Error
2026	I	~103	~92	~114	±8.5 %
2026	II	~102	~91	~113	±9.0 %
2026	III	~108	~96	~120	±9.3 %
2026	IV	~106	~93	~119	±9.6 %
2027	I	~104	~90	~118	±10.5 %
2027	II	~103	~89	~117	±11.0 %
2027	III	~109	~94	~124	±11.3 %
2027	IV	~107	~92	~122	±11.6 %

2028	I	~105	~89	~121	±12.5 %
2028	II	~104	~87	~121	±13.0 %
2028	III	~110	~92	~128	±13.3 %
2028	IV	~108	~90	~126	±13.6 %

Прогноз показывает отсутствие выраженного тренда роста — значения колеблются около 100–110 %, что свидетельствует о стагнации в аграрном секторе. Широкие доверительные интервалы подтверждают высокую неопределенность в этом секторе.

Сезонные коэффициенты (средние по ЮФО):

- I квартал: 0.97 (сезонный спад)
- II квартал: 0.96 (стагнация)
- III квартал: 1.02 (небольшой рост)
- IV квартал: 1.05 (пик сезона)

Таким образом, видим, что, несмотря на благоприятные прогнозы по среднему душевому доходу населения Юга России, прогноз по темпам роста сельскохозяйственного производства по предприятиям региона демонстрируют стагнацию и проблемы, которые требуют решений [23; 24].

Здоровье и безопасность

В данном аспекте мы рассмотрим показатели заболеваемости населения и их взаимосвязь с метеоклиматическими условиями проживания на территории. Учет данных факторов окружающей среды необходим для оценки общего фонда заболеваемости и жизнедеятельности людей, так как от их влияния зависит продолжительность жизни местного населения и качество трудовых ресурсов. Ранее в статье были рассмотрены атмосферные или метеорологические факторы, которые будут выступать основными

биоклиматическими показателями здоровья и продолжительности жизни населения.

Южные регионы России отличаются, как было установлено выше жесткими температурными режимами (климатическими контрастами), которые отражаются на живых системах способных реагировать на погодные условия. Со временем под влиянием температурных колебаний даже местные жители испытывают дискомфорт и ухудшение самочувствия, изменение психоэмоционального состояния, проявление клинических расстройств, летальные исходы [24].

Как правило, климатические качели отражаются на людях страдающих следующими видами заболеваний [25; 26]:

- сердечно-сосудистыми заболеваниями – 82 %;
- бронхолегочными заболеваниями – 68–72 %;
- заболеваниями опорно-двигательного аппарата – 87 %;
- психоэмоциональными нарушениями – 82–90 %.

Именно данные категории населения испытывают рассеяние внимания, снижение работоспособности, эмоциональной неуравновешенности. К примеру, такие частые явления на Юге как аномальная жара, высокая влажность воздуха, сухие ветры, перепады атмосферного давления, шторма, грозы, магнитные бури – приводят к развитию метеотропных заболеваний. Статистика заболеваемости в регионах ЮФО представлена в таблице 5.

Таблица 5. Заболеваемость по всем видам болезней в регионах ЮФО

Table 5. Incidence of all types of diseases in the regions of the Southern Federal District

Регион Region	2021	2022	2023	2024	Изменения, % Changes, %
Россия Russia	38841270	40973358	50325372	58033710	33
Южный федеральный округ Southern federal district	2350158	2818874	3771869	3831236	39
Республика Адыгея Republic of Adygea	16075	13298	11055	21118	24
Республика Калмыкия Republic of Kalmykia	4702	3892	5644	3885	-21
Республика Крым Republic of Crimea	85396	113772	299018	416035	79
Краснодарский край Krasnodar Krai	953448	1363625	2086109	1579460	40
Астраханская область Astrakhan region	234417	213163	235486	244243	4
Волгоградская область Volgograd region	460755	486921	460708	583328	21
Ростовская область Rostov region	529714	589384	521682	838903	37
г. Севастополь Sevastopol	65651	34819	152167	144264	54

Представленная динамика заболеваемости по всем категориям болезней среди населения южных регионов демонстрирует положительный тренд роста заболеваемости населения по всем регионам, за исключением Республики Калмыкии. Тенденции роста общего фона заболеваемости по стране подтверждают ухудшение условий проживания в окружающей среде, поэтому необходимо изучить более глобальные причины роста количества заболеваний и общей картины безопасности для здоровья населения страны.

Тенденция к росту заболеваемости населения в стране привела к запуску нового Национального проекта в 2024 году «Продолжительная и активная жизнь», целью которого выступило увеличение общей продолжительности жизни населения до 78 лет (2030 год) и до 81 года (2036 год). С этой целью принят и введен в работу целый ряд федеральных проектов, направленных на борьбу с наиболее часто встречающимися заболеваниями населения (сердечно-сосудистые заболевания, онкология, сахарный диабет, гепатит С и т.п.), так же проводятся работы по улучшению качества медицинской помощи, подготовки кадров для отрасли и переход к цифровизации документооборота и развитию телемедицины.

Таким образом, следует отметить, что, несмотря на общий положительный рост экономических показателей (доходы населения), условия безопасного и продолжительного проживания населения на Юге России подвергаются влиянию климатических факторов и отражаются косвенным образом на общем росте заболеваемости населения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Глобальные климатические подвижки, происходящие сегодня в мире, несут определенные риски, связанные с комфортностью и качеством проживания и работы населения в различных регионах. Сезонные колебания температурных режимов, повторяющиеся природные метеособытия, повышение уровня Мирового океана под влиянием таяния ледников в Арктике и Антарктике, изменения объемов выпадения осадков и расширение эрозийных процессов – все это отражается не только на природной экосистеме, но и трансформирует социально-экономическую среду обитания человека.

В фокусе данного исследования были регионы Южного Федерального Округа России, традиционно специализирующиеся на сельскохозяйственном производстве, выступающим базой для формирования социально-экономической инфраструктуры территории. Сельское хозяйство – одно из отраслей народного хозяйства, которая сильно зависит от агроклиматических условий в течение производственного процесса. В этой связи резкие климатические контрасты, которые становятся регулярными последние 10–15 лет, отражаются на урожайности сельскохозяйственных культур, продуктивности сельскохозяйственных животных и птиц, и, как следствие, на показателях прибыльности отрасли. Экономические показатели развития территории выступают базовыми для формирования социальной инфраструктуры, поэтому их сокращение будет существенно ухудшать качество жизни.

Качество жизни населения складывается из целого комплекса критериев, которые взаимосвязаны и подвержены взаимовлиянию. Основным базовым критерием выступают климатические и природные

условия хозяйствования и проживания людей, которые являются глобальными факторами. Глобальные факторы трансформируют не только социально-экономический уклад одного государства, но и меняют систему технологий и подходов к производству, потреблению, жизнедеятельности общества. На основе данных факторов функционируют параметры экономического, социального, организационного плана, которые нацелены на создание адаптационных мероприятий к меняющимся климатическим условиям проживания.

В ходе проведенного обзора нами сделаны выводы о необратимости климатических изменений и климатических контрастов, которые происходят на протяжении нескольких десятков лет. Данные климатические подвижки меняют саму структуру производства и применяемые технологии для поддержания необходимого уровня рентабельности. Южные регионы России наиболее зависимы от данных изменений, что отражается не только на замедлении производственных процессов в отраслях сельского хозяйства, но и в росте количества заболеваний населения. Таким образом, очевидно, косвенное влияние глобальных факторов на качество и безопасность жизнедеятельности местного населения. В связи с чем необходимо продумать мероприятия по оздоровлению и ранней диагностике заболеваний, искать новые подходы к организации сельскохозяйственного производства в условиях климатических контрастов для преодоления тенденций стагнации и снижения производительности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреев С.С. Интегральная оценка климатической комфортности на примере территории Южного Федерального округа России. СПб.: РГМУ, 2011. 304 с.
2. Pan Y.Y., Cheng L., Abraham J., Trenberth K.E., Reagan J., Du J., Wang Z., Storto A., Schuckmann K.V., Zhu Y., Mann M. E., Zhu J., Wang F., Yu F., Locarnini R., Fasullo J., Huang B., Graham G., Yin X., Gouretski V., Zheng F., Li Y., Zhang Z., Wan L., Chen X., Wang D., Feng L., Song X., Liu Y., Reseghetti F., Simoncelli S., Chen G., Zhang R., Mishonov A., Wei W., Tan Z., Li G., Cao L., Chen L., Yuan H., Lyu K., Sulaiman A., Mayer M., Wang H., Ma Z., Bao S., Yan H., Liu Z., Yang C., Liu X., Hausfather Z., Gues F., Song X., Zhang M., Chenand L. Ocean heat content sets another record in 2025 // Adv. Atmos. Sci. 2026. <https://doi.org/10.1007/s00376-026-5876-0>
3. Cheng L.J., Cheng L., Abraham J., Trenberth K.E., Reagan J., Zhang H., Storto A., Schuckmann K., Pan Y., Zhu Y., Mann M., Zhu J., Wang F., Yu F., Locarnini R., Fasullo J., Huang B., Graham G., Yin X., Gouretski V., Zheng F., Li Y., Zhang B., Wan L., Chen X., Wang D., Feng L., Song X., Liu Y., Reseghetti F., Simoncelli S., Chen G., Zhang R., Mishonov A., Tan Z., Wei W., Yuan H., Li G., Ren Q., Cao L., Lu Y., Du J., Lyu K., Sulaiman A., Mayer M., Wang H., Ma Z., Bao S., Yan H., Liu Z., Yang C., Liu X., Hausfather Z., Szekely T., Gues F. Record high temperatures in the ocean in 2024 // Adv. Atmos. Sci. 2025. N 42. P. 1092–1109. <https://doi.org/10.1007/s00376-025-4541-3>
4. Chen L.F., Xu W.H., Zhou Z.J., Cao L.J., Yang S., Xu C.D. A new global land–ocean merged surface temperature dataset since the 1850s: The CMA-GMST dataset // Climate Dyn. 2025. V. 63. N 187. <https://doi.org/10.1007/s00382-025-07614-x>
5. Tan Z.T., Tan Z., Zhu Y., Cheng L., Gouretski V., Pan Y., Yuan H., Wang Z., Li G., Song X., Zhang B., Bao S., Li Y., Zhu J. CODC-S: A quality-controlled global ocean salinity profiles dataset // Scientific Data. 2025. V. 12. Article number: 917. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-05172-9>
6. Thomas A.P., Liu W. Ocean circulation change modulates tropical atmospheric circulation in a warming climate: The role of ocean

heat uptake // *J. Climate*. 2025. N 38. P. 5305–5321. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-24-0228.1>

7. Макоско А.А., Матешева А.В., Фетисов В.П. Повышение качества жизни населения в условиях загрязнения атмосферы и изменения климата. URL: <https://new.ras.ru/upload/iblock/ca9/pnou9vri026p69yva4lky8ili2wh3h84.pdf> (дата обращения 25.01.2026)

8. Данилов-Данильян В.И., Катков В.М., Порфирьев Б.Н. Экология и климат: где мы сейчас и где будем через два-три десятилетия. Ситуация в России // *Вестник РАН*. 2023. Т. 93. N 11. С. 1032–1046. DOI: 10.31857/S0869587323110038

9. Ключев Н.Н. Территориальные сдвиги антропогенной нагрузки на природу в постсоветской России // *Вестник РАН*. 2023. N 3. С. 255–265. DOI: 10.31857/S0869587323030052

10. Ибрагимов А.Г., Джанчарова Г.К., Лещева М.Г. Перспективы и проблемы цифровизации сельского хозяйства в России // *Экономика и предпринимательство*. 2020. N 9 (122). С. 587–589.

11. Широков А.А., Колпаков А.Ю. Целевой сценарий социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2060 года // *Проблемы прогнозирования*. 2023. N 6. С. 53–64.

12. Орешников В.В., Низамутдинов М.М. Оценка качества жизни населения в регионах Российской Федерации // *Вестник Тюменского государственного университета. Социально-экономические и правовые исследования*. 2023. Т. 9. N 3. С. 192–213. <https://doi.org/10.21684/2411-7897-2023-9-3-192-213>

13. Кобышева Н.В., Стадник В.Д., Ключева М.В., Пигольцева Г.Б. и др. Руководство по специализированному обслуживанию экономики климатической информацией, продукцией и услугами СПб., 2008. 536 с.

14. Андреева Е.С. Опасные явления погоды юга России. Под ред. проф. Л.Н. Карлина. СПб.: Изд. ВВМ, 2006. 216 с.

15. Прохоров Б.Б. Медико-экологическое районирование и региональный прогноз здоровья населения России. М.: Изд. МНЭПУ. 1996. 72 с.

16. Essex C., McKittrick R. Taken by Storm. The Troubled Science, Policy and Politics of Global Warming. Toronto: Key Porter Books, 2002. 320 p.

17. Архипова И.В. Показатели медико-географической оценки комфортности климата // *Материалы Шестого Сибирского совещания по климатологическому мониторингу*. Томск, 2005. С. 79–83.

18. Mora C. et al. Global risk of deadly heat // *Nature Climate Change*. 2017. V. 7. P. 501.

19. Гатауллин Р.Ф., Каримов А.Г., Чувашаева Э.Р. Методологические основы оценки и обеспечения экономической жизнестойкости локальных территориальных образований // *Вестник евразийской науки*. 2019. Т. 11. N 3. С. 9.

20. Сергеев Ю.Н., Кулеш В.П., Дмитриев В.В. Теория и практика оценки качества жизни населения России на текущем вековом интервале // *Биосфера*. 2021. Т. 13. N 3. С. 49–85.

21. Dzhancharova G., Kosheleva A., Drobysheva N., Pasternak S., Shelygov A., Lebedev K. Economic and legal aspects of foreign economic risks within the framework of sustainable development of Russian enterprises // *Journal of Law and Sustainable Development*. 2023. V. 11. N 3. Article id: e317. <https://doi.org/10.55908/sdgs.v11i3.317>

22. Ferreira L.N., Pereira L.N., Bras M.F., Ilchuk K. Quality of life under the COVID-19 quarantine // *Quality of Life Research*. 2021. V. 30. P. 1389–1405.

23. Зубец А.Н. Оценка и международные сопоставления показателя «годы счастливой жизни» при комплексной оценке качества жизни населения // *Социология*. 2022. N 3. С. 116–124.

24. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2025: Р32 Стат. сб. / Росстат. М., 2025. 1035 с.

25. Millward-Hopkins J., Steinberger J.K., Rao N.D., Oswald Y. Providing decent living with minimum energy: A global scenario // *Global Environmental Change*. 2020. V. 65. Art. 102168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102168>

26. Ferreira L.N., Pereira L.N., Bras M.F., Ilchuk K. Quality of life under the COVID-19 quarantine // *Quality of Life Research*. 2021. V. 30. P. 1389–1405.

REFERENCES

- Andreev S.S. *Integral'naya otsenka klimaticheskoi komfortnosti na primere territorii Yuzhnogo Federal'nogo okruga Rossii* [Integral assessment of climatic comfort using the example of the territory of the Southern Federal District of Russia]. St. Petersburg, Russian State Medical University Publ., 2011, 304 p. (In Russian)
- Pan Y.Y., Cheng L., Abraham J., Trenberth K.E., Reagan J., Du J., Wang Z., Storto A., Schuckmann K.V., Zhu Y., Mann M. E., Zhu J., Wang F., Yu F., Locarnini R., Fasullo J., Huang B., Graham G., Yin X., Gouretski V., Zheng F., Li Y., Zhang Z., Wan L., Chen X., Wang D., Feng L., Song X., Liu Y., Reseghetti F., Simoncelli S., Chen G., Zhang R., Mishonov A., Wei W., Tan Z., Li G., Cao L., Chen L., Yuan H., Lyu K., Sulaiman A., Mayer M., Wang H., Ma Z., Bao S., Yan H., Liu Z., Yang C., Liu X., Hausfather Z., Gues F., Song X., Zhang M., Chenand L. Ocean heat content sets another record in 2025. *Adv. Atmos. Sci.*, 2026. <https://doi.org/10.1007/s00376-026-5876-0>
- Cheng L.J., Cheng L., Abraham J., Trenberth K.E., Reagan J., Zhang H., Storto A., Schuckmann K., Pan Y., Zhu Y., Mann M., Zhu J., Wang F., Yu F., Locarnini R., Fasullo J., Huang B., Graham G., Yin X., Gouretski V., Zheng F., Li Y., Zhang B., Wan L., Chen X., Wang D., Feng L., Song X., Liu Y., Reseghetti F., Simoncelli S., Chen G., Zhang R., Mishonov A., Tan Z., Wei W., Yuan H., Li G., Ren Q., Cao L., Lu Y., Du J., Lyu K., Sulaiman A., Mayer M., Wang H., Ma Z., Bao S., Yan H., Liu Z., Yang C., Liu X., Hausfather Z., Szekely T., Gues F. Record high temperatures in the ocean in 2024. *Adv. Atmos. Sci.*, 2025, no. 42, pp. 1092–1109. <https://doi.org/10.1007/s00376-025-4541-3>
- Chen L.F., Xu W.H., Zhou Z.J., Cao L.J., Yang S., Xu C.D. A new global land–ocean merged surface temperature dataset since the 1850s: The CMA-GMST dataset. *Climate Dyn.*, 2025, vol. 63, no. 187. <https://doi.org/10.1007/s00382-025-07614-x>
- Tan Z.T., Tan Z., Zhu Y., Cheng L., Gouretski V., Pan Y., Yuan H., Wang Z., Li G., Song X., Zhang B., Bao S., Li Y., Zhu J. CODC-S: A quality-controlled global ocean salinity profiles dataset. *Scientific Data*, 2025, vol. 12, article number: 917. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-05172-9>
- Thomas A.P., Liu W. Ocean circulation change modulates tropical atmospheric circulation in a warming climate: The role of ocean heat uptake. *J. Climate*, 2025, no. 38, pp. 5305–5321. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-24-0228.1>
- Makosko A.A., Matesheva A.V., Fetisov V.P. *Povyshenie kachestva zhizni naseleniya v usloviyakh zagryazneniya atmosfery i izmeneniya klimata* [Improving the quality of life of the population in the context of air pollution and climate change]. Available at: <https://new.ras.ru/upload/iblock/ca9/pnou9vri026p69yva4lky8ili2wh3h84.pdf> (accessed 25.01.2026)
- Danilov-Danilyan V.I., Katkov V.M., Porfiryev B.N. Ecology and climate: where we are now and where we will be in two or three decades. Situation in Russia. *Vestnik RAN*, 2023, vol. 93, no. 11, pp. 1032–1046. (In Russian) DOI: 10.31857/S0869587323110038
- Klyuev N.N. Territorial shifts in anthropogenic load on nature in post-Soviet Russia. *Vestnik RAN*, 2023, no. 3, pp. 255–265. (In Russian) DOI: 10.31857/S0869587323030052
- Ibragimov A.G., Dzhancharova G.K., Leshcheva M.G. Prospects and problems of digitalization of agriculture in Russia. *Ehkonomika i predprinimatel'stvo* [Economics and Entrepreneurship]. 2020, no. 9 (122), pp. 587–589. (In Russian)
- Shirov A.A., Kolpakov A.Yu. Target scenario of socio-economic development of Russia with a low level of net greenhouse gas emissions until 2060. *Problemy prognozirovaniya* [Forecasting problems]. 2023, no. 6, pp. 53–64. (In Russian)
- Oreshnikov V.V., Nizamutdinov M.M. Assessment of the quality of life of the population in the regions of the Russian Federation. *Bulletin of Tyumen State University. Socioeconomic and legal research*. 2023, vol. 9, no. 3, pp. 192–213. <https://doi.org/10.21684/2411-7897-2023-9-3-192-213> (In Russian)
- Kobysheva N.V., Stadnik V.D., Klyueva M.V., Pigoltseva G.B. et al. *Rukovodstvo po spetsializirovannomu obsluzhivaniyu ehkonomiki klimaticheskoi informatsiei, produktsiei i uslugami* [Guide to specialized servicing of the economy with climate information, products and services]. St. Petersburg, 2008, 536 p. (In Russian)

14. Andreeva E.S. *Opasnye yavleniya pogody yuga Rossii* [Dangerous weather phenomena in the south of Russia]. St. Petersburg, VVM Publ., 2006, 216 p. (In Russian)
15. Prokhorov B.B. *Mediko-ekologicheskoe raionirovanie i regional'nyi pognoz zdorov'ya naseleniya Rossii* [Medical and ecological zoning and regional forecast of health of the population of Russia]. Moscow, International Independent University of Environmental and Political Sciences Publ., 1996, 72 p. (In Russian).
16. Essex C., McKittrick R. *Taken by Storm. The Troubled Science, Policy and Politics of Global Warming*. Toronto: Key Porter Books, 2002, 320 p.
17. Arkhipova I.V. Pokazateli mediko-geograficheskoi otsenki komfortnoti klimata [Indicators of medical-geographical assessment of climate comfort]. *Materialy Shestogo Sibirskogo soveshchaniya po klimato-ekologicheskomu monitoring* [Proceedings of the Sixth Siberian Meeting on Climate-Ecological Monitoring] Tomsk, 2005, pp. 79–83. (In Russian)
18. Mora C. et al. Global risk of deadly heat. *Nature Climate Change*, 2017, vol. 7, p. 501.
19. Gataullin R.F., Karimov A.G., Chuvashava E.R. Methodological foundations for assessing and ensuring the economic viability of local territorial entities. *Vestnik evraziiskoi nauki* [Bulletin of Eurasian Science]. 2019, vol. 11, no. 3, p. 9. (In Russian)
20. Sergeev Yu.N., Kulesh V.P., Dmitriev V.V. Theory and practice of assessing the quality of life of the Russian population in the current secular interval. *Biosfera* [Biosphere]. 2021, vol. 13, no. 3, pp. 49–85. (In Russian)
21. Dzhancharova G., Kosheleva A., Drobysheva N., Pasternak S., Shelygov A., Lebedev K. Economic and legal aspects of foreign economic risks within the framework of sustainable development of Russian enterprises. *Journal of Law and Sustainable Development*, 2023, vol. 11, no. 3, article id: e317. <https://doi.org/10.55908/sdgs.v11i3.317>
22. Ferreira L.N., Pereira L.N., Bras M.F., Ilchuk K. Quality of life under the COVID-19 quarantine. *Quality of Life Research*. 2021, vol. 30, pp. 1389–1405.
23. Zubets A.N. Assessment and international comparisons of the indicator “years of happy life” in a comprehensive assessment of the quality of life of the population. *Sotsiologiya* [Sociology]. 2022, no. 3, pp. 116–124. (In Russian)
24. *Regiony Rossii. Sotsial'no-ekonomicheskie pokazateli. 2025* [Regions of Russia. Socio-economic indicators. 2025: R32 Stat. collection]. Rosstat. 2025, 1035 p. (In Russian)
25. Millward-Hopkins J., Steinberger J.K., Rao N.D., Oswald Y. Providing decent living with minimum energy: A global scenario. *Global Environmental Change*, 2020, vol. 65, art. 102168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102168>
26. Ferreira L.N., Pereira L.N., Bras M.F., Ilchuk K. Quality of life under the COVID-19 quarantine. *Quality of Life Research*. 2021, vol. 30, pp. 1389–1405.

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи, и несут ответственность за плагиат, самоплагиат и другие неэтические проблемы.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

All authors are equally participated in the 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

Гилян В. Федотова / Gilyan V. Fedotova <https://orcid.org/0000-0002-2066-8628>
 Хамида Г. Ахмедова / Khamida G. Akhmedova <https://orcid.org/0000-0003-2442-9955>
 Юлия А. Капустина / Yulia A. Kapustina <https://orcid.org/0000-0002-6828-4332>
 Татьяна Е. Козенко / Tatyana E. Kozenko <https://orcid.org/0000-0002-0544-1361>
 Илья А. Максютин / Ilya A. Maksyutin <https://orcid.org/0009-0000-3348-7028>
 Турмушбек М. Джанчаров / Turmushbek M. Jancharov <https://orcid.org/0000-0003-0684-6253>

Оригинальная статья / Original article
УДК 504, 502, 574, 332.1, 332.3, 614, 63
DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-2



Методика оценки потерь продукции растениеводства и животноводства после аварии на атомной электростанции

Владимир А. Седнев, Михаил А. Хончев

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия

Контактное лицо

Владимир А. Седнев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности», Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации; 125167, Россия, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 49/2.
Тел. +79265312924
Email sednev70@yandex.ru, VASednev@fa.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4922-430X>

Формат цитирования

Седнев В.А., Хончев М.А. Методика оценки потерь продукции растениеводства и животноводства после аварии на атомной электростанции // Юг России: экология, развитие. 2026. Т.21, N 2. С. 20-26.
DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-2

Получена 22 марта 2026 г.

Прошла рецензирование 20 апреля 2026 г.

Принята 25 апреля 2026 г.

Резюме

Цель: разработка научно-методических подходов оценки возможностей объектов сельскохозяйственного производства после аварии на атомной электростанции, которые распространяются на другие радиационно опасные объекты, обоснования мероприятий по повышению устойчивости функционирования объектов сельскохозяйственного производства, недопущению или снижению возможного ущерба, а также путей дальнейшей реабилитации радиоактивно загрязненных сельскохозяйственных территорий. Несмотря на проделанную громадную работу по реабилитации радиоактивно загрязненных территорий, существуют территории с высокими уровнями радиоактивного загрязнения, которые продолжают негативно влиять на радиационную обстановку в целом, при этом сохраняются ограничения по радиологическим критериям по использованию земель сельскохозяйственного назначения и лесного фонда на этих территориях. Радиационная обстановка на сегодня определяется природной радиоактивностью; радиационным фоном, связанным с испытаниями ядерного оружия и наличием радиоактивно загрязненных территорий вследствие деятельности объектов атомной энергетики, промышленности и аварий на них; эксплуатацией радиационно опасных объектов, в том числе атомных электростанций. Атомная отрасль включает более тысячи предприятий, связанных с получением расщепляющихся материалов, их использованием, переработкой и захоронением, как в гражданских, так и в военных целях. Аварии на ядерных энергетических установках сопровождаются практически всеми видами радиационной опасности (прямое ионизирующее излучение, радиоактивные газы и аэрозоли, продукты активации, радиоактивные загрязнения) и представляют опасность для объектов сельскохозяйственного производства.

Ключевые слова

Авария на атомной электростанции, радиоактивное загрязнение, объекты сельскохозяйственного производства, сельское и лесное хозяйство, растениеводство и животноводство.

Methodology for estimating losses of crop and livestock production after a nuclear power plant accident

Vladimir A. Sednev and Mikhail A. Khonchev

Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia

Principal contact

Vladimir A. Sednev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Life Safety, Financial University under the Government of the Russian Federation; 49/2 Leningradsky Ave. Moscow, Russia 125167.
Tel. +79265312924
Email sednev70@yandex.ru, VASednev@fa.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4922-430X>

How to cite this article

Sednev V.A., Khonchev M.A. Methodology for estimating losses of crop and livestock production after a nuclear power plant accident. *South of Russia: ecology, development*. 2026; 21(2):20-26. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-2

Received 22 March 2026

Revised 20 April 2026

Accepted 25 April 2026

Abstract

Objective: to develop scientific and methodological approaches to assess the capabilities of agricultural production facilities after an accident at a nuclear power plant, which extend to other radiation-hazardous facilities, substantiate measures to increase the sustainability of agricultural production facilities, prevent or reduce possible damage, as well as ways to further rehabilitate radioactively contaminated agricultural areas. Despite the tremendous work done to rehabilitate radioactively contaminated territories, there are territories with high levels of radioactive contamination that continue to negatively affect the radiation situation in general, while restrictions remain on radiological criteria for the use of agricultural land and forest resources in these territories. The radiation situation today is determined by: natural radioactivity; radiation background related to nuclear weapons tests and the presence of radioactively contaminated territories due to the activities of nuclear power facilities, industry and accidents on them; the operation of radiation-hazardous facilities, including nuclear power plants. The nuclear industry includes more than a thousand enterprises related to the production of fissile materials, their use, processing and burial for both civilian and military purposes. Accidents at nuclear power plants are accompanied by almost all types of radiation hazards (direct ionizing radiation, radioactive gases and aerosols, activation products, radioactive contamination) and pose a danger to agricultural production facilities.

Key Words

Nuclear power plant accident, radioactive contamination, agricultural production facilities, agriculture and forestry, crop production and animal husbandry.

ВВЕДЕНИЕ

К радиационно опасному объекту относят [1] объект, на котором хранят, перерабатывают, используют или транспортируют радиоактивные вещества, при аварии на котором или его разрушении может произойти облучение ионизирующим излучением или радиоактивное загрязнение людей, сельскохозяйственных животных и растений, объектов народного хозяйства, а также окружающей природной среды (ядерные установки – сооружения и комплексы с ядерными реакторами, в том числе атомные электростанции; радиационные источники; пункты хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ, хранилища радиоактивных отходов; ядерные материалы; радиоактивные вещества и отходы; объекты ядерного комплекса; базы ядерного оружия; территории и водоемы, загрязненные радионуклидами в результате радиационных аварий, ядерных взрывов). Степень их опасности зависит от типа, мощности источника ионизирующих излучений, характера аварии [2–5], которые определяют модели и направления возрождения и обеспечения безопасного развития экономики регионов [6–14], укрепления их финансовой устойчивости [15–16].

Атомная энергетика – продукт военных технологий, то же время потребление энергии – показатель, определяющий экономическое развитие и национальную безопасность страны. Энергетическая стратегия на период до 2030 года должна обеспечить гарантированное энергоснабжение экономики за счет развития атомной энергетике. В то же время в результате аварии на Чернобыльской атомной электростанции 26 апреля 1986 года пострадали территории 14 субъектов Российской Федерации с интенсивным агропромышленным производством, площади радиоактивного загрязнения цезием-137 с плотностью 1 Ки/км² и выше составили 57 тыс. км², из сельскохозяйственной деятельности было выведено 17 тыс. га земель, на 30 тыс. га лесов была прекращена хозяйственная деятельность, ограничения её были введены на 900 тыс. га, порядка 300 км² территорий с плотностями загрязнения цезием-137, превышающим 40 Ки/км², были выделены в зону отчуждения [2; 17].

Государственной программой РСФСР на 1990–1995 годы предусматривалась реализация мероприятий по реабилитации радиоактивно загрязненных сельскохозяйственных угодий. К 1991 году загрязнение почвы радиоцезием более 30 Ки/км² наблюдалось в шести районах Брянской области и трех районах Калужской области. Нижний предел радиационного загрязнения почвы был установлен 1 Ки/км². После 1992 года было принято пять федеральных целевых программ по преодолению последствий аварии. Цель их в 1992–2001 годы: возвращение радиоактивно загрязненных территорий к нормальным условиям жизнедеятельности. В 1992–1994 гг. были созданы элементы системы мониторинга [18] радиоактивного загрязнения окружающей среды, содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции и продукции лесного хозяйства. Было выявлено 2,9 млн. га сельскохозяйственных угодий, загрязненных цезием-137 с плотностью более 1 Ки/км². С 2001 года реализация мероприятий была ориентирована на наиболее пострадавшие Брянскую, Калужскую, Орловскую и

Тульскую области. С 2002 по 2015 гг. преодоление последствий радиационных аварий осуществлялось в рамках федеральных целевых программ. К 2010 году в 6 районах Брянской области радиационная обстановка требовала продолжения реабилитации сельских и лесных угодий. Применение здесь защитных мер для обеспечения чистой продукции требовало 10–15 лет.

Применительно к реабилитационным мероприятиям в лесных экосистемах исходили из того, что их самоочищение от цезия-137 происходит за счет его радиоактивного распада и автореабилитационных процессов. Ведение лесного хозяйства предусматривало разделение его территорий, по плотности загрязнения цезием-137, на три зоны по степени ограничений на лесопользование: I – до 15 Ки/км²; II – 15–40 Ки/км²; III – более 40 Ки/км². В зависимости от коэффициента перехода цезия-137 из почвы в растительность территория была дифференцирована на три района [17]: район зоны хвойно-широколиственных лесов; район зоны широколиственных лесов; район лесостепной зоны. В лесном фонде с плотностью загрязнения почвы цезием-137 свыше 40 Ки/км² или стронцием-90 свыше 25 Ки/км² лесопользование было запрещено. К 2015 году в хозяйственный оборот было возвращено всего 7 % лесов из радиоактивно загрязненных. Радиационно-гигиеническая ситуация в Брянской, Калужской, Орловской, Тульской областях требует продолжения радиационного контроля сельскохозяйственной продукции и лесных ресурсов. В дальнейшем площадь радиоактивно загрязненных территорий лесного фонда будет уменьшаться незначительно. Таким образом, последствия аварии для сельского и лесного хозяйства долгосрочны. К зонам радиоактивного загрязнения относятся территории площадью более 30 тыс. км², где проживает 1,6 млн. чел. Территории с высокими уровнями радиоактивного загрязнения продолжают негативно влиять на радиационную обстановку в целом, при этом сохраняются ограничения по радиологическим критериям по ведению хозяйства на землях сельскохозяйственного назначения и лесного фонда на этих территориях.

Цель исследования: оценка возможностей объектов сельскохозяйственного производства в различные периоды после аварии на атомной электростанции для обоснования мероприятий по повышению устойчивости их функционирования, недопущению или снижению возможного ущерба.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Радиоактивное загрязнение территорий страны после аварии на Чернобыльской атомной электростанции оказалось неравномерным [19], при этом состав радионуклидов представлял смесь топливных частиц, обогащенного урана, летучих и легкоплавких нуклидов и аэрозолей йода, цезия, плутония, стронция и других элементов с периодом полураспада от нескольких часов до 30 и более лет. Основными биологически опасными были изотопы плутония-238 (период полураспада T_{1/2} – 87,7 года), 239 (T_{1/2} – 24,38 лет) и 240 (T_{1/2} – 6,5 тыс. лет), оказавшиеся в основном в 30-км зоне вокруг АЭС, стронция 90 (T_{1/2} – 28,8 лет), цезия 134 (T_{1/2} – 2,06 года) и 137 (T_{1/2} – 30,2 года), йода 131 (T_{1/2} – 8,04 дня), разнесенные воздушными потоками на тысячи километров. По мере распада

короткоживущих радионуклидов, радиационная обстановка определялась радионуклидами стронция и цезия. Наибольшую опасность представляют гамма-излучения и поступление из почвы в сельскохозяйственную продукцию радионуклидов йода-131, стронция-90 и цезия-137. Исходя из этого при оценке радиационной обстановки можно выделить йодный и цезиево-стронцевый (цезиевый) периоды [20].

Йодный период продолжается от 2–4 мес. до года после аварии, характеризуется высокими уровнями радиоактивного загрязнения, а наибольшую опасность представляют внешнее и внутреннее облучение за счет вдыхания загрязненного воздуха и потребления загрязненных продуктов питания и воды. Цезиево-стронцевый период измеряется годами и характеризуется наличием на территории пятен, где уровни загрязнения радиоизотопами цезия-137 и стронция-90 могут изменяться от 5 до 80 Ки/км².

Оценка состояния объектов сельскохозяйственного производства в йодный период

Формула для определения поражающей дозы внешнего γ -излучения на открытой радиоактивно загрязненной местности имеет вид

$$D(t) = 1,7P_1(t_2^{0,6} - 1). \quad (1)$$

Конкретные значения поражающей дозы людей и объектов сельскохозяйственного производства зависят от уровня загрязнения P_1 , приведенного к часу после выпадения осадков, и времени t_2 от начала загрязнения до окончания периода вегетации растений или пребывания на местности. Доза облучения людей и животных в помещениях с коэффициентом ослабления излучений (K_3) имеет вид

$$D(t) = \frac{1,7P_1}{K_3}(t_2^{0,6} - 1). \quad (2)$$

При смешанном режиме пребывания животных на открытой местности и в животноводческих помещениях суммарную дозу внешнего γ -облучения можно определить по формуле

$$D(t) = 1,7P_1(t_2^{0,6} - 1) + \frac{1,7P_1}{K_3}(t_k^{0,6} - t_2^{0,6}), \quad (3)$$

где $t_k^{0,6}$ – время нахождения животных в животноводческих помещениях.

В зависимости от величины суммарной дозы определяются ожидаемые потери животных при однократном облучении. Производственные возможности объектов сельскохозяйственного производства могут быть определены как разность объемов зерновых и технических культур, а также количества животных, прогнозируемых на год, предшествующий аварии ($V_{гн}$ – объем производства за год), и объема ожидаемых потерь ($V_{пот}$) после аварии,

$$P_0 = V_{гн} - V_{пот}. \quad (4)$$

Ожидаемые потери производства молока (и молочных продуктов):

$$V_{мол} = \frac{M_n \cdot K}{100} T \cdot N_k; \quad (5)$$

где M_n – среднесуточный удой на корову, л/сут.; K – коэффициент снижения удоя за время восстановления после облучения, в %; T – время переболевания лучевой болезнью; N_k – количество коров, получивших облучение 150–600 р.

Оценка потерь продукции растениеводства и животноводства в цезиево-стронцевый период

Основной причиной, определяющей объем потерь, является переход изотопов цезия-137 и стронция-90 из почвы и накопление их в растениях и кормах, с переходом из кормов в молоко и мясо. Уровень загрязнения продукции растениеводства и кормов для животных может быть определен путем умножения данных натурных замеров плотности загрязнения участков местности, полей и пастбищ на коэффициент перехода изотопов цезия-137 и стронция-90 в растение через корневую систему

$$U_3 \approx P_3 \cdot K_n, \quad (6)$$

где P_3 – плотность загрязнения участков местности, Ки/км² (принимается по картам загрязнения полей и пастбищ); K_n – коэффициент перехода изотопов в растения через корневую систему при $P_3 = 1$ Ки/км², например: K_n цезия-137 из почвы в растения, выращиваемые на всех почвах, кроме торфяников, в несколько раз ниже, чем у стронция-90.

Степень загрязнения продуктов животноводства зависит от плотности загрязнения кормов и воды, объемов суточного удоя молока и веса животных. Чем больше удой, тем меньше концентрация радионуклидов. Для расчета степени загрязнения молока и мяса может быть использована зависимость:

$$U_{3м} = \frac{P_{3к}}{P_p} \cdot K_n, \quad (7)$$

где $P_{3к}$ – плотность загрязнения суточного потребления кормов, Ки/кг; P_p – продуктивность животных: суточный удой молока в литрах или объем мяса от животного (живой вес) в кг; K_n – коэффициент перехода радионуклидов из кормов в молоко и мясо от суточного поступления их с кормами (Ки/кг).

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Если будет обнаружено радиоактивное загрязнение продукции, превышающее нормативные уровни, то должны выполняться мероприятия по их снижению. Эффективность мероприятий может быть оценена величиной ожидаемых потерь продукции сельскохозяйственного производства или снижением коэффициентов перехода радионуклидов из почвы в растения. Выбор мероприятий рекомендуется проводить по показателю «эффект на рубль затрат» или снижения возможных потерь на единицу затрат. Чем меньше величина η , тем мероприятие эффективнее

$$\eta = \frac{\Delta C}{q_2 - q_1} \min, \quad (8)$$

где ΔC – затраты на мероприятия по снижению потерь населения, животных и продукции сельскохозяйственного производства или на обеспечение условий снижения уровней загрязнения продукции до допустимых норм; q_2 – ожидаемые значения вероятности или количество сохранившегося населения, животных и продукции за счет проведения специальных мероприятий в йодный период; q_1 – то же без проведения мероприятий. В цезиевый период q_2 – показатель фактического уровня загрязнения продукции до проведения мероприятий, а q_1 – показатель допустимого уровня загрязнения для продукции.

Устойчивость функционирования объектов

сельскохозяйственного производства может быть оценена отношением сохранившегося объема производства (области, района, объекта) к планируемому в расчете на год

$$V_{\text{сох}} = \frac{V_{\text{сохр}}}{V_{\text{пр}}}, \quad (9)$$

где $V_{\text{сохр}}$ – сохранившийся объем производства продукции, соответствующей требованиям по уровню загрязнения по отдельным культурам в натуральных объемах или рублях; $V_{\text{пр}}$ – среднегодовой объем производства, планируемый на год до аварии в натуральных объемах по видам продукции или в рублях.

Для определения сохранившегося объема производства следует установить: размеры посевных площадей, урожайность культур, годовое производство мяса и молока до и после радиоактивного загрязнения; количество животных и птицы; ожидаемые уровни радиоактивного загрязнения посевных площадей, пастбищ, потери урожайности и продуктивности животных.

ВЫВОДЫ

С учетом результатов работы по реабилитации радиоактивно загрязненных территорий необходимо реализовывать мероприятия по обеспечению экологически безопасного развития регионов. Основными направлениями могут быть следующие:

- создание условий для социально-экономического развития и инвестиционной привлекательности загрязненных территорий, при этом технологические приемы должны быть направлены на повышение рентабельности производства и снижение содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции до нормативных уровней;
- создание условий для возвращения пострадавших территорий к нормальным условиям жизнедеятельности. На территориях с высокими уровнями загрязнения не удалось решить проблему установления режимов использования сельскохозяйственных земель, и они продолжают негативно влиять на радиационную обстановку. Поэтому необходимо: продолжение наблюдений для принятия обоснованных решений по выбору технологий реабилитации выведенных из оборота земель; научное обоснование рационального использования потенциала радиоактивно загрязненных территорий; создание системы управления сельскохозяйственными землями, выведенными из оборота;
- создание условий для повышения качества жизни пострадавшим гражданам. Для реализации направления необходимо: продолжение строительства систем газо- и теплоснабжения, водоснабжения и канализации на пострадавших территориях; повышение эффективности медицинской помощи;
- создание условий для безопасного использования радиоактивно загрязненных земель сельскохозяйственного назначения и лесного фонда. Основные мероприятия: ведение сельскохозяйственного и лесного хозяйства с учетом их радиационно-экологических характеристик; предотвращение деградации земель с высокими плотностями загрязнения; разработка рекомендаций по

реабилитации сельскохозяйственных земель и развитию животноводства;

- развитие системы мониторинга на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению, включая создание национальной автоматизированной системы мониторинга радиоактивных загрязнений, что предполагает продолжение исследований воздействия ионизирующего излучения для флоры и фауны в сильно загрязненных зонах (зоне отчуждения);
- социально-психологическая реабилитация граждан, для чего предлагается: разработка технологий по формированию культуры безопасности жизнедеятельности; информирование о безопасности проживания на территориях, подвергшихся воздействию малых доз радиации.

Дальнейшая реабилитация территорий обеспечит безопасное состояние окружающей среды и возврат к ведению хозяйства без ограничений по радиологическим критериям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Об использовании атомной энергии / Федеральный закон от 21 ноября 1995 г. №170-ФЗ.
2. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия-Беларусь) / Под ред. Ю.А. Израэля и И.М. Богдевича // Москва-Минск: Фонд «Инфосфера» - НИА-Природа, 2009. 140 с.
3. Воронов С.И., Седнев В.А. Авария на Сибирском химическом комбинате: последствия и выводы для обеспечения безопасности населения и устойчивости функционирования // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2016. N 3 (30). С. 3–9.
4. Седнев В.А., Воронов С.И. Риск возникновения чрезвычайных ситуаций радиационного и нерадиационного характера и проблемы развития атомной энергетики // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2016. N 2. С. 40–48.
5. Аврорин Е.Н. Красота взрыва // Аргументы и факты. 2015. N 21. С. 27.
6. Тютюкина Е.Б., Мельников Р.М., Седаш Т.Н., Егорова Д.А. Оценка влияния инструментов экологической политики Российской Федерации на региональные инвестиции в охрану окружающей среды // Экономика региона. 2023. Т. 19. N 1. С. 192–207. DOI: 10.17059/ekon.reg.2023-1-15
7. Пивоварова О.В., Конищев Е.С. Оценка эффективности природоохранной деятельности в Российской Федерации: проблемы и перспективы // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. N 12. С. 56–61. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-12-56-61>
8. Лаврикова Ю.Г., Суворова А.В. Неоднородность экономического развития российских макрорегионов // Экономика региона. 2023. Т. 19. N 4. С. 934–948. DOI: 10.17059/ekon.reg.2023-4-1
9. Строев П.В. Влияние размещения экономических ресурсов на особенности пространственной организации России // Экономика региона. 2023. Т. 19. N 4. С. 949–963. DOI: 10.17059/ekon.reg.2023-4-2
10. Стерник С.Г. Комплексное развитие территорий и экономика регионов // Проблемы прогнозирования. 2023. N 2 (197). С. 57–75. DOI: 10.47711/0868-6351-197-57-75
11. Строев П.В., Низамутдинов М.М., Орешников В.В. Методический подход к комплексной оценке уровня жизни населения в регионах России // Регионология. 2024. Т. 32. N 1 (126). С. 71–89. DOI: 10.15507/2413-1407.126.032.202401.071-089

12. Еремин В.В., Побываев С.А., Сильвестров С.Н. О показателях оценки обеспечения демографической безопасности России // Проблемы прогнозирования. 2023. N 4 (199). С. 104–114. DOI: 10.47711/0868-6351-199-104-114
13. Новоселова И.Ю., Новоселов А.Л. Альтернативные методы экономической оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики // Экономика. Налоги. Право. 2025. Т. 18. N 2. С. 67–76. DOI: 10.26794/1999-849X-2025-18-2-67-76
14. Новоселова И.Ю., Новоселов А.Л. Программные проекты экономического развития региона: оценка их приоритетности и моделирование последовательности их реализации // Экономика. Налоги. Право. 2026. Т. 19. N 1. С. 114–124. DOI: 10.26794/1999-849X-2026-19-1-114-124
15. Карпова С.В., Погодина Т.В. Финансово-экономическое поведение потребителей и его влияние на достижение целей устойчивого развития в России // Финансы: теория и практика. 2024. Т. 28. N 1. С. 109–121. <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2024-28-1-109-121>
16. Чупин А.Л., Засько В.Н., Морковкин Д.Е., Донцова О.И. Модель роста экономики региона на основе индекса экономической сложности // Финансы: теория и практика. 2024. Т. 28. N 3. С. 52–60. <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2024-28-3-52-60>
17. Перечень населенных пунктов, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС / Постановление Правительства Российской Федерации от 18.12.1997 г. №1582. URL: <https://base.garant.ru/5138508/> (дата обращения: 17.03.2026)
18. Voronov S.I., Popov E.V., Sednev V.A., Voronov O.S. Public safety conditions under radiological emergencies monitoring comprehensive system mobile facilities application. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. "Advances in Science for Agriculture "Achievements of Science for the Agro-Industrial Complex"" 2021. Article id: 012049.
19. Рекомендации по ведению сельского хозяйства в условиях радиоактивного загрязнения территории в результате аварии на Чернобыльской АЭС на период 1991-1995 гг. / Под ред. Алексахина Р.М. // ВНИИХСР РАСХН. 1991. 57 с.
20. Седнев В.А. Теоретические основы обеспечения устойчивости функционирования объектов экономики и территорий: учебник. Москва. Академия ГПС МЧС России, 2023. 314 с.
5. Aurorin E.N. The beauty of explosion. Argumenty i fakty [Arguments and facts]. 2015, no. 21, p. 27. (In Russian)
6. Tyutyukina E.B., Melnikov R.M., Sedash T.N., Egorova D.A. Assessment of the impact of environmental policy instruments of the Russian Federation on regional investments in environmental protection. *Economy of regions*, 2023, vol. 19, no. 1, pp. 192–207. (In Russian) DOI: 10.17059/ekon.reg.2023-1-15
7. Pivovarova O.V., Konishchev E.S. Evaluation of the effectiveness of environmental protection activities in the Russian Federation: problems and prospects. *Ecology and industry of Russia*, 2023, vol. 27, no. 12, pp. 56–61. (In Russian) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-12-56-61>
8. Lavrikova Yu.G., Suvorova A.V. Heterogeneity of economic development of Russian macro-regions. *Ekonomika regiona* [The economy of the region]. 2023, vol. 19, no. 4, pp. 934–948. (In Russian) DOI: 10.17059/ekon.reg.2023-4-1
9. Stroeve P.V. The influence of the allocation of economic resources on the features of the spatial organization of Russia. *Ekonomika regiona* [The economy of the region]. 2023, vol. 19, no. 4, pp. 949–963. (In Russian) DOI: 10.17059/ekon.reg.2023-4-2
10. Sternik S.G. Integrated territorial development and regional economics. *Problemy prognozirovaniya* [Forecasting problems]. 2023, no. 2 (197), pp. 57–75. (In Russian) DOI: 10.47711/0868-6351-197-57-75
11. Stroeve P.V., Nizamutdinov M.M., Oreshnikov V.V. A methodological approach to a comprehensive assessment of the standard of living of the population in the regions of Russia. *Regionology*, 2024, vol. 32, no. 1 (126), pp. 71–89. (In Russian) DOI: 10.15507/2413-1407.126.032.202401.071-089
12. Eremin V.V., Pobuyayev S.A., Silvestrov S.N. On indicators for assessing Russia's demographic security. *Forecasting problems*, 2023, no. 4 (199), pp. 104–114. (In Russian) DOI: 10.47711/0868-6351-199-104-114
13. Novoselova I.Yu., Novoselov A.L. Alternative methods of economic assessment of environmental pollution by energy facilities. *Economy. Taxes. Right*, 2025, vol. 18, no. 2, pp. 67–76. (In Russian) DOI: 10.26794/1999-849X-2025-18-2-67-76
14. Novoselova I.Yu., Novoselov A.L. Program projects for the economic development of the region: assessing their priority and modeling the sequence of their implementation. *Economy. Taxes. Right*, 2026, vol. 19, no. 1, pp. 114–124. (In Russian) DOI: 10.26794/1999-849X-2026-19-1-114-124
15. Karpova S.V., Pogodina T.V. Financial and economic behavior of consumers and its impact on the achievement of sustainable development goals in Russia. *Finance: theory and practice*, 2024, vol. 28, no. 1, pp. 109–121. (In Russian) <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2024-28-1-109-121>
16. Chupin A.L., Zasko V.N., Morkovkin D.E., Dontsova O.I. A model of regional economic growth based on the economic complexity index. *Finance: theory and practice*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 52–60. (In Russian) <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2024-28-3-52-60>
17. *Perechen' naselennykh punktov, nakhodyashchikhsya v granitsakh zon radioaktivnogo zagryazneniya vslledstvie katastrofy na Chernobyl'skoi AEHS* [List of settlements located within the boundaries of radioactive contamination zones due to the Chernobyl disaster]. Decree of the Government of the Russian Federation dated December 18, 1997, No. 1582. Available at: <https://base.garant.ru/5138508/> (accessed: 17.03.2026) (In Russian)
18. Voronov S.I., Popov E.V., Sednev V.A., Voronov O.S. Conditions of public safety when using mobile means of an integrated radiation emergency monitoring system. In: IOP Conference Series "Earth and Environmental Science". Ser. "Achievements of science for agriculture" "Achievements of science for the agro-industrial complex"" 2021, article id: 012049.

REFERENCES

1. *Ob ispol'zovanii atomnoi ehnergii* [On the use of atomic energy]. Federal Law No. 170-FZ of November 21, 1995. (In Russian)
2. Israel Yu.A., Bogdevich I.M., eds. *Atlas sovremennykh i prognoznykh aspektov posledstviy avarii na Chernobyl'skoi AEHS na postradavshikh territoriyakh Rossii i Belarusi (ASPA Rossiya-Belarus)* [Atlas of modern and forecast aspects of the consequences of the Chernobyl accident in the affected territories of Russia and Belarus (ASPA Russia-Belarus)]. Moscow-Minsk, Infosphere Foundation - NIA-Priroda Publ., 2009, 140 p. (In Russian)
3. Voronov S.I., Sednev V.A. Accident at the Siberian Chemical plant: consequences and conclusions for ensuring public safety and sustainable functioning. *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoi zashchity* [Scientific and educational problems of civil protection]. 2016, no. 3 (30), pp. 3–9. (In Russian)
4. Sednev V.A., Voronov S.I. The risk of radiation and non-radiation emergencies and the problems of nuclear energy development. *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoi zashchity* [Scientific and educational problems of civil protection]. 2016, no. 2, pp. 40–48. (In Russian)

19. Aleksakhina R.M., ed. *Rekomendatsii po vedeniyu sel'skogo khozyaistva v usloviyakh radioaktivnogo zagryazneniya territorii v rezul'tate avarii na Chernobyl'skoi AEHS na period 1991-1995 gg.* [Recommendations on agriculture in conditions of radioactive contamination of the territory as a result of the Chernobyl accident for the period 1991-1995]. 1991, 57 p. (In Russian)

20. Sednev V.A. *Teoreticheskie osnovy obespecheniya ustoichivosti funktsionirovaniya ob"ektov ehkonomiki i territorii* [Theoretical foundations of ensuring the sustainability of the functioning of economic facilities and territories]. Moscow. Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia Publ., 2023, 314 p. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Владимир А. Седнев написал рукопись;
Михаил А. Хончев редактировал рукопись
до подачи в редакцию. Авторы несут ответственность
при обнаружении плагиата, самоплагиата и других
неэтических проблем.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Vladimir A. Sednev wrote the manuscript;
Mikhail A. Khonchev edited the manuscript
before submission. The authors are responsible
for plagiarism, self-plagiarism, or other ethical
transgressions.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Владимир А. Седнев / Vladimir A. Sednev <https://orcid.org/0000-0002-4922-430X>
Михаил А. Хончев / Mikhail A. Khonchev <https://orcid.org/0009-0004-3258-8993>

Оригинальная статья / Original article

УДК 502.131.1:504.062(571.1/5)

DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-3



Геоэкологические предпосылки экологической оптимизации степного природопользования в постцелинном районе Оренбургского Зауралья

Александр А. Чибилёв, Юрий А. Падалко, Сергей В. Левыкин, Юрий А. Гулянов,
Дмитрий А. Ильютчик, Руслан Р. Садертдинов, Григорий В. Казачков

Институт степи Уральского отделения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Оренбургский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук, Оренбург, Россия

Контактное лицо

Юрий А. Падалко, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт степи Уральского отделения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Оренбургский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук; 460040 Россия, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11.
Тел. +73532774432
Email yapadalko@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1149-7887>

Формат цитирования

Чибилёв А.А., Падалко Ю.А., Левыкин С.В., Гулянов Ю.А., Ильютчик Д.А., Садертдинов Р.Р., Казачков Г.В. Геоэкологические предпосылки экологической оптимизации степного природопользования в постцелинном районе Оренбургского Зауралья // Юг России: экология, развитие. 2026. Т.21, N 2. С. 27-39.
DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-3

Получена 16 января 2026 г.

Прошла рецензирование 4 марта 2026 г.

Принята 25 апреля 2026 г.

Резюме

Исследование направлено на изучение современного постцелинного состояния сельскохозяйственных угодий района, выявление перспектив аграрного и промышленного развития в современных условиях, оценку альтернативных сценариев освоения природных ресурсов муниципального образования, связанных с созданием ООПТ, структур охотничьего хозяйства и сохранением биологического разнообразия.

Проведены экспедиционные исследования. Изучены и проанализированы материалы землеустройства, динамика структуры селхозугодий Степного Зауралья за 70 лет, обработан обширный картографический материал, почвенные, геоботанические карты в т.ч. источники ДЗЗ за 50 лет.

Оренбургское Зауралье, в 50–60-е годы прошлого века охватывавшее территорию пяти административных районов области, является одним из крупнейших очагов освоения целинных земель в Российской Федерации. Общая площадь вновь распаханых в 1954–1963 годы массивов сельскохозяйственных угодий составила около миллиона гектаров или почти 60 % всей целины, поднятой в Оренбургской области. Среди вновь распаханых земель Зауралья 2/3 площади новой пашни составили песчаные и супесчаные земли, солонцы и эрозийно-опасные угодья.

Распашка малопригодных для земледелия почв в зоне черноземов южных и темно-каштановых почв привела не только к резкому падению естественного плодородия с потерей запасов гумуса от 30 до 50 %, но и списанию многих десятков тысяч гектаров пашни из-за полной гибели посевов или очень низкой урожайности, около 2,5 ц/га (30 % площади целины). В этих условиях многие целинные хозяйства были вынуждены сократить посевы зерновых и поголовье скота, что привело к оттоку населения и деградации аграрной инфраструктуры. Предлагается во всех постцелинных районах создавать *земельный фонд восстановления степных ландшафтов (экосистем)*.

Ключевые слова

Постцелинное пространство, Оренбургское Зауралье, земельный фонд, ООПТ, степные озера, охотничьи угодья, биоразнообразие, горнодобывающие предприятия.

Geo-ecological prerequisites for steppe land-use optimisation and landscape-ecological framework development in the post-virgin lands region of the Orenburg Trans-Urals, Russia

Alexander A. Chibilev, Yuriy A. Padalko, Sergey V. Levykin, Yuriy A. Gulyanov,

Dmitry A. Ilyutchnik, Ruslan R. Sadertdinov and Grigory V. Kazachkov

Steppe Institute, Ural Branch, Russian Academy of Sciences – a separate structural unit of the Orenburg Federal Research Centre, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia.

Principal contact

Yuriy A. Padalko, Candidate of Geographical Sciences, Researcher, Steppe Institute, Ural Branch, Russian Academy of Sciences – a separate structural unit of the Orenburg Federal Research Centre, Ural Branch, Russian Academy of Sciences; 11 Pioneerskaya St, Orenburg, Russia 460040. Tel. +73532774432
Email yapadalko@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1149-7887>

How to cite this article

Chibilev A.A., Padalko Yu.A., Levykin S.V., Gulyanov Yu.A., Ilyutchnik D.A., Sadertdinov R.R., Kazachkov G.V. Geo-ecological prerequisites for steppe land-use optimisation and landscape-ecological framework development in the post-virgin lands region of the Orenburg Trans-Urals, Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2026; 21(2):27-39. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-3

Received 16 January 2026

Revised 4 March 2026

Accepted 25 April 2026

Abstract

The study focuses on the current state of agricultural lands in the post-Virgin Lands development period, identifying prospects for agro-industrial growth and assessing alternative natural resource management scenarios. These scenarios include the establishment of specially protected natural areas (SPNAs), hunting management systems and biodiversity conservation.

Field expeditions were conducted to collect primary data. The authors studied and analysed land management records and the dynamics of agricultural land structures in the Steppe Trans-Urals over a 70-year period. The research involved processing extensive cartographic materials, soil maps and geobotanical maps, as well as remote sensing (RS) data spanning 50 years.

The Orenburg Trans-Urals, which covered five administrative districts in the 1950s–1960s, remains one of Russia's largest hubs of what was the Virgin Lands campaign. Between 1954 and 1963, newly cultivated areas reached approximately one million hectares, accounting for nearly 60 % of all virgin lands developed in the region. Notably, two-thirds of this new arable land consisted of marginal soils, including sandy, sandy-loam, solonetzic and erosion-prone areas.

The cultivation of soils poorly suited for agriculture in the southern chernozem and dark chestnut soil zones led not only to a sharp decline in natural fertility with humus reserve losses ranging from 30 % to 50 %, but also to the withdrawal of tens of thousands of hectares of arable land from production. This abandonment resulted from frequent crop failures or critically low yields, averaging approximately 0.25 t/ha (affecting 30 % of the developed area). Under these conditions, many virgin land farms were forced to reduce grain crop areas and livestock numbers, triggering rural depopulation and the degradation of agricultural infrastructure. To address these ongoing issues, it is proposed to establish a land fund for the restoration of steppe landscapes (ecosystems) in all post-Virgin Land districts.

Key Words

Post-Virgin Land landscapes, Orenburg Trans-Urals, land fund, protected areas, steppe lakes, hunting grounds, biodiversity, mining enterprises.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим условием планирования устойчивого развития постцелинных территорий степной зоны Российской Федерации и, в частности, Восточного Оренбуржья является новое землеустройство. Оно должно:

- во-первых, сориентировать современное сельское хозяйство на эффективное использование наиболее продуктивных земель (т.н. «элитный земельный фонд»);
- во-вторых, создать эколого-стабилизирующие природоподобные угодья различного назначения, играющие важную роль в поддержании углеродного баланса и сохранении степного биома, биоразнообразия и открывающие новые перспективные виды природопользования, такие как туризм, рекреация, охотничье хозяйство;
- в-третьих, учитывая катастрофическое обеднение и уничтожение степного ландшафтного и биологического разнообразия, важное место в структуре земельного фонда должны занимать особо охраняемые природные территории;
- в-четвертых, экологическая оптимизация постцелинных степных ландшафтов должна предусматривать поддержание устойчивого лесомелиоративного каркаса, элементов водохозяйственного комплекса – естественных и искусственных водоемов, рекультивацию нарушенных земель, территорий исчезнувшей аграрной инфраструктуры и антропогенных очагов экологической опасности;
- в-пятых, с учетом убыли населения необходимо развивать опорные населенные пункты, дорожную инфраструктуру и создавать перспективные производства, включая предприятия по добыче и переработке полезных ископаемых, по переработке сельскохозяйственной продукции, а также развитию рекреации, туризма, охотничьего хозяйства.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика исследования базируется на комплексном каркасно-ландшафтном подходе. В качестве

информационной базы исследования использовались фундаментальные научные труды, посвященные теории и практике формирования ландшафтно-экологического каркаса, а также работы, детально рассматривающие природно-хозяйственные особенности Оренбургской области и ключевых районов исследования [1–12]. В рамках исследования муниципального образования был осуществлён комплексный геоинформационный анализ статистических показателей распределения современных земельных ресурсов по категориям и видам разрешённого использования с применением программного обеспечения QGIS 3.32. Методологической основой исследования послужили данные открытых информационных ресурсов, включая материалы Федеральной государственной информационной системы «Единая цифровая платформа «Национальная система пространственных данных» и Федерального агентства по недропользованию, а также актуальная документация по территориальному планированию. Детальная проработка объекта исследования обеспечивалась привлечением материалов землеустройства, структуры сельхозугодий Степного Зауралья за 70 лет, обработан обширный картографический материал, почвенные, геоботанические карты в т.ч. источники ДЗЗ за 50 лет.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оптимизация структуры земельного фонда

Характерной особенностью современной структуры земельного фонда Светлинского района в связи с высокой вовлечённостью в сельскохозяйственный процесс является высокая доля земель сельскохозяйственного назначения, составляющая 93,6 % (524,6 тыс. га) его площади (560,7 тыс. га).

В составе сельскохозяйственных угодий преобладает пашня (289086 га по состоянию на 01.01.2026 г.), занимающая 58,7 % их площади и 51,6 % площади района. Значительно меньшую площадь, при полном отсутствии многолетних насаждений, занимают сенокосы (3,98 %) и пастбища (34,64 %) (рис. 1).

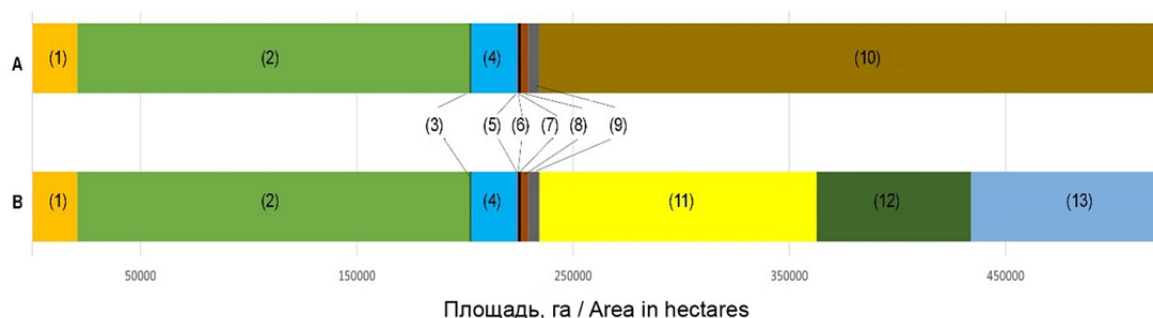


Рисунок 1. Современные (А) и перспективные (В) состав, структура и площадь (га) земель сельскохозяйственного назначения, Светлинский район, Оренбургская область

Цифрами на графике: 1. Сенокосы; 2. Пастбища; 3. Лесные земли; 4. Земли под водой; 5. Болота; 6. Земли застройки; 7. Нарушенные земли; 8. Земли под дорогами; 9. Прочие земли; 10. Отведённые под пашню земли; 11. Условно пахотные земли; 12. Пахотные земли, непригодные для полеводства; 13. Лучшие пахотные земли

Figure 1. Current (A) and prospective (B) composition, structure, and area (ha) of agricultural lands, Svetlinsky District, Orenburg Region

Legend: 1. Hayfields; 2. Pastures; 3. Forest lands; 4. Lands under water; 5. Wetlands (Swamps); 6. Built-up areas; 7. Disturbed lands; 8. Lands under roads; 9. Other lands; 10. Allotted arable lands; 11. Conditionally arable lands; 12. Arable lands unsuitable for crop farming; 13. Prime arable lands

При таком диспаритете стабилизирующих (сенокосы, пастбища, многолетние насаждения, лесные земли,

лесные насаждения, не входящие в лесной фонд, земли под водой, залежь, болота) и дестабилизирующих

(пашня, земли застройки, нарушенные земли, земли под дорогами и прочие земли-полигоны отходов, свалки, овраги) экологическое равновесие структурных элементов территории района характеризуется неустойчивым экологическим состоянием, с комплексным показателем экологической устойчивости, равном 0,75 (0,5...1,0 – неустойчивое, 1,0...3,0 – условно устойчивое, 3,0...4,5 – устойчивое с хорошей выраженностью, более 4,5 – устойчивое с яркой выраженностью [13]). Низкой является и территориально-функциональная устойчивость агроландшафтов, с индексом экологической сбалансированности, определяемом по соотношению площадей, занятых стабилизирующими экологическое равновесие структурными элементами и отведённых под пашню в общей площади землепользования, составляющим 0,78 (> 1 – устойчивое, 1 – экологически сбалансированное или порогу устойчивое, < 1 – неустойчивое [14]).

Анализ сложившейся экологической ситуации показывает, что целесообразность широкого пространственного использования отведённых под пашню земель, как самого дестабилизирующего фактора, нуждается в критическом переосмыслении, особенно в условиях нарастающей засушливости климата [15]. В первую очередь это связано с присутствием в почвенном покрове малопродуктивных угодий с недостаточным для высокорентабельного производства уровнем плодородия – солонцово-солончаковых почв и их комплексов с зональными тёмно-каштановыми почвами [16]. Вместе они занимают 27,4 % (153,9 тыс. га) площади землепользования района, включая 6,5 тыс. га чистых солонцов, отведённых под пашню [17].

Эти почвы отличаются неблагоприятными агрофизическими свойствами и не представляют практического интереса для полеводства, хотя частично и вовлекаются в земледельческий оборот. Большая же часть этих почв, а также каштановых неполноразвитых щебенчато-каменистых почв, в связи с экономической бесперспективностью невозвратных технологических трат, не используется по назначению (71300 га).

Наиболее экологически обоснованным их использованием, направленным на стабилизацию экологического равновесия, может стать перевод в сенокосные и (или) пастбищные угодья для восстановления степных травяных экосистем. Результатом такого перераспределения угодий станет ощутимое повышение экологической устойчивости территории до условно устойчивого (1,30 единиц) и территориально-функциональной устойчивости агроландшафтов – до устойчивого (1,36 единиц), экологически сбалансированного состояния.

Из 217786 га действительно обрабатываемых в Светлинском районе из отведённых под пашню земель 89604,8 га (31,0 %) являются особо ценными, подлежащими к использованию для производства семян высоких репродукций, испытания сортов сельскохозяйственных культур и не допустимыми к использованию на другие цели [18]. Они должны быть отнесены к первой категории земель – лучшим пахотным землям или элитному региональному фонду, оставаться в использовании при любых экономических условиях и составлять основу устойчивого ведения сельского хозяйства.

Применительно к территории Оренбургской области к таким землям относятся наиболее продуктивные земли плакоров с бонитетом 73–75 баллов. Для условий Светлинского района лучший земельный фонд образуют пахотные угодья на плакорах-ровняках со среднесуглинистыми тёмно-каштановыми почвами с бонитетом 43–45 баллов, с мощностью гумусового горизонта (A+B) 35–40 см и содержанием гумуса до 3,5–4,5 %. Это пахотные угодья, обладающие высокими, характерными для зональных тёмно-каштановых почв, водно-физическими свойствами, достаточно плодородные, устойчивые к негативным проявлениям природного и антропогенного характера, обеспечивающие относительно стабильную урожайность, пригодные для интенсивного использования и сосредоточения на них основной технологической нагрузки. На них может ориентироваться рентабельное растениеводство, преимущественно для выращивания яровой твёрдой пшеницы перспективных сортов (Оренбургская 21, Безенчукская степная, Донская элегия, Безенчукская Нива, Безенчукская золотистая, Безенчукская крепость и др.).

Дополнительно к лучшим пахотным землям, при благоприятных экономических условиях, в пахотный оборот без критического снижения экологической стабильности территории и территориально-функциональной устойчивости агроландшафтов допустимо включение ещё 128181,2 га (44,3 %) отведённых под вспашку земель из числа зональных тёмно-каштановых солонцеватых и тёмно-каштановых карбонатных почв, отнесённых ко второй категории земель – условно пахотным землям. В неё могут быть включены земли, обладающие вышеперечисленными свойствами, с бонитетом 39–42 балла, мощностью гумусового горизонта (A+B) 28–37 см и содержанием гумуса 3,2–3,7 %. В отдельных случаях, при реализации соответствующих мелиоративных мероприятий, в эту категорию земель, в пределах обозначенной площади, могут быть включены комплексы тёмно-каштановых солонцеватых почв с солонцами каштановыми засоленными, с относительной долей солонцов не более 25 %, слабой каменистости (рис. 2).

Неиспользуемые в настоящее время пахотные угодья (71300 га, 27,4 %), не целесообразные для полеводства ввиду низких продуктивных свойств, представленные солонцово-солончаковыми почвами и их комплексами с зональными тёмно-каштановыми почвами с относительной долей солонцов более 25 %, высокой и средней каменистости, а также неполноразвитыми щебенчато-каменистыми почвами с укороченным (сжатым) и подпираемым плотной породой гумусовым горизонтом (15–20 см), не должны рассматриваться в качестве пашни ни при каких экономических условиях. Они составляют третью категорию земель – непригодные для обработки земли.

Экологически целесообразным направлением их использования может стать отведение под пастбища с перспективой восстановления вторичных степей и пополнения природоохранно-охотничьего земельного фонда, как угодий, восстанавливающих и сохраняющих степной биом.

Доля обрабатываемых земель при таком соотношении угодий будет составлять 41,5 % в структуре земель сельскохозяйственного назначения, 44,2 % в структуре сел.-хоз. угодий и 38,8 % в общей

площади района. Структура земель сельскохозяйственного назначения в результате предлагаемого перераспределения угодий приобретёт направленность на ощутимое повышение экологической устойчивости территории и территориально-функциональной устойчивости агроландшафтов. Сосредоточение же технологической нагрузки на лучших землях,

отзывающихся на реализацию наукоёмких агротехнических приёмов, при значительной экономии материально технических ресурсов, будет способствовать поддержанию продовольственной безопасности за счёт повышения продуктивности остающихся в обработке полей.

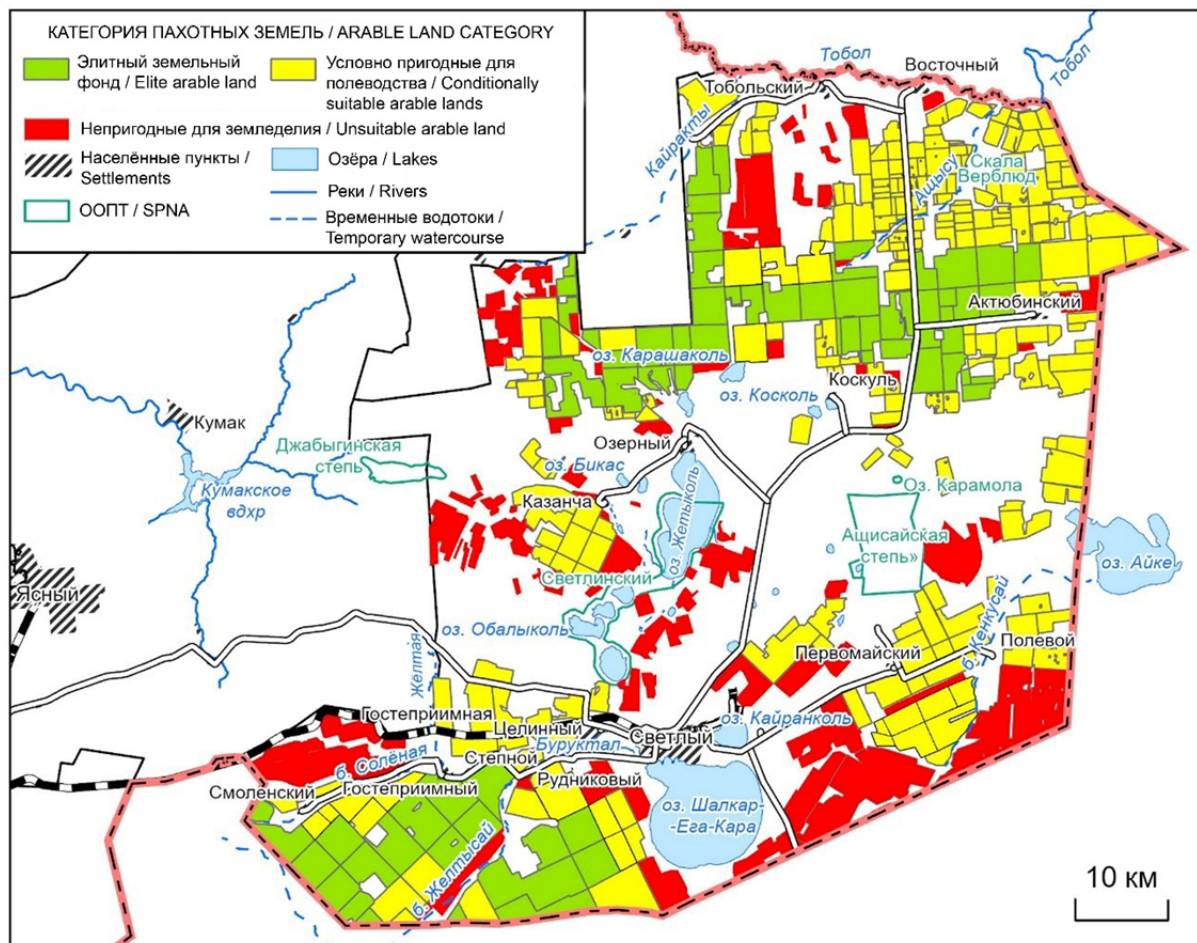


Рисунок 2. Распределение пахотных земель Светлинского района по категориям использования

Figure 2. Distribution of arable lands in Svetlinsky District by use categories

Создание и развитие природоохранно-охотничьего земельного фонда

Важное место в земельном фонде района исторически принадлежит охотничьим ресурсам. Состояние этих ресурсов является универсальным показателем степени сохранности биоты, в данном случае травяных и водно-болотных экосистем как кормовой базы и местообитаний охотничьих видов млекопитающих и птиц. На основе отечественного и зарубежного опыта можно привести немало примеров, когда постаграрные ландшафты становились уникальными полигонами для восстановления охотничьих животных [19–21].

В начале 1950-х гг. данные территории входили в пределы самого крупного в области Адамовского района и относились к государственному земельному запасу. В конце 1940-х гг. целинные степи и озёра района оценивались как богатейшие по охотресурсам, прежде всего, обращалось внимание на Шалкар-Жетыкольскую озёрную котловину протяжённостью около 40 км и площадью порядка 30 тыс. га. Озёра изобиловали водоплавающей дичью – гнездилился серый гусь, что позволяло ставить вопрос об

организации охотничье-промыслового хозяйства по водоплавающей дичи на базе системы бессточных озёр. После зарыбления озёр язем, карасём и окунем они стали крупным рыбохозяйственным объектом. В тростниковых зарослях наиболее крупных озёр обитала камышовая популяция кабана. Целинные лесинго-ковыльные степи изобиловали стрепетом, сурком, дрофой, серой куропаткой, которые встречались повсеместно. Поселения сурка, находившиеся при оптимальных условиях, занимали свыше 5000 км² при плотности 70–90 гол/км², что говорит об общей численности до 400 тыс. гол. Ежегодно на летовку из Казахстана заходило несколько тысяч сайгаков. До середины 50-х годов прошлого века Адамовский госземзапас располагал значительным охотресурсным потенциалом целинных степей, чему способствовали удалённость, отсутствие дорог, крупных населённых пунктов, пашни, адаптивное животноводство [22–24].

После освоения целины в Оренбургском Зауралье произошли глубокие антропогенные преобразования, приведшие к катастрофическому сокращению охотничьих ресурсов [25]. Уже с середины

1960-х гг. бывшие целинные земли представляли собой «страну жаворонков и коньков» [26], сурок сократил численность в десятки раз, переместился на аграрные неудобья и сохранялся в основном на территории созданного заказника в количестве 30–40 тыс. гол. [27; 28]. Были полностью истреблены или вытеснены дрофа, стрепет, камышовый кабан. Сохраняли высокую численность неохотничьи виды, однако сократилась общая полезная продуктивность ландшафта за счет критического сокращения ресурсов титульных степных и ценных охотничьих видов.

В 1970-е гг. охотресурсы стабилизировались на низком по сравнению с доцелинным, но относительно высоком для области уровне. Охотугодья стали доступнее и привлекали спортивных охотников. Стабилизации ресурсов способствовал запрет весенней охоты. Продуктивная спортивная охота велась в основном на открытых плёсах среди камышовых лабиринтов.

К 1990-м гг. всего на Светлинских озёрах насчитывалось на гнездовании и на миграции 145 видов птиц, по данным на 2008 год – 195. На максимуме водности и камышовой ремизности летнее население гусеобразных составляло 200 особей на кв. км, что позволяло оценивать общую численность в 50 тыс. особей [29; 30]. В маловодные и безводные годы количество местной дичи сокращалось более чем в 10 раз.

В постцелинный период эколого-стабилизирующую роль играли охотничье-природоохранные угодья: два госохотзаказника (Каракольский по ондатре, Светлинский по сурку-байбаку), два охотничьих хозяйства «Озёрное» и «Жетыколь», участок ГПЗ «Оренбургский» Ащисайская степь. Эти угодья охватили различным режимом охраны и управления охотресурсами полосу протяжённостью с запада на восток свыше 40 км полосой шириной 25 км.

На максимуме водности 1990-х на озёрах и в окрестностях отмечалось порядка 200–300 тыс. пролётных гусей (белолобый, серый, пискалька), 30–35 тыс. краснозобой казарки. В последующий маловодный период объём миграции снизился в несколько раз (до 70–80 тыс. гусеобразных). Несмотря на пересыхание озёр, исторически сложившийся маршрут пролёта гусеобразных сохраняется, птицы используют каждый открытый водоем, включая искусственные [31]. В декабре 2025 г. на юго-западных незамерзших плёсах оз. Жетыколь на завершающих этапах пролёта нами было отмечено несколько стай краковых уток численностью до 1500 гол.

В последние десятилетия высокий охотхозяйственный потенциал Светлинского района стал привлекать охотхозяйственных инвесторов. В районе с 2005 г. формируется крупнейший в степной зоне России, а возможно в стране в целом, кластер охотничьих хозяйств нового поколения (объединённых в систему ООО «Охотклуб»).

В настоящее время на территории района формируется своеобразный очаг высокой степной охотничьей культуры и культуры степного землепользования. Разнообразие и масштабы охотресурсов, развитие биотехники и культуры спортивной охоты в степной зоне невозможно без специально организованного пространства, в нашем понимании *степного охотничьего агроландшафта* – своеобразного благоустроенного кластера передовых

охотничьих хозяйств и ООПТ разного уровня интегрированных с ними в функционально единое целое. С позиций теории землеустройства и планов территориального развития это можно считать одной из наиболее эффективных форм сохранения и восстановления ландшафтного, биологического разнообразия, ресурсов титульных степных и охотничьих видов, которые можно назвать *природоохранным охотничьим земельным фондом*. Основными признаками формирования этого земельного фонда являются:

- природные предпосылки: наличие охотугодий с потенциально высокой продуктивностью;
- научное обоснование охотустройства;
- формирование степного охотничьего агроландшафта (разнообразие и мозаичность угодий, ремизность, наличие участков воспроизводства);
- эффективная постоянная охрана охотресурсов;
- высокая культура спортивной охоты;
- развитие степной биотехники.

В Светлинском районе природными предпосылками формирования современного степного охотничьего агроландшафта сосредоточены в котловинах от оз. Жетыколь на севере до оз. Шалкарегакара на юге и площадью более 30 тыс. га, и в примыкающей к ней с востока широтной Ащисайской полосе района площадью свыше 100 тыс. га.

Ащисайская полоса характеризуется наивысшим в районе ландшафтным разнообразием. Во время максимальной распашки в постцелинный период именно здесь удалось сохранить потенциал восстановления степных экосистем. Был создан Светлинский сурчинный заказник, воспроизводственный участок Каракольский, самый крупный участок заповедника «Оренбургский» «Ащисайская степь» и два крупных охотхозяйства «Шалкарское» и «Озёрное». Благодаря этому земельному фонду, как на нём, так и вокруг него активно протекают процессы самовосстановления степных экосистем, лессингоковильных степей, особенно активно возрастают ресурсы сурка, стрепета, серой купопатки, зайца-русака, барсука, лисицы. На площадях более чем 70 тыс. га формировались вторичные лессингоковильные степи – аналоги целинных степей первой половины XX века.

В качестве примеров, иллюстрирующих положительную динамику восстановления охотресурсов района, можно привести:

- формирование устойчивой местной (озерно-степной!) популяции сибирской косули, численностью до 400 голов;
- рост численности степного сурка (до 100 тыс. голов), что уже в 2–3 раза превышает его численность в 1970-е годы;
- восстановление популяции камышового кабана с крупными трофейными особями;
- регулярные заходы сайгаков из Актыбинской и Костанайской областей.

Таким образом, развитие природоохранным охотничьего земельного фонда с формированием в его пределах пастбищного скотоводства с щадящей нагрузкой будет способствовать решению задач экологической оптимизации степных ландшафтов на основе природоподобных технологий.

Природно-заповедный фонд (Ащисайская степь, заказник «Светлинский», памятники природы)

Современный природно-заповедный фонд Светлинского района образуют участок госзаповедника «Оренбургский» Ащисайская степь, государственный биологический заказник «Светлинский» и три государственных памятника природы [12]. К сожалению, другие ООПТ района не были согласованы во время принятия административного решения в 1998 году, а утвержденный памятник природы Жетыкольская песчаная коса – единственное в Оренбургской области реликтовое золово-намывное образование нерусского происхождения – несмотря на природоохранный статус было уничтожено в результате добычи песка.

Ащисайская степь, площадью 7200 га, была изъята из землепользования совхоза «50 лет СССР» в 1989 году при создании государственного заповедника. Заповедный участок является эталоном степных ландшафтов западной части Тургайской столовой страны. Здесь наибольшее распространение имеют плоско-наклонные равнины с грядовыми выходами кварцитов. До организации заповедника данный степной участок использовался под выпас овец и крупного рогатого скота калмыцкой породы. Внутренние территории участка, удаленные от водоемов, практически не были затронуты выпасом домашнего скота. Еще в 1970–80-е годы на участок заходили стада сайгаков численностью до 5–6 тыс. голов. В последние годы (2022–2025) отмечаются заходы небольших групп сайгаков из Казахстана.

Ащисайская степь почти целиком расположена в бассейне широкой и разветвленной балки Ащисай, впадающей в озеро Айке. В ландшафтно-типологическом отношении Ащисайскую степь представляют типы местности: междуречный недренированный озерно-западинный, волнистый ложково-склоновый и останцово-водораздельный скалисто-грядовый [32]. Почвенный покров образуют сочетания темно-каштановых карбонатных и карбонатно-солонцеватых, часто засоленных глинистых почв. По увалам и грядам отмечаются каменистые почвы с выходами кварцитов.

Для Ащисайской степи характерны типчакково-ковыльные, белополынно-ковыльные и полыньково-типчакковые модификации растительности. По кварцитовым грядам распространены петрофиты и лугово-степное разнотравье, встречаются кустарники: спирея городчатая, шиповник, кизильник. Для ложины и ложбины характерно мезофитное разнотравье.

Фауну млекопитающих представляют степной сурок, русак, пищевуха степная, лисица, барсук, кожан двухцветный. Из птиц характерны степной орел, виды жаворонков, а также околотовые утки – огарь, пеганка.

В период агрохозяйственного освоения района участок заповедника мог бы быть расширен за счет включения в него прилегающей с севера котловины озера Карамола, а также территории к югу с густонаселенными колониями степного сурка. В настоящее время такой необходимости нет в связи с формированием природоохранный-охотничьего земельного фонда, охватывающего практически все непахотные и озерно-котловинные угодья района.

В 2005 году на территории района был создан Светлинский биологический заказник регионального значения общей площадью 8400 га. Он охватывает центральный и южный сектор озера Жетыколь, озера Давленколь, Обалыколь, Малый Обалыколь, Караколь с 500-метровой зоной степных угодий вокруг них. Заказник входит в состав ключевой орнитологической территории «Шалкар-Жетыкольский озерный район». В пределах заказника гнездится и останавливается на миграциях более 180 видов птиц. Можно сказать, что озера заказника являются своеобразным ядром биоразнообразия всей озерной системы района.

В Светлинском районе в 1998 году было создано три государственных памятника природы. Самый значительный из них – кварцитовая скала Верблюд – своеобразный ландшафтный символ всей Оренбургской области. К сожалению, статус памятника природы не спас от уничтожения Жетыкольскую песчаную косу. В перспективе необходимо расширить памятник природы в долине речки Ащису, включая скалу Верблюд, Каменную речку по руслу водотока и гору Аккаргу – уникальный скалистый обрыв на правобережье Ащису с висячими зарослями степных кустарников. На левобережье Ащису среди кварцитовых скал находится родник. Из других природных объектов района статуса ООПТ регионального значения заслуживают озеровидные плесы р. Буруктал (самой глубокой реки в Оренбуржье), пойменные озера в пойме р. Тобол и условный исток крупной сибирской реки Тобол. Уникальными геологическими объектами являются ландшафтные проявления хромовых, никелевых и медных руд, а также золотоносные жилы месторождений кварцитового типа.

Водохозяйственная оценка района

Ландшафтной особенностью Светлинского района является наличие здесь обширной бессточной неоген-четвертичной равнины с большим количеством плоских озерных ванн. Впадины наиболее крупных озер имеют тектоническое происхождение и донеогеновый возраст. Общая площадь бессточного бассейна озер Шалкарегакара, Жетыколь, и Айке занимает площадь 4,6 тыс. км² и близка к площади района. Исключение составляет северо-восток района, который входит в состав бассейна р. Тобол. В пределах бессточного бассейна выделяется река Буруктал, которая состоит из плесов глубиной 3–12 м, водотоком считается только верхняя часть плеса реки, длиной 6 км, а остальной плес протяженностью 22 км имеет озерный режим, со стоком в весенний период. В многоводные годы, особенно до освоения целины эта река имела сток в озеро Шалкарегакара, наполняя до его до обрывов сохранившегося приозерного вала. Аналогично наполняется временными водотоками озеро Жетыколь. В многоводные годы, например, 1942, 1995, 2005, крупные озера соединяются проливами, образуя весной единую озерную систему, поглощая более мелкие степные водоёмы.

Водно-озерный фонд представлен 58 озёрами общей площадью водного зеркала 195 км² (3,5 % от площади района). Наполнение озер, зависящее преимущественно от весенних талых вод, отличается значительными колебаниями их площади, как в многолетнем режиме, так и в течение сезонов одного года. В многоводные годы озерная системы сливаются

в один водоем, увеличивая площадь водного зеркала в 1,5 раза. В отдельные годы такие крупные озёра, как Шалкарегакара, сокращают площадь водного зеркала до нуля, а на Жетыколе сохраняются 5–7 мелководных песков. Континентальный климат с недостаточным увлажнением обуславливает низкие среднегодовые нормы стока, не превышающие 0,5 л/с·км². Флуктуации водного режима озёр являются индикатором климатических изменений. В прошлом озёра имели промышленное рыбохозяйственное значение для региона, однако в настоящее время озёрная ихтиофауна сильно деградировала и не располагает такими ресурсами.

Согласно водному реестру, в районе насчитывается 10 рек и временных водотоков. Здесь расположен исток реки Тобол, которая является

пограничным водным объектом с Республикой Казахстан протяжённостью 44 км. Общая длина гидрографической сети составляет 302 км. Плотность речной сети района составляет примерно 0,054 км/км², – это наименьший показатель для Оренбургской области.

С момента освоения целины обеспечение водой было основной проблемой хозяйственного и селитебного развития территории. С целью устойчивого водообеспечения хозяйства было создано 68 искусственных водоёмов различного назначения. В настоящее время фонд гидротехнических сооружений входят порядка 47 действующих прудов и водохранилищ, объёмом от 1 до 4 млн м³ с общей площадью водного зеркала 1200 га (рис. 3).

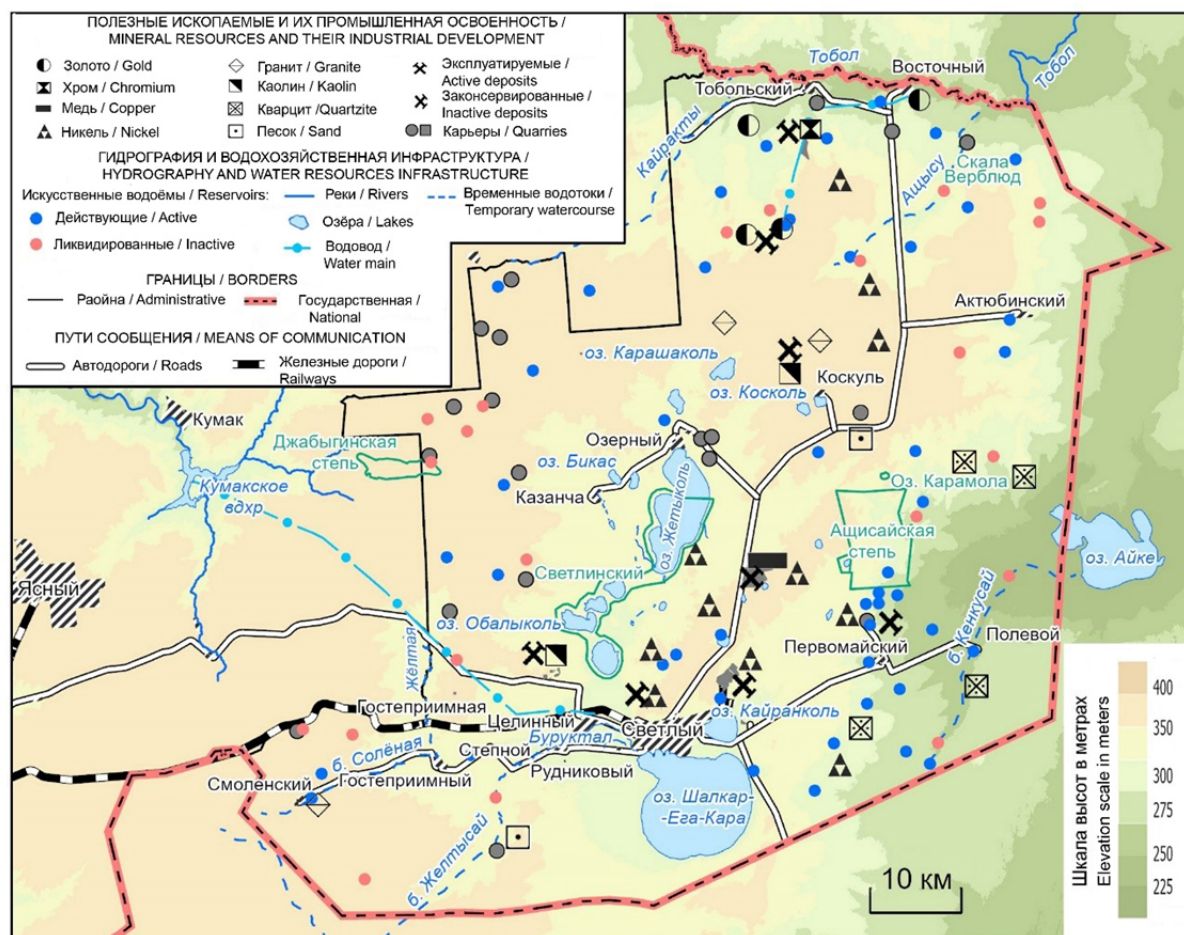


Рисунок 3. Горно-промышленное и водохозяйственное использование территории Светлинского района
Figure 3. Mining, industrial and water management use of the territory of Svetlinsky District

На большей части территории района подземные воды первых от поверхности водоносных горизонтов сильно минерализованы – до 35 г/дм³ (преобладание хлоридных анионов). Только ближе к водоразделу бассейнов рек Урал и Тобол минерализация уменьшается до 3 г/дм³. Большая часть населённых пунктов имеет подземные источники питьевого централизованного водоснабжения и один поверхностный источник – Верхне-Кумакский водозабор. Водоснабжение посёлка Светлый и двух поселений (Степной и посёлок Целинный) осуществляется транспортировкой воды по водоводу Кумак – Светлый. Гидроузел на Кумакском

водохранилище в соседнем Ясенском районе включает в себя головную насосную станцию и водовод Кумак – Светлый, сданный в эксплуатацию в 1964 г. Его мощность составляет 3,2 тыс. м³/час.

Водоотведение представлено прудом-испарителем очистных сооружений посёлка Светлый в прибрежной зоне озера Шалкарегакара и водоочистными сооружениями бывшего Бурукталяского никелевого завода у озера Кайранколь. Озёра несут значительную хозяйственную нагрузку при отсутствии проточности. Также немаловажной проблемой является использование пересохших озёрных ванн в маловодные годы для

сельскохозяйственных целей и невозможность соблюдения не только водоохранных зон, но и границ водных объектов. При анализе кадастровой карты установлено, что в водоохранных зонах водных объектов территориально входят земли сельскохозяйственного назначения площадью около 2400 га.

Первоочередными вопросами экологической оптимизации ландшафтно-гидрологических объектов района является:

- обустройство верховьев реки Тобол, включая оборудование истока реки и реальное создание водоохранной зоны в пределах его поймы и долин при малых водотоках;
- создание водоохранной зоны реки Буруктал с выносом бывшей и современной сельскохозяйственной инфраструктуры за пределы долины реки;
- противопожарная организация приозёрных тростниково-камышевых зарослей, которые служат убежищем для водных, околоводных птиц и таких ценных видов охотничьей фауны как косуля и кабан;
- предотвращение загрязнения водоёмов и элементов гидрологической сети от коммунальных, сельскохозяйственных и промышленных загрязнений.

Горно-промышленные особенности территории

Светлинский район полностью входит в Уральскую палеогеосинклиналь, благодаря чему располагает обширным разнообразием полезных ископаемых: от чёрных и цветных до благородных и редкоземельных металлов, гранита и каолина (рис. 3). Имеются геологические проявления бериллия, ниобия, урана, вольфрама, циркония и изумрудов.

Первое промышленное освоение полезных ископаемых на территории современного Светлинского района связано с освоением хромовых руд Аккаргинского массива в 30-х гг. XX века в бассейне р. Тобол. Позднее, с открытием месторождений в Кемпирсайском массиве Актюбинской области, содержащих высококачественные руды с высоким содержанием Cr_2O_3 (до 62 %) и низким содержанием железа и фосфора, Аккаргинская группа месторождений была заброшена, рекультивация рудника и карьеров не проводилась. В 2018 году началась доразведка и опытно-промышленная добыча, а затем промышленная добыча открытым способом. В настоящее время запасы месторождения оцениваются в 0,3 млн т., а по последним данным в 2023 г. добыто 9 тыс. т. хромовых руд [33].

В районе расположено Буруктальское месторождение силикатного никеля по запасам – одно из крупнейших в России (1,5 млн т.) с содержанием 0,63 % Ni в руде [34; 35]. Именно с освоением данного месторождения связано образование райцентра и постройка в 60-х гг. Буруктальского никелевого завода. Из-за относительной бедности местной руды в 2000-х гг. добыча на месторождении и производство были остановлены. Месторождение осваивалось открытым способом на нескольких участках, вследствие чего остались карьеры и отвалы шлака, представляющие наибольшую экологическую угрозу окружающим степным и озёрным экосистемам. Площадь нарушенных земель в результате освоения месторождения составляет около 400 га без учёта транспортных коридоров и других отводов. Кроме Буруктальского месторождения, включающего десяток

залей, никелевые руды разведаны в Аккаргинском массиве и на Коскольском никелевом месторождении.

В конце 2000-х гг. выявлены несколько перспективных участков залегания элювиальных каолинов — Ковыльное и перспективное месторождение близ с. Косколь. В дальнейшем на Коскольской площади элювиальных каолинов выявлены залежи высококачественных каолинов с прогнозными ресурсами категории P_1 в количестве 22,04 млн т и утверждёнными запасами категорий C_1+C_2 в количестве 366,3 млн т [33; 35]. Значительные запасы делают Коскольское месторождение не только крупнейшим в России, но и сопоставимым со всеми объёмами запасов страны. К настоящему времени разработка началась только на Ковыльном месторождении с началом строительства завода по обогащению каолинов.

Цветные металлы представлены запасами медных руд, которые в основном сосредоточены в Светлинском медноколчеданном месторождении в вулканогенных породах, в 20 км к северу от районного центра. Месторождение находится в резерве, но под него проведён кадастровый отвод земель для разработки площадью 700 га. Благородные металлы представлены месторождениями золота кварцитового типа: Правотобольское, Бисмулла, Старый Блак, Блак. Все месторождения значатся как законсервированные и сведений о промышленном освоении месторождений в прошлом нет.

В достаточном количестве имеются запасы месторождений строительных материалов: гранита (3 крупных месторождениями), кварцита (4 месторождения) на юго-востоке района, а также песков строительных (озёрного происхождения), глины кирпичных, щебня и др.

На большинстве освоенных месторождений полезных ископаемых рекультивация не проводилась. На заброшенных карьерах имеются признаки самозарастания степной растительностью, но имеются участки хорошей сохранности техногенных нарушений. На космических снимках просматривается несколько десятков карьеров различных размеров и назначения общей площадью более 2000 га. В перспективе прослеживается значительный рост площади техногенно нарушенных ландшафтов за счёт разработки новых месторождений меди, каолина, возможно золота. Богатство полезными ископаемыми не значительно повлияло на социально-экономическое благосостояние района, но их разработка оказывает, и будет представлять угрозу уникальному степному биому района.

При новом землеустройстве и разработки проектов районной планировки необходимо выделить не только уже существующие горные отвод, но и перспективные площади месторождений, на которых необходимо предусмотреть опережающие исследования возможных угроз местообитания редких видов биоты. Особое внимание должно быть уделено предотвращению совершенно варварских технологий поиска золотоносных жил кварцитового типа, которые приводят к образованию «оскальпированных» степных ландшафтов, которые характерны для Оренбургского Зауралья.

ВЫВОДЫ

1. Светлинский район Оренбургской области является своеобразным геоэкологическим феноменом

постцелинного пространства Российской Федерации, где в первой четверти 21 века сформировались уникальные перспективы восстановления степного биоразнообразия и экологической оптимизации степных ландшафтов при сохранении относительно устойчивого развития растениеводства на лучших землях – элитном земельном фонде.

2. Рентабельное полеводство в пределах района возможно на площади 89604,8 га, что составляет 31,0 % от всей пашни, которая числится таковой на 01.01.2026 г. *Элитный земельный фонд* занимает 17,11 % от территории района. На площади 128181,2 га или 44,3 % от всей пашни растениеводство возможно только при проведении специальных мелиоративных мероприятий и без гарантий рентабельного полеводства. Практика землепользования последнего десятилетия и материалы агрономической оценки почв дают основания утверждать, что около 71300 га должны быть официально выведены из категории пашни в земельный фонд эколого-стабилизирующих угодий, в т.ч. природоохранный-охотничий.

3. Светлинский район является первым на постцелинном пространстве Оренбургской области и, вероятно, в Российской Федерации, где сформировались условия для создания масштабного *природоохранный-охотничий земельный фонд*, который позволяет восстановить и сохранить степной биом с эталонными территориями типчаково-ковыльных и полынно-типчаково-ковыльных степей, озерно-степными угодьями, представляющими интерес для сохранения, воспроизводства характерных степных животных, в т.ч. охотничьих. Главными составными частями природоохранный-охотничий земельный фонд являются пастбища, сенокосы, вторичные степи на залежах, овражно-балочная сеть, многочисленные котловины степных озер.

4. Безусловным достоянием земельного фонда являются участок госзаповедника «Оренбургский» «*Ащисайская степь*», региональный биологический заказник «Светлинский», а также несколько государственных памятников природы.

5. Водный фонд района образуют степные озера со средне-многолетней общей площадью водного зеркала 19,5 тыс. га, пруды и степные реки, которые представляют собой ценные угодья для миграции и гнездования водоплавающих и околоводных видов птиц. Озера района являются ключевой орнитологической территорией, играющей важную роль на трансконтинентальном миграционном пути гусеобразных Северной Евразии.

6. Важное место в современной структуре земельного фонда района занимают разнообразные горно-промышленные ландшафты – карьеры и отвалы, отработанные, заброшенные и активно разрабатываемые. Они вносят элементы ландшафтного разнообразия, являются источниками экологических опасностей и перспективными объектами рекультивации.

7. Современная структура селитебных ландшафтов в постцелинный период характеризуется повсеместной деградацией, а многие бывшие поселения, отделения, фермы, полевые станы стали природно-антропогенными урочищами – неотъемлемой частью ландшафта и своеобразным «угасающим элементом» кочевнической и целинной культуры.

8. Характерной особенностью Светлинского района, в отличие от всех других постцелинных территорий является отсутствие лесомелиоративного каркаса. Лесные насаждения паркового и приусадебного типа характерны только для населенных пунктов.

9. На территории Светлинского района имеются возможности для развития туризма. Это, во-первых, скала Верблюд, каменная река и гора Аккарга в верховьях р. Ащесу. Во-вторых, точки наблюдения за птицами (бёрдвотчинг) во время миграций и на гнездовании. В-третьих, экологический и познавательный туризм в охранный зоне ООПТ. Кроме того, имеются прекрасные условия для конного туризма, водного туризма по реке Буруктал. Все это разнообразие туристской деятельности могли бы развивать «Охотклуб», горнодобывающие предприятия, а также администрация района через краеведческий музей для школьников и гостей региона.

10. Отмеченные геоэкологические особенности Светлинского района необходимо учитывать при новом землеустройстве его территории, разработке проектов районной планировки, мероприятий по охране ландшафтного и биологического разнообразия.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-00020, <https://rscf.ru/project/25-17-00020>

ACKNOWLEDGMENT

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-17-00020, <https://rscf.ru/project/25-17-00020>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баранский Н.Н. Экономическая география. Экономическая картография. М.: Географгиз, 1960. 450 с.
2. Лаппо Г.М. Концепция опорного каркаса территориальной структуры народного хозяйства: развитие, теоретическое и практическое значение // Известия АН СССР. Серия географическая. 1983. N 5. С. 16–28.
3. Федотов М.А. Опорный каркас Центрального экономического района // Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология. 2022. N 4(40). С. 17–25. <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2022-4-17-25>
4. Tansley A.G. The use and abuse of vegetational concepts and terms // Ecology. 2015. V. 16. N 3. P. 284–307. <https://doi.org/10.2307/1930070>
5. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1978. 319 с.
6. Родоман Б.Б. Поляризованный ландшафт: полвека спустя // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2021. N 3. С. 467–480. <https://doi.org/10.31857/S2587556621030122>
7. Исаченко А.Г. Методология ландшафтоведения и ландшафтно-географический научный метод // Известия Русского географического общества. 2016. Т. 148. N 1. С. 15–30.
8. Климанова О.А., Колбовский Е.Ю., Илларионова О.А. Экологический каркас крупнейших городов Российской Федерации: современная структура, территориальное планирование и проблемы развития // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018. Т. 63.

N 2. С. 127–146.

<https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2018.201>

9. Чибилев А.А. Ландшафтно-экологический каркас как территориальная основа устойчивого развития земледельческих регионов России // Юг России: экология, развитие. 2022. Т. 17. N 2. С. 115–121.

<https://doi.org/10.18470/1992-1098-2022-2-115-121>

10. Чибилев А.А. Экологическая оптимизация степных ландшафтов. Свердловск: УрО АН СССР, 1992. 172 с.

11. Чибилев А.А. Перспективы развития непрерывной сети ключевых природных резерватов в степной зоне Европейской России на основе сопряженного анализа современной структуры ландшафтов // Вопросы степеведения. 2018. N 14. С. 36–44.

<https://doi.org/10.2441/9999-006A-2018-00001>

12. Чибилев А.А. Природное наследие Оренбургской области. Оренбург: Оренбургское книжное издательство, 1996. 384 с.

13. Клементова Е.Н., Гейниге В. Оценка экологической устойчивости сельскохозяйственного ландшафта // Мелиорация и водное хозяйство. 1995. N 5. С. 33–34.

14. Масютенко Н.П., Чунан Н.А., Кузнецов А.В., Глазунов Г.П., Калужских А.Г., Дубовик Е.В., Панкова Т.И., Бахирев Г.И., Сухановский Ю.П., Санжарова С.И., Пруцки А.В., Соловьёва Ю.А., Чунан О.Г. Система оценки ресурсного потенциала агроландшафтов для формирования экологически сбалансированных агроландшафтов. Курск: Изд-во ГНУ ВНИИЗиЗПЭ РАСХН, 2012. 67 с.

15. Гулянов Ю.А. Оценка континентальности климата и её влияние на устойчивость земледелия в Оренбургской области // Вопросы степеведения. 2025. N 4. С. 151–169. DOI: 10.24412/2712-8628-2025-4-151-169

16. Блохин Е.В. Экология почв Оренбургской области: почвенные ресурсы, мониторинг, агроэкологическое районирование. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 228 с.

17. Климентьев А.И. Почвы степного Зауралья: ландшафтно-генетическая и экологическая оценка. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 436 с.

18. Указ Губернатора Оренбургской области от 30 июля 2013 г. N 755-УК «О перечне особо ценных земель сельскохозяйственного назначения в Оренбургской области». Официальное опубликование. URL: <https://orenbgov.ru/doc/38974> (дата обращения: 14.01.2026)

19. Дёжкин В.В. Охота и охотничье хозяйство мира: справочное пособие. М.: Лесная промышленность, 1983. 358 с.

20. Зарубежный опыт охотничьего хозяйства // Охотоведение: научно-теоретический журнал. 2004. N 2 (52). 180 с.

21. Ермолик В.Б. Биотехническая концепция заказника «Кирзинский»: Симбиоз зарубежного опыта и собственных новаций // Известия Уфимского НЦ. 2022. N 3. С. 74–80.

22. Даркшевич Я.Н. Птицы и звери Чкаловской области и охота на них. Чкалов: Чкаловское изд-во, 1950. 192 с.

23. Мильков Ф.Н. Поездка на Джигы-Куль // С экскурсией по Чкаловской области. Чкалов: Чкаловское кн. изд-во, 1949. С. 118–125.

24. Румянцев В.Ю. Картографический анализ размещения степного сурка в Казахстане // Структура популяций сурков. М., 1991. С. 71–97.

25. Чибилев А.А., Левыкин С.В. Ландшафтно-экологические последствия освоения целины в Заволжье и Казахстане // Сб. тез. научно-практ. конф. «40-летие освоения целины». Оренбург: изд-во ВНИИМС, 1994. С. 52–54.

26. Рябов В.Ф. Авиафауна степей Северного Казахстана. М.: Наука, 1982. 175 с.

27. Машкин В.И. Европейский байбак: экология, сохранение и использование. Киров: Обл. типография, 1997. 155 с.

28. Машкин В.И., Челинцев Н.Г. Инструкция по

организации и проведению учёта сурков в СССР. М.: ВНИИ охраны природы, ВНИИ охотн. хоз. и звероводства им. Б.М. Житкова, 1989. 26 с.

29. Географический атлас Оренбургской области. М.: Изд-во ДИК, 1999. 96 с.

30. Давыгора А.В. Дополнения к орнитологической фауне Шалкар-Жетыкольского озёрного района // Вестник ОГУ. 2008. N 87. С. 22–33.

31. Давыгора А.В., Чернецов Н.С., Семёнов А.А. К осеннему пролёту гусеобразных на озёрах Оренбургского степного Зауралья на пике засушливой фазы внутривекового цикла увлажнённости // Selevinia. 2022. С. 162–165.

32. Чибилев А.А. Заповедник «Оренбургский»: история создания и природное разнообразие. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. 139 с.

33. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2023 году / Федеральное агентство по недропользованию. URL:

<https://rosnedra.gov.ru/activity/documents/gosudarstvennyy-doklad-2023/> (дата обращения: 14.01.2026)

34. Петров О.В., Гурская Л.И., Феоктистов В.П. Металлогения никеля и перспективы развития его сырьевой базы в России // Региональная геология и металлогения. 2013. N 54. С. 64–74.

35. Горбачев Б.Ф., Васянов Г.П., Красникова Е.В. Каолины Орского Зауралья - сырьевая база для формирования в Приволжском федеральном округе специализированного горно-промышленного комплекса // Георесурсы. 2015. N 4 (63). С. 25–32. <http://dx.doi.org/10.18599/grs.63.4.4>

REFERENCES

- Baranskiy N.N. *Ekonomicheskaya geografiya. Ekonomicheskaya kartografiya* [Economic Geography. Economic Cartography]. Moscow, Geografiz Publ., 1960, 450 p. (In Russian)
- Lappo G.M. The Concept of the Supporting Framework of the Territorial Structure of the National Economy: Development, Theoretical and Practical Significance. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geograficheskaya* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Geographical Series]. 1983, no. 5, pp. 16–28. (In Russian)
- Fedotov M.A. Supporting frame of the Central Economic Region. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Herald of Tver State University. Series: Geography and Geoecology*, 2022, no. 4(40), pp. 17–25. (In Russian) <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2022-4-17-25>
- Tansley A.G. The use and abuse of vegetation concepts and terms. *Ecology*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 284–307. <https://doi.org/10.2307/1930070/>
- Sochava V.B. *Vvedenie v uchenie o geosistemakh* [Introduction to the Study of Geosystems]. Novosibirsk, Nauka, Sibirskoe otделение Publ., 1978, 319 p. (In Russian)
- Rodoman B.B. Polarized landscape: half a century later. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, 2021, no. 3, pp. 467–480. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S2587556621030122>
- Isachenko A.G. Methodology of landscape science and landscape-geographical scientific method. *Izvestiya Russkogo Geograficheskogo Obshchestva* [Proceedings of the Russian Geographical Society]. 2016, vol. 148, no. 1, pp. 1–30. (In Russian)
- Klimanova O.A., Kolbovsky E.Yu., Illarionova O.A. Ecological framework of the largest cities of the Russian Federation: modern structure, territorial planning and development issues. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 127–146. (In Russian) <https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2018.201>
- Chibilev A.A. Landscape-ecological framework as a territorial basis for sustainable development of agricultural

- regions of Russia. *South of Russia: ecology, development*, 2022, vol. 17, no. 2, pp. 115–121. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2022-2-115-121>
10. Chibilev A.A. *Ekologicheskaya optimizatsiya stepnykh landshaftov* [Ecological Optimization of Steppe Landscapes]. Sverdlovsk, UrO AN SSSR Publ., 1992, 172 p. (In Russian)
 11. Chibilev A.A. Prospects for the development of a continuous network of key natural reserves in the steppe zone of European Russia based on a coupled analysis of the modern structure of landscapes. *Steppe Science*, 2018, no. 14, pp. 36–44. (In Russian) <https://doi.org/10.2441/9999-006A-2018-00001>
 12. Chibilev A.A. *Prirodnoe nasledie Orenburgskoi oblasti* [Natural Heritage of the Orenburg Region]. Orenburg, Orenburgskoe knizhnoe izdatel'stvo Publ., 1996, 384 p. (In Russian)
 13. Klementova E.N., Geynige V. Assessment of ecological stability of the agricultural landscape. *Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo* [Land Reclamation and Water Management]. 1995, no. 5, pp. 33–34. (In Russian)
 14. Masyutenko N.P., Chuyan N.A., Kuznetsov A.V., Glazunov G.P., Kaluzhskikh A.G., Dubovik E.V., Pankova T.I., Bakhirev G.I., Sukhanovskiy Yu.P., Sanzharova S.I., Prushchik A.V., Solov'eva Yu.A., Chuyan O.G. *Sistema otsenki resursnogo potentsiala agrolandshaftov dlya formirovaniya ekologicheskoi sbalansirovannykh agrolandshaftov* [System for assessing the resource potential of agrolandscapes for the formation of environmentally balanced agrolandscapes]. Kursk, GNU VNIIZIPE RASKhN Publ., 2012, 67 p. (In Russian)
 15. Gulyanov Yu.A. Assessment of climate continentality and its impact on the sustainability of agriculture in the Orenburg region. *Steppe Science*, 2025, no. 4, pp. 151–169. (In Russian) <https://doi.org/10.24412/2712-8628-2025-4-151-169>
 16. Blokhin E.V. *Ekologiya pochv Orenburgskoi oblasti: pochvennye resursy, monitoring, agroekologicheskoe raionirovanie* [Soil ecology of the Orenburg region: soil resources, monitoring, agro-ecological zoning]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 1997, 228 p. (In Russian)
 17. Kliment'ev A.I. *Pochvy stepnogo Zaural'ya: landshaftno-geneticheskaya i ekologicheskaya otsenka* [Soils of the steppe Trans-Urals: landscape-genetic and environmental assessment]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2000, 436 p. (In Russian)
 18. *Ukaz Gubernatora Orenburgskoi oblasti ot 30 iyulya 2013 g. No. 755-UK «O perechne osobo tsennykh zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya v Orenburgskoi oblasti»* [Decree of the Governor of the Orenburg Region dated July 30, 2013 No. 755-UK "On the list of particularly valuable agricultural lands in the Orenburg region"]. Available at: <https://orenb-gov.ru/doc/38974> (accessed 14.01.2026)
 19. Dezhkin V.V. *Okhota i okhotnich'e khozyaistvo mira* [Hunting and hunting management of the world: a reference guide]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983, 358 p. (In Russian)
 20. Zarubezhnyi opyt okhotnich'ego khozyaistva. *Okhotovedenie* [Hunting Science Journal]. 2004, no. 2 (52), 180 p. (In Russian)
 21. Ermolik V.B. Biotechnical concept of the "Kirzinsky" reserve: Symbiosis of foreign experience and own innovations. *Izvestiya Ufimskogo NTs* [Proceedings of the Ufa Scientific Center]. 2022, no. 3, pp. 74–80. (In Russian)
 22. Darkshevič Ya.N. *Ptitsy i zveri Chkalovskoi oblasti i okhota na nikh* [Birds and animals of the Chkalov region and hunting for them]. Chkalov, Chkalovskoe izd-vo Publ., 1950, 192 p. (In Russian)
 23. Mil'kov F.N. *Poezdka na Dzhity-Kul'* [A trip to Jity-Kul]. In: *S ekskursiei po Chkalovskoi oblasti* [With an excursion around the Chkalov region]. Chkalov, Chkalovskoe kn. izd-vo Publ., 1949, pp. 118–125. (In Russian)
 24. Rumyantsev V.Yu. *Kartograficheskii analiz razmeshcheniya stepnogo surka v Kazakhstane* [Cartographic analysis of the distribution of the steppe marmot in Kazakhstan]. In: *Struktura populyatsii surkov* [Structure of marmot populations]. Moscow, 1991, pp. 71–97. (In Russian)
 25. Chibilev A.A., Levykin S.V. *Landshaftno-ekologicheskoe posledstviya osvoeniya tseliny v Zavolzh'e i Kazakhstane* [Landscape and ecological consequences of virgin land development in the Volga region and Kazakhstan]. *Sb. tez. nauchno-prakt. konf. «40-letie osvoeniya tseliny»* [Abstracts of scientific-practical conference "40th anniversary of the development of virgin lands"]. Orenburg, VNIIMS Publ., 1994, pp. 52–54. (In Russian)
 26. Ryabov V.F. *Avifauna stepei Severnogo Kazakhstana* [Avifauna of the steppes of Northern Kazakhstan]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 175 p. (In Russian)
 27. Mashkin V.I. *Evropeiskii baibak: ekologiya, sokhranenie i ispol'zovanie* [European bobak marmot: ecology, conservation and use]. Kirov, Obl. tip-ya Publ., 1997, 155 p. (In Russian)
 28. Mashkin V.I., Chelintsev N.G. *Instruktsiya po organizatsii i provedeniyu ucheta surkov v SSSR* [Instructions for organizing and conducting marmot counting in the USSR]. Moscow, VNI okhrany prirody Publ., 1989, 26 p. (In Russian)
 29. *Geograficheskii atlas Orenburgskoi oblasti* [Geographical Atlas of the Orenburg Region]. Moscow, DIK Publ., 1999, 96 p. (In Russian)
 30. Davygora A.V. Additions to the ornithological fauna of the Shalkar-Zhetykol lake district. *Vestnik OGU* [Vestnik of the Orenburg State University]. 2008, no. 87, pp. 22–33. (In Russian)
 31. Davygora A.V., Chernetsov N.S., Semenov A.A. On the autumn migration of Anseriformes on the lakes of the Orenburg steppe Trans-Urals at the peak of the dry phase of the intracutaneous moisture cycle. *Selevinia*, 2022, pp. 162–165. (In Russian)
 32. Chibilev A.A. *Zapovednik «Orenburgskii»: istoriya sozdaniya i prirodnoe raznoobrazie* [Nature Reserve "Orenburgskii": history of creation and natural diversity]. Ekaterinburg, OOO «UIPTs» Publ., 2014, 139 p. (In Russian)
 33. *Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'yevykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2023 godu* [State report on the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2023]. Federal Agency for Mineral Resources. Available at: <https://rosnedra.gov.ru/activity/documents/gosudarstvennyy-doklad-2023/> (accessed 14.01.2026)
 34. Petrov O.V., Gurskaya L.I., Feoktistov V.P. Nickel metallogeny and prospects for the development of its raw material base in Russia. *Regional'naya geologiya i metallogeniya* [Regional Geology and Metallogeny]. 2013, no. 54, pp. 64–74 (In Russian)
 35. Gorbachev B.F., Vasyanov G.P., Krasnikova E.V. Kaolins of the Orsk Trans-Urals - a raw material base for the formation of a specialized mining and industrial complex in the Volga Federal District. *Georesources*, 2015, no. 4 (63), pp. 25–32 (In Russian) <http://dx.doi.org/10.18599/grs.63.4.4>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Александр А. Чибилев осуществлял научное руководство исследованием, составил план работ, корректировал материалы, обобщил результаты и написал выводы.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Alexander A. Chibilev undertook scientific supervision of the study, developed the work plan, revised materials and summarized the results and wrote conclusions.

Юрий А. Падалко оформил статью, проанализировал состояние водохозяйственного комплекса, минерально-сырьевой базы и геоэкологических последствий природопользования, составил картосхемы. Сергей В. Левыкин проанализировал развитие природоохранно-охотничьего земельного фонда. Юрий А. Гулянов обработал статистические данные по сельскохозяйственному землепользованию. Дмитрий А. Илютьчик собрал и подготовил картографический материал. Руслан Р. Садертдинов собрал и подготовил статистический материал по району исследования. Григорий В. Казачков собрал материал по охотничьему хозяйству. 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.

Yuriy A. Padalko prepared the manuscript, analyzed the state of the water management complex and the mineral resource base, assessed the geoecological consequences of environmental management, and compiled schematic maps. Sergey V. Levykin undertook analysis of the development of nature conservation and hunting land funds. Yuriy A. Gulyanov undertook statistical data processing for agricultural land use. Dmitry A. Ilyutchnik collected and prepared cartographic material. Ruslan R. Sadertdinov collected and prepared statistical material for the area studied. Grigory V. Kazachkov collected materials on hunting management. 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

Александр А. Чибилёв / Alexander A. Chibilev <http://orcid.org/0000-0002-6214-1437>
Юрий А. Падалко / Yuriy A. Padalko <https://orcid.org/0000-0003-1149-7887>
Сергей В. Левыкин / Sergey V. Levykin <https://orcid.org/0000-0003-0949-9939>
Юрий А. Гулянов / Yuriy A. Gulyanov <http://orcid.org/0000-0002-5883-349X>
Дмитрий А. Илютьчик / Dmitry A. Ilyutchnik <https://orcid.org/0000-0002-0848-5060>
Руслан Р. Садертдинов / Ruslan R. Sadertdinov <https://orcid.org/0009-0006-8761-3046>
Григорий В. Казачков / Grigory V. Kazachkov <https://orcid.org/0000-0001-6779-8334>

Оригинальная статья / Original article

УДК 581.93 / 632.5

DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-4



Особенности географического распространения сорных растений на территории Ставропольского края

Евгений Г. Мишвелов¹, Никита В. Панков¹, Надира О. Гусейнова², Хасан Н. Аров³¹Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия²Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия³Невинномысский государственный гуманитарно-технический институт, Невинномысск, Россия

Контактное лицо

Евгений Г. Мишвелов, доктор биологических наук, профессор, кафедра экологии и биогеографии, Северо-Кавказский федеральный университет; 355017 Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1.

Тел. +79614973994

Email mishvelov@mail.ruORCID <https://orcid.org/0000-0003-2004-9429>

Формат цитирования

Мишвелов Е.Г., Панков Н.В., Гусейнова Н.О., Аров Х.Н. Особенности географического распространения сорных растений на территории Ставропольского края // Юг России: экология, развитие. 2026. Т.21, N 2. С. 40-47.
DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-4

Получена 7 марта 2026 г.

Прошла рецензирование 14 апреля 2026 г.

Принята 25 апреля 2026 г.

Резюме

Цель исследования – проведение комплексного анализа фитосанитарного состояния на территории Ставропольского края за период с 1996 по 2019–2025 гг.

Проанализированы особенности распространения одного из ведущих карантинных сорняков края – амброзии полыннолистной (*Ambrosia artemisiifolia* L.) за период с 1996 г. по 2019–2025 гг.

В исследовании применялся комплексный подход, включающий системный, статистический, аналитический и расчетный метод исследования. Дополнительно использовались интегральные методы, учитывающие природно-климатические факторы, влияющие на продуктивность сельскохозяйственных культур и распространение организмов, связанных с биологическими угрозами. Материалами исследования в основном послужили официальные данные отчетности Россельхознадзора, научные публикации, размещенные в открытой печати, а также на сайтах специализированных научно-исследовательских организаций.

Распространение амброзии полыннолистной на территории Ставропольского края демонстрирует устойчивую негативную динамику роста. В крае в 2025 году сорняк занимал 702 тыс. га, т.е. свыше 11 % земель сельхозназначения. За последние годы наблюдается четкая тенденция к увеличению площадей, поражённых амброзией.

В 1996 г. очаги амброзии были единичными и занимали десятки–сотни гектаров, а к 2025 г. в 23 муниципальных округах более 50 % территории оказалось в карантинной зоне, лидерами по площади заражения стали Шпаковский (114 тыс. га) и Петровский (64 тыс. га) округа. Причин такого роста распространения сорных растений несколько: климатические изменения (динамика температуры, осадков, влажности, сокращение лесостепных зон и расширение степных и сухостепных территорий), а также особенности интенсификации хозяйственной деятельности в регионе.

Ключевые слова

Карантинные объекты, сорные растения, мониторинг, амброзия полыннолистная (*Ambrosia artemisiifolia* L.), распространение, фитосанитарное состояние.

Features of the geographical distribution of weeds in Stavropol Territory, Russia

Evgeny G. Mishvelov¹, Nikita V. Pankov¹, Nadira O. Guseynova² and Khasan N. Arov³

¹North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

²Dagestan State University, Makhachkala, Russia

³Nevinnomyssk State Institute of Humanities and Technology, Nevinnomyssk, Russia

Principal contact

Evgeny G. Mishvelov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of Ecology and Biogeography, North Caucasus Federal University; 1 Pushkin St, Stavropol, Russia 355017. Tel. +79614973994

Email mishvelov@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2004-9429>

How to cite this article

Mishvelov E.G., Pankov N.V., Guseynova N.O., Arov Kh.N. Features of the geographical distribution of weeds in Stavropol Territory, Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2026; 21(2):40-47. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-4

Received 7 March 2026

Revised 14 April 2026

Accepted 25 April 2026

Abstract

Aim: to conduct a comprehensive analysis of the phytosanitary status in Stavropol Territory for the period from 1996 to 2019–2025.

The features of the distribution of one of the leading quarantined weeds of the region – ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) for the period from 1996 to 2019–2025 are analysed. The study used an integrated approach, including a systematic, statistical, analytical and computational research method. Additionally, integral methods were used that take into account natural and climatic factors affecting crop productivity and the spread of organisms associated with biological threats. The research materials were mainly official data from the Rosselkhoz nadzor, scientific publications published in the open press, as well as on the websites of specialised research organizations.

The spread of ragweed in Stavropol Territory demonstrates a steady negative growth trend. In the region in 2025, weed occupied 702 thousand hectares, i.e. over 11 % of agricultural land. In recent years, there has been a clear trend towards an increase in areas affected by ragweed.

In 1996, ragweed foci were identified and occupied tens to hundreds of hectares, and by 2025, in 23 municipal districts, more than 50 % of the territory was in the quarantine zone, with Shpakovsky (114 thousand hectares) and Petrovsky (64 thousand hectares) districts becoming most affected in the area of infection. There are several reasons for this increase in the spread of these weeds: climatic changes (dynamics of temperature, precipitation, humidity, reduction of forest-steppe zones and expansion of steppe and dry-steppe territories), as well as features of intensification of economic activity in the region.

Key Words

Quarantine facilities, weeds, monitoring, ragweed, *Ambrosia artemisiifolia* L., distribution, phytosanitary status.

ВВЕДЕНИЕ

Территория Ставропольского края расположена главным образом в пределах Центрального Предкавказья, что обуславливает особые физико-географические условия, благоприятные для ведения сельского хозяйства. Растениеводство Ставрополья является важнейшей отраслью, обеспечивающей стабильное социально-экономическое развитие субъекта. Аграрный сектор Ставропольского края производит порядка 10 % валового сбора зерна в РФ. В период с 2014 по 2025 гг. отрасль четырежды превышала планку производства зерна в 8 млн т, и урожай свыше 10 млн т отмечался трижды, при этом в стоимостном выражении на этот продукт приходится 75 % всей сельскохозяйственной продукции края [1–3].

Последние десятилетия отмечается в целом положительное влияние климатических изменений на растениеводство Ставропольского края, что наряду с растущей интенсификацией аграрного сектора обуславливает рост емкости экологических ниш и формирование новых для чужеродных видов мест обитания, в т.ч. вредителей, сорняков и болезней сельскохозяйственных культур. Значимы ли подобные угрозы биологического характера? По мнению ряда специалистов в структуре сеgetальной флоры доля адвентивных видов может достигать 40 % и более [4–7]. Потенциальные потери урожая в России, по мнению Мысник Е.Н. составляют 100 млн. т ежегодно, 40 % потерь приходится на сорные растения [8]. В работе Ижевского С.С. отмечается, что для европейской части России общая численность чужеродных насекомых-фитофагов составляет 200 видов, а для периода с 1900 по 2010 гг. появилось 28 новых растительноядных насекомых азиатского происхождения [9].

В череде биологических угроз для сельского хозяйства страны особо можно выделить так называемые карантинные объекты, под которыми понимаются вредные организмы, отсутствующие или ограниченно распространенные на территории Российской Федерации и включенные в единый перечень карантинных объектов. Важнейшей особенностью карантинных объектов является возможность значительно повлиять на урожай, массово снижая его качество и количество, а иногда приводя к полной потере культур. По состоянию на 31 декабря 2024 г. на территории Российской Федерации установлены карантинные фитосанитарные зоны по 60 карантинным объектам различного биологического происхождения (24,1 % общего числа карантинных объектов Единого перечня ЕАЭС) [10–14].

Охрану территории Российской Федерации от проникновения и распространения карантинных объектов обеспечивает Россельхознадзор, являющийся официальной национальной организацией по карантину и защите растений страны в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 29 мая 2006 г. № 329 "Об официальной национальной организации по карантину и защите растений". Кроме того, Россельхознадзор осуществляет фитосанитарную сертификацию экспортируемой на мировой рынок подкарантинной продукции.

Угрозы биологического характера в растениеводстве Ставропольского края связаны во многом с чужеродными растительными, животными и некоторыми другими видами организмов. По данным Россельхознадзора в перечень карантинных видов

Ставропольского края включены 7 видов растений сорняков, 7 видов насекомых, 5 возбудителей болезней растений. Особую группу риска в распространении инвазий представляют предприятия закрытого грунта, например, только на территории Ставропольского края на 2025 г. функционировало 12 тепличных комплексов общей площадью более 336 га; в г. Невинномысске строится тепличное хозяйство около 46 га для выращивания экзотических культур: бананов, авокадо, манго, маракуйи и фисташек; на приусадебных участках и дачах ставропольцев повсеместно культивируются ранее не встречающиеся инжир, хурма, унаби, миндаль; массив унаби в десятки га произрастает на востоке Ставрополья, что связано с деятельностью в 90-е годы Ачикулакской научно-исследовательской лесоаграрной опытной станции [15; 16]. При этом возрастают риски угроз биологического характера, связанные с чужеродными видами, и, как следствие, возможно снижение урожайности сельскохозяйственных культур и качества продукции, негативное воздействие на компоненты регионального биологического разнообразия [17].

Переориентация экономических отношений, возникшая с введением против РФ различных видов санкций с 2014 г., создала предпосылки для системного изменения объема и направленности потока продовольственного и иного импорта, в т.ч. из Западного полушария, стран Африки и Юго-Восточной Азии, причем последние в связи с географическими особенностями представляют значимые угрозы проникновения чужеродных видов [18; 19]. Подобные прогнозы высказывают и ученые РАН, отмечая потенциально опасные угрозы биологического характера, связанные с возможным проникновением и распространением ряда видов, в первую очередь это сорные растения и насекомые, подавляющие рост сельскохозяйственных культур. Самым распространенным и вредоносным считается амброзия полыннолистная (*Ambrosia artemisiifolia* L.). Хотя амброзия полыннолистная часто называется одним из самых распространенных и вредоносных карантинных объектов, в РФ также значимую угрозу представляют и повилики (*Cuscuta* spp.). Из насекомых это: западный цветочный трипс (*Frankliniella occidentalis*), коричнево-мраморный клоп (*Halyomorpha halys*) и американская белая бабочка (*Hyphantria cunea*).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Настоящая работа в основном посвящена особенностям распространения одного из ведущих карантинных сорняков Ставропольского края – амброзии полыннолистной (*Ambrosia artemisiifolia* L.), создающей угрозы как здоровью человека и животных, так и продуктивности и качеству многих сельскохозяйственных культур. Анализируется период с 1996 г. по 2019–2025 гг.

В исследовании применялся комплексный подход, включающий системный, статистический, аналитический и расчетный метод исследования. Дополнительно использовались интегральные методы, учитывающие природно-климатические факторы, влияющие на продуктивность сельскохозяйственных культур и распространение организмов, связанных с биологическими угрозами. Материалами исследования в основном послужили официальные данные отчетности Россельхознадзора, научные публикации,

размещенные в открытой печати, а также на сайтах специализированных научно-исследовательских организаций [10–14].

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Амброзия полыннолистная примерно с 1918 г. прочно закрепилась на территории России и в конце 2025 года занимала площадь карантинных фитосанитарных зон около 2,7 млн. га [8]. Данные рис. 1 свидетельствуют о том, что амброзия полыннолистная, безусловно, является самым значимым по распространению карантинным сорняком на Ставрополье, занимаемая ею площадь весьма велика и составляла в 2025 г. 702 тыс. га, а это свыше 11 % всех земель

сельхозназначения, среднегодовое значение за анализируемый период при этом составило 454 тыс. га. Следует отметить тенденцию роста для края занимаемых сорняком площадей в 2023–2025 гг. Среднее значение площади выявленных очагов оставались на уровне 350–450 га, при этом суммарная численность всех очагов к 2025 г. выросла более чем вдвое и достигла немногим менее двух тысяч. Из всех рассмотренных карантинных сорных видов растений амброзия полыннолистная отличалась максимальными значениями средней площади очага распространения, для изученного периода – до 450 га, для сравнения этот показатель для повилики составлял 46 га.

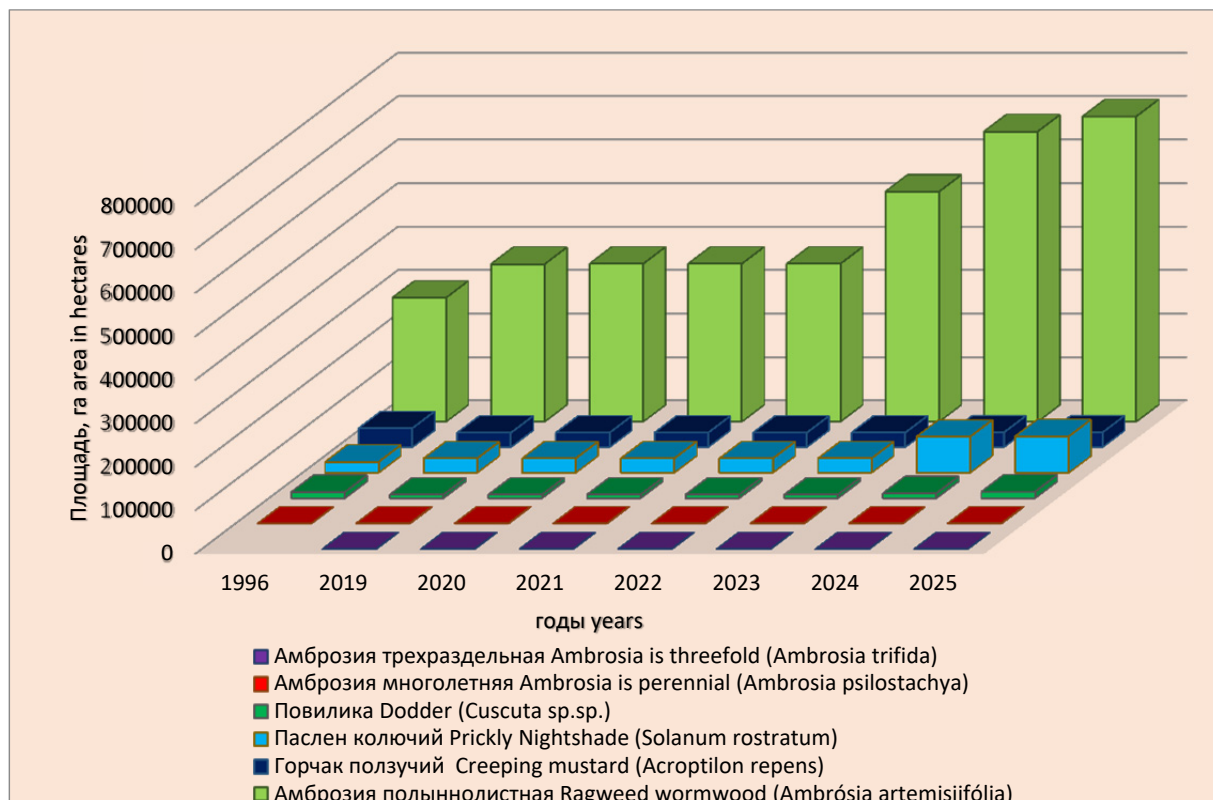


Рисунок 1. Площади распространения карантинных сорных растений на территории Ставропольского края с 1996 г. по 2019–2025 гг.

Figure 1. Areas of quarantine weed distribution in Stavropol Territory from 1996 to 2019–2025

На рис. 2 представлены особенности распространения амброзии полыннолистной по муниципальным округам Ставропольского края с 1996 г. по 2019–2025 гг. Картосхемы свидетельствуют о том, что в период до 2023 г. единственным округом со значительным наличием карантинного сорняка оставался Шпаковский муниципальный округ (более 50 % территории в карантинной зоне), к 2023 г. количество таких округов увеличивается до 3, добавляется Петровский и Георгиевский. В 2025 г. уже для 23 округов более 50 % их территории оказывается в карантинной зоне по амброзии полыннолистной и только для Апанасенковского, Арзгирского и Нефтекумского округов распространение не столь значимо. Следует отметить, что и в начале анализируемого периода – в 1996 г. земли, занимаемые амброзией полыннолистной в этих же и некоторых других округах, расположенных в степных и сухостепных условиях, занимали всего лишь несколько десятков или сотен гектаров и были представлены единичными очагами.

Экспансия сорняка с юго-запада края на северо-восток для проанализированного периода почти в 30 лет во многом может быть связана как с особенностями и издержками хозяйственной деятельности субъекта, так и с климатическими факторами, это, в первую очередь, осадки, влажность и температура, а также с их многолетней динамикой для территорий провинций лесостепных, степных и полупустынных ландшафтов. Об этом, в частности, может свидетельствовать динамика ГТК для территории Предкавказья [20]. Данное обстоятельство нашло отражение в соответствующих публикациях, где авторы отмечают, что в последние десятилетия для Ставрополья и всего Предкавказья условия тепловлагообеспечения привели к сокращению территорий с лесостепными условиями за счет увеличения площади степных и сухостепных, что обусловило с одной стороны улучшение климатических условий для производства зерновых культур, а с другой – стимулировало распространение сопутствующего

комплекса сорняков, вредителей и других вредных биологических агентов [21–22].

Анализ данных по амброзии полыннолистной для рассматриваемого периода выявил муниципальные

округа с максимальным распространением сорняка – это в первую очередь Шпаковский – 114 тыс. га, Петровский – 64 тыс. га.

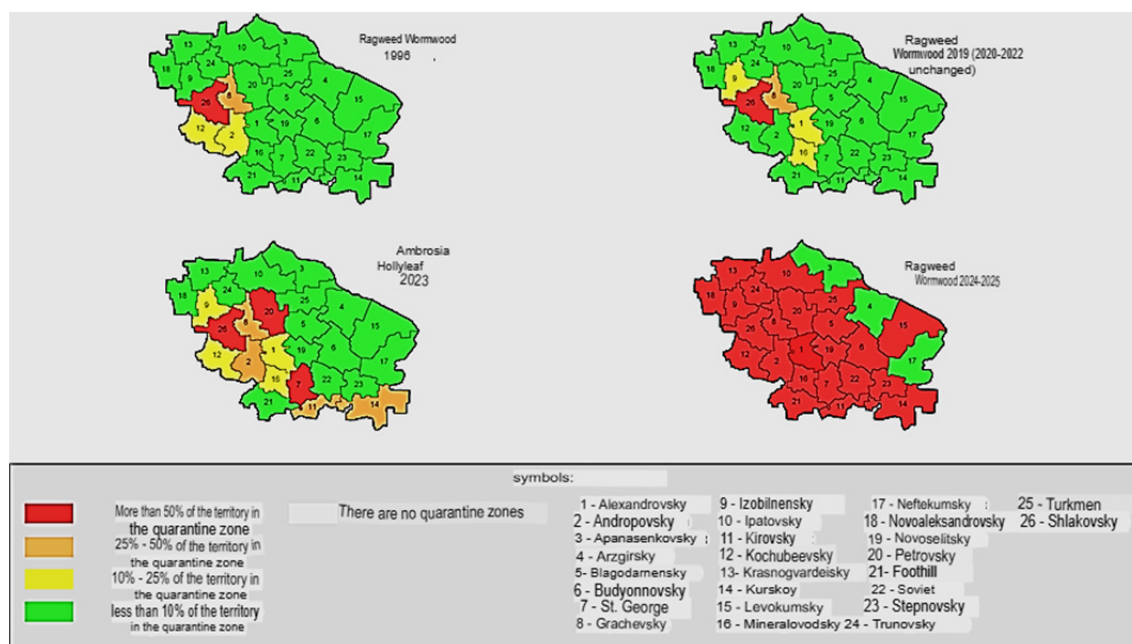


Рисунок 2. Распространение амброзии полыннолистной по муниципальным округам Ставропольского края с 1996 г. по 2019–2025 гг.

Figure 2. Distribution of *Ambrosia artemisiifolia* in the municipal districts of Stavropol Territory from 1996 to 2019–2025

Среднегодовое значение площади распространения амброзии многолетней и амброзии трехраздельной для территории Ставропольского края за анализируемый период на три порядка меньше, чем для амброзии полыннолистной. Эти виды фиксируются в 1–2 муниципальных округах.

Паслен колючий и горчак ползучий по занимаемой площади сельхозугодий делят 2 и 3 место среди карантинных видов, среднегодовая занимаемая площадь – 44,4 и 34,7 тыс. га, соответственно. Среднегодовое количество очагов у паслена для края составило 369 очагов с площадью одного – 226 га, тогда как у горчака – 136 очагов с площадью одного – 264 га.

В условиях интенсификации растениеводства Ставропольского края и современной трансформации климата целесообразно в системе профилактики и борьбы с биологическими инвазиями акцентировать внимание на комплексном подходе, включающем мониторинг численности и распространения биологических агентов, своевременное соблюдение организационно-логистических карантинных мероприятий, агротехнических мер и технологий, а также средств биологической и химической борьбы [23; 24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ распространения амброзии полыннолистной на территории Ставропольского края за длительный период (с 1996 по 2019–2025 гг.) демонстрирует устойчивую негативную динамику и подтверждает статус этого сорняка как наиболее значимого карантинного объекта в регионе. К концу 2025 года общая площадь карантинных фитосанитарных зон, занятых амброзией полыннолистной в России, достигла огромных значений. В Ставропольском крае в 2025 году сорняк занимал 702 тыс. га – свыше 11 % земель

сельхозназначения. За последние годы (2023–2025) наблюдается явная тенденция к увеличению площадей, поражённых амброзией: суммарное число очагов к 2025 г. выросло более чем вдвое и достигло почти 2 тысяч; среднегодовая площадь распространения – 454 тыс. га; средняя площадь одного очага – до 450 га, что значительно больше, чем у других карантинных видов, например, у повилики – всего 46 га.

Если в 1996 г. очаги амброзии полыннолистной были единичными и занимали десятки-сотни гектаров, то к 2025 г. в 23 муниципальных округах более 50 % территории оказалось в карантинной зоне, лидерами по площади заражения стали Шпаковский (114 тыс. га) и Петровский (64 тыс. га) округа. Причин такого роста числа сорных растений несколько: климатические изменения (динамика температуры, осадков, влажности, сокращение лесостепных зон и расширение степных и сухостепных территорий), особенности интенсификации хозяйственной деятельности в регионе.

В условиях интенсификации растениеводства и трансформации климата для эффективной борьбы с амброзией полыннолистной и другими карантинными видами необходим комплексный подход, включающий:

- регулярный мониторинг численности и распространения карантинных объектов;
- своевременное проведение организационно-логистических карантинных мероприятий;
- соблюдение агротехнических мер и технологий;
- применение средств биологической и химической борьбы (последний способ борьбы требует должного отношения, чтобы не нанести непоправимый ущерб окружающей среде).

Реализация этих мер позволит снизить темпы распространения амброзии полыннолистной и других

карантинных объектов, минимизировать ущерб сельскому хозяйству и предотвратить дальнейшее ухудшение фитосанитарной обстановки в Ставропольском крае.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тер-Григорьянц А.А., Шелухина Е.А. Современное состояние и тенденции производства зерна в Ставропольском крае // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2023. Т. 16, N 3(78). С. 225–237. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2023_3_225–237
2. Продукция сельского хозяйства. Валовые сборы сельскохозяйственных культур в Ставропольском крае // Управление Федеральной службы государственной статистики по Северо-Кавказскому федеральному округу (Северо-Кавказстат). 2024. URL: <https://26.rosstat.gov.ru/folder/28442> (дата обращения: 11.11.2025)
3. Мишвелов Е.Г., Корниенко А.И., Гусейнова Н.О., Тихонов Э.Е., Павленко Е.Н. Морфометрическая характеристика рельефа и оценка эрозионной опасности бассейна р. Калаус на основе цифрового моделирования // Юг России: экология, развитие. 2024. Т. 19. N 2. С. 148–159. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-13
4. Кондратков П.В., Третьякова А.С. Таксономическая и биоэкологическая структура сеgetальной флоры Свердловской области // Аграрный вестник Урала. 2018. Т. 170. N 3. С. 29–36.
5. Хасанова Г.Р., Ямалов С.М., Корчев В.В. Флористический состав сеgetальных сообществ Республики Башкортостан // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2014. N 2. С. 38–41.
6. Лунева Н.Н., Бочкарев Д.В., Никольский А.Н. Распространение сорных растений в регионах (на примере Республики Мордовия и Ленинградской области) // Вестник защиты растений. 2017. N 1. С. 33–38.
7. Палкина Т.А. Структура сеgetальной флоры Рязанской области // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета. 2015. Т. 27. N 3. С. 26–32.
8. Мыслик Е.Н. Анализ распространения видов сорных растений с использованием баз данных «Сорные растения во флоре России» // Материалы международной конференции «Базы данных и информационные технологии в диагностике, мониторинге и прогнозе важнейших сорных растений, вредителей и болезней растений», Санкт-Петербург - Пушкин, 14-17 июня, 2010. С. 55–57.
9. Ижевский С.С., Масляков В.Ю. Новые инвазии чужеземных насекомых в Европейскую Россию // Российский журнал биологических инвазий. 2008. Т. 1 N 2. С. 45–54
10. Национальный доклад о карантинном фитосанитарном состоянии территории Российской Федерации в 2024 году. Москва, 2025. URL: <https://vetandlife.ru/wp-content/uploads/2025/04/Национальный-доклад-о-фитосанитарном-состоянии-территории-Российской-Федерации-в-2024-году-1.pdf> (дата обращения: 28.11.2025)
11. Баранова О.Г. Видовой состав сорных растений Удмуртской Республики // Материалы I Международной научной конференции «Сорные растения в изменяющемся мире: актуальные вопросы изучения разнообразия, происхождения, эволюции», СПб.: ВИР, 2011. С. 30–35.
12. Лихачев С.В. Экологическая оценка изменения активности представителей сеgetальной флоры вблизи г. Перми // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2022. N 1. С. 29–38. DOI: 10.21658/2307-9150-2022-1-3
13. Масалов В.Н., Березина Н.А., Червонова И.В. Состояние зернового хозяйства России, роль зерновых в кормлении сельскохозяйственных животных и питании человека // Вестник Аграрной науки. 2021. Т. 89. N 2. С. 3–15. DOI: 10.17238/issn2587-666X.2021.2.3
14. Фитосанитарное состояние Ставропольского края. Северо-Кавказское межрегиональное управление. Федеральная служба по ветеринарному и фитосанитарному надзору (Россельхознадзор) URL: <https://126.fsvps.gov.ru/fitosanitarnoe-sostojanie/fitosanitarnoe-sostojanie-stavropol/> (дата обращения: 28.01.2026)
15. Сурхаев Г.А., Буянкин В.И., Сурхаев И.Г. Натурализация унаби в Восточном Предкавказье и перспективы расширения ареала субтропической культуры на юго-востоке России // Научно-агрономический журнал. 2019. Т. 107. N 4. С. 32–34. DOI: 10.34736/FNC.2019.107.4.010
16. Ал Харби Н.А. Разнообразие и таксономический состав сорных трав в оливковых садах округа Табук Саудовской Аравии // Аридные экосистемы. 2017. Т. 72. N 3. С. 88–94.
17. Васютин А.С., Сметник А.Н., Мордкович Я.Б. и др. Карантин растений в Российской Федерации. М.: Колос, 2001. 375 с.
18. Dubey S.C., Gupta K., Akhtar J. et al. Plant quarantine for biosecurity during transboundary movement of plant genetic resources. *Indian Phytopathology*, 2021, vol. 74, no. 3, pp. 495–508. DOI: 10.1007/s42360-021-00375-7
19. Haubrock P.J., Cuthbert R.N., Balzani P. et al. Discrepancies between non-native and invasive species classifications. *Biological Invasions*, 2024, vol. 26, no. 2, pp. 371–384. DOI: 10.1007/s10530-023-03184-3
20. Братков В.В., Савинова С.В., Ключин П.В., Керимов И.А., Бекмурзаева Л.Р. Картографирование современной изменчивости агроклиматических условий Северного Кавказа // Юг России: экология, развитие. 2021. Т. 16. N 4. С. 173–181. DOI: 10.18470/1992-1098-2021-4-173-181
21. Лошаков А.В., Одинцов С.В., Кипа Л.В. Комплексный подход к охране агроландшафтов Ставропольского края с учетом региональных и зональных особенностей // Московский экономический журнал. 2022. Т. 7. N 6. С. 87–96. DOI: doi.org/10.55186/2413046X_2022_7_6_389 (дата обращения: 01.03.2026)
22. Пшегусов Р.Х., Чадаева В.А. Комплексный подход учёта экологических факторов в моделях современного распространения и климатогенной динамики *Ambrosia artemisiifolia* L. на Кавказе // Российский журнал биологических инвазий. 2023. N 3. С. 149–167. DOI: 10.35885/1996-1499-16-3-149-167
23. Есипенко Л.П. Использование насекомых-фитофагов в борьбе с амброзией полыннолистной в агроценозах юга России // Земледелие. 2013. N 5. С. 39–40.
24. Информация о методах борьбы в преддверии начала всходов амброзии / Южное межрегиональное управление Россельхознадзора. 2024. URL: <https://123.fsvps.gov.ru/news/informacija-o-metodah-borby-v-preddverii-nachala-vshodov-ambrozii/> (дата обращения: 15.11.2025)

REFERENCES

1. Ter-Grigor'yants A.A., Shelukhina E.A. Current state and trends of grain production in Stavropol Krai. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*, 2023, vol. 16, no. 3, pp. 225–237. (In Russian) DOI: 10.53914/issn2071-2243_2023_3_225–237
2. *Produktsiya sel'skogo khozyaistva. Valovye sbory sel'skokhozyaistvennykh kul'tur v Stavropol'skom krae. Upravlenie Federal'noi sluzhby gosudarstvennoi statistiki po Severo-Kavkazskomu federal'nomu okргу (Severo-Kavkazstat)*

- [Agricultural products. Gross harvests of agricultural crops in the Stavropol Territory // Department of the Federal State Statistics Service for the North Caucasus Federal District (Severo-Kavkazstat)]. 2024. Available at: <https://26.rosstat.gov.ru/folder/28442> (accessed: 11.11.2025)
3. Mishvelov E.G., Kornienko A.I., Guseynova N.O., Tikhonov E.E., Pavlenko E.N. Morphometric characteristics of the relief and assessment of erosional hazards of the Kalas River basin, Russia, based on digital modelling. *South of Russia: ecology, development*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 147–159. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-13
 4. Kondratkov P.V., Tretyakova A.S. Taxonomical and biological structure of the segetal flora in Sverdlovsk region. *Agrarnyi vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals]. 2018, vol. 170, no. 3, pp. 29–36. (In Russian)
 5. Khasanova G., Yamalov S., Korchev V. Floral composition of segetal communities of the Republic of Bashkortostan. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Bashkir State Agrarian University]. 2014, no. 2, pp. 38–41. (In Russian)
 6. Luneva N.N., Bochkarev D.V., Nikolskiy A.N. Distribution of weed plants in regions (in Republic of Mordovia and Leningrad region as examples). *Vestnik zashchity rastenii* [Plant Protection News]. 2017, vol. 91, no. 1, pp. 33–38. (In Russian)
 7. Palkina T.A. The structure of the segetal flora of the Ryazan region. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University]. 2015, vol. 27, no. 3, pp. 26–32. (In Russian)
 8. Mysnik E.N. Analiz rasprostraneniya vidov sornykh rastenii s ispol'zovaniem baz dannykh «Sornye rasteniya vo flore Rossii» [Analysis of the distribution of weeds using the databases "Weeds in the flora of Russia"]. *Materialy mezhdunarodnoi konferentsii «Innovatsionnyi tsentr zashchity rastenii» Bazy dannykh i informatsionnye tekhnologii v diagnostike, monitoringe i prognoze vazhneishikh sornykh rastenii, vrediteli i boleznei rastenii.. Sankt-Peterburg - Pushkin, 14-17 iyunya, 2010* [Proceedings of the international conference «Databases and information technologies in the diagnosis, monitoring and prognosis of the most important weeds, pests and plant diseases», St. Petersburg -Pushkin, June 14-17, 2010]. St. Petersburg -Pushkin, 2010, pp. 55–57.
 9. Izhevskiy S.S., Maslyakov V.Yu. New invasions of alien insects into European part of Russia. *Rossiiskii zhurnal biologicheskikh invazii* [Russian Journal of Biological Invasions]. 2008, vol. 1, no. 2, pp. 45–54. (In Russian)
 10. *Natsional'nyi doklad o karantinnom fitosanitarnom sostoyanii territorii Rossiiskoi Federatsii v 2024 godu* [National report on the quarantine phytosanitary status of the territory of the Russian Federation in 2024]. Moscow, 2025. Available at: <https://vetandlife.ru/wp-content/uploads/2025/04/Национальный-доклад-о-фитосанитарном-состоянии-территории-Российской-Федерации-в-2024-году-1.pdf> (accessed: 28.11.2025) (In Russian)
 11. Baranova O.G. Vidovoi sostav sornykh rastenii Udmurtskoi Respubliki [Species composition of weeds of the Udmurt Republic]. *Materialy I Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Sornye rasteniya v izmenyayushchetsya mire: aktual'nye voprosy izucheniya raznoobraziya, proiskhozhdeniya, evolyutsii»*, Spb.: VIR, 2011. [Proceedings of the I International Scientific Conference "Weeds in a changing world: current issues of studying diversity, origin, evolution", St. Petersburg: VIR, 2011]. St. Petersburg, VIR, 2011, pp. 30–35. (In Russian)
 12. Lihachev S.V. Ecological assessment of segetal flora activity's change near Perm. *University proceedings. Volga region. Natural sciences*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 29–38 (In Russian) DOI: 10.21685/2307-9150-2022-1-3
 13. Masalov V.N., Berezina N.A., Chervonova I.V. The state of the grain farming in Russia, the role of grain crops in the feeding of agricultural animals and human diet. *Bulletin of Agrarian Science*, 2021, vol. 89, no. 2, pp. 3–15 (In Russian) DOI: 10.17238/issn2587-666X.2021.2.3
 14. *Fitosanitarnoe sostoyanie Stavropol'skogo kraya. Severo-Kavkazskoe mezhhregional'noe upravlenie. Federal'naya sluzhba po veterinarnomu i fitosanitarnomu nadzoru (Rossel'khoz nadzor)* [Phytosanitary condition of the Stavropol Territory. North Caucasus Interregional Administration. Federal Service for Veterinary and Phytosanitary Surveillance (Rosselkhoz nadzor)] Available at: <https://126.fsvps.gov.ru/fitosanitarnoe-sostojanie/fitosanitarnoe-sostojanie-stavropol/> (accessed 28.01.2026) (In Russian)
 15. Surkhaev G.A., Buyankin V.I., Surkhaev I.G. Naturalization of ziziphus in the Eastern Ciscaucasia and prospects for expanding the range of subtropical culture in the south-east of Russia. *Scientific and Agronomic Journal*, 2019, vol. 107, no. 4, pp. 32–34. (In Russian) DOI: 10.34736/FNC.2019.107.4.010
 16. Al Kharbi N.A. Diversity and taxonomic composition of weeds in olive orchards of Tabuk district of Saudi Arabia. *Aridnye ekosistemy* [Arid ecosystems]. 2017, vol. 72, no. 3, pp. 88–94. (In Russian)
 17. Vasyutin A.S., Smetnik A.N., Mordkovich Ya.B. et al. *Karantin rastenii v Rossiiskoi Federatsii* [Quarantine of plants in the Russian Federation]. Moscow, Kolos Publ., 2001, 375 p. (In Russian)
 18. Dubey S.C., Gupta K., Akhtar J. et al. Plant quarantine for biosecurity during transboundary movement of plant genetic resources. *Indian Phytopathology*, 2021, vol. 74, no. 3, pp. 495–508. DOI: 10.1007/s42360-021-00375-7
 19. Haubrock P.J., Cuthbert R.N., Balzani P. et al. Discrepancies between non-native and invasive species classifications. *Biological Invasions*, 2024, vol. 26, no. 2, pp. 371–384. DOI: 10.1007/s10530-023-03184-3
 20. Bratkov V.V., Savinova S.V., Klyushin P.V., Kerimov I.A., Bekmurzaeva L.R. Mapping of modern variability of agroclimatic conditions of the North Caucasus. *South of Russia: ecology, development*, 2021, vol. 16, no. 4, pp. 173–181. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2021-4-173-181
 21. Loshakov A.V., Odintsovo S.V., Kipa L.V. [An integrated approach to the protection of agricultural landscapes of the Stavropol Territory, taking into account regional and zonal features]. *Moskovskii ekonomicheskii zhurnal*, 2022, vol. 7, no. 6, pp. 87–96. DOI: 10.55186/2413046X_2022_7_6_389 (In Russian) (accessed: 01.03.2026)
 22. Pshegusov R.H., Chadaeva V.A. An integrated approach to accounting for environmental factors in models of modern distribution and climatic dynamics of *Ambrosia artemisiifolia* L. in the Caucasus. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2023, no. 3, pp. 149–167. (In Russian) DOI: 10.35885/1996-1499-16-3-149-167
 23. Esipenko L.P. The use of insect phytophages in the control of ragweed in the agrocenoses of southern Russia. *Zemledelie* [Agriculture]. 2013, no. 5, pp. 39–40. (In Russian)
 24. *Informatsiya o metodakh bor'by v preddverii nachala vskhodov ambrozii. Yuzhnoe mezhhregional'noe upravlenie Rossel'khoz nadzora*. 2024. [Information on methods of control on the eve of the onset of ragweed shoots. Southern Interregional Rosselkhoz nadzor Administration]. 2024. Available at: <https://123.fsvps.gov.ru/news/informaciya-o-metodah-borby-v-preddverii-nachala-vshodov-ambrozii/> (accessed 15.11.2025) (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Евгений Г. Мишвелов определил идею и выстроил логику исследования, участвовал в подготовке и анализе материалов, структурировал результаты исследования и сформулировал выводы. Никита В. Панков, Надира О. Гусейнова и Хасан Н. Аров участвовали в написании 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

Evgeny G. Mishvelov defined the idea and built the logic of the research, participated in the preparation and analysis of materials, structured the research results and formulated conclusions. Nikita V. Pankov, Nadira O. Guseynova and Khasan N. Arov participated in the writing 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

Евгений Г. Мишвелов / Evgeny G. Mishvelov <https://orcid.org/0000-0003-2004-9429>

Никита В. Панков / Nikita V. Pankov <https://orcid.org/0009-0006-5735-7248>

Надира О. Гусейнова / Nadira O. Guseynova <https://orcid.org/0000-0003-3979-4293>

Хасан Н. Аров / Khasan N. Arov <https://orcid.org/0009-0005-4218-5108>

Оригинальная статья / Original article
УДК 578.8, 578.833.25, 57.083, 615.371
DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-5



Валидация иммуноферментной тест-системы на основе рекомбинантного антигена d34 для мониторинга протективного гуморального ответа к вирусу денге при иммунизации мышей вакцинным препаратом MVA-d34

Софья С. Гогина¹, Галина М. Цыганова², Богдан С. Черепович¹, Алексей С. Оксанич¹

¹Научно-исследовательский институт вакцин и сывороток имени И.И. Мечникова, Москва, Россия

²Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью
Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

Контактное лицо

Софья С. Гогина, м.н.с. лаборатории молекулярной биотехнологии, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт вакцин и сывороток им. И.И. Мечникова»; 105064 Россия, г. Москва, Малый Казенный переулок, д. 5А.
Тел. +79251486177
Email fominasofya@yandex.ru
ORCID <https://orcid.org/0009-0009-2889-9680>

Формат цитирования

Гогина С.С., Цыганова Г.М., Черепович Б.С., Оксанич А.С. Валидация иммуноферментной тест-системы на основе рекомбинантного антигена d34 для мониторинга протективного гуморального ответа к вирусу денге при иммунизации мышей вакцинным препаратом MVA-d34 // Юг России: экология, развитие. 2026. Т.21, N 2. С. 48-62. DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-5

Получена 2 марта 2026 г.

Прошла рецензирование 19 апреля 2026 г.

Принята 25 апреля 2026 г.

Резюме

Цель исследования — валидация иммуноферментной тест-системы для полуколичественного определения специфических IgG-антител к домену III Е-белка вируса денге (ДЕНВ) серотипов 1-4 в сыворотке крови мышей.

Коммерческие наборы реагентов АО БТК «Биосервис» (Москва, Россия). Рекомбинантный белок d34, экспрессированный в бакуловирусной системе. Сыворотки мышей линии BALB/c (n=100, 11 групп). Вируснейтрализующие антитела к серотипам D1–D4 ДЕНВ определяли методом реакции нейтрализации (РН) в культуре клеток Vero.

Специфичность и чувствительность разработанной тест-системы составили 100 % (95 % ДИ: 91,2–100,0 %), критический уровень ОП составил 0,16, CV не превышал 8,2 %. Исследование стабильности при 37 °C (14 сут) выявило снижение сигнала на 4,7 % (95 % ДИ: от –11,3 % до +1,9 %), что позволяет прогнозировать сохранение функциональных свойств иммуносорбента в течение 12 месяцев при хранении при 2–8 °C. Закономерное превышение значений ИФА над титрами РН отражает различие в детектируемых пулах антител и подтверждает целесообразность совместного применения обоих методов для комплексной оценки гуморального ответа.

ИФА тест-система обладает высокими диагностическими характеристиками и пригодна для полуколичественного определения специфических IgG-антител к домену III Е-белка ДЕНВ в сыворотке лабораторных мышей. Ее применение обеспечивает надежный инструмент для доклинического мониторинга иммуногенности вакцинных кандидатов и создает методологическую основу для стандартизации контроля качества биопрепаратов на основе серотип-специфичных эпитопов.

Ключевые слова

ИФА, вирус денге, ДЕНВ, DENV, домен III Е-белка, d34, вируснейтрализующие антитела, валидация аналитических методик, MVA, модифицированная осповакцина Анкара, modified vaccinia Ankara, MVA-d34.

Validation of a d34 recombinant antigen-based ELISA for monitoring protective humoral immunity to dengue virus in MVA-d34-immunized mice

Sofya S. Gogina¹, Galina M. Tsyganova², Bogdan S. Cherepovich¹ and Alexey S. Oksanich¹

¹I.I. Mechnikov Vaccine and Serum Research Institute, Moscow, Russia

²Centre for Strategic Planning and Management of Biomedical Health Risks, Federal Medical and Biological Agency, Moscow, Russia

Principal contact

Sofya S. Gogina, Postgraduate Student, Junior Researcher, Laboratory of Molecular Biotechnology, I.I. Mechnikov Vaccine and Serum Research Institute; 5a Maly Kazenny pereulok, Russia 105064.

Tel. +79251486177

Email fominasofya@yandex.ru

ORCID <https://orcid.org/0009-0009-2889-9680>

How to cite this article

Gogina S.S., Tsyganova G.M., Cherepovich B.S., Oksanich A.S. Validation of a d34 recombinant antigen-based ELISA for monitoring protective humoral immunity to dengue virus in MVA-d34-immunized mice. *South of Russia: ecology, development*. 2026; 21(2):48-62. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-5

Received 2 March 2026

Revised 19 April 2026

Accepted 25 April 2026

Abstract

To validate an enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) test system for the semi-quantitative detection of specific IgG antibodies against domain III of the E protein of dengue virus (DENV) serotypes 1–4 in mouse serum. Commercial reagent kits (JSC BTK Bioservice, Moscow, Russia) were utilised. The recombinant d34 protein expressed in a baculovirus system served as the immunosorbent. Analytical performance was evaluated using a panel of 100 serum samples from BALB/c mice (11 groups). Virus-neutralising antibodies against DENV serotypes D1–D4 were determined by a virus neutralisation test in *Vero* cell culture.

The specificity and sensitivity of the test system developed both reached 100 % (95 % CI: 91.2–100.0 %), with a critical optical density (OD_{crit}) of 0.16 and a coefficient of variation (CV) not exceeding 8.2 %. Stability testing at 37°C for 14 days revealed a 4.7 % signal decrease (95 % CI: –11.3 % to +1.9 %), indicating that the immunosorbent is expected to retain its functional properties for up to 12 months when stored at 2–8°C. The systematically higher ELISA values compared to neutralisation test titers reflect differences in the detected antibody pools and support the combined use of both methods for a comprehensive evaluation of the humoral immune response.

The validated ELISA test system exhibits high diagnostic performance and is suitable for the semi-quantitative determination of specific IgG antibodies against domain III of the DENV E protein in laboratory mouse serum. Its application provides a reliable tool for preclinical monitoring of vaccine candidate immunogenicity and establishes a methodological basis for standardising the quality control of biologics targeting serotype-specific epitopes.

Key Words

ELISA, dengue virus, DENV, domain III of E protein, d34, virus-neutralizing antibodies, validation of analytical methods, MVA, modified vaccinia Ankara, MVA-d34.

ВВЕДЕНИЕ

Лихорадка денге — одна из наиболее быстро распространяющихся трансмиссивных болезней XXI века. По оценкам Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), ежегодно регистрируется до 400 млн случаев заболевания лихорадкой денге, более 100 стран являются эндемичными, а угроза экспансии вируса на новые территории, включая юг европейской части России, становится все более реальной в условиях глобального потепления и усиления международных миграционных потоков [1; 2]. Несмотря на наличие зарегистрированных вакцин (*Dengvaxia*®, *Qdenga*®), их применение ограничено узкими возрастными рамками, риском антитело-зависимого усиления инфекции (ADE, *antibody-dependent enhancement*) и дисбалансом иммунного ответа по серотипам, что делает задачу создания безопасной, эффективной и сбалансированной тетравалентной вакцины одной из приоритетных в современной вакцинологии [3; 4].

Ключевым барьером на пути разработки таких препаратов остается отсутствие стандартизированных аналитических подходов, позволяющих избирательно оценивать поствакцинальный иммунный ответ у человека, вызывающий нейтрализацию вируса, минимизируя таким образом вклад неспецифических или потенциально опасных (ADE-индуцирующих) антител. Традиционные ИФА тест-системы, основанные на вирионах или полноразмерном Е-белке, демонстрируют высокую кросс-реактивность между флавивирусами и не позволяют дифференцировать антитела, направленные против критически важного домена III (EDIII) Е-белка — структурного элемента, ответственного за связывание вируса с рецепторами клетки-мишени и являющегося основной мишенью для серотип-специфических, высоконейтрализующих антител [5; 6]. Более того, в РФ на сегодняшний день отсутствуют отечественные диагностические наборы, пригодные для доклинической оценки иммуногенности субъединичных вакцинных кандидатов, что создает технологическую зависимость и ограничивает темпы импортозамещения в области биобезопасности.

В этих условиях разработка рекомбинантного тетравалентного антигена d34 — слитого белка, объединяющего домены III всех четырех серотипов вируса денге, — представляет собой стратегически значимый шаг вперед [7]. Однако его успешное внедрение в вакцинные платформы (в частности, на основе модифицированного вируса осповакцины Анкара (*modified vaccinia Ankara*) — MVA-d34) требует создания специализированной аналитической базы, которая будет обеспечивать высокую точность и воспроизводимость оценки как функциональных параметров индуцированного иммунного ответа.

Цель исследования — комплексная валидация иммуноферментной тест-системы на основе рекомбинантного антигена d34 для полуквантитативного определения специфических IgG-антител к вирусу денге в сыворотке лабораторных мышей. Впервые в отечественной практике разработана иммуноферментная тест-система, направленная на детекцию антител к серотип-специфичному домену III (EDIII) Е-белка вируса денге. Для разработанной тест-системы проведена полная оценка диагностических характеристик: специфичность, чувствительность, воспроизводимость и стабильность. Кроме того, выполнено сопоставление показателей ИФА с

результатами реакции нейтрализации. Анализ продемонстрировал, что метод корректно отражает динамику гуморального ответа, при этом систематическое превышение титров ИФА над значениями РН обусловлено различием в детектируемых пулах антител. Это подтверждает целесообразность совместного применения обоих подходов: ИФА позволяет проводить высокопроизводительный мониторинг уровня специфических IgG-антител, тогда как РН необходима для верификации функциональной активности сывороток. Полученные данные обосновывают применимость тест-системы для оценки иммуногенности вакцинных кандидатов против денге и закладывают методологическую основу для последующей стандартизации биопрепаратов на основе EDIII в рамках Государственной фармакопеи Российской Федерации.

Таким образом, данная работа вносит вклад в решение задачи национальной биобезопасности, обеспечивая отечественную технологическую платформу для контроля качества и эффективности инновационных вакцин против особо опасных инфекций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Коммерческие наборы

В исследовании использовали коммерческие наборы реагентов АО БТК «Биосервис» (Москва, Россия) для определения специфических IgG-антител методом ИФА: «БиоСкрин-ВЗН» (Е-1345) — к вирусу лихорадки Западного Нила, «БиоСкрин-КЭ» (Е-1145) — к вирусу клещевого энцефалита, «БиоСкрин-ЖЛ» (Е-2345) — к вирусу желтой лихорадки, «БиоСкрин-Денге» (Е-1545(D1–D4)) — к вирусам лихорадки денге серотипов 1–4 (к каждому серотипу отдельно), и «БиоСкрин-Чикунгунья» (Е-1645) — к вирусу чикунгунья.

Конъюгат

Для выявления мышинных антител класса IgG применяли пероксидазный конъюгат (козий поликлональный HRP-конъюгат антител к Fc-фрагменту мышинных IgG, MP Biomedicals, США; кат. № ICN55554) в рабочем разведении 1:10 000.

Антигены и иммуносорбент

В качестве основного антигена для иммуноферментного анализа использовали рекомбинантный тетравалентный антиген d34(ДЕНВ-d34), представляющий собой слитый белок, включающий домен III Е-белка всех четырех серотипов вируса денге (D1–D4), экспрессированный в системе бакуловируса с N-концевым гистидиновым тегом и очищенный методом металл-аффинной хроматографии, как описано в [7]. Для сорбции антигена использовали стандартные 96-луночные полистирольные планшеты высокой сорбционной емкости (Corning #2592, LOT 21823010, США).

Лабораторные животные и сыворотки

Исследования проводили с использованием мышей линии BALB/c (гаплотип H-2d) массой 18–20 г в возрасте 6–8 недель (самцы и самки). Животные были получены из лаборатории экспериментальных биомоделей Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научный центр биомедицинских технологий» ФМБА России (п. Столбовая, Московская

область). Все процедуры проводили согласно действующим ГОСТам: ГОСТ 33215-2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила оборудования помещений и организации процедур» [8]; ГОСТ 33216-2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила содержания и ухода за лабораторными грызунами и кроликами» [9].

Для получения сывороток крови, используемых в исследовании, было задействовано 100 голов мышей, разделенных на одиннадцать групп:

- четыре группы (по 10 голов в каждой) для получения моносывороток к каждому серотипу вируса денге (D1–D4);
- четыре группы (по 10 голов в каждой) для получения сывороток к гетерологичным вирусам (ВКЭ, ЖЛВ, ВЗН, ЧИКВ);
- контрольная группа (10 голов) – интактные животные;
- группа (5 голов) – для получения сывороток к исходному штамму модифицированному вирусу осповакцины Анкара MVA;
- группа (5 голов) – животные, иммунизированные вакцинным кандидатом MVA-d34.

Для получения моносывороток к вирусу денге животных заражали каждым серотипом живого вируса ДЕНВ отдельно (D1–D4 соответственно). Животным каждой опытной группы вводили вирус одного серотипа однократно, внутривенно, в дозе 10^3 БОЕ/0,2 мл. От начала заражения до дня забора крови за животными проводили ежедневное наблюдение: признаков изменения поведения, отказа от пищи и воды, патологических изменений шерстного покрова отмечено не было. Через 14 суток после заражения производили тотальный забор крови, для получения сыворотки.

Сыворотки к гетерологичным вирусам: клещевого энцефалита (инактивированная вакцина), желтой лихорадки (штамм 17D), Западного Нила (штамм Ast986) и чикунгунья (инактивированный β -пропиолактоном штамм Nika21, GenBank: PQ673601.1) – получали по единой схеме: животным (по 10 голов на вирус) трехкратно, с интервалом 14 суток, вводили соответствующий вирусный препарат. Первое и второе введения осуществляли подкожно и внутривенно одновременно (суммарный объем 0,2 мл), третье – только внутривенно (0,2 мл). Через 14 суток после последнего введения у животных брали кровь и получали сыворотку.

Иммунизацию животных (по 5 голов) исходным штамм MVA и экспериментальным вакцинным препаратом MVA-d34, представляющий собой штамм MVA, экспрессирующий антиген d34, подробно описанный в работе Mintae et al., 2023 [7], проводили в дозе 10^8 ТЦД₅₀ на животное, внутримышечно, в соответствии с протоколом, описанным в [7] (иммунизацию проводили трехкратно с интервалом 3 недели). Забор крови осуществляли серийно, для данного этапа работы анализировали только сыворотки, полученные на 21-й неделе после завершения иммунизации.

В работе дополнительно использовали сыворотки интактных животных, которым вводили стерильный физиологический раствор.

Клеточные линии и вирусы

Для проведения вирусологических исследований использовали клеточную линию Vero (почка африканской зеленой марышки), полученную на уровне 145-го пассажа из коллекции ФГБНУ НИИ вакцин и сывороток им. И.И. Мечникова (Москва, Россия; исходный источник – ООО «Биолот»). В работе применяли коллекционные штаммы вируса денге серотипов D1–D4, полученные из коллекции микроорганизмов ФГБНУ НИИ вакцин и сывороток им. Мечникова (Москва, Россия) и адаптированные к размножению на клетках Vero. До начала экспериментов генетическую идентичность штаммов верифицировали методом высокопроизводительного секвенирования нового поколения (Illumina NextSeq 2000), что подтвердило соответствие заявленным серотипам и отсутствие значимых субпопуляционных вариантов. В ходе исследования клетки дополнительно пассировали не более 7 раз. Подходы к молекулярной идентификации и генетическому анализу флавивирусов и альфавирусов, применяемые в лаборатории на базе коллекции ФГБНУ НИИВС им. И.И. Мечникова, описаны ранее в работах Г.М. Игнатова с соавторами [10; 11].

В качестве среды поддержки для культивирования клеток Vero применяли DMEM («ООО Биолот», Россия), дополненную 5 % эмбриональной телячьей сывороткой. Клетки культивировали в термостате при 37 ± 1 °C с содержанием 5 % CO₂. Штаммы вируса денге поддерживали и титровали на данной клеточной линии.

Методика выявления иммуноглобулинов класса G к домену III E-белка вируса денге в сыворотке/плазме крови мышей методом иммуноферментного анализа

Антиген ДЕНВ-d34 иммобилизовали на планшетах в концентрации 2 мкг/мл в карбонатно-бикарбонатном буфере (КББ, pH 9,6). Планшеты выдерживали при температуре 4 °C в течение 16–18 ч и блокировали инертным белковым раствором (АО БТК «Биосервис», Россия) при комнатной температуре в течение 90 мин. Далее вносили исследуемые сыворотки крови мышей, разведенные 1:100 в ФСБ-Т (по 100 мкл/лунку), и инкубировали при $37,0 \pm 1,0$ °C в течение 60 мин, после чего планшеты трижды промывали с использованием автоматического промывочного устройства LisaWash (ERBA, Чехия) с применением фосфатно-солевого буфера с добавлением 0,05 % Твин-20 (ФСБ-Т, pH 7,2). Затем в каждую лунку вносили по 100 мкл рабочего раствора конъюгата, повторно инкубировали при $37,0 \pm 1,0$ °C в течение 60 мин и промывали пять раз тем же буфером. После этого вносили по 100 мкл раствора хромогена на основе 3,3',5,5'-тетраметилбензидина (ТМБ; АО БТК «Биосервис», Россия) и инкубировали при комнатной температуре в течение 15 мин в темноте. Реакцию останавливали внесением 50 мкл раствора серной кислоты (0,89 М). Измерение оптической плотности (ОП) проводили при 450 нм с референсной длиной волны 620–680 нм на планшетном спектрофотометре (LisaScan EM, ERBA, Чехия).

При наличии специфических IgG-антител к вирусу денге в образце они связываются с иммобилизованным антигеном d34; последующее взаимодействие с пероксидазным конъюгатом антител к Fc-фрагменту мышиных IgG-антител приводит к образованию иммунного комплекса. Интенсивность

окраски после остановки реакции в ИФА прямо пропорциональна концентрации специфических IgG в исследуемом образце.

Методика разработки положительного и отрицательного контрольных образцов для набора реагентов на основе рекомбинантного антигена d34 для полуколичественного определения специфических IgG-антител к вирусу денге в сыворотке лабораторных мышей

Положительный контрольный образец (K^+) изготавливали путем пулирования образцов сывороток крови мышей с предварительно подтвержденным высоким уровнем специфических антител класса IgG к ДЕНВ. Все сыворотки подвергали тепловой инаktivации при $56,0 \pm 1,0^\circ\text{C}$ в течение 30 мин для инаktivации комплемента [12]. Отрицательный контрольный образец (K^-) формировали на основе пула образцов сывороток крови мышей с подтвержденным отсутствием антител к ДЕНВ. Пул K^- также подвергали термической инаktivации при $56,0 \pm 1,0^\circ\text{C}$ в течение 30 мин.

Полученный инаktivированный пул разводили в 10 раз в стабилизирующем растворе для положительных и отрицательных контролей (АО БТК «Биосервис», Москва, Россия).

Методика «ускоренного старения»

Стабильность иммуносорбента оценивали с помощью методики «ускоренного старения» согласно рекомендациям Всемирной организации здравоохранения и ICH Q1A(R2) Stability testing of new drug substances and products. Исходя из эмпирического правила Вант-Гоффа, увеличение температуры хранения на 10°C увеличивает скорость реакций в 2–4 раза [12; 13]. Экспериментальное хранение при $+37,0 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 3, 7, 10 и 14 суток коррелировало с 79, 183, 261 и 365 сутками реального хранения при $+4^\circ\text{C}$ при температурном коэффициенте скорости реакции $A=2,6862$ и коэффициенте соответствия $K=26,07$.

Методика классической реакции нейтрализации

Оценку вируснейтрализующей активности IgG-антител в сыворотках крови мышей проводили с использованием классической РН с живым вирусом денге серотипов D1–D4, полученными из коллекции ФГБНУ НИИВС им. И.И. Мечникова (Москва, Россия), в соответствии с модифицированным протоколом [2; 7; 14; 15]. За 48 ч до проведения реакции в 24-луночные культуральные планшеты (Corning® Falcon™, арт. № 353047, США) вносили по 0,5 мл суспензии клеток Vero в концентрации 1×10^6 клеток/мл в среде DMEM («ООО Биолот», Россия) с 5 % эмбриональной телячьей сывороткой (ЭТС; «ООО Биолот», Россия). Планшеты культивировали при 37°C и 5 % CO_2 до формирования сплошного монослоя. Сыворотки перед анализом подвергали тепловой инаktivации при 56°C в течение 45 мин. Затем готовили последовательные двукратные разведения (начальное разведение 1:10) в среде MEM («ООО Биолот», Россия) без сыворотки. Каждое разведение смешивали с фиксированной дозой вируса — 30 бляшкообразующих единиц (БОЕ) в объеме 70 мкл — и инкубировали при 37°C и 5 % CO_2 в течение

60 мин. В качестве контроля использовали вирус, инкубированный либо со средой MEM, либо с сывороткой от интактных мышей.

После инкубации 120 мкл вирус-сывороточной смеси переносили в лунки 24-луночного планшета с монослоем клеток Vero. Планшеты дополнительно инкубировали 60 минут при 37°C и 5 % CO_2 , после чего осторожно удаляли жидкость, не нарушая целостности монослоя. Затем в каждую лунку аккуратно по краю вносили по 0,5 мл первого агарового покрытия, приготовленного из 1,5 % легкоплавкого агара (Агар Нобль, BD Difco Agar Noble, кат. № 214230), двукратной среды MEM и 10% ЭТС, предварительно доведенного до температуры $44\text{--}46^\circ\text{C}$. Планшеты культивировали при 37°C и 5 % CO_2 в течение 7 суток. На 7-е сутки готовили второе агаровое покрытие, содержащее 0,033 % нейтрального красного (Neutral Red Solution, кат. № 15330-079, Life Technologies, Великобритания), и наносили его по 0,5 мл в каждую лунку. Через 24 ч проводили подсчет бляшек под световым микроскопом.

Титр нейтрализации (PRNT_{50}) определяли, как наибольшее разведение сыворотки, вызывающее 50 %-ное снижение количества бляшек по сравнению с вирусным контролем.

Статистическая обработка результатов

Статистический анализ выполняли с использованием программного обеспечения Microsoft Excel 2013 и GraphPad Prism 9.0. Результаты представлены как среднее $\pm$ стандартное отклонение ($M \pm SD$) или среднее с 95 % доверительным интервалом (95 % ДИ). Пороговое значение оптической плотности ($\text{ОП}_{\text{крит}}$) рассчитывали по формуле $M + 3SD$. Сопоставление показателей ИФА и РН проводили методами описательной статистики с качественной интерпретацией согласованности профилей ответов.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика панели контрольных образцов сыворотки крови мышей

Первым этапом валидации разрабатываемой тест-системы на основе рекомбинантного антигена d34 для полуколичественного определения специфических IgG-антител к вирусу денге в сыворотке лабораторных мышей стало формирование детально охарактеризованной панели контрольных сывороток мышей линии BALB/c. В панель включали образцы с подтвержденным наличием IgG-антител к вирусу клещевого энцефалита (ВКЭ), вирусу желтой лихорадки (ЖЛВ), вирусу Западного Нила (ВЗН) и вирусу чикунгунья (ЧИКВ), а также сыворотки, полученные от мышей, зараженных живым вирусом денге каждого серотипа отдельно (D1–D4) и характеризующиеся преобладанием серотип-специфических IgG-антител к соответствующему серотипу.

Характеризацию мышиных сывороток выполняли методом ИФА с использованием коммерческих наборов реагентов с заменой конъюгата и контрольных образцов (подробнее см. раздел «Материалы и методы»). Это позволило подтвердить серологический профиль каждой группы и исключить возможные случаи перекрестной реактивности. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты тестирования панели контрольных сывороток методом ИФА с использованием коммерческих наборов реагентов**Table 1.** Results of testing a panel of control sera by enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) using commercial reagent kits

ИФА набор реагентов ELISA reagent kit		IgG-антитела к* / IgG antibodies for*								
		ВКЭ TBEV	ЖЛВ YFV	ВЗН WNV	ЧИКВ CHIKV	ДЕНВ / DENV				Интактные Intact
						D1	D2	D3	D4	
БиоСкрин-ВЗН BioScrin-WNV		-	-	+	-	+	+	+	+	-
БиоСкрин-ВКЭ BioScrin-TBEV		+	-	+	-	+	+	+	+	-
БиоСкрин-ЖЛВ BioScrin-YFV		-	+	-	-	+	+	+	+	-
БиоСкрин-ЧИКВ BioScrin-CHIKV		-	-	-	+	-	-	-	-	-
БиоСкрин-ДЕНВ BioScrin-DENV	D1	-	+	+	-	+	+	+	+	-
	D2	-	+	+	-	+	+	+	+	-
	D3	+	-	+	-	+	+	+	+	-
	D4	-	-	+	-	+	+	+	+	-

Примечание: результаты ИФА на коммерческих наборах: + — положительно (ОП > ОП_{крит}), — — отрицательно;

* — сыворотки, полученные от мышей, зараженных живым вирусом ДЕНВ каждым серотипом отдельно (D1–D4); клещевого энцефалита (инактивированная вакцина), желтой лихорадки (штамм 17D), Западного Нила (штамм Ast986) и чикунгунья (инактивированный β-пропиолактоном штамм Nika21, GenBank: PQ673601.1). Каждый образец сыворотки анализировался в 3-х точках (количество образцов в группе n=10)

Note: ELISA results obtained with commercial reagent kits: + — positive (OD > OD_{crit}), — — negative; * — Serum samples obtained from mice infected with live dengue virus (DENV) of each serotype individually (D1–D4); tick-borne encephalitis virus (inactivated vaccine); yellow fever virus (strain 17D); West Nile virus (strain Ast986); and Chikungunya virus (β-propiolactone-inactivated strain Nika21, GenBank: PQ673601.1). Each serum sample was analyzed in triplicate; the number of samples per group was n = 10

Результаты показали, что сыворотки, содержащие антитела к ВКЭ (среднее ОП $0,41 \pm 0,03$; 95 % ДИ: 0,34–0,49), ЖЛВ (среднее ОП $0,36 \pm 0,03$; 95 % ДИ: 0,29–0,44) и ВЗН (среднее ОП $0,49 \pm 0,03$; 95 % ДИ: 0,42–0,56), дают слабоположительный, но воспроизводимый сигнал в коммерческих диагностических тест-системах на денге («БиоСкрин-Денге» D1–D4). Эта перекрестная реактивность объясняется высокой степенью структурного сходства домена II Е-белка у различных флавивирусов [5]. Исследования на модели вируса клещевого энцефалита подтверждают принципиальную возможность использования рекомбинантных доменов Е-белка для повышения специфичности серодиагностики: антигены sE и dIII сибирского подтипа ВКЭ обеспечивали 100 % специфичность, не давая перекрестных реакций с сыворотками против ДЕНВ, ВЗН, Зика и других флавивирусов [16]. Интересно, что для ВКЭ полноразмерный sE показал более высокую чувствительность по сравнению с dIII при сохранении специфичности [16], что подчеркивает необходимость выбора антигена для серологических исследований исходя из поставленной задачи. Для денге, где важна серотип-специфичность, домен III остается предпочтительным, тогда как для ВКЭ, не требующего такой дифференциации, sE может оказаться более эффективным решением. Следовательно, применение в разрабатываемой ИФА тест-системе рекомбинантного тетравалентного антигена ДЕНВ-d34, содержащего исключительно серотип-специфичные детерминанты домена III, является методологически обоснованным решением, направленным на устранение ложноположительных реакций, характерных для препаратов на основе полноразмерного Е-белка или цельных вирионов [1].

Дополнительную проверку панели сывороток провели с помощью реакции нейтрализации. Результаты показали, что образцы, содержащие антитела к ВКЭ, ЖЛВ, ВЗН и ЧИКВ, не обладали достоверной вируснейтрализующей активностью против ДЕНВ D1–D4: средние $\log_2$ -титры оказались ниже 2. Это дает основание отнести их к отрицательным контрольным образцам при работе с вирусом денге. В то же время сыворотки, полученные от мышей после заражения каждым из четырех серотипов ДЕНВ, демонстрировали выраженную гомологичную нейтрализацию, что подтверждает их соответствие требованиям к положительным контрольным образцам при оценке специфичности разработанного иммуносорбента. Таким образом, проведенная характеристика панели контрольных сывороток подтвердила ее пригодность для последующей валидации иммуносорбента с иммобилизованным ДЕНВ-d34.

Гомологичная вируснейтрализующая активность сывороток, полученных после заражения мышей отдельными серотипами ДЕНВ (D1–D4)

Для оценки серотип-специфической иммуногенности домена III Е-белка были проанализированы титры гомологичной нейтрализации — то есть нейтрализующая активность сыворотки против того же серотипа, которым проводили заражение. Каждый образец тестировали в трех повторах; данные в таблице 2 представляют собой средние значения $\log_2$ -титров по группе сывороток.

Сыворотки, полученные от мышей, зараженных вирусами ДЕНВ D2 и D3, демонстрировали наиболее высокие титры гомологичной нейтрализации (средний $\log_2$ -титр: $5,98 \pm 0,34$ и $6,44 \pm 0,34$ соответственно), тогда как ответ на ДЕНВ D4 был минимальным ($\log_2 = 2,67 \pm 0,58$), а на ДЕНВ D1 — умеренным

($\log_2 = 3,88 \pm 0,51$). Эти различия отражают серотип-специфические особенности иммуногенности целого вируса, которые могут быть обусловлены как

вариабельностью конформации Е-белка, так и степенью экспонирования ключевых нейтрализующих эпитопов на поверхности вириона вируса денге.

Таблица 2. Гомологичная вируснейтрализующая активность сывороток мышей, зараженных вирусом ДЕНВ-серотипами D1–D4

Table 2. Homologous virus-neutralising activity of sera from mice infected with dengue virus (DENV) serotypes D1–D4

Группа сывороток Serum Group	Средний $\log_2$ -титр $\pm$ SD Mean $\log_2$ -titer $\pm$ SD	95% ДИ 95% CI
ДЕНВ D1 / DENV D1	3,88 $\pm$ 0,51	3,52–4,25
ДЕНВ D2 / DENV D2	5,98 $\pm$ 0,34	5,74–6,22
ДЕНВ D3 / DENV D3	6,44 $\pm$ 0,34	6,20–6,68
ДЕНВ D4 / DENV D4	2,67 $\pm$ 0,58	2,26–3,09

Полученные данные согласуются с концепцией антигенной картографии флавивирусов [5], согласно которой серотипы ДЕНВ образуют два основных кластера (D1/D2 и D3/D4), что проявляется как в структуре, так и в иммуногенности. Высокая нейтрализующая активность сывороток к D2 и D3 подтверждает их роль как доминирующих компонентов в формировании протективного ответа, в то время как слабый ответ к D4 согласуется с известной низкой иммуногенностью этого серотипа в составе тетравалентных вакцин [7].

Таким образом, гомологичная вируснейтрализующая активность четко отражает серотип-специфический спектр иммуногенности вирусов ДЕНВ, где D2 и D3 индуцируют наиболее сильный ответ, а D4 — наименее выраженный. Эти различия необходимо учитывать при разработке и анализе тетравалентных вакцин, чтобы обеспечить сбалансированный иммунный ответ против всех четырех серотипов.

Антигенная перекрестная реактивность при нейтрализации вируса ДЕНВ

Для оценки антигенного сродства между серотипами ДЕНВ проводили реакцию нейтрализации в гетерологичном формате: сыворотки, полученные от мышей, зараженных каждым из серотипов ДЕНВ отдельно (D1–D4), тестировали против всех четырех серотипов вируса денге отдельно. Каждую комбинацию «сыворотка–вирус» анализировали в трех повторах.

Анализ перекрестной нейтрализации (рисунок 1) выявил сложную картину антигенных взаимосвязей между серотипами. Процент перекрестной нейтрализации рассчитывали как отношение линейных титров, полученных путем пересчета $\log_2$ -значений в абсолютные величины ($2^{\log_2}$), для гетерологичной и гомологичной реакций. Наблюдается тенденция к формированию двух антигенных кластеров (D1/D2 и D3/D4), что согласуется с данными антигенной картографии флавивирусов [5]. Внутрикластерные реакции проявляются с интенсивностью 37–46 % для пары D1/D2 и 40 % для D3/D4 относительно гомологичных титров. Однако межкластерные взаимодействия не являются равномерно слабыми: например, сыворотка D1 демонстрирует перекрестную активность 31–32 % в отношении серотипов D3 и D4, что превышает некоторые внутрикластерные реакции.

Принципиально иным профилем характеризуется сыворотка D4: несмотря на низкий гомологичный титр ($\log_2$ 2,67, см. табл. 2), она проявляет одинаковый уровень относительной перекрестной реактивности (50 % по отношению ко всем серотипам в линейной шкале, рассчитанной как $2^{\log_2}$). Это явление может отражать смещение иммунного ответа на D4 в сторону перекрестно-реактивных антител, направленных против консервативных эпитопов, общих для всех серотипов вируса денге, на фоне низкой доли серотип-специфичных нейтрализующих антител [3; 18].

Важной особенностью выявленной картины является асимметрия перекрестных реакций. Например, сыворотка D2 нейтрализует вирус D1 с эффективностью 37 % от гомологичного титра в линейной шкале, тогда как обратная реакция (D1→D2) составляет 46 %. Еще более выраженная асимметрия наблюдается в паре D3/D4: сыворотка D3 проявляет 40 % перекрестной активности в отношении D4, тогда как сыворотка D4, хотя и показывает формально высокий относительный уровень перекрестной реактивности (50 % в линейной шкале), в абсолютных значениях не достигает биологически значимых титров нейтрализации ($\log_2 < 2,0$).

Полученные данные подтверждают фундаментальный вывод, сделанный Katzelnick L.C. с соавторами [5] на основании масштабного исследования с применением методов антигенной картографии: хотя вирусы денге действительно образуют четыре генетически обособленные группы, они не представляют собой дискретные антигенные серотипы в классическом понимании. Исследователи показали, что антигенное расстояние между некоторыми штаммами внутри одного серотипа вируса может быть сопоставимо с расстоянием между разными серотипами, а отдельные изоляты вирусов могут быть антигенно более сходны с вирусами другого типа, чем с некоторыми представителями собственного типа [5]. Это явление объясняет высокую вариабельность иммунных ответов при денге и имеет важные последствия для разработки вакцин: протективный иммунитет против одного серотипа не гарантирует защиты от всех штаммов этого же серотипа, а степень кросс-реактивности зависит не только от принадлежности к серотипу, но и от конкретных антигенных характеристик штамма.

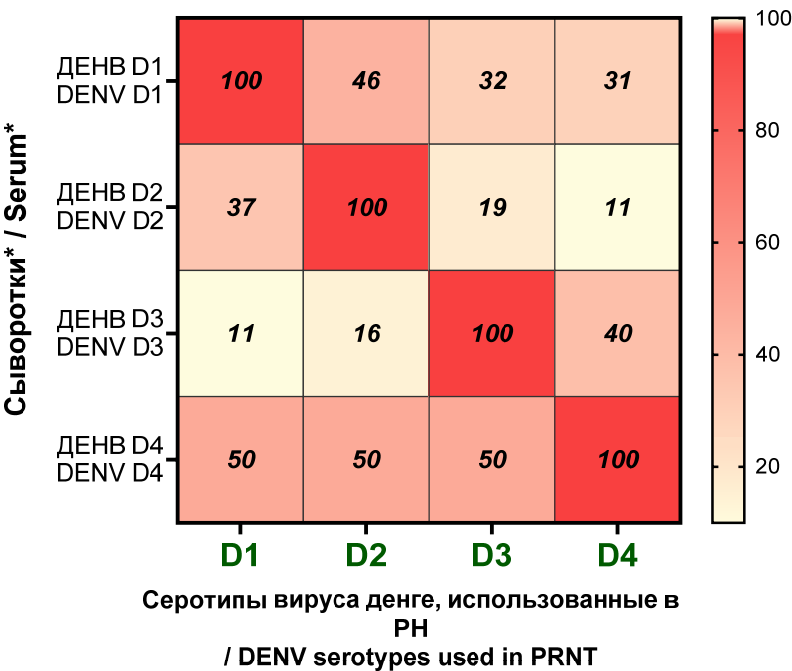


Рисунок 1. Тепловая карта перекрестной нейтрализации, демонстрирующая антигенную кластеризацию серотипов вируса денге (D1/D2 и D3/D4). Данные представлены в процентах от гомологичных титров для каждой сыворотки

Примечание: *— сыворотки, полученные от зараженных ДЕНВ D1–D4 мышей. Процент перекрестной нейтрализации рассчитывали, как отношение линейных титров ($2^{\log_2}$) гетерологичной реакции к гомологичной реакции для каждой сыворотки

Figure 1. Heat map of cross-neutralisation demonstrating antigenic clustering of dengue virus serotypes (D1/D2 and D3/D4). Data are expressed as percentages of homologous titers for each monospecific serum

Note: *— Sera obtained from mice infected with DENV serotypes D1–D4, respectively. Cross-neutralisation percentage was calculated as the ratio of linear titers ($2^{\log_2}$) of heterologous reaction to homologous reaction for each serum

Результаты количественного анализа вируснейтрализующей активности (рисунок 2) подтверждают и детализируют обсуждаемые закономерности. Сыворотки D1 и D2 демонстрируют взаимную перекрестную нейтрализацию с титрами $\log_2$ 2,77 и 4,54 соответственно, что согласуется с их принадлежностью к одному антигенному кластеру. Сыворотка D3 проявляет высокую перекрестную активность в отношении D4 ($\log_2$ 5,10, что составляет 79 % в логарифмической шкале от гомологичного титра 6,44), подтверждая тесное антигенное родство этих серотипов.

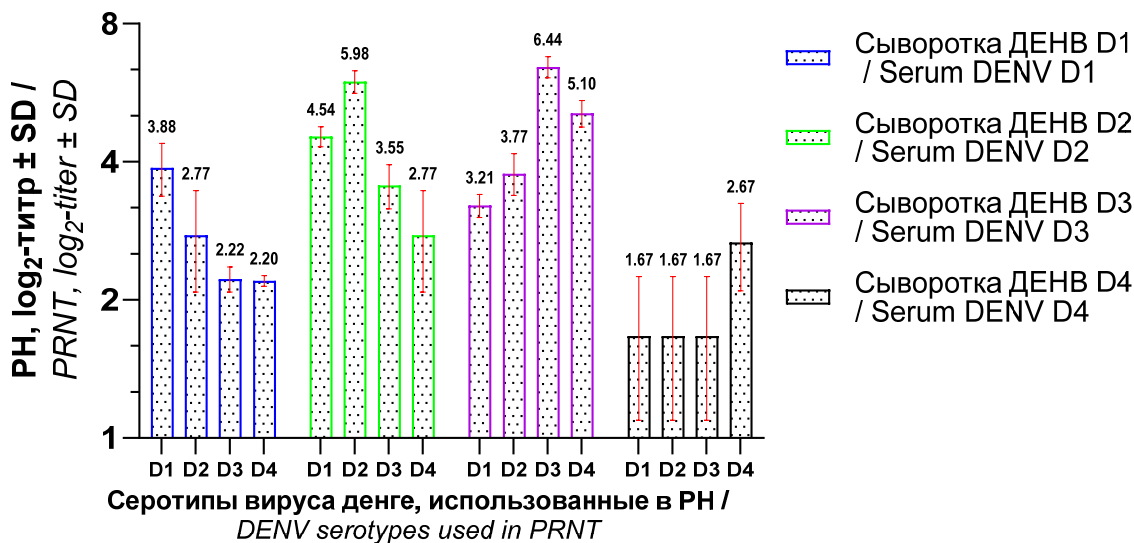


Рисунок 2. Профиль вируснейтрализующей активности ($\log_2$ -титр $\pm$ SD) сывороток мышей, полученных после инфицирования вирусом ДЕНВ (D1–D4), в отношении всех четырех серотипов ДЕНВ

Figure 2. Virus-neutralising activity profile ($\log_2$ -titer $\pm$ SD) of mouse sera obtained following infection with dengue virus (DENV) serotypes D1–D4, assessed against all four DENV serotypes

Анализ сыворотки D4 выявил специфические характеристики: абсолютные значения гетерологичных титров против всех серотипов (D1–D3) составили $\log_2 1,67$, что находится на пороге детекции метода. Несмотря на то, что в относительных единицах (процентах от гомологичного титра в линейной шкале, рассчитанной как $2^{\log_2}$) перекрестная активность достигает 50 %, биологически значимой нейтрализации не наблюдается из-за исходно низкого гомологичного ответа. Этот феномен согласуется с известными данными о низкой иммуногенности D4 и трудностях индукции сбалансированного тетравалентного иммунного ответа [7]. Вероятно, слабый ответ на D4 обусловлен как конформационными особенностями домена III Е-белка этого серотипа, так и конкуренцией иммунодоминантных эпитопов при формировании гуморального ответа.

Таким образом, результаты перекрестной нейтрализации характеризуют антигенные связи между серотипами вируса денге как сложную и неоднозначную систему. Выявленное сближение серотипов в пары D1/D2 и D3/D4 согласуется с данными антигенной картографии, однако, как подчеркивают современные исследования, эти группы не формируют строго изолированные серотипы, а демонстрируют перекрывающуюся антигенную вариабельность [5]. Асимметрия перекрестных реакций, а также специфика ответа на серотип D4, проявляющаяся в высокой доле перекрестно-реактивных антител при отсутствии значимой нейтрализующей активности, свидетельствует о смещении гуморального ответа в сторону консервативных эпитопов, распознавание которых не коррелирует с нейтрализующей активностью. Следовательно, при конструировании тетравалентных вакцин против лихорадки денге ориентация исключительно на филогенетическую близость или усредненные антигенные свойства штаммов не гарантирует эффективности. Формирование сбалансированного иммунного ответа требует целенаправленной оптимизации спектра иммунодоминантных детерминант и точного дозирования серотип-специфических компонентов. Такой подход может

способствовать формированию равнозначной нейтрализующей активности против всех серотипов вируса денге, включая слабоиммуногенный D4.

Оценка аналитических характеристик ИФА тест-системы на основе рекомбинантного антигена d34 для полуколичественного определения специфических IgG-антител к вирусу денге в сыворотке лабораторных мышей

Для полуколичественной оценки гуморального ответа к домену III Е-белка вируса денге был разработан набор реагентов, предназначенный для выявления специфических IgG-антител в сыворотке лабораторных мышей. В основе тест-системы лежит твердофазный иммуносорбент, сенсibilизированный рекомбинантным антигеном d34 в концентрации 2 мкг/мл – оптимальной для обеспечения высокого специфического сигнала при минимальном фоне. Эмпирические данные, полученные при подборе параметров иммобилизации антигена, в данной работе не приводятся.

Специфичность оценивалась на панели из 40 гетерологичных сывороток, полученных от мышей иммунизированных ЖЛВ, ВКЭ, ВЗН, ЧИКВ (по 10 на каждый патоген). Среднее значение ОП составило $0,069 \pm 0,030$, $CV \leq 7,1 \%$ (табл. 3). Пороговое значение ($ОП_{крит}$), рассчитанное по формуле $M + 3SD$ [17], составило 0,16. Все образцы дали сигнал ниже $ОП_{крит}$, что обеспечило специфичность 100 % (95 % ДИ: 91,2–100,0 %).

Чувствительность оценивалась на 40 гомологичных сыворотках, полученных от мышей, зараженных ДЕНВ D1, ДЕНВ D2, ДЕНВ D3, ДЕНВ D4 (по 10 для каждого серотипа ОП варьировала от 1,232 (ДЕНВ D4) до 2,025 (ДЕНВ D3), превышая $ОП_{крит}$ в 7,7–12,7 раза (табл. 3). Все образцы были корректно классифицированы как положительные, что обеспечило чувствительность 100 % (95 % ДИ: 91,2–100,0 %).

Для стандартизации анализа сформированы положительный (К+) и отрицательный (К-) контрольные образцы, методика приготовления которых описана в разделе «Материалы и методы».

Таблица 3. Оптическая плотность (ОП) контрольных образцов в ИФА (набор реагентов на основе рекомбинантного антигена d34 для полуколичественного определения специфических IgG к вирусу денге в сыворотке лабораторных мышей)

Table 3. Optical density (OD) values of control samples in the ELISA test system based on recombinant d34 antigen for qualitative detection of specific IgG antibodies against dengue virus in laboratory mouse serum

Отрицательные контрольные образцы / Negative control samples				
№	IgG к ЖЛВ Anti-YFV IgG	IgG к ВКЭ Anti-TBEV IgG	IgG к ВЗН Anti-WNV IgG	IgG к ЧИКВ Anti-CHIKV IgG
1	0,071	0,083	0,073	0,018
2	0,074	0,086	0,076	0,019
3	0,077	0,089	0,079	0,019
4	0,079	0,091	0,081	0,02
5	0,081	0,093	0,083	0,02
6	0,083	0,095	0,085	0,02
7	0,085	0,097	0,087	0,02
8	0,087	0,099	0,089	0,021
9	0,089	0,101	0,091	0,021
10	0,084	0,096	0,086	0,022

M ± SD	0,081 ± 0,0058	0,093 ± 0,0058	0,083 ± 0,0058	0,02 ± 0,0011
95 % ДИ / 95 % CI	0,077–0,085	0,089–0,097	0,079–0,087	0,019–0,021
CV, %	7,1	6,2	6,9	5,8
Положительные контрольные образцы / Positive control samples				
№	IgG κ D1 Anti-DENV D1 IgG	IgG κ D2 Anti-DENV D2 IgG	IgG κ D3 Anti-DENV D3 IgG	IgG κ D4 Anti-DENV D4 IgG
1	1,731	1,547	1,865	1,232
2	1,757	1,577	1,895	1,252
3	1,825	1,607	1,925	1,282
4	1,826	1,637	1,945	1,302
5	1,844	1,667	1,955	1,322
6	1,861	1,697	1,965	1,342
7	1,889	1,727	1,985	1,362
8	1,912	1,757	2,005	1,382
9	1,921	1,787	2,025	1,402
10	1,952	1,667	1,985	1,342
M ± SD	1,852 ± 0,071	1,667 ± 0,077	1,955 ± 0,049	1,322 ± 0,055
95 % ДИ / 95 % CI	1,801–1,902	1,612–1,722	1,920–1,990	1,283–1,361
CV, %	3,8	4,6	2,5	4,2

Примечание: результаты измерений при $\lambda = 450$ нм; каждый образец сыворотки анализировался в 3-х повторках

Note: Measurements performed at $\lambda = 450$ nm; each serum sample was analysed in triplicate

Оценка контрольных компонентов (K^+ и K^-)

ИФА тест-системы

Контрольные образцы изготавливали в соответствии с методикой, описанной в разделе «Материалы и методы». Их пригодность в качестве компонентов разрабатываемой тест-системы подтверждали комплексно: наличие функционально активных антител – реакцией нейтрализации, а аналитические параметры сигнала определяли в ИФА.

Функциональную активность контролей проверяли в реакции нейтрализации против всех четырех серотипов ДЕНВ (табл. 4). В образцах отрицательного контроля (K^-) вируснейтрализующая активность не проявлялась: средние $\log_2$ -титры по всем серотипам оставались ниже 2, что соответствует порогу обнаружения метода и подтверждает отсутствие

неспецифических нейтрализующих антител. В то же время положительный контроль (K^+) показал стабильно высокие значения $\log_2$ -титров нейтрализации против каждого серотипа, что указывает на присутствие функционально активных антител с выраженной перекрестной реактивностью.

При тестировании в разработанной ИФА тест-системе на основе антигена d34 K^+ формировал выраженный специфический сигнал (среднее значение ОП > 1,7), превышающий критический порог (ОП_{крит} = 0,16). Контроль K^- регистрировался на фоновом уровне (среднее ОП < 0,07). Коэффициент вариации для обоих контролей находился в пределах аналитического допуска (CV < 10 %), что подтверждает высокую воспроизводимость результатов в рамках анализа.

Таблица 4. Характеристика положительного и отрицательного контролей (K^+ и K^-)

Table 4. Characterisation of positive (K^+) and negative (K^-) controls

Тип контрольного компонента Control component type	Серотипы вируса денге, использованные в РН (Средний $\log_2$ -титр ± SD) DENV Serotypes used in PRNT (Mean $\log_2$ -titer ± SD)				Результаты ИФА при $\lambda = 450$ нм (тест-система на основе рекомбинантного антигена d34) ELISA Results (recombinant d34 antigen-based test system)		
	D1	D2	D3	D4	M ± SD	95% ДИ 95% CI	CV, %
Положительный контроль K^+ Positive control (K^+)	3,84 ± 0,45	4,21 ± 0,32	5,13 ± 0,55	2,69 ± 0,41	1,702 ± 0,11	1,424–1,980	6,6
Отрицательный контроль K^- Negative control (K^-)	<2	<2	<2	<2	0,069 ± 0,01	0,057–0,081	7,2

Примечание: каждый контрольный компонент анализировался в 3-х повторках; титр в РН < 2 $\log_2$ – свидетельствует о том, что в контрольном образце отсутствуют вируснейтрализующие антитела

Note: each control component was analysed in triplicate; PRNT titer < 2 $\log_2$ indicates that the control sample contains no virus-neutralising antibodies

Таким образом, контрольные компоненты K^+ и K^- могут быть использованы для стандартизации и рутинного контроля качества разработанной ИФА тест-системы на основе рекомбинантного антигена вируса денге d34.

Стабильность тест-системы

Функциональная стабильность твердой фазы оценивалась методом ускоренного старения при $37,0 \pm 1^\circ\text{C}$, моделирующим срок хранения 12 месяцев при $2-8^\circ\text{C}$. ОП измеряли в трех лунках на каждом из трех независимых стрипов одного ИФА-планшета ($n=9$).

Средние значения оптической плотности (ОП) положительных контрольных образцов (см. раздел «Характеристика панели контрольных образцов сыворотки крови мышей.») снизились с $1,702 \pm 0,114$ до $1,622 \pm 0,126$ через 14 дней ускоренного старения при $37,0 \pm 1^\circ\text{C}$ (см. табл. 5), что соответствует уменьшению сигнала на 4,7 % (95 % ДИ: -11,3 %; +1,9 %). Коэффициент вариации увеличился с 6,7 % до 8,2 %, оставаясь в пределах аналитического допуска ($CV < 10\%$).

Таблица 5. Показатели стабильности иммуносорбента d34 при ускоренном старении

Table 5. Stability parameters of the d34 immunosorbent under accelerated aging conditions

Интервал ускоренного старения, сут при 37°C Accelerated aging interval, days at 37°C	Эквивалент при $+4^\circ\text{C}$, сут Equivalent storage time at $+4^\circ\text{C}$, days	ОП положит. ($M \pm SD$) $OD_{pos} (M \pm SD)$	Δ к исходному, % Δ vs. original, %	CV, %	ОП отрицат. ($M \pm SD$) $OD_{neg} (M \pm SD)$
0 (исходное) 0 (original)	—	$1,702 \pm 0,114$	—	6,7	$0,054 \pm 0,009$
3	79	$1,688 \pm 0,121$	-0,8	7,1	$0,053 \pm 0,010$
7	183	$1,661 \pm 0,118$	-2,4	7,3	$0,055 \pm 0,011$
10	261	$1,642 \pm 0,133$	-3,5	8,0	$0,056 \pm 0,012$
14	365	$1,622 \pm 0,126$	-4,7	8,2	$0,057 \pm 0,011$

Значения ОП отрицательных контрольных образцов (см. раздел «Характеристика панели контрольных образцов сыворотки крови мышей») в ходе всех интервалов ускоренного старения варьировали в диапазоне 0,053–0,057 и статистически не отличались от исходных ($p > 0,05$). Пересчитанное критическое значение ОП изменилось на 2,9 %, что соответствует допустимому уровню отклонения ($\leq 10\%$). Диагностический разрыв между положительными и отрицательными образцами сохранялся на уровне более чем 8-кратного превышения, что полностью удовлетворяет требованиям к иммуноферментным тест-системам качественного профиля.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют об отсутствии деградации иммобилизованного антигена ДЕНВ-d34 и подтверждают, что тест-система сохраняет функциональную пригодность не менее 12 месяцев хранения при температуре $2-8^\circ\text{C}$.

Сравнительная оценка связывающей (ИФА) и нейтрализующей (РН) активности IgG-антител

Для функциональной интерпретации данных, полученных с помощью разработанной ИФА тест-системы, проведено сопоставление титров специфических IgG-антител и их нейтрализующей активности. Анализ охватывал панели моносывороток, содержащих IgG-антитела к серотипам вируса денге отдельно (D1–D4), сыворотки животных, иммунизированных рекомбинантным штаммом MVA-d34 (21-я неделя после завершения курса), а также контрольную группу, получавшую исходный штамм MVA (табл. 6).

В группе моносывороток отмечено закономерное расхождение между показателями (см. табл. 6): титры связывающих IgG-антител в ИФА

стабильно превышали гомологичные титры в РН. Указанная тенденция обусловлена принципиальными различиями в регистрируемых параметрах. Рекомбинантный антиген d34, иммобилизованный на твердой фазе, предоставляет доступ для связывания широкому спектру эпитопов, включая конформационные участки, которые на поверхности нативного вириона могут быть структурно экранированы или не участвовать в процессе клеточной адсорбции [3; 18]. Поскольку в разработанной ИФА тест-системе для детекции иммунных комплексов применялся конъюгат, специфичный к Fc-фрагменту мышиных антител класса IgG, твердофазный анализ фиксирует совокупность всех специфических IgG-антител, распознающих иммобилизованный антиген. Реакция нейтрализации, напротив, выявляет исключительно функционально активную фракцию, способную блокировать проникновение вируса в чувствительные клетки.

Наиболее выраженное отклонение результатов наблюдалось для серотипа D4 вируса денге: при умеренном сигнале в ИФА ($\log_2 6,64$) нейтрализующие $\log_2$ -титры против гетерологичных серотипов не превышали порога детекции ($\log_2 1,67$), а гомологичная активность оставалась на минимальном уровне ($\log_2 2,67$). Это согласуется с данными литературы о низкой иммуногенности домена III D4 и сложностях индукции протективного ответа на этот компонент при моноинфекции или в условиях конкуренции эпитопов [3; 18].

Принципиально иную картину продемонстрировала панель сывороток, полученных от животных, иммунизированных конструкцией MVA-d34. К 21-й неделе поствакцинального периода $\log_2$ -титры IgG-антител достигли значения 10,64, что сопровождалось стабильно высокими показателями

нейтрализации по всем четырем серотипам вируса денге ($\log_2 9,55-9,77$). Сближение абсолютных значений методов в этой группе указывает на качественное созревание гуморального ответа: вакцинный кандидат MVA-d34 обеспечил не только количественный прирост антител, но и формирование пула с высокой долей

серотип-перекрестных нейтрализующих детерминант. Подобная динамика характерна для сбалансированных тетравалентных формул, где устойчивость протективности определяется не суммарной концентрацией иммуноглобулинов, а пропорцией функционально активных клонов [4; 19].

Таблица 6. Сравнение уровней специфических IgG-антител к вирусу денге, определенных методом ИФА (значения титров ИФА (при $\lambda = 450$ нм)), и методом РН в образцах сывороток мышей представлено как средний $\log_2$ -титр $\pm$ SD

Table 6. Comparison of specific IgG antibodies levels to dengue virus, determined by ELISA (values of ELISA titers (at $\lambda = 450$ nm)), and by PRNT in mouse serum samples is presented as the average $\log_2$ -titer $\pm$ SD

Образец сыворотки Serum sample	Серотипы вируса денге, использованные в РН (титр) DENV Serotypes used in PRNT ($\log_2$ -titer)				Титр ИФА ELISA ($\log_2$ -titer)
	D1	D2	D3	D4	
ДЕНВ D1 / DENV D1	3,88 $\pm$ 0,51	2,77 $\pm$ 0,69	2,22 $\pm$ 0,14	2,20 $\pm$ 0,06	7,64
ДЕНВ D2 / DENV D2	4,54 $\pm$ 0,23	5,98 $\pm$ 0,34	3,55 $\pm$ 0,39	2,77 $\pm$ 0,69	8,64
ДЕНВ D3 / DENV D3	3,21 $\pm$ 0,19	3,77 $\pm$ 0,39	6,44 $\pm$ 0,34	5,10 $\pm$ 0,34	8,64
ДЕНВ D4 / DENV D4	1,67 $\pm$ 0,58	1,67 $\pm$ 0,58	1,67 $\pm$ 0,58	2,67 $\pm$ 0,58	6,64
Исходный штамм MVA Original MVA strain	< 2	< 2	< 2	< 2	—
21-я неделя после иммунизации MVA-d34 Week 21 post-MVA-d34 immunisation	9,77 $\pm$ 0,39	9,77 $\pm$ 0,39	9,77 $\pm$ 0,39	9,55 $\pm$ 0,39	10,64

Примечание: каждый контрольный компонент анализировался в 3-х повторах; для сывороток 21-й недели указаны средние значения, полученные при тестировании пула сывороток мышей, иммунизированных вакцинным кандидатом MVA-d34; титр в РН < 2 $\log_2$ свидетельствует об отсутствии нейтрализующей активности в отношении вируса денге; «—» означает отсутствие детектируемого сигнала в ИФА

Note: each control component was analysed in triplicate; for sera collected at week 21, values represent mean results obtained from testing pooled sera of mice immunised with the MVA-d34 vaccine candidate; PRNT titer < 2 $\log_2$ indicates the absence of neutralising activity against dengue virus; "—" indicates no detectable signal in ELISA

Отсутствие детектируемого сигнала как в ИФА, так и в РН в контрольной группе, получавшей исходный штамм MVA, подтверждает антиген-специфичность регистрируемых реакций и исключает вектор-обусловленную перекрестную реактивность или неспецифическое связывание с компонентами твердофазного иммуносorbента разработанной ИФА тест-системы.

Сопоставление данных подтверждает, что разработанная ИФА тест-система корректно отражает динамику гуморального иммунитета и согласуется с формированием функционально активных IgG-антител, что наиболее выражено в поствакцинальной группе. Закономерное превышение титров в ИФА над показателями РН обусловлено различием в регистрируемых пулах иммуноглобулинов и не снижает аналитическую надежность метода. В связи с этим оба подхода целесообразно использовать совместно: ИФА анализ обеспечивает возможность массового скрининга и отслеживания изменения концентрации специфических IgG-антител в ходе эксперимента, тогда как реакция нейтрализации необходима для подтверждения способности сывороток блокировать инфекционный цикл вируса денге и оценки баланса ответа по каждому из четырех серотипов. Применение такой комбинации методов гарантирует объективную оценку иммуногенности вакцинных кандидатов против лихорадки денге на доклиническом этапе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании впервые в отечественной практике создана и комплексно валидирована иммуноферментная тест-система на основе тетравалентного рекомбинантного антигена d34, объединяющего домены III Е-белка всех четырех серотипов вируса денге. Разработанный диагностический набор предназначен для полуколичественного определения специфических IgG-антител в сыворотке лабораторных мышей и позволяет избирательно оценивать гуморальный ответ, направленный против серотип-специфичных эпитопов.

Результаты аналитической валидации подтвердили высокую надежность системы: специфичность и чувствительность составили 100 % (95 % ДИ: 91,2–100,0 %), коэффициент вариации при внутрिलाбораторном контроле не превышал 8,2 %, а моделирование 12-месячного хранения при 2–8 °C выявило снижение сигнала менее чем на 4,7 %, что соответствует международным рекомендациям по оценке стабильности диагностических реагентов. Функциональная оценка показала, что в группе иммунизированных рекомбинантным штаммом MVA-d34 повышение уровня специфических IgG-антител, регистрируемых в ИФА, сопровождается формированием выраженной вируснейтрализующей активности, что подтверждает формирование сбалансированного тетравалентного иммунного ответа. При этом закономерно наблюдаемое превышение показателей ИФА над титрами в реакции

нейтрализации отражает различие в детектируемых пулах иммуноглобулинов и подчеркивает целесообразность совместного применения обоих методов: твердофазный анализ обеспечивает высокопроизводительный скрининг и мониторинг концентрации специфических IgG-антител, тогда как реакция нейтрализации остается необходимым инструментом для верификации протективного потенциала и оценки баланса ответа по каждому из четырех серотипов.

Анализ перекрестной нейтрализации выявил сложную картину антигенных взаимосвязей, подтверждающую тенденцию к сближению серотипов в пары D1/D2 и D3/D4 при сохранении значительной перекрывающейся вариативности, что согласуется с современными представлениями о непрерывной антигенной организации вируса денге. Выявленная асимметрия перекрестных реакций и устойчиво низкий нейтрализующий ответ на серотип D4, несмотря на достаточный уровень связывающих антител, указывают на смещение иммунного ответа в сторону консервативных, но слабонейтрализующих эпитопов. Эти особенности объясняют известные трудности в достижении сбалансированного тетравалентного иммунитета и требуют целенаправленной оптимизации D4-компонента в составе вакцинных препаратов.

Разработанная ИФА тест-система создает методологическую основу для доклинического контроля иммуногенности вакцинных кандидатов против лихорадки денге, в том числе платформы MVA-d34. Ее внедрение способствует стандартизации оценки качества биопрепаратов на основе домена III Е-белка и снижает технологическую зависимость от зарубежных аналогов. В перспективе адаптация методики для работы с клиническими образцами человека позволит расширить инструментарий для мониторинга поствакцинального иммунитета и усилит систему эпидемиологического надзора за арбовирусными инфекциями на территории Российской Федерации.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность А.И. Желтухиной (ФГБУ «Научно-исследовательский институт гриппа имени А.А. Смородинцева» Минздрава России) за проведение генотипирования штаммов вируса денге методом высокопроизводительного секвенирования нового поколения (Next Generation Sequencing), что позволило верифицировать серотип-специфичную принадлежность коллекционных штаммов ДЕНВ D1–D4, использованных в исследовании, а также А.Г. Самарцевой за техническую помощь в наработке вирусных препаратов ДЕНВ.

ACKNOWLEDGMENT

The authors are grateful to A.I. Zheltukhina (Smorodintsev Research Institute of Influenza, Ministry of Health of Russia) for performing genotyping of dengue virus strains by next-generation sequencing (NGS), which enabled verification of the serotype identity of the reference DENV D1–D4 strains used in this study, and to A.G. Samartseva for technical assistance in the propagation of dengue virus preparations.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Anumanthan G., Sahay B., Mergia A. Current Dengue Virus Vaccine Developments and Future Directions // *Viruses*. 2025. V. 17. N 2. P. 212. <https://doi.org/10.3390/v17020212>
2. Limothai U., Tachaboon S., Dinhuze J., Hunsawong T., Ong-Ajchaowlerd P., Thaisomboonsuk B., Fernandez S., Trongkamolchai S., Wanpaisitkul M., Chulapornsirir C. et al. Dengue pre-vaccination screening test evaluation for the use of dengue vaccine in an endemic area // *PLoS ONE*. 2021. V. 16. N 9. e0257182. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257182>
3. Halstead S.B. Neutralization and antibody-dependent enhancement of dengue viruses // *Current Topics in Microbiology and Immunology* / Ed. by U. Koszinowski, H. Wagner. Berlin: Springer. 2003. V. 267. C. 251–266. https://doi.org/10.1007/978-3-662-06094-2_13
4. Katzelnick L.C., Gresh L., Halloran M.E. et al. Antibody-dependent enhancement of severe dengue disease in humans // *Science*. 2017. V. 358. N 6365. P. 929–932. <https://doi.org/10.1126/science.aan6836>
5. Katzelnick L.C., Fonville J.M., Sang X. et al. Dengue viruses cluster antigenically but not as discrete serotypes // *Science*. 2015. V. 349. N 6254. P. 1338–1343. <https://doi.org/10.1126/science.aaa4204>
6. Wahala W.M.P.B., Silva A.M. Natural strain variation and antibody neutralization of dengue serotype 3 viruses // *PLoS Pathogens*. 2010. V. 6. N 3. e1000821. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1000821>
7. Mintae R.R., Glazkova D.V., Orlova O.V., Ignatyev G.M., Oksanich A.S., Shipulin G.A., Bogoslovskaya E.V. Development of MVA-d34 tetraivalent dengue vaccine: design and immunogenicity // *Vaccines*. 2023. V. 11. N 4. P. 831. <https://doi.org/10.3390/vaccines11040831>
8. ГОСТ 33215-2014. Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила оборудования помещений и организации процедур. М.: Стандартинформ, 2014.
9. ГОСТ 33216-2014. Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила содержания и ухода за лабораторными грызунами и кроликами. М.: Стандартинформ, 2014.
10. Игнатьев Г.М., Оксанич А.С., Казакова Е.В., Самарцева Т.Г., Отрашевская Е.В., Уйба С.В., Трухин В.П. Изоляция и генетический анализ вируса Чикунгунья из комаров *Aedes aegypti* и *Aedes albopictus*, отловленных в Центральной Америке // *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии*. 2023. Т. 100. N 5. С. 310–318. <https://doi.org/10.36233/0372-9311-354>
11. Игнатьев Г.М., Каа К.В., Оксанич А.С. и др. Индикация и идентификация вирусов денге и Чикунгунья в комарах рода *Aedes* spp., отловленных в центральной Америке // *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии*. 2020. Т. 97. N 3. С. 227–232. <https://doi.org/10.36233/0372-9311-2020-97-3-4>
12. Государственная фармакопея Российской Федерации / МЗ РФ. XIII изд. Т. 1. Москва, 2015. 1470 с.
13. Беланова А.И., Ковалева Е.Л., Митькина Л.И. Сравнение подходов к изучению стабильности лекарственных средств в рамках национальной процедуры в России и Евразийском экономическом союзе // *Вестник Научного центра экспертизы средств медицинского применения*. 2021. Т. 11. N 1. С. 16–23. <https://doi.org/10.30895/1991-2919-2021-11-1-16-23>
14. Russell P.K., Nisalak A., Sukhavachana P., Vivona S. A. Plaque reduction test for dengue virus neutralizing antibodies // *J. Immunol.* 1967. V. 99. N 2. P. 285–290.
15. Morens D.M., Halstead S.B., Larsen L.K. Comparison of dengue virus plaque reduction neutralization by macro and "semi-micro" methods in LLC-MK2 cells // *Microbiol. Immunol.*

1985. V. 29. N 12. P. 1197–1205.
<https://doi.org/10.1111/j.1348-0421.1985.tb00909.x>
16. Baryshnikova V., Turchenko Y., Tchyynskaya K., Belyaletdinova I., Butenko A., Dereventsova A., Ignatiev G., Kholodilov I., Larichev V., Lyapeykova E., Rogova A., Shakaryan A., Shishova A., Gmyl A., Karganova G. Recombinant TBEV Protein E of the Siberian Subtype Is a Candidate Antigen in the ELISA Test System for Differential Diagnosis // *Diagnostics*. 2023. V. 13. N 20. P. 3277.
<https://doi.org/10.3390/diagnostics13203277>
17. Нетесова И.Г., Бобкова М.Р. Внутрелабораторный контроль качества не количественных методов ИФА // Справочник заведующего КДЛ. 2017. N 8. С. 65–74.
18. Dejnirattisai W., Jumnainsong A., Onsirakul N. et al. A new class of highly potent, broadly neutralizing antibodies isolated from viremic patients infected with dengue virus // *Nature Immunology*. 2015. V. 16. N 2. P. 170–177.
<https://doi.org/10.1038/ni.3058>
19. Tennakoon M.S.B.W.T.M.N.S., Lee K.-H., Lee H.-M., Park J.-Y., Shin H.-J. Optimization of Conditions for Expression of Dengue Serotype 2 EDIII Protein in *Escherichia coli* and Immune Responses of Adjuvant-Free EDIII Ferritin Nanoparticles Against Dengue Virus in BALB/c Mice // *Viruses*. 2025. V. 17. N 1. P. 129. <https://doi.org/10.3390/v17010129>

REFERENCES

- Anumanthan G., Sahay B., Mergia A. Current Dengue Virus Vaccine Developments and Future Directions. *Viruses*, 2025, vol. 17, no. 2, p. 212. <https://doi.org/10.3390/v17020212>
- Limothai U., Tachaboon S., Dinhuzen J., Hunsawong T., Ong-Ajchaowlerd P., Thaisomboonsuk B., Fernandez S., Trongkamolchai S., Wanpaisitkul M., Chulapornsir C. et al. Dengue pre-vaccination screening test evaluation for the use of dengue vaccine in an endemic area. *PLoS ONE*, 2021, vol. 16, no. 9, article number: e0257182.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257182>
- Halstead S.B. Neutralization and antibody-dependent enhancement of dengue viruses. In: *Current Topics in Microbiology and Immunology*. Berlin, Springer, 2003, vol. 267, pp. 251–266. https://doi.org/10.1007/978-3-662-06094-2_13
- Katzelnick L.C., Gresh L., Halloran M.E. et al. Antibody-dependent enhancement of severe dengue disease in humans. *Science*, 2017, vol. 358, no. 6365, pp. 929–932.
<https://doi.org/10.1126/science.aan6836>
- Katzelnick L.C., Fonville J.M., Sang X. et al. Dengue viruses cluster antigenically but not as discrete serotypes. *Science*, 2015, vol. 349, no. 6254, pp. 1338–1343.
<https://doi.org/10.1126/science.aaa4204>
- Wahala W.M.P.B., Silva A.M. Natural strain variation and antibody neutralization of dengue serotype 3 viruses. *PLoS Pathogens*, 2010, vol. 6, no. 3, Article number: e1000821.
<https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1000821>
- Mintaev R.R., Glazkova D.V., Orlova O.V., Ignatyev G.M., Oksanich A.S., Shipulin G.A., Bogoslovskaya E.V. Development of MVA-d34 tetravalent dengue vaccine: design and immunogenicity. *Vaccines*, 2023, vol. 11, no. 4, p. 831.
<https://doi.org/10.3390/vaccines11040831>
- GOST 33215-2014. *Rukovodstvo po soderzhaniyu i ukhodu za laboratornymi zhivotnymi. Pravila oborudovaniya pomeshchenii i organizatsii protsedur* [GOST 33215-2014. Guidelines for the maintenance and care of laboratory animals. Rules for equipment of premises and organization of procedures]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. (In Russian)

- GOST 33216-2014. *Rukovodstvo po soderzhaniyu i ukhodu za laboratornymi zhivotnymi. Pravila soderzhaniya i ukhoda za laboratornymi gryzunami i krolikami* [GOST 33216-2014. Guidelines for the maintenance and care of laboratory animals. Rules for the maintenance and care of laboratory rodents and rabbits]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. (In Russian)
- Ignat'ev G.M., Oksanich A.S., Kazakova E.V., Samartseva T.G., Otrasevskaya E.V., Uyba S.V., Trukhin V.P. Isolation and genetic analysis of Chikungunya virus from *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* mosquitoes collected in Central America. *Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology*, 2023, vol. 100, no. 5, pp. 310–318. (In Russian)
<https://doi.org/10.36233/0372-9311-354>
- Ignat'ev G.M., Kaa K.V., Oksanich A.S. et al. Detection and identification of dengue and Chikungunya viruses in *Aedes* spp. mosquitoes collected in Central America. *Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology*, 2020, vol. 97, no. 3, pp. 227–232. (In Russian)
<https://doi.org/10.36233/0372-9311-2020-97-3-4>
- State Pharmacopoeia of the Russian Federation. Ministry of Health of the Russian Federation. 13th ed., vol. 1. Moscow, 2015, 1470 p. (In Russian)
- Belanova A.I., Kovaleva E.L., Mit'kina L.I. Comparison of approaches to studying the stability of medicinal products within the national procedure in Russia and the Eurasian Economic Union. *Bulletin of the Scientific Center for Expertise of Medical Products*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 16–23. (In Russian) <https://doi.org/10.30895/1991-2919-2021-11-1-16-23>
- Russell P.K., Nisalak A., Sukhavachana P., Vivona S. A plaque reduction test for dengue virus neutralizing antibodies. *J. Immunol.*, 1967, vol. 99, no. 2, pp. 285–290.
- Morens D.M., Halstead S.B., Larsen L.K. Comparison of dengue virus plaque reduction neutralization by macro and "semi-micro" methods in LLC-MK2 cells. *Microbiol. Immunol.*, 1985, vol. 29, no. 12, pp. 1197–1205.
<https://doi.org/10.1111/j.1348-0421.1985.tb00909.x>
- Baryshnikova V., Turchenko Y., Tchyynskaya K., Belyaletdinova I., Butenko A., Dereventsova A., Ignatiev G., Kholodilov I., Larichev V., Lyapeykova E., Rogova A., Shakaryan A., Shishova A., Gmyl A., Karganova G. Recombinant TBEV Protein E of the Siberian Subtype Is a Candidate Antigen in the ELISA Test System for Differential Diagnosis. *Diagnostics*, 2023, vol. 13, no. 20, p. 3277.
<https://doi.org/10.3390/diagnostics13203277>
- Netesova I.G., Bobkova M.R. Internal quality control of non-quantitative ELISA methods. *Spravochnik zaveduyushchego KDL* [Reference Book for the Head of the Clinical Diagnostic Laboratory]. 2017, no. 8, pp. 65–74. (In Russian)
- Dejnirattisai W., Jumnainsong A., Onsirakul N. et al. A new class of highly potent, broadly neutralizing antibodies isolated from viremic patients infected with dengue virus. *Nature Immunology*, 2015, vol. 16, no. 2, pp. 170–177.
<https://doi.org/10.1038/ni.3058>
- Tennakoon M.S.B.W.T.M.N.S., Lee K.-H., Lee H.-M., Park J.-Y., Shin H.-J. Optimization of Conditions for Expression of Dengue Serotype 2 EDIII Protein in *Escherichia coli* and Immune Responses of Adjuvant-Free EDIII Ferritin Nanoparticles Against Dengue Virus in BALB/c Mice. *Viruses*, 2025, vol. 17, no. 1, p. 129.
<https://doi.org/10.3390/v17010129>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Алексей С. Оксанич участвовал в разработке концепции исследования и корректуре рукописи до подачи в редакцию. Софья С. Гогина участвовала в

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Alexey S. Oksanich contributed to the study conception and manuscript revision before submission. Sofya S. Gogina contributed to the experimental work, data analysis and

экспериментальной части работы, в анализе и интерпретации результатов, в подборе научной литературы по тематике статьи и написании рукописи. Галина М. Цыганова участвовала в экспериментальной части работы. Богдан С. Черепович участвовал в корректуре иллюстративного материала и 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.

interpretation, literature search relevant to the study topic, and drafting of the manuscript. Galina M. Tsyganova performed the experimental work. Bogdan S. Cherepovich participated in the review and editing of the illustrative materials and the manuscript prior to submission. 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

Софья С. Гогина / Sofya S. Gogina <https://orcid.org/0009-0009-2889-9680>

Галина М. Цыганова / Galina M. Tsyganova <https://orcid.org/0009-0002-1527-949X>

Богдан С. Черепович / Bogdan S. Cherepovich <https://orcid.org/0000-0002-5803-6263>

Алексей С. Оксанич / Alexey S. Oksanich <https://orcid.org/0000-0002-8600-7347>



Биохимическая специфика и ингибирующий потенциал этанольных экстрактов кипрея узколистного в отношении вируса простого герпеса 2 типа *in vitro*

Елена И. Казачинская^{1,2}, Лариса Н. Зибарева³, Виктория В. Величко⁴, Дмитрий С. Круглов⁴, Дарья Л. Прокушева⁴, Юлия В. Кононова¹, Марина А. Гуляева¹, Михаил Ю. Щелканов², Александр А. Чепурнов^{1,2}

¹НИИ вирусологии Федерального исследовательского центра фундаментальной и трансляционной медицины (ФИЦ ФТМ) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Новосибирск, Россия

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

³Национальный исследовательский Томский государственный университет (ТГУ), Томск, Россия

⁴Новосибирский государственный медицинский университет МЗ РФ, Новосибирск, Россия

Контактное лицо

Елена И. Казачинская, доктор биологических наук, главный научный сотрудник ФИЦ ФТМ СО РАН; 630060 Россия, г. Новосибирск, улица Тимакова, 2; ведущий научный сотрудник ФГБНУ "НИИ эпидемиологии и микробиологии имени Г.П. Сомова" Роспотребнадзора; 690087 Россия, Приморский край, г. Владивосток, ул. Сельская, д. 1. Тел. +79095307441 Email lena.kazachinskia@mail.ru ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1856-6147>

Формат цитирования

Казачинская Е.И., Зибарева Л.Н., Величко В.В., Круглов Д.С., Прокушева Д.Л., Кононова Ю.В., Гуляева М.А., Щелканов М.Ю., Чепурнов А.А. Биохимическая специфика и ингибирующий потенциал этанольных экстрактов кипрея узколистного в отношении вируса простого герпеса 2 типа *in vitro* // Юг России: экология, развитие. 2026. Т.21, N 2. С. 63-80. DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-6

Получена 22 марта 2026 г.

Прошла рецензирование 17 ноября 2026 г.

Принята 25 апреля 2026 г.

Список сокращений

HSV (*Herpes Simplex virus*) – вирус простого герпеса, CC₅₀ (50 % cytotoxic concentration) – 50 %-ная цитотоксическая концентрация, EC₅₀ (50 % effective concentrations) – 50 %-ная эффективная концентрация, SI (Selectivity index) – селективный индекс, БОЕ – бляшко-образующие единицы, БАВ – биологически активные вещества, ДМСО – диметилсульфоксид, ЦПД – цитопатическое действие, ТЦПД₅₀ – 50 %-ная тканевая цитопатическая доза, ВЭЖХ – высокоэффективная жидкостная хроматография

Резюме

Оценка *in vitro* инактивирующей (вирулицидной) и ингибирующей активности сухих этанольных экстрактов листьев кипрея узколистного, приготовленных из сухого сырья и предварительно ферментативного, на репликацию вируса простого герпеса 2 типа (*Herpes simplex virus*, HSV-2).

Анализ противовирусной активности экстрактов, разведенных в ДМСО, проводили на культуре клеток Vero E6 по общепринятым методикам с использованием растительных образцов сравнения и лиофилизированного препарата ацикловира. Содержание БАВ в экстрактах проводили методом ВЭЖХ, а также прямой и дифференциальной спектрофотометрии.

Для экстракта ферментированных листьев кипрея выявлена вирулицидная активность, сопоставимая с активностью растительных препаратов сравнения и более высокая при сравнении с экстрактом сухих листьев. Ингибирующая активность экстракта ферментированных листьев кипрея по схемам "профилактика" заражения и "лечение" инфицированных клеток также сопоставима с активностью контрольных растительных образцов. По данным ВЭЖХ ферментированные листья кипрея содержат большее количество флавоноидов, чем неферментированное сырье. Во всех образцах кипрея выявлен доминирующий пик, который идентифицирован как цинарозид. Методом спектрофотометрии определено, что по сумме полифенольных соединений экстракты кипрея сравнимы с экстрактом зеленого чая и превышают по содержанию суммы оксикоричных кислот и флавоноидов.

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что комплекс полифенольных соединений, содержащийся в сухих этанольных экстрактах кипрея узколистного, обладает вирулицидным действием и способен эффективно блокировать внутриклеточные этапы жизненного цикла HSV-2.

Ключевые слова

Кипрей узколистный, ферментация листьев, сухие этанольные экстракты, ВЭЖХ, спектрофотометрия, HSV-2.

Biochemical specificity and inhibitory potential of ethanol extracts of *Epilobium angustifolium* against herpes simplex virus type 2 *in vitro*

Elena I. Kazachinskaia^{1,2}, Larisa N. Zibareva³, Victoriya V. Velichko⁴, Dmitriy S. Kruglov⁴, Dar'ya L. Prokusheva⁴, Yulia V. Kononova¹, Marina A. Gulyaeva¹, Mikhail Yu. Shchelkanov² and Alexander A. Chepurnov^{1,2}

¹Research Institute of Virology, Federal Research Centre of Fundamental and Translational Medicine, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

²Somov Research Institute of Epidemiology and Microbiology, Federal Service for Surveillance in the Sphere of Consumers Rights Protection and Human Welfare, Vladivostok, Russia

³National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

⁴Novosibirsk State Medical University, Novosibirsk, Russia

Principal contact

Elena I. Kazachinskaia, Doctor of Biology, Chief Researcher, Research Institute of Virology, Federal Centre for Fundamental and Translational Medicine, SB RAS; 2 Timakova Street, Novosibirsk, Russia 630060 & Leading Researcher, Somov Research Institute of Epidemiology and Microbiology; 1 Selskaya St, Vladivostok, Primorsky Krai, Russia 690087. Tel. +79095307441
Email lena.kazachinskaia@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1856-6147>

How to cite this article

Kazachinskaia E.I., Zibareva L.N., Velichko V.V., Kruglov D.S., Prokusheva D.L., Kononova Yu.V., Gulyaeva M.A., Shchelkanov M.Yu., Chepurnov A.A. Biochemical specificity and inhibitory potential of ethanol extracts of *Epilobium angustifolium* against herpes simplex virus type 2 *in vitro*. *South of Russia: ecology, development*. 2026; 21(2):63-80. (In Russ.)
DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-6

Received 22 March 2026

Revised 17 April 2026

Accepted 25 April 2026

Abbreviations list

HSVs – Herpes Simplex viruses, CC₅₀ – 50 % cytotoxic concentration, EC₅₀ – 50 % effective concentrations, SI – Selectivity index, PFU – plaque-forming units, BAS – biologically active substances, DMSO – Dimethyl sulfoxide, TCPD₅₀ – 50 % tissue cytopathic dose, CPE – cytopathic effect, HPLC – High performance liquid chromatography

Abstract

In vitro evaluation of the inactivating (virucidal) and inhibitory activity of dry ethanol extracts of

leaves *Epilobium angustifolium* L. (dry raw materials and pre-enzymatic) on the replication of herpes simplex virus type 2 (Herpes simplex virus, HSV-2).

The antiviral activity of extracts diluted in DMSO was analyzed on Vero E6 cell culture according to generally accepted methods using plant reference samples and a lyophilized acyclovir preparation. The content of BAS in the extracts was carried out by HPLC as well as direct and differential spectrophotometry.

The extract of fermented leaves *E. angustifolium* showed virucidal activity comparable to that of the herbal preparations of comparison and higher when compared with the extract of dried leaves. The inhibitory activity of the extract of fermented leaves *E. angustifolium* according to the schemes of "prevention" of infection and "treatment" of infected cells is also comparable with the activity of control plant samples. According to HPLC, fermented leaves contain more flavonoids than unfermented raw materials. In all samples of *E. angustifolium* a dominant peak was identified, which was identified as cynaroside. It was determined by spectrophotometry that in terms of the amount of polyphenolic compounds, extracts of *E. angustifolium* are comparable to green tea extract and exceed the amount of oxycoric acids and flavonoids.

Based on the results obtained, it can be concluded that the complex of polyphenolic compounds contained in the dry ethanol extracts of *E. angustifolium* has a virucidal effect and is able to effectively block the intracellular stages of the HSV-2 life cycle.

Key Words

Epilobium angustifolium, fermentation of leaves, dry ethanol extracts, HPLC, mass spectrophotometry, HSV-2.

ВВЕДЕНИЕ

Виды *Epilobium* или *Chamaenerion* составляют самый многочисленный род семейства растений, известного как Кипрейные (Onagraceae), насчитывающий более 165 видов по всему миру. К наиболее распространённым видам относятся *Epilobium parviflorum* Schreb., *E. hirsutum* L., *E. rosmarinifolium* (E. *dodonaei* Vill.), *Epilobium roseum* Schreb. и *E. angustifolium* L., которые известны своими лечебными свойствами [1; 2]. В частности, кипрей узколистный (Иван-чай, русский чай, Копорский чай [3]), *Epilobium angustifolium* L. или *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop. (рис. 1) – многолетнее травянистое растение, произрастающее в арктических и альпийских зонах по всему Северному полушарию. Его ареал включает Северную Америку, Гренландию, Исландию и северную часть России, в то время как в северной Европе он практически не встречается. В Южной Азии он произрастает в Гималаях, от Афганистана до западного Китая, а также в регионах Центральной Азии, таких как Алтай, Тагатай, Джунгарский Алатау, Заилийский Алатау, Киргизский Алатау, Кунгей Алатау и Западный Тянь-Шань [2]. Кипрей узколистный является одним из наиболее известных пищевых и лекарственных растений и издавна используется в народной медицине разных стран в виде чая или настоя листьев, применяемого при головной боли, простуде, желудочно-кишечных расстройствах и проблемах с предстательной железой у мужчин [4], а также наружно для снятия отеков, заживления ран и кожных язв. В тестах *in vitro* показано, что гиперозид (3-(β-D-галактопиранозилокси)-3',4',5,7-тетрагидроксифлавоны) кипрея может быть тем полифенольным соединением, которое отвечает за заживление ран благодаря своей значительной антигалактуронидазной, антиколлагеназной и антиоксидантной активности [5]. *E. angustifolium* – хорошо изученное растение, содержащее богатый элементарный состав (обнаружен 61 химический элемент – Na, Mg, P, K и т.д.) и множество биологически активных веществ (БАВ), таких как флавоноиды, фенольные соединения с различной структурой (в частности, эллаготанины), органические кислоты, аминокислоты, антоциановые соединения, каротиноиды, тритерпены, кумарины, стеролы, гликозиды, полисахариды, липиды, эфирное масло, витамины и др. Например, содержание аскорбиновой кислоты в надземной части кипрея такое же как в плодах лимона [6; 7]. Основными фенольными кислотами кипрея являются галловая, кофейная, хлорогеновая, розмариновая, эллаговая, п-кумаровая и коричная, а преобладающими флавоноидами – кверцетин, мирицетин, кемпферол, рутин, кверцетин-3-О-глюкозид и гиперозид [2]. С уникальным биохимическим составом биомассы *E. angustifolium*, связывают многообразие его биологической активности и терапевтические эффекты – обезболивающие, антихолинэстеразные, фотозащитные, антиоксидантные, противовоспалительные [2; 8], антипролиферативные (противоопухолевые) свойства [7; 9], а также антибактериальную и фунгицидную активность [10]. Недавние исследования подчеркнули ценные косметические свойства экстрактов кипрея – противовоспалительные и антивозрастные за счет перечисленных выше свойств [8]. Предполагается, что доминирующим компонентом этанольных и водных

экстрактов *E. angustifolium* является энотеин В (димер макроциклического полифенола эллаготанина), который влияет на терапевтическое действие, например, на противоопухолевый эффект [7; 9; 11] и противовирусную активность, например, против вируса гриппа [12]. *In vitro* показано, что энотеин В и флавоноловый гликозид кверцетин, выделенные из *E. angustifolium*, синергетически блокируют репликацию вируса иммунодефицита человека 1 типа (ВИЧ-1) в инфицированных Т-клетках и ускоряют их апоптоз, т.е. нацелены на позднюю фазу жизненного цикла этого патогена [13]. Поиск препаратов натурального происхождения во время пандемии COVID-19 (CoronaVirus Disease 2019, коронавирусной болезни 2019 года) для лечения и профилактики этой новой болезни путем анализа литературы в онлайн-базах данных (Web of Science, Scopus, Google Scholar и PubMed, включая официальные сайты ВОЗ) показал, что *E. angustifolium* может быть использован как наиболее перспективное лекарственное растение с наибольшим фармакологическим эффектом по сравнению с другими видами лекарственного сырья. Предположительно его терапевтические свойства позволяют физиологически облегчить восемнадцать симптомов этой коронавирусной инфекции, связанных с нарушением функций легких, сосудов, сердца, ЦНС, мозга, почек и кожи [14]. Кипрей узколистный в это время также привлек и наше внимание при тестировании многих видов растений, т.к. водная вытяжка из его ферментированных листьев проявила *in vitro* нейтрализующую активность против 10^3 ТЦПД₅₀/мл коронавируса SARS-COV-2 с ЕС₅₀, равной $33,56 \pm 8,75$ мкг/мл по сухому сырью [15]. Недавно (в 2025 г.) Uminska с соавт. *in vitro* показали, что водный и метанольный экстракты кипрея волосистого (*E. hirsutum*) проявили высокую активность в отношении варианта Омикрон SARS-COV-2 при концентрации 10 мкг/мл, при этом процент ингибирования составил 38,4 % и 46,1 % соответственно. Основными фенольными соединениями неочищенных метанольных экстрактов *E. hirsutum* и *E. angustifolium*, по данным ВЭЖХ, были энотеин В, галловая кислота, гиперозид и изокверцитрин [16].

Наиболее часто в фармацевтической практике в качестве экстрагента используется этиловый спирт и, как правило, экстракцию БАВ из растительного сырья проводят водно-спиртовой смесью в разных соотношениях [17]. При изучении антиоксидантной активности экстрактов *E. angustifolium*, полученных с использованием экстрагентов различной полярности (н-гексан, этилацетат и 70 % этанол в воде) показано, что водно-этанольный экстракт проявил наилучшую способность к поглощению радикалов и их восстановлению до соединений, безопасных для клеток [7]. Ранее мы показали, что водная вытяжка из ферментированных листьев *E. angustifolium* проявила *in vitro* нейтрализующую активность против 10^3 БОЕ/мл вируса простого герпеса 2-го типа (*Herpes Simplex virus 2*, HSV-2) с ЕС₅₀ равной $10,68 \pm 1,96$ мкг/мл по сухому сырью [18; 19].

Около полумиллиарда человек во всем мире инфицированы вирусом простого герпеса 2-го типа. Длительное лечение ацикловиром (Acyclovir, ACV) и его аналогами приводит к развитию резистентных штаммов. К недостаткам ACV можно отнести ограниченную растворимость в воде, короткий период

полувыведения из организма и низкую биодоступность при пероральном приеме. Это приводит к необходимости увеличения дозировки препарата для сохранения эффективности, что повышает его токсичность. В связи с этим, полифенольные молекулы, получаемые из растений, в последнее время набирают популярность как мощные нетоксичные противовирусные соединения [20].

Целью данного исследования было изучение противовирусного потенциала кипрея узколистного, а именно оценка *in vitro* инактивирующей (вирулицидной) и ингибирующей активности сухих

этанольных экстрактов листьев этого растения, приготовленных из сухого сырья и предварительно ферментативного, на репликацию HSV-2.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Растительное сырье: образцы сухих листьев кипрея узколистного (место сбора: Салаирский край Маслянинского района Новосибирской области РФ) и гранул ферментированного препарата, приготовленные из свежего сырья любезно предоставлены ООО НПФ «Золотая долина» (г. Новосибирск).



Рисунок 1. Кипрей узколистный (*Epilobium angustifolium* L., Onagraceae) (фото авторов)
Figure 1. *Epilobium angustifolium* L., Onagraceae (photograph by the authors)

Получение сухих этанольных экстрактов (на 70 % спирте), подготовка растительных препаратов (растворение сухих экстрактов в диметилсульфоксиде (ДМСО) для исследования цитотоксичности и ингибирующей активности на вирусную репликацию, используемые культура клеток Vero E6 и отрицательные контроли, описаны ранее в работе [21].

Вирус простого герпеса 2 типа (HSV-2, штамм MS) пассировали на чувствительной для этого вируса культуре клеток Vero E6 [22].

Инфекционный титр HSV-2 выражали в бляшкообразующих единицах в мл (БОЕ/мл) как показано в работах [18] и [23].

В качестве растительных образцов сравнения использовали приготовленные сухие этанольные экстракты черного и зеленого чая (*Camellia sinensis* L. Kuntze, Theaceae), а также чаги (*Inonotus obliquus* Ach. Ex Pers. Pil., Basidiomycota) и специи гвоздики (*Syzygium aromaticum* L., Myrtaceae), т.к. их активность против HSV-2 *in vitro* недавно описаны [24]. Сырье – черный чай

из Индии и зеленый чай из Китая, чага с Салаирского края Маслянинского района Новосибирской области РФ и специя гвоздика из Вьетнама, любезно предоставлено ООО НПФ «Золотая долина» (г. Новосибирск). В качестве специфического антигерпетического препарата использовали лиофилизированный препарат ацикловира («ФАРМЛЕНД», Республика Беларусь), растворенный в физиологическом растворе.

Цитотоксичность растительных экстрактов и ацикловира определяли согласно [25] по 50 %-ной цитотоксичной концентрации (50 % cytotoxic concentration, CC₅₀ в мл) на культуре клеток Vero E6 в лунках 96-луночных планшетов (Corning, США), в поддерживающей питательной среде. В первом варианте эксперимента монослой клеток отмывали и оставляли в поддерживающей питательной среде, а во втором варианте монослой клеток не отмывали от экстрактов. Срок инкубации 48 часов.

Анализ инактивирующей (вирулицидной) активности растительных экстрактов и ацикловира при прямой нейтрализации (инактивации) свободных

вирионов HSV-2 описан [26]. Кратко: монослой клеток отмывали после 1 ч экспозиции с суспензией экстрактов и вирусного препарата, оставляли в поддерживающей питательной среде, результат снимали через 48 ч после экспозиции при проявлении ЦПД в контрольных лунках инфицированных клеток.

Анализ ингибирующей активности исследуемых растительных экстрактов и контрольных образцов по «профилактической» схеме (нанесение разведений экстрактов на монослой клеток перед их инфицированием) описан [26]. Кратко: монослой клеток не отмывали после экспозиции с экстрактами и добавления вирусного препарата, результат снимали через 48 ч после экспозиции при проявлении ЦПД в контрольных лунках инфицированных клеток.

Анализ ингибирующей активности растительных экстрактов по схеме «лечения» клеток (при предварительном инфицировании клеток) описан [26]. Кратко: на монослой инфицированных клеток, отмытых от вирусного препарата, наносили суспензии экстрактов и оставляли в покое, результат снимали через 48 ч после экспозиции при проявлении ЦПД в контрольных лунках инфицированных клеток.

Учет результатов проводили визуально в соответствии с рекомендациями [23] при наблюдении в инвертированный микроскоп при 10-кратном увеличении, а затем после фиксации клеток в течение 30 мин раствором формальдегида и 0,05 %-м раствором кристаллического фиолетового с 20 % спирта.

Эффективность инактивации и ингибирования репликации вируса экстрактами выражали в 50 %-х эффективных концентрациях (50 % effective concentrations, EC_{50}) по общепринятым методикам и как описано [26].

Селективный индекс (Selectivity index, SI) для 50 %-х цитотоксичных и эффективных концентраций исследуемых экстрактов рассчитывали по общепринятой формуле: $SI_{50} = CC_{50} / EC_{50}$ как описано [25].

Статистическую обработку результатов по определению цитотоксичности (CC_{50}) и 50 %-ным эффективным концентрациям (EC_{50}) проводили с применением метода Спирмена-Кербера в программе Excel при 95 %-ном уровне надежности ($p \leq 0,05$). Все анализы *in vitro* проводили и фиксировали в четырех повторах в двух независимых экспериментах.

Анализ БАВ методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) выполнен на жидкостном хроматографе «Shimadzu LC-20AD» (Япония). Для выявления флавоноидов образцы детектировали при 3-х длинах волн: 254, 272 и 350 нм как описано [27]. Идентификацию сигналов на хроматограммах осуществляли сопоставлением времен удерживания (T_R , мин) и максимумов поглощения (λ , нм) компонентов экстрактов и стандартных образцов соединений (производство Sigma Aldrich), чистота ≥ 95 %. Содержание БАВ рассчитывалось по площадям пиков образца и соответствующих стандартов с помощью калибровочной кривой, построенной с использованием программного обеспечения LC Postrun

Calibration Curve. Анализ проводили в трех повторах, статистические расчеты осуществляли в программе Microsoft Excel, 2007.

Определение содержания БАВ в растительных экстрактах проводили методами прямой и дифференциальной спектрофотометрии, как описано [28]. Получение извлечений, определение содержания полифенольных соединений (в пересчете на катехин), суммы оксикоричных кислот (в пересчете на хлорогеновую кислоту) и суммы флавоноидов (в пересчете на рутин) проводили по формуле Бугера-Ламберта-Бера по величине оптической плотности, измеренной на характерной длине волны максимума – 282 нм, 330 нм и 410 нм, соответственно. Статистический анализ полученных результатов (объем выборки $n=10$) проводили по стандартной методике с определением среднего арифметического, стандартного отклонения и доверительного интервала. Расчет выполнялся с использованием программы Microsoft Excel как описано [26].

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Инактивирующая активность экстрактов кипрея и препаратов сравнения на свободные вирионы HSV-2 при прямой нейтрализации

В наших экспериментах при прямой инаktivации HSV-2 с инфекционным титром 10^3 БОЕ/мл для экстрактов кипрея и растительных образцов сравнения выявлены 50 %-ные концентрации (EC_{50}) в таком диапазоне (по убывающей активности): черный чай – $1,22 \pm 0,31$ мкг/мл, специя гвоздика – $1,59 \pm 0,70$ мкг/мл, ферментированные листья кипрея – $2,92 \pm 0,72$ мкг/мл, чага – $3,17 \pm 0,69$ мкг/мл, зеленый чай – $3,42 \pm 0,63$ мкг/мл, листья кипрея – $14,65 \pm 1,91$ мкг/мл и стебли кипрея – $46,87 \pm 11,57$ мкг/мл. С учетом цитотоксичности и показателей селективного индекса (SI) вирулицидная активность исследованных экстрактов может быть представлена следующим образом (по убывающей активности): черный чай – 1229,50, специя гвоздика – 471,69, ферментированные листья кипрея – 385,27, зеленый чай – 328,94, чага – 276,02, листья и стебли кипрея – 102,38 и 34,67, соответственно (табл. 1). В качестве контрольного препарата использовали лиофилизированный препарат ацикловира, растворенный в физиологическом растворе. В данной постановке эксперимента (прямая инаktivация вируса в течение 1 часа) ацикловир проявил слабую эффективность – $29,29 \pm 7,22$ мкг/мл (табл. 1), что объясняется его механизмом действия, требующим проникновения внутрь инфицированной клетки и последующего фосфорилирования для ингибирования вирусной ДНК-полимеразы. В отличие от него, исследуемые экстракты и растительные образцы сравнения проявляют выраженную вирулицидную активность непосредственно при контакте с вирионами во внеклеточной среде, обеспечивая защиту клеток еще до этапа инвазии вируса.

Таким образом, установлено, что ацикловир в данной схеме малоэффективен. Экстракты черного чая, гвоздики, чаги и зеленого чая проявили выраженное вирулицидное действие с EC_{50} в диапазоне от $1,22 \pm 0,31$ мкг/мл до $3,42 \pm 0,63$ мкг/мл. При этом эффективность экстракта ферментированных листьев кипрея (с $EC_{50} = 2,92 \pm 0,72$ мкг/мл) сравнима с

контрольными растительными образцами и, скорее всего, связана с уникальным фитохимическим составом, который образуется в процессе ферментации сырья, в

отличие от экстракта обычного сухого сырья листьев ($EC_{50}=14,65\pm 1,91$ мкг/мл) и стеблей ($EC_{50}=46,87\pm 11,57$ мкг/мл) этого растения (табл. 1).

Таблица 1. Результаты по цитотоксичности и инактивирующей активности экстрактов на свободные вирионы HSV-2 при прямой нейтрализации

Table 1. Results on cytotoxicity and inactivating activity of extracts on free HSV-2 virions during direct neutralization

Образец Specimen	Части растения Parts of plant	50 %-ная цитотоксичная концентрация мкг/мл 50 % cytotoxic concentration in µg/ml (CC_{50})	50 %-ная эффективная концентрация мкг/мл 50 % effective concentration in µg/ml (EC_{50})	Селективный индекс Selective index (SI)
Кипрей <i>Epilobium angustifolium</i>	листья leaves	1500±370,4	14,65±1,91	102,38
Кипрей <i>E. angustifolium</i>	стебли stems	1625±358,63	46,87±11,57	34,67
Кипрей <i>E. angustifolium</i>	ферментированные листья fermented leaves	1125±224,99	2,92±0,72	385,27
Черный чай Black tea	листья leaves	1500±370,4	1,22±0,31	1229,50
Зеленый чай Green tea	листья leaves	1125±224,99	3,42±0,63	328,94
Чага <i>Inonotus obliquus</i>	плодовое тело fruit body	875,0±160,39	3,17±0,69	276,02
Гвоздика <i>Syzygium aromaticum</i>	бутоны buds	750,0±185,20	1,59±0,70	471,69
Ацикловир Acyclovir		3125,00±801,93	29,29±7,22	106,69
Отрицательные контроли Negative controls		-	-	-

Примечание: – нет эффекта; отрицательные контроли – поддерживающая питательная среда для культуры клеток и ДМСО в объемах, соответствующих содержанию этого растворителя в исследуемых растительных препаратах, и физиологический раствор для растворения ацикловира; HSV-2 использовали с инфекционным титром 10^3 БОЕ/мл
Note: – there is no effect; negative controls are a supportive nutrient medium for cell culture and DMSO in volumes corresponding to the content of this solvent in the herbal preparations studied, as well as a saline solution for dissolving Acyclovir; HSV-2 was used at an infectious titer of 10^3 PFU/mL

В обзоре Šudomova с соавт. 2023 г., основанном на результатах недавних исследований, раскрываются сложные механизмы, с помощью которых флавоноиды разных растений проявляют свои противовирусные свойства в отношении вирусов простого герпеса [29]. В частности, Stamos с соавт. показали, что коммерческий препарат очищенного эпигаллокатехин-3-галлата (Epigallocatechin-3-gallate, EGCG) и его стабильный аналог EGCG-стеарат (EGCG-S), выделенные из зеленого чая, при растворении в ДМСО в концентрации 75 µM проявили ингибирование HSV-2 на культуре клеток Vero более чем на 99,9 % за счет блокирования прикрепления вирионов к клеткам-хозяевам. Результаты анализа *in silico* подтвердили, что EGCG-S имеет высокую аффинность связывания с вирусным гликопротеином gD и таким образом, может блокировать слияние HSV-2 и клеточной мембраны (точнее, клеточных рецепторов), предотвращая проникновение вируса в клетку [20]. Известно, что, в отличие от большинства оболочечных вирусов, для проникновения в клетки-мишени вирусам простого герпеса (HSV-1 и HSV-2) требуется, по меньшей мере, четыре гликопротеина – gD, gB, gH и gL [30]. Метод

прямой инактивации (нейтрализации) HSV-2 применяется для первичного скрининга *in vitro* препаратов с потенциальным антивирусным действием – на его способность адсорбироваться и проникать в клетки-хозяева [22; 31–34]. При этом показаны следующие результаты, например, для метанольного экстракта листьев ботанического вида птерокария (*Pterocarya stenoptera* C. DC., Juglandaceae) определены EC_{50} в диапазоне от 8,0 до 52,0 мкг/мл против 10^3 БОЕ/мл HSV-2 [31]; для метанольного экстракта семян гармалы обыкновенной (*Peganum harmala* L., Nitrariaceae) 50 %-ная ингибирующая концентрация (IC_{50}) против 10^4 БОЕ/мл HSV-2 составила 13,2 мкг/мл ($SI_{50}=161,0$) [33]; для метанольного экстракта смолы фисташки мастичной (*Pistacia lentiscus* L., Anacardiaceae) – $IC_{50}=3,63\pm 0,58$ мкг/мл и $SI_{50}=51,23$ при $CC_{50}=186,0\pm 13,74$ мкг/мл против HSV-2 при множественности инфицирования $MOI=0,1$ [22]; метанольный экстракт коры акации нильской (*Vachellia nilotica* L., Fabaceae) блокировал проникновение HSV-2 (в титре 10^5 БОЕ/мл) при концентрации 4,71 мкг/мл (при $CC_{50}=144,0$ мкг/мл и $SI_{50}=30,6$), а при концентрации 6,71 мкг/мл и $SI_{50}=21,5$ таким же образом действовал на

вирусный штамм, резистентный к ацикловиру [34]. Некоторые авторы считают показателями мощной противовирусной активности EC_{50} в диапазоне от 10,0 до 18,0 мкг/мл и $EC_{100}=100$ мкг/мл, как, например, показано для водно-этанольного экстракта корня и стеблей хвоща гигантского (*Equisetum giganteum* L., Equisetaceae) против HSV-2 с титром 10^2 БОЕ/мл [32]. Недавно при исследовании сухих этанольных экстрактов нескольких видов полыни против HSV-2 с титром 10^3 БОЕ/мл мы обнаружили самую высокую инактивирующую активность (с $EC_{50}=2,46\pm 0,63$ мкг/мл и $SI=257,36$) для экстракта листьев полыни обыкновенной (*Artemisia vulgaris* L., Asteraceae) [26]. Кроме того, экстракты представителей подсемейства Rosoideae семейства Rosaceae – репешка волосистого (*Agrimonia pilosa* Ledeb.), манжетки обыкновенной (*Alchemilla vulgaris* L.), кровохлебки аптечной (*Sanguisorba officinalis* L.), кровохлебки альпийской (*Sanguisorba alpina* Bunge) и гравилата речного (*Geum rivale* L.) также проявили вирулицидную активность против HSV-2 в диапазоне EC_{50} от $2,19\pm 0,48$ до $46,87\pm 11,57$ мкг/мл [24].

2. Ингибирующая активность экстрактов кипрея и препаратов сравнения на репликацию HSV-2 по схемам "профилактика" заражения и "лечение" инфицированных клеток

В наших экспериментах по схеме "профилактика" заражения инфицированных HSV-2 с инфекционным титром 10^2 БОЕ/мл для экстрактов кипрея и растительных образцов сравнения выявлены 50 %-ные концентрации (EC_{50}) в таком диапазоне (по убывающей активности): чага – $7,94\pm 2,07$ мкг/мл, специя гвоздика – $13,67\pm 2,51$ мкг/мл, зеленый чай – $21,48\pm 5,60$ мкг/мл, ферментированные листья кипрея – $25,39\pm 5,60$ мкг/мл, черный чай – $27,34\pm 5,01$ мкг/мл, листья кипрея – $39,06\pm 10,02$ мкг/мл и стебли кипрея – $109,37\pm 20,04$ мкг/мл. По схеме "лечение" клеток для экстрактов кипрея и растительных образцов сравнения выявлены EC_{50} в таком диапазоне (по убывающей активности): зеленый чай – $12,69\pm 2,80$ мкг/мл, чага и черный чай – $13,67\pm 2,51$ мкг/мл, специя гвоздика – $14,64\pm 1,91$, ферментированные листья кипрея – $21,48\pm 5,60$ мкг/мл, листья кипрея – $42,96\pm 11,20$ мкг/мл и стебли кипрея – $218,75\pm 40,09$ мкг/мл (табл. 2).

Таблица 2. Результаты по цитотоксичности и ингибирующей активности экстрактов по схемам "профилактики" и "лечения" клеток, инфицированных HSV-2

Table 2. Results on cytotoxicity and inhibitory activity of extracts according to the schemes of "prevention" and "treatment" of HSV-2 infected cells

Образец Specimen	Части растения Parts of plant	50 %-ная цитотоксичная концентрация мкг/мл 50 % cytotoxic concentration in µg/ml (CC50)	Схема "профилактика" заражения Scheme of infection "prevention"		Схема "лечение" инфицированных клеток Scheme of "treatment" of infected cells	
			EC_{50} мкг/мл EC_{50} µg/ml	SI	EC_{50} мкг/мл EC_{50} µg/ml	SI
Кипрей <i>Epilobium angustifolium</i>	листья leaves	$562,5\pm 122,49$	$39,06\pm 10,02$	14,40	$42,96\pm 11,20$	13,09
Кипрей <i>E. angustifolium</i>	стебли stems	$875,00\pm 160,39$	$109,37\pm 20,04$	8,00	$218,75\pm 40,09$	4,00
Кипрей <i>E. angustifolium</i>	фермент. листья fermented leaves	$406,25\pm 89,66$	$25,39\pm 5,6$	16,00	$21,48\pm 5,60$	18,91
Черный чай Black tea	листья leaves	$468,75\pm 61,25$	$27,34\pm 5,01$	17,14	$13,67\pm 2,50$	34,29
Зеленый чай Green tea	листья leaves	$312,5\pm 80,19$	$21,48\pm 5,60$	14,54	$12,69\pm 2,80$	24,62
Чага <i>I. obliquus</i>	плодовое тело fruit body	$171,87\pm 15,31$	$7,94\pm 2,07$	21,64	$13,67\pm 2,50$	12,57
Гвоздика <i>S. aromaticum</i>	бутоны buds	$116,07\pm 20,04$	$13,67\pm 2,51$	8,49	$14,64\pm 1,91$	7,92
Ацикловир Acyclovir		$1249,99\pm 398,48$	$1,9\pm 0,48$	$657,88$	$1,71\pm 0,54$	730,98
Отрицательные контроли Negative controls		-	-	-	-	-

Примечание: – нет эффекта; фермент. – ферментированные; отрицательные контроли – поддерживающая питательная среда для культуры клеток и ДМСО в объемах, соответствующих содержанию этого растворителя в исследуемых растительных препаратах, и физиологический раствор для растворения ацикловира; HSV-2 использовали с инфекционным титром 10^2 БОЕ/мл

Note: – there is no effect; negative controls are a supportive nutrient medium for cell culture and DMSO in volumes corresponding to the content of this solvent in the herbal preparations studied, as well as a saline solution for dissolving Acyclovir; HSV-2 was used at an infectious titer of 10^2 PFU/ml

Таким образом, установлено, что ингибирующая активность экстракта ферментированных листьев кипрея по схемам "профилактика" заражения и "лечение" инфицированных клеток сопоставима с активностью контрольных растительных образцов, особенно с черным и зеленым чаем. Наблюдаемое резкое снижение значений SI до 4,00–34,29 по сравнению с результатами по инаktivации вируса (см. табл. 1) является естественным следствием методики эксперимента. Длительная (до 48 часов) экспозиция экстрактов на клетках по схемам "профилактика" и "лечение" инфицированных клеток ведет к повышению неспецифической токсической нагрузки, однако сохранение ингибирующего эффекта ($EC_{50} < 30$ мкг/мл) доказывает способность комплекса флавоноидов, содержащихся в экстракте ферментированных листьев кипрея эффективно блокировать внутриклеточные этапы жизненного цикла HSV-2. В данных условиях контрольный препарат (ацикловир) показал самую высокую эффективность $1,9 \pm 0,48$ и $1,71 \pm 0,54$ мкг/мл (табл. 2), что связано с его специфическим механизмом действия.

В обзоре Šudomova с соавт. 2023 г. сообщается, что флавоноиды разных растений влияют не только на прикрепление вирусов простого герпеса к клеткам хозяина и проникновение в клетку, но и на процессы репликации вирусной ДНК внутри инфицированной клетки, латентность этих патогенов и их реактивацию. Кроме того, авторы отмечают, что прогресс в изучении флавоноидов в контексте HSV-2, в отличие от HSV-1, пока был незначительным [29]. Например, установлено, что флавоноид вогонин, выделенный из корня шлемника байкальского (*Scutellaria baicalensis*, Lamiales), при концентрации 100 мМ подавлял цитопатический эффект, вызванный HSV-2 на этапе после проникновения в инфицированную клетку Vero и снижал транскрипцию вирусной мРНК, синтез вирусных белков и титр инфекционных частиц [35]. Флавоны, в частности апигенин и лютеолин, извлеченные из хлороформного экстракта листьев ариземы извилистой (*Arisaema tortuosum* (Wall.) Schott, Araceae), были идентифицированы как ингибиторы репликации HSV-2 с $EC_{50} = 0,05$ и $0,41$ мкг/мл, соответственно, снижающие "урожай" вирусного потомства в инфицированных клетках Vero и распространение его от клетки к клетке [36]. Флавоноид изорамнетин, получаемый из коммерческого стандартизированного сухого экстракта листьев гинкго двулопастного (*Ginkgo biloba* L., Ginkgoaceae) значительно снижал (с $IC_{50} = 7,08$ мкг/мл) инфекцию, вызванную HSV-2, подавляя репликацию вирусной ДНК в клетках линии A549 [37]. Показано, что флавоноид кумарон Е, выделенный из коры корня шелковицы белой (*Morus alba* L., Moraceae), способен подавлять репликацию HSV-2 в инфицированных клетках Vero с $EC_{50} = 1,61$ мкг/мл. По данным анализа *in silico*, этот противовирусный эффект объясняется взаимодействием молекул кумарона и вирусной протеазы. Кроме того, предполагается, что активность этого флавоноида обусловлена наличием гидроксильной группы в положении С-4' [38]. Протокатеховая кислота, выделенная из цветков гибискуса сабдариффа (*Hibiscus sabdariffa* L., Malvaceae), ингибировала репликацию ДНК HSV-2 в клетках Vero при $EC_{50} = 0,92$ мкг/мл, что оказалось даже эффективнее действия ацикловира с

$EC_{50} = 1,43$ мкг/мл [39]. Недавно, при исследовании сухих этанольных экстрактов разных видов полыни против HSV-2 с титром 10^2 БОЕ/мл по схемам "профилактика" заражения и "лечение" инфицированных клеток, мы обнаружили достаточно высокую ингибирующую активность этих растительных препаратов в диапазоне EC_{50} от $13,67 \pm 2,50$ мкг/мл до $218,75 \pm 40,09$ мкг/мл в зависимости от вида и части растения (лист, соцветие или стебель), использованного для экстрагирования [26].

3. Определение БАВ в экстрактах кипрея и препаратов сравнения методом ВЭЖХ

Согласно литературным данным, кипрей является богатым источником флавоноидов [2; 5; 6; 7; 13], часть из которых удалось идентифицировать в настоящей работе. Как показал анализ хроматограмм при длинах волн 272 нм (рис. 2, 3, 4) – для всех фенольных соединений, включая флавоноиды, 350 и 355 нм (рис. 5, 6, 7) для выявления флавоноидов и 254 нм для выявления флавонолов (рис. 8, 9, 10), ферментированные листья кипрея содержат большее количество флавоноидов (девять соединений), тогда как неферментированное сырье (листья) – шесть соединений, а стебель – пять. Во всех образцах кипрея выявлен доминирующий пик, который идентифицирован как флавоноид цинарозид с максимумами поглощения 256 и 355 нм (табл. 3). Содержание цинарозида в сухом сырье ферментированных листьев, исходных листьев и стеблей составляет 1,86; 2,51 и 1,04 % соответственно, т.е. оказалось, что наибольшее его количество свойственно сухому этанольному экстракту обычных сухих листьев кипрея (табл. 3).

Цинарозид (лютеолин-7-О-глюкозид) – это флавоноид, который выделяют из нескольких видов растений, относящихся к семействам Зонтичные (Apiaceae), Злаки (Poaceae), Яснотковые (Lamiaceae), Пасленовые (Solanaceae), Имбирные (Zingiberaceae), Астровые (Asteraceae) и другим. Его можно получить из семян, корней, стеблей, листьев, коры, цветов, плодов, надземных частей и всего растения этих видов. Ряд исследований показал, что цинарозид может оказывать благотворное влияние при различных патологиях, т.к. обладает антибактериальным, противогрибковым, противолейшманиальным, антиоксидантным, гепатопротекторным, противодиабетическим, противовоспалительным и противоопухолевым действием [40]. Виртуальный скрининг активных компонентов традиционной китайской медицины для лечения COVID-19 (на основе молекулярного докинга и молекулярно-динамического моделирования) показал, что цинарозид, обладает хорошей аффинностью связывания с несколькими мишенями SARS-CoV-2 – основной протеазой (Mpro/3CL), нуклеокапсидным белком (N), РНК-зависимой РНК-полимеразой (RDRP) и спайковым белком (S), который взаимодействует с клеточными рецепторами [41]. Цинарозид эхинацеи узколистной (*Echinacea angustifolia* DC, Asteraceae) демонстрирует высокую аффинность к аллостерическому сайту RDRP вируса Зика (ZIKV, Flaviviridae) [42]. Данных об антигерпетической активности цинарозида и его содержании в экстрактах *E. angustifolia* в научной литературе не обнаружено.

Таблица 3. Результаты ВЭЖХ анализа экстрактов кипрея
Table 3. Results of HPLC analysis of *E. angustifolium* extracts

Экстракты кипрея Extracts of <i>E. angustifolium</i>	Tr, мин Tr, min	λ, нм λ, nm	Площадь пика, % Peak area, %	Содержание флавоноидов в сух. образце, % Content of flavonoids in the dry sample, %	Соединение Compounds
Ферментированные листья Fermented leaves Σ3,65 %	18.160	254/366	4.3452	0,72	НИФ / UNF
	19.016	256/355	11.2823	1,86	Цинарозид / Cynaroside
	19.819	256/353	2.1018	0,35	НИФ / UNF
	21.391	256/352	0.3696	0,06	Кверцетрин гидрат Guercetrin hydrate
	23.098	259/352	0.1845	0,03	НИФ UNF
	23.861	265/348	1.5650	0,26	НИФ / UNF
	25.073	265/341	0.1402	0,02	Хризин-7-О-глюкозид Chrysin-7-O-glucoside
	33.178	255/368	0.8749	0,14	произв. кверцетина A derivative of quercetin
	34.745	253/349	1.2938	0,21	Лютеолин / Luteolin
Листья Leaves Σ3,99 %	14.561	264/355	0.6527	0,28	НИФ / UNF
	16.341	266/354	0.1162	0,05	НИФ / UNF
	18.202	254/358	0.4141	0,18	Гиперозид/рутин/ изокверцетрин Hyperoside/Rutin/ Isoquercetrin
	19.089	256/355	5.9228	2,51	Цинарозид / Cynaroside
	20.082	257/354	1.4788	0,63	НИФ / UNF
	23.931	266/343	0.8003	0,34	НИФ / UNF
	16.246	257/352	0.9911	0,25	НИФ / UNF
	18.146	254/366	1.4017	0,35	НИФ / UNF
	19.005	256/355	4.1279	1,04	Цинарозид / Cynaroside
Стебли Stems Σ2,17 %	20.019	257/352	1.3666	0,34	НИФ / UNF
	23.834	266/346	0.7436	0,19	НИФ / UNF

Примечание: НИФ – неидентифицированный флавоноид; цветом выделены строки для отражения присутствия одних и тех же соединений в исследованных экстрактах

Note: UNF – unidentified flavonoid; lines are highlighted in colour to reflect the presence of the same compounds in the extracts studied

В экстракте листьев кипрея нами выявлен пик флавоноида с Tr 18.202 мин и λ 254/358 нм, который, предположительно по данным ВЭЖХ, может соответствовать близким по хроматографическому поведению флавоноидам – гиперозиду, рутину либо изокверцетрину (табл. 3). В литературе имеются сведения о содержании в кипрее этих флавоноидов [16]. В процессе ферментации, по всей вероятности, происходит изменение химического состава листьев, т.к. в экстракте ферментативных листьев выявлены дополнительные пики кверцетрин гидрата (производного кверцетина) и флавонов - хризин-7-О-глюкозида и 0,21 % лютеолина, которые отсутствовали в листьях до их ферментации (табл. 3).

Лютеолин содержится в различных цветах, травах, овощах и специях. Он играет важную роль в защите растений, например от ультрафиолетового излучения, частично поглощая ультрафиолетовые лучи спектра А и В. Таким образом, лютеолин может снижать негативное фотобиологическое воздействие на кожу, выступая в качестве первой линии защиты. Кроме того, лютеолин оказывает антиоксидантное и противовоспалительное действие на кератиноциты и фибробласты, а также на некоторые иммунные клетки (например, макрофаги, тучные клетки, нейтрофилы, дендритные клетки и Т-клетки), подавляя выработку провоспалительных медиаторов. Результаты

исследований лютеолина *in vitro* и *in vivo* в области старения кожи и рака кожи, заживления ран, а также воспалительных заболеваний кожи, включая псориаз, контактный дерматит и атопический дерматит, показали, что этот флавоноид может стать перспективной молекулой для разработки топических и системных препаратов для лечения воспалительных заболеваний кожи [43]. Есть данные, что у мышей лютеолин облегчает течение синдрома сухого глаза, модулируя сигнальный путь PTGS2/NF-κB, уменьшая воспаление и повреждение роговицы, что указывает на его терапевтический потенциал при воспалительных заболеваниях глаз [44]. Интересен факт о высокой ингибирующей активности растворимой в хлороформе фракции экстракта листьев ариземы курчавой (*Arisaema tortuosum*, Araceae) с индексом селективности 758 и лютеолина, выделенного из этой фракции со значением EC₅₀, равном 0,41 мкг/мл по схеме "лечение" клеток, инфицированных вирусом простого герпеса 2-го типа [45].

В исследованных образцах кипрея выявлен ряд неидентифицированных соединений, максимумы поглощения которых свойственны флавоноидам. При длине волны 272 нм видно, что на хроматограмме в полярной области присутствует мажорный пик в диапазоне 4,55–10,00 мин, площади которого в экстрактах ферментированных листьев, сухих листьев и

стеблей составляют соответственно 75,40; 87,90; 72,19 % от общей суммы пиков (рис. 2, 3, 4). При использовании в качестве аналитической длины волны 350 нм этот пик минимизируется (рис. 5, 6, 7), что свидетельствует об отсутствии второго ароматического кольца, что свойственно простым фенольным соединениям. Предположительно, этот мажорный неразрешенный пик при (длине волны 272 нм) (рис. 2, 3, 4) представляет собой смесь не разделенных простых фенолов – фенолкарбоновых кислот – галловой, хлорогеновой и других соединений, которые имеют схожую полярность

и близкие УФ-спектры (максимумы поглощения в районе 270–280 нм).

При сравнении с временами удерживания и поглощением пиков экспериментальных экстрактов и стандартов, ни в одном из образцов кипрея не выявлены кверцетин, мирицетин и кемпферол. Пик с Тг 33.178 мин, вероятно, соответствует производному кверцетина (табл. 3), т.к. для стандарта кверцетина в условиях анализа характеристики следующие: Тг 31.870 мин и длины волн 255/369 нм.

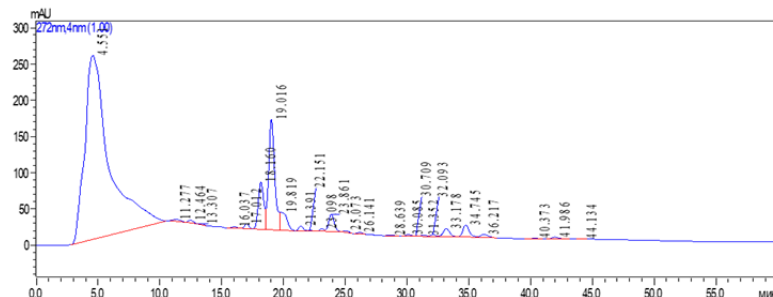


Рисунок 2. Хроматограмма экстракта ферментированных листьев *E. angustifolium* при длине волны 272 нм
Figure 2. Chromatogram of the extract of fermented leaves of *E. angustifolium* at a wavelength of 272 nm

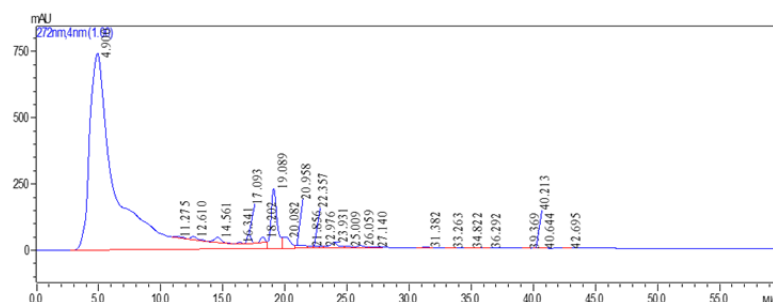


Рисунок 3. Хроматограмма экстракта листьев *E. angustifolium* при длине волны 272 нм
Figure 3. Chromatogram of extract of leaves of *E. angustifolium* at a wavelength of 272 nm

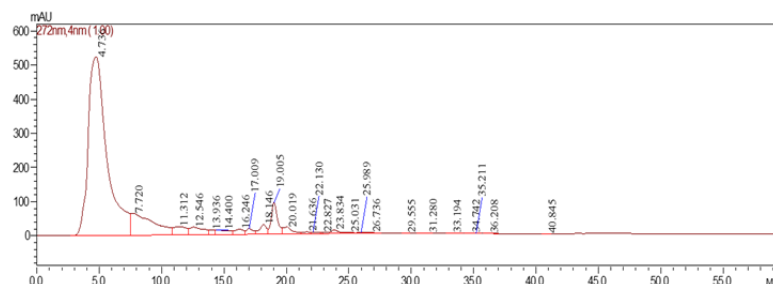


Рисунок 4. Хроматограмма экстракта стеблей *E. angustifolium* при длине волны 272 нм
Figure 4. Chromatogram of extract of stem of *E. angustifolium* at a wavelength of 272 nm

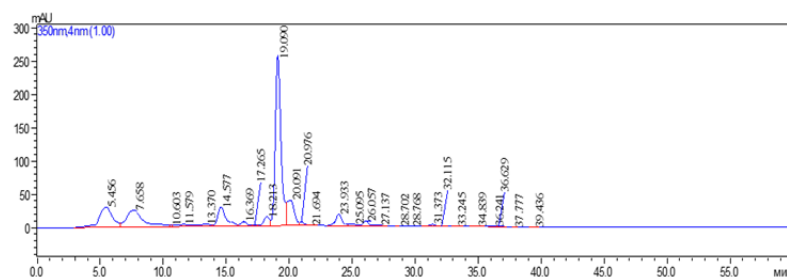


Рисунок 5. Хроматограмма экстракта листьев *E. angustifolium* при длине волны 350 нм
Figure 5. Chromatogram of extract of leaves of *E. angustifolium* at a wavelength of 350 nm

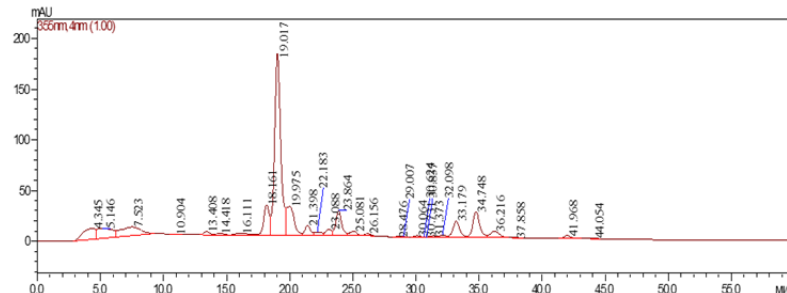


Рисунок 6. Хроматограмма экстракта ферментированных листьев *E. angustifolium* при длине волны 355 нм
Figure 6. Chromatogram of extract of fermented leaves of *E. angustifolium* at a wavelength of 355 nm

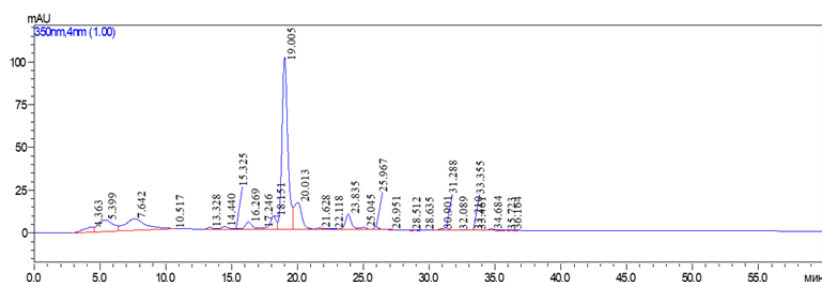


Рисунок 7. Хроматограмма экстракта стеблей *E. angustifolium* при длине волны 350 нм
Figure 7. Chromatogram of extract of stem of *E. angustifolium* at a wavelength of 350 nm

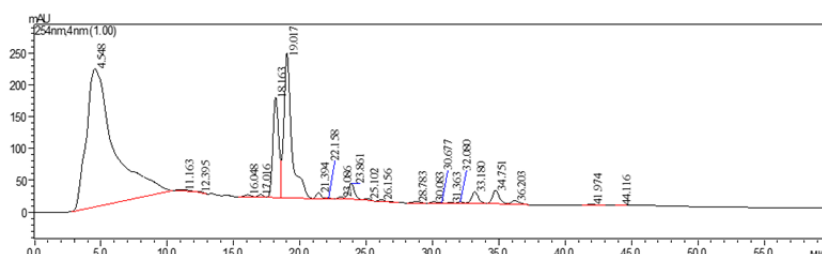


Рисунок 8. Хроматограмма экстракта ферментированных листьев *E. angustifolium* при длине волны 254 нм
Figure 8. Chromatogram of extract of fermented leaves of *E. angustifolium* at a wavelength of 254 nm

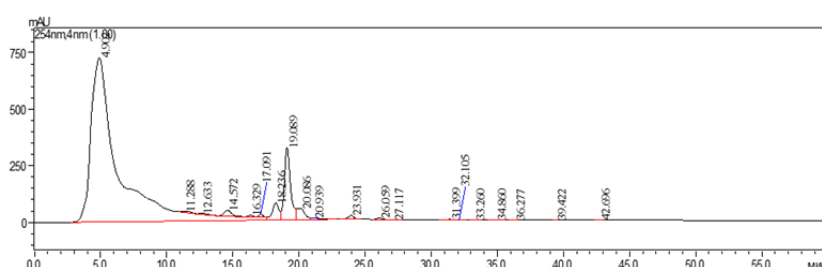


Рисунок 9. Хроматограмма экстракта сухих листьев *E. angustifolium* при длине волны 254 нм
Figure 9. Chromatogram of extract of dry leaves of *E. angustifolium* at a wavelength of 254 nm

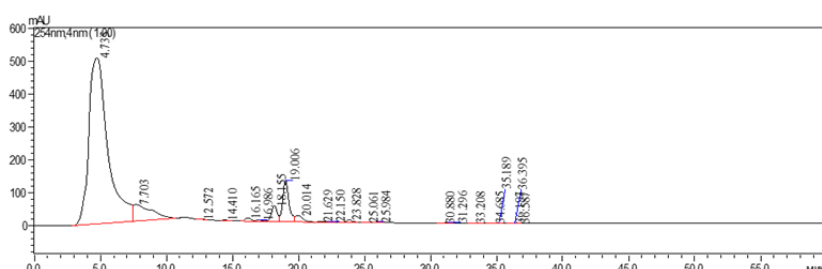


Рисунок 10. Хроматограмма экстракта стеблей *E. angustifolium* при длине волны 254 нм
Figure 10. Chromatogram of extract of stem of *E. angustifolium* at a wavelength of 254 nm

Ранее мы показали хроматограммы этанольных экстрактов – черного чая из Индии, зеленого чая из Китая, чаги, специи гвоздики и коротко описали фенольные соединения, выявленные при длине волны 272 нм [24]. В данной работе представлен подробный профиль этих соединений. Так, в частности, в черном и зеленом чае, которые являются ферментированными продуктами чайного листа, состав фенольных соединений оказался более представительным по сравнению с экстрактом ферментированных листьев кипрея – 19 и 18 соединений, соответственно (табл. 4). В экстрактах черного и зеленого чая содержится свободная галловая кислота – 6,70 и 3,04 %, соответственно, и ее производные, а также ряд простых фенолов и флавонов – производных апигенина, ориентина и кемпферола. Оба экстракта содержат флавоноид – шатофид – 2,70 % в черном чае и 1,87 % в зеленом чае. Кроме того, на хроматограммах этанольных экстрактов черного и зеленого чая проявился широкий пик по времени удерживания 51.39–52.11 мин (с $\lambda=366/272/251$ и $366/272/250$ нм), который, скорее всего, является комплексом производных кемпферола и кверцетина с содержанием 24,07 и 32,95 %, соответственно. Катехин, катехин гидрат и эпикатехин в этанольных экстрактах черного и

зеленого чая не обнаружены при сравнении с соответствующими маркерами для ВЭЖХ.

В этанольном экстракте чаги обнаружено фенольное соединение (с содержанием 0,56 %) с характеристиками $T_r=8.03$ мин и $\lambda=274$ нм, свойственными галловой кислоте. В этанольном экстракте специи гвоздики выявлено четыре флавоноида, один из которых идентифицирован как кверцитрин гидрат, другой – предположительно, рутин или изокверцитрин (которые имеют близкие времена удерживания и одинаковые максимумы поглощения 255/355 нм) (табл. 4).

Многочисленные исследования подтверждают, что флавоноиды, такие как, например, апигенин, лютеолин, кемпферол, мирицетин, кверцетин, эпикатехин и др., обладают доказанной противовирусной активностью [46]. Также хорошо изучены и многочисленные полезные свойства галловой кислоты (мономер сложных полифенолов – галлотанинов), такие как противомикробное, антиоксидантное, противораковое, противовоспалительное и противовирусное действие [47]. Эта кислота обладает противовирусной активностью широкого спектра, воздействуя на различные типы патогенов с помощью множества механизмов. Одним из примечательных

аспектов противовирусной активности является ее способность подавлять репликацию, например, вируса псевдобешенства [48]. Кроме того, 16 производных галловой кислоты были тестированы *in silico* на совместимость взаимодействия молекул с пятью

важнейшими неструктурными белками SARS-CoV-2 – nsр14, nsр13, nsр12, nsр5 и nsр3, которые считаются перспективными мишенями для низкомолекулярных ингибиторов [49].

Таблица 4. Результаты ВЭЖХ анализа этанольных экстрактов чая, чаги и гвоздики

Table 4. Results of HPLC analysis of ethanol extracts of tea, chaga and *S. aromaticum*

Экстракты Extracts	T _r , мин Tr, min	λ, нм λ, nm	Площадь пика, % Peak area, %	Содержание флавоноидов в сух. образце, % Content of flavonoids in a dry sample, %	Соединения Compounds
Черный чай* <i>Camellia sinensis</i> *	1.605	264/342	1.5817	1,25	НИФ / UNF
	8.168	273	29.3410	6,70	Галловая кислота Gallic Acid
	12.818	268/336	3.2977	2,61	Флаван шафтозид Flavone Schaftoside
	15.983	267/338	1.8734	1,53	Произв. апигенина Apigenin derivative
	16.779	264/341	1.4543	1,19	Произв. ориентина Orientin derivative
	18.286	263/346	2.1282	1,74	Произв. ориентина Orientin derivative
	19.019	263/346	0.5840	0,48	Произв. ориентина Orientin derivative
	19.529	263/346	1.6931	1,38	Произв. ориентина Orientin derivative
	20.481	264/343	0.9432	0,77	Произв. ориентина Orientin derivative
	21.475	264/338	0.9799	0,80	Произв. апигенина Apigenin derivative
	22.862	262/336	3.5385	2,89	Произв. апигенина Apigenin derivative
	23.926	263/337	1.1970	0,97	Произв. апигенина Apigenin derivative
	24.907	263/337	0.9070	0,74	Произв. апигенина Apigenin derivative
	30.059	267/337	0.0407	0,01	Произв. апигенина Apigenin derivative
	32.263	267/337	0.1352	0,11	Произв. апигенина Apigenin derivative
	33.957	267/338	0.1986	0,16	Произв. апигенина Apigenin derivative
	35.243	269/362	0.8165	0,54	Произв. кемпферола Kaempferol derivative
	36.223	267/346	0.0480	0,04	Произв. ориентина Orientin derivative
	52.109	366/272/251	36.1101	24,07П	Произв. кемпферола Kaempferol derivative
				Σ41,36 без галловой кислоты / gallic acid-free	
Зеленый чай** <i>C. sinensis</i> **	8.130	273	12.7478	3,04	Галловая кислота Gallic Acid
	9.033	274	17.4715	4,17	Произв. галловой кислоты The derivative of Gallic Acid
	12.312	272/328	2.1908	1,87	Флаван шафтозид Flavone Schaftoside
	14.416	275/347	5.1434	4,40	Произв. ориентина Orientin derivative
	15.711	268/343	0.7560	0,65	Произв. ориентина Orientin derivative

	16.468	258/352	1.4460	1,01	НИФ / UNF
	18.098	264/348	0.6219	0,53	Произв. ориентина Orientin derivative
	18.638	266/347	0.4470	0,38	Произв. ориентина Orientin derivative
	19.323	264/348	0.3540	0,30	Произв. ориентина Orientin derivative
	20.410	265/343	0.6438	0,55	Произв. ориентина Orientin derivative
	21.065	263/336	0.4669	0,40	Произв. апигенина Apigenin derivative
	22.548	264/337	0.1551	0,13	Произв. апигенина Apigenin derivative
	27.528	267/337	0.0111	0,02	Произв. апигенина Apigenin derivative
	37.419	268/362	0.0246	0,02	НИФ / UNF
	38.627	268/343	0.0285	0,02	Произв. ориентина Orientin derivative
	39.825	268/366	0.0022	0,002	Произв. кемпферола Kaempferol derivative
	40.867	268/366	0.0022	0,002	Произв. кемпферола Kaempferol derivative
	51.665	366/272/251	47.2314	32,95	Произв. кемпферола Kaempferol derivative
	Σ42,83 без галловой кислоты / gallic acid-free				
Чага <i>I. obliquus</i>	8.033	274	15.1110	0,56	Галловая кислота Gallic Acid
	17.690	254/366	7.4375	1,97	НИФ / UNF
Гвоздика <i>S. aromaticum</i>	18.609	255/355	5.9007	1,56	Рутин / Изокверцетрин Rutine/Isoquercetrin
	23.382	265/346	0.478	0,43	НИФ / UNF
	24.110	255/346	0.8150	0,22	Кверцетрин гидрат Guercetrin hydrate

Примечание: черный чай* – сырье из Индии; зеленый чай** – сырье из Китая; НИФ – неидентифицированный флавоноид; цветом выделены строки для отражения присутствия одних и тех же соединений в исследованных экстрактах; произв. – производное (derivat); ? – под вопросом

Note: *Camellia sinensis** – raw materials from India; *C. sinensis*** – raw materials from China;

UNF – unidentified flavonoid; lines are highlighted in colour to reflect the presence of the same compounds in the extracts studied; ? – questionable

In vitro была показана вирулицидная активность галловой кислоты против HSV-2 [50] и сульфатированного рутина [51]. Флавоны шафтозид – гликозид апигенина, ингибирует протеазы 3CL и PL SARS-CoV-2 со значениями IC₅₀ 1,73±0,22 и 3,91±0,19 мкмоль/л соответственно, а также подавляет инфекционный вирус в клетках Vero E6 со значением EC₅₀=11,83±3,23 мкмоль/л по схеме "лечение" инфицированных клеток. Кроме того, противовоспалительное действие шафтозида было подтверждено на мышах с острым повреждением легких, вызванным липополисахаридами [52].

4. Определение БАВ в экстрактах кипрея и растительных препаратов сравнения методом спектрофотометрии

По содержанию полифенольных соединений в пересчете на катехин из приготовленных нами экстрактов лидером оказался черный чай (82,50±8,3 %). Остальные препараты можно расположить в следующем порядке (по убывающей): зеленый чай (54,80±5,4 %), специя гвоздика (52,30±5,2 %), кипрей

лист (45,60±4,6 %) и ферментированные листья кипрея (44,10±4,7 %). В этанольном экстракте чаги наименьшее содержание полифенольных соединений – 15,7±1,8 %.

Содержание оксикоричных кислот в пересчете на хлорогеновую кислоту сухой этанольный экстракт обычных листьев кипрея (4,30±0,29 %) немного превосходит по содержанию в экстрактах как ферментированных листьев этого растения (3,10±0,27 %), так и черного и зеленого чая (3,30±0,3 и 2,40±0,23 %, соответственно), специи гвоздики (3,30±0,27 %) и чаги (2,3±0,17 %).

Можно отметить, что экстракт обычных листьев кипрея по содержанию суммы флавоноидов в пересчете на рутин наиболее насыщенный (13,49±0,69 %) из всех исследованных растительных препаратов, а экстракт ферментированных листьев кипрея (8,74±0,58 %) почти не уступает экстракту черного чая (9,03±0,62 %). Остальные экстракты можно расположить в следующем порядке (по убывающей): специя гвоздика (4,91±0,36 %), чага (3,43±0,19 %) и зеленый чай (2,00±0,14 %) (рис. 5, рис. 11).

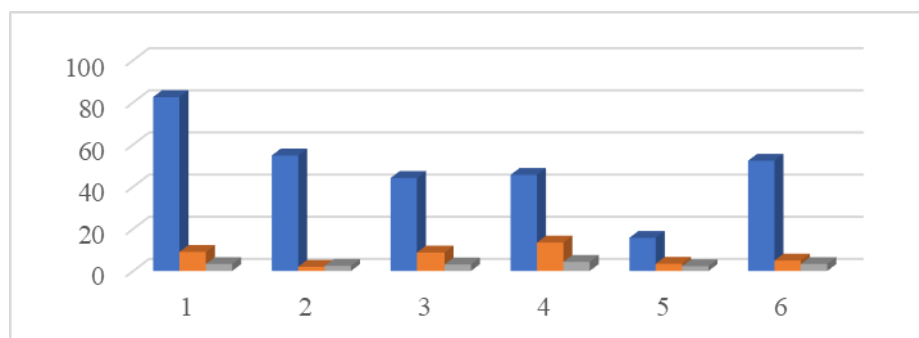


Рисунок 11. Содержание биологически активных соединений в сухих этанольных экстрактах

Примечание: метод прямой и дифференциальной спектрофотометрии; значения представлены в процентах; синий столбец – полифенольные соединения (в пересчете на катехин); оранжевый столбец – флавоноиды (в пересчете на рутин); серый столбец – оксикоричные соединения (в пересчете на хлорогеновую кислоту). 1 – черный чай из Индии; 2 – зеленый чай из Китая; 3 – ферментированные листья кипрея; 4 – кипрей лист; 5 – чага; 6 – гвоздика

Figure 11. The content of biologically active compounds in dry ethanol extracts

Note: direct and differential spectrophotometry method; values are presented as percentages; blue column – polyphenolic compounds (in terms of Catechin); orange column – flavonoids (in terms of Rutin); gray column – oxycoric compounds (in terms of chlorogenic acid). 1 – black tea from India; 2 – green tea from China; 3 – fermented leaves of *E. angustifolium*; 4 – leaves of *E. angustifolium*; 5 – chaga (*I. obliquus*); 6 – *S. aromaticum*

Таким образом, на основании представленных результатов можно сделать вывод о том, что, несмотря на отличие спектра БАВ и их содержания в экстрактах кипрея узколистного от экстрактов чая (черного и зеленого), сухие этанольные препараты этого растения (скорее всего, комплекс полифенольных соединений) обладают выраженным вирулицидным действием и способны блокировать внутриклеточные этапы жизненного цикла вируса простого герпеса 2-го типа. Эти результаты могут стать основой для разработки эффективных профилактических и/или терапевтических препаратов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

От всех авторов статьи благодарность зав. лаборатории фитохимии Сибирского ботанического сада ТГУ, доктору химических наук Зибаревой Л. Н. за проведение анализа БАВ экстрактов высокоэффективной жидкостной хроматографией. Работа выполнена при финансовой поддержке и по государственному заданию НИИ вирусологии ФИЦ ФТМ №125031903984-1. Исследование проводилось по теме "Поиск, изучение и внедрение новых лекарственных средств на основе природных и синтетических биологически активных соединений и совершенствование лекарственного обеспечения населения" ФГБОУ ВО "Новосибирский государственный медицинский университет".

ACKNOWLEDGMENT

The authors express their gratitude to Doctor of Chemical Sciences L.N. Zibareva for conducting HPLC analysis at the Laboratory of Phytochemistry of the Siberian Botanical Garden of National Research Tomsk State University. The work was carried out with financial support and according to the state assignment of the Research Institute of Virology of the FRCFTM No. 125031903984-1. The research was conducted on the topic "Search, Study and Introduction of New Medicines Based on Natural and Synthetic Biologically Active Compounds and Improvement of Drug Supply to the Population" by Novosibirsk State Medical University.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Kyriakou S., Tragkolia V., Paraskevaidis I., Plioukas M., Trafalis D.T., Franco R., Pappa A., Panayiotidis M.I. Chemical Characterization and Biological Evaluation of *Epilobium parviflorum* Extracts in an In Vitro Model of Human Malignant Melanoma // *Plants* (Basel). 2023. V. 12. N 8. Article id: 1590. DOI: 10.3390/plants12081590
- Kozhantayeva A., Iskakova Z., Ibrayeva M., Sapiyeva A., Arkharbekova M., Tashenov Y. Phytochemical Insights and Therapeutic Potential of *Chamaenerion angustifolium* and *Chamaenerion latifolium* // *Molecules*. 2025. V. 30. N 5. Article id: 1186. DOI: 10.3390/molecules30051186
- Olennikov D.N., Kirillina C.S., Chirikova N.K. Water-Soluble Melanoidin Pigment as a New Antioxidant Component of Fermented Willowherb Leaves (*Epilobium angustifolium*) // *Antioxidants* (Basel). 2021. V. 10. N 8. Article id: 1300. DOI: 10.3390/antiox10081300
- Nowak A., Cybulska K., Makuch E., Kucharski Ł., Rózewicka-Czabańska M., Prowans P., Czapla N., Bargiel P., Petriczko J., Klimowicz A. In Vitro Human Skin Penetration, Antioxidant and Antimicrobial Activity of Ethanol-Water Extract of Fireweed (*Epilobium angustifolium* L.) // *Molecules*. 2021. V. 26. N 2. Article id: 329. DOI: 10.3390/molecules26020329
- Karakaya S., Süntar I., Yakinci O.F., Sytar O., Ceribasi S., Dursunoglu B., Ozbek H., Guvenalp Z. In vivo bioactivity assessment on *Epilobium* species: A particular focus on *Epilobium angustifolium* and its components on enzymes connected with the healing process // *J. Ethnopharmacol.* 2020. V. 262. Article id: 113207. DOI: 10.1016/j.jep.2020.113207
- Царёв В.Н., Базарнова Н.Г., Дубенский М.М. Кипрей узколистный (*Chamaenerion angustifolium* (L.) химический состав, биологическая активность (обзор) // *Химия растительного сырья*. 2016. N 4. С. 15–26. DOI: 10.14258/jcpr.2016041549
- Hryć B., Kljakić A.C., Cetiz M.V., Ak G., Zengin G., Senkardes I., Świątek Ł., Kunecki M., Salwa K. et al. Network pharmacology of *Epilobium angustifolium* metabolites in relation to *in vitro* analyses of its extracts // *Fitoterapia*. 2025. V. 183. Article id: 106552. DOI: 10.1016/j.fitote.2025.106552
- Nowak A., Zielonka-Brzezicka J., Perużyńska M., Klimowicz A. *Epilobium angustifolium* L. as a Potential Herbal Component of Topical Products for Skin Care and Treatment-A Review // *Molecules*. 2022. V. 27. N 11. Article id: 3536. DOI: 10.3390/molecules27113536
- Piwowski J.P., Bobrowska-Korczak B., Stanisławska I., Bielecki W., Wrzesien R., Granica S., Krupa K., Kiss A.K. Evaluation of the Effect of *Epilobium angustifolium* Aqueous Extract on LNCaP Cell Proliferation in *In Vitro* and *In Vivo* Models // *Planta Med.* 2017. V. 83. N 14-15. P. 1159-1168. DOI: 10.1055/s-0043-109372
- Dreger M., Adamczak A., Foksowicz-Flaczyk J. Antibacterial and Antimycotic Activity of *Epilobium angustifolium* L. Extracts: A Review

- // Pharmaceuticals (Basel). 2023. V. 16. N 10. Article id: 1419. DOI: 10.3390/ph16101419
11. Esposito C., Santarcangelo C., Masselli R., Buonomo G., Nicotra G., Insolia V., D'Avino M., Caruso G., Buonomo A.R., Sacchi R. et al. *Epilobium angustifolium* L. extract with high content in oenothien B on benign prostatic hyperplasia: A monocentric, randomized, double-blind, placebo-controlled clinical trial // Biomed Pharmacother. 2021. V. 138. Article id: 111414. DOI: 10.1016/j.biopha.2021.111414
 12. Бабенко А., Турмагамбетова А.С., Алексюк М.С. Зайцева И.А., Соколова Н.С., Боговянский А.П., Березин В.Э. Противовирусная активность *Chamérion angustifólium* или *Epilóbium angustifolium* // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. V. 6. P. 81–82. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=5193> (дата обращения: 19.11.2025)
 13. Tahara Y., Fujita M., Zhang T., Wang D., Tateishi H., Togami A., Nyame P., Terasawa H., Monde N., Appiah-Kubi J. et al. Turkish Plants, Including Quercetin and Oenothien B, Inhibit the HIV-1 Release and Accelerate Cell Apoptosis // Biol Pharm Bull. 2023. V. 46. N 11. P. 1535–1547. DOI: 10.1248/bpb.b23-00328
 14. Kamkin V., Kamarova A., Shalabayev B., Kussainov A., Anuarbekov M., Abeuov S. Comparative Analysis of the Efficiency of Medicinal Plants for the Treatment and Prevention of COVID-19 // Int J Biomater. 2022. N 2022. P. 5943649. DOI: 10.1155/2022/5943649
 15. Казачинская Е.И., Чепурнов А.А., Кононова Ю.В., Шелемба А.А., Романюк В.В., Магомедов М.Г., Шестопапов А.М. Ингибирующая активность чайных композиций и их составляющих ингредиентов на репликацию SARS-CoV-2 *in vitro* // Юг России: экология, развитие. 2022. Т. 17. N 2. С. 76–90. DOI: 10.18470/1992-1098-2022-2-76-9
 16. Uminska K., Korinek M., Ivanauskas L., El-Shazly M., Georgiyants V., Chen Y.-L., Shukla M.K., Renadi S., Hwang T.-L., Chang F.-R. et al. Assessment of the Phenolics Content in *Epilobium angustifolium* and *Epilobium hirsutum* Extracts and Their Pharmacological Activity // Arch Pharm (Weinheim). 2025. V. 358. N 5. Article id: e12001. DOI: 10.1002/ardp.202400765
 17. Евсеева С.Б., Сысцев Б.Б. Экстракты растительного сырья как компоненты косметических и наружных лекарственных средств: ассортимент продукции, особенности получения (Обзор) // Фармация и фармакология. 2016. Т. 4. N 3(16). С. 4–37. DOI: 10.19163/2307-9266-2016-4-3-4-37
 18. Казачинская Е.И., Чепурнов А.А., Шелемба А.А. Гусейнова С.А., Магомедов М.Г., Кононова Ю.В., Романюк В.В., Шестопапов А.М. Ингибирующая активность водных экстрактов чайных композиций, индивидуальных ингредиентов для их составления и некоторых растений на репликацию вируса простого герпеса 2 типа *in vitro* // Юг России: экология, развитие. 2022. Т. 17. N 3. С. 135–152. DOI: 10.18470/1992-1098-2022-3-135-152
 19. Казачинская Е.И., Чепурнов А.А., Романюк В.В., Романюк И.В., Кононова Ю.В., Шестопапов А.М. Способ получения водного экстракта кипрея узколистного *Epilobium angustifolium* L., проявляющего ингибирующую активность против коронавируса SARS-CoV-2 и вируса простого герпеса 2-го типа *in vitro* // Патент на изобретение RU 2788172 C1, 17.01.2023.
 20. Stamos J.D., Lee L.H., Taylor C., Elias T., Adams S.D. In Vitro and In Silico Analysis of the Inhibitory Activity of EGCG-Stearate against Herpes Simplex Virus-2 // Microorganisms. 2022. V. 10. N 7. Article number: 1462. DOI: 10.3390/microorganisms10071462
 21. Казачинская Е.И., Романова В.Д., Иванова А.В., Чепурнов А.А., Муртазалиева З.А., Кононова Ю.В., Шауло Д.Н., Романюк В.В., Шестопапов А.М. Ингибирующая активность сухих этанольных экстрактов *Artemisia* spp. на репликацию SARS-CoV-2 *in vitro* // Юг России: экология, развитие. 2022. Т. 17. N 4. С. 111–129. DOI: 10.18470/1992-1098-2022-4-111-129
 22. Benzekri R., Limam F., Bouslama L. Combination effect of three anti-HSV-2 active plant extracts exhibiting different modes of action // Adv. Tradit. Med. 2020. N 20. P. 223–231. DOI: 10.1007/s13596-020-00430-0
 23. Liu P., Zhong L., Xiao J., Hu Y., Liu T., Ren Z., Wang Y., Zheng K. Ethanolic extract from *Artemisia argyi* leaves inhibits HSV-1 infection by destroying the viral envelope // Virol J. 2023. V. 20. N 1. P. 8. DOI: 10.1186/s12985-023-01969-5
 24. Казачинская Е.И., Зибарева Л.Н., Чепурнов А.А., Иванова А.В., Кононова Ю.В., Шауло Д.Н., Романюк В.В., Шестопапов А.М. Эффективность сухих этанольных экстрактов *Agrimonia pilosa* Ledeb. и некоторых других растений подсемейства *Rosoideae* семейства *Rosaceae* для инактивации SARS-CoV-2 и вируса простого герпеса второго типа // Химия растительного сырья. 2025. N 2. С. 286–299. URL: <https://journal.asu.ru/cw/article/view/14782> (дата обращения: 19.02.2026)
 25. Hassan S.T.S., Berchova-Bimova K., Šudomova M., Malanik M., Smejkal K., Rengasamy K.R.R. In Vitro Study of Multi-Therapeutic Properties of *Thymus bovei* Benth. Essential Oil and Its Main Component for Promoting Their Use in Clinical Practice // J. Clin. Med. 2018. V. 7. N 9. P. 283. DOI: 10.3390/jcm7090283
 26. Казачинская Е.И., Величко В.В., Романова В.Д., Круглов Д.С., Прокушева Д.Л., Чепурнов А.А., Кононова Ю.В., Фу Л., Шао Ш., Гуляева М.А., Шестопапов А.М. Инактивирующая и ингибирующая активность сухих этанольных экстрактов полыни (*Artemisia* spp.) на вирус простого герпеса второго типа *in vitro* // Юг России: экология, развитие. 2025. Т. 20. N 2. С. 14–36. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-2-2
 27. Казачинская Е.И., Кононова Ю.В., Иванова А.В., Зибарева Л.Н., Чепурнов А.А., Романюк В.В., Бийболатов А.А., Гуляева М.А., Шестопапов А.М. Способ получения водной вытяжки и сухих этанольных экстрактов травы (смесь цветков с листьями) и стебля зверобоя продырявленного (*Hypericum perforatum* L.), обладающих ингибирующей активностью на репликацию коронавируса SARS-CoV-2 *in vitro* // Юг России: экология, развитие. 2023. Т. 18. N 3. С. 103–117. DOI: 10.18470/1992-1098-2023-3-103-117
 28. Величко В.В., Круглов Д.С., Оленников Д.Н., Олешко Е.Д. Фенольные соединения и алкалоиды *Onosma simplicissima* (Boraginaceae), произрастающей в Западной Сибири // Химия растительного сырья. 2025. N 3. С. 133–142. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250316840>
 29. Šudomova M., Hassan S.T.S. Flavonoids with Anti-Herpes Simplex Virus Properties: Deciphering Their Mechanisms in Disrupting the Viral Life Cycle // Viruses. 2023. V. 15. N 12. Article id: 2340. DOI: 10.3390/v15122340
 30. White E.M., Stampfer S.D., Heldwein E.E. Expression, Purification, and Crystallization of HSV-1 Glycoproteins for Structure Determination // Methods Mol Biol. 2020. N 2060. P. 377–393. DOI: 10.1007/978-1-4939-9814-2_23
 31. Cheng H.-Y., Lin T.-C., Yang C.-M., Wang K.-C., Lin C.-C. Mechanism of action of the suppression of herpes simplex virus type 2 replication by pterocarnin A // Microbes Infect. 2004. N 6. P. 738–744. DOI: 10.1016/j.micinf.2004.03.009
 32. Churqui M.P., Lind L., Thörn K., Svensson A., Savolainen O., Aranda K.T., Eriksson K. Extracts of *Equisetum giganteum* L. and *Copaifera reticulata* Ducke show strong antiviral activity against the sexually transmitted pathogen herpes simplex virus type 2 // J. Ethnopharmacol. 2018. N 210. P. 192–197. DOI: 10.1016/j.jep.2017.08.010
 33. Benzekri R., Bouslama L., Papetti A., Hammami M., Smaoui A., Limam F. Anti HSV-2 activity of *Peganum harmala* (L.) and isolation of the active compound // Microb Pathog. 2018. N 114. P. 291–298. DOI: 10.1016/j.micpath.2017.12.017
 34. Donalisio M., Cagno V., Civra A., Gibellini D., Musumeci G., Rittà M., Ghosh M., Lembo D. The traditional use of *Vachellia nilotica* for sexually transmitted diseases is substantiated by the antiviral activity of its bark extract against sexually transmitted viruses // J. Ethnopharmacol. 2018. N 213. P. 403–408. DOI: 10.1016/j.jep.2017.11.039
 35. Chu Y., Lv X., Zhang L., Fu X., Song S., Su A., Chen D., Xu L., Wang Y., Wu Z., et al. Wogonin Inhibits in Vitro Herpes Simplex Virus Type 1 and 2 Infection by Modulating Cellular NF-κB and MAPK Pathways // BMC Microbiol. 2020. V. 20. N 1. P. 227. DOI: 10.1186/s12866-020-01916-2
 36. Rittà M., Marengo A., Civra A., Lembo D., Cagliero C., Kant K., Lal U.R., Rubiolo P., Ghosh M., Donalisio M. Antiviral Activity of a *Arisaema tortuosum* Leaf Extract and Some of Its Constituents against Herpes Simplex Virus Type 2 // Planta Med. 2020. V. 86. P. 267–275. DOI: 10.1055/a-1087-8303

37. Sochocka M., Sobczyński M., Ochnik M., Zwolińska K., Leszek J. Hampering Herpesviruses HHV-1 and HHV-2 Infection by Extract of Ginkgo Biloba (EGb) and Its Phytochemical Constituents // *Front. Microbiol.* 2019. V. 10. Article id: 2367. DOI: 10.3389/fmicb.2019.02367
38. Čulenová M., Sychrová A., Hassan S.T.S., Berchová-Bímová K., Svobodová P., Helclová A., Michnová H., Hošek J., Vasilev H., Suchý P., Kuzminová G., Švajdlénka E., Gajdziok J., Čížek A., Suchý V., Šmejkal K. Multiple In vitro biological effects of phenolic compounds from *Morus alba* root bark // *J Ethnopharmacol.* 2020. N 248. Article id: 112296. DOI: 10.1016/j.jep.2019.112296
39. Hassan S.T.S., Švajdlénka E., Berchová-Bímová K. Hibiscus sabdariffa L. and Its Bioactive Constituents Exhibit Antiviral Activity against HSV-2 and Anti-Enzymatic Properties against Urease by an ESI-MS Based Assay // *Molecules.* 2017. V. 22. N 5. P. 722. DOI: 10.3390/molecules22050722
40. Bouyahya A., Taha D., Benali T., Zengin G., Omari N.E., Hachlafi N.E., Khalid A., Abdalla A.N., Ardianto C., Tan C.S., Ming L.C., Sahib N. Natural sources, biological effects, and pharmacological properties of cynaroside // *Biomed Pharmacother.* 2023. N 161. Article id: 114337. DOI: 10.1016/j.biopha.2023.114337
41. Liu M., Faez I.K., Xiao Y., Wang X., Hu Z., Lai D. Virtual screening of active ingredients of traditional Chinese medicine in treating COVID-19 based on molecular docking and molecular dynamic simulation // *Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Za Zhi.* 2022. V. 39. N 5. P. 1005–1014. DOI: 10.7507/1001-5515.202205021
42. El-Daly M.M., Bajrai L.H., Alandijany T.A., Alsaady I.M., Gattani H.S., Alhamdan M.M., Dwivedi V.D., Azhar E.I. Exploring Echinacea angustifolia for anti-viral compounds against Zika virus RNA-dependent RNA polymerase: a computational study // *Sci Rep.* 2025. V. 15. N 1. Article id: 4060. DOI: 10.1038/s41598-025-88481-8
43. Gendrisch F., Esser P.R., Schempp C.M., Wölfl U. Luteolin as a modulator of skin aging and inflammation // *Biofactors.* 2021. V. 47. N 2. P. 170–180. DOI: 10.1002/biof.1699
44. Zhao X., Ren Z., Cao D., Huang Y. Luteolin alleviates Herpes Simplex Keratitis by inhibiting inflammatory responses via suppressing the PTGS2/NF- κ B signaling pathway // *Am J Transl Res.* 2025. V. 17. N 5. P. 3307–3321. DOI: 10.62347/IQUZ8416
45. Rittà M., Marengo A., Civra A., Lembo D., Cagliero C., Kant K., Lal U.R., Rubiolo P., Ghosh M., Donalisio M. Antiviral Activity of a *Arisaema tortuosum* Leaf Extract and Some of its Constituents against Herpes Simplex Virus Type 2 // *Planta Med.* 2020. V. 86. N 4. P. 267–275. DOI: 10.1055/a-1087-8303
46. Sergiel I. Flavonoids – natural compounds with antiviral and anticancer potential // *Postepy Biochem.* 2024. V. 70. N 4. P. 474–482. DOI: 10.18388/pb.2021_563
47. Hadidi M., Liñán-Atero R., Tarahi M., Christodoulou M.C., Aghababaei F. The Potential Health Benefits of Gallic Acid: Therapeutic and Food Applications // *Antioxidants (Basel).* 2024. V. 13. N 180. Article id: 114068. DOI: 10.3390/antiox13081001
48. Ye S., Su F., Li J., Yu B., Xu L., Xiong T., Shao K., Yuan X. Enhanced in Vivo Antiviral Activity against Pseudorabies Virus through Transforming Gallic Acid into Graphene Quantum Dots with Stimulation of Interferon-Related Immune Responses // *J. Mater. Chem. B.* 2023. V. 12. P. 122–130. DOI: 10.1039/D3TB01844
49. Umar H.I., Siraj B., Ajayi A., Jimoh T.O., Chukwuemeka P.O. Molecular Docking Studies of Some Selected Gallic Acid Derivatives against Five Non-Structural Proteins of Novel Coronavirus // *J. Genet. Eng. Biotechnol.* 2021. V. 19. N 1. P. 16. DOI: 10.1186/s43141-021-00120-7
50. Kratz J.M., Andrighetti-Fröhner C.R., Leal P.C., Nunes R.J., Yunes R.A., Trybala E., Bergström T., Barardi C.R.M., Simões C.M.O. Evaluation of anti-HSV-2 activity of gallic acid and pentyl gallate // *Biol Pharm Bull.* 2008. V. 31. N 5. P. 903–907. DOI: 10.1248/bpb.31.903
51. Tao J., Hu Q., Yang J., Li R., Li X., Lu C., Chen C., Wang L., Shattock R., Ben K. In vitro anti-HIV and -HSV activity and safety of sodium rutin sulfate as a microbicide candidate // *Antiviral Res.* 2007. V. 75. N 3. P. 227–233. DOI: 10.1016/j.antiviral.2007.03.008
52. Yi Y., Zhang M., Xue H., Yu R., Bao Y.-O., Kuang Y., Chai Y., Ma W., Wang J., Shi X. et al. Schaftoside inhibits 3CL^{pro} and PL^{pro} of SARS-CoV-2 virus and regulates immune response and inflammation of host cells for the treatment of COVID-19 // *Acta Pharm Sin B.* 2022. V. 12. N 11. P. 4154–4164. DOI: 10.1016/j.apsb.2022.07.017

REFERENCES

1. Kyriakou S., Tragkola V., Paraskevaidis I., Plioukas M., Trafalis D.T., Franco R., Pappa A., Panayiotidis M.I. Chemical Characterization and Biological Evaluation of *Epilobium parviflorum* Extracts in an In Vitro Model of Human Malignant Melanoma. *Plants (Basel)*, 2023, vol. 12, no. 8, article id: 1590. DOI: 10.3390/plants12081590
2. Kozhantayeva A., Iskakova Z., Ibrayeva M., Sapiyeva A., Arkharbekova M., Tashenov Y. Phytochemical Insights and Therapeutic Potential of *Chamaenerion angustifolium* and *Chamaenerion latifolium*. *Molecules*, 2025, vol. 30, no. 5, article id: 1186. DOI: 10.3390/molecules30051186
3. Olennikov D.N., Kirillina C.S., Chirikova N.K. Water-Soluble Melanoidin Pigment as a New Antioxidant Component of Fermented Willowherb Leaves (*Epilobium angustifolium*). *Antioxidants (Basel)*, 2021, vol. 10, no. 8, article id: 1300. DOI: 10.3390/antiox10081300
4. Nowak A., Cybulska K., Makuch E., Kucharski Ł., Różewicka-Czabańska M., Prowans P., Czapla N., Bargiel P., Petriczko J., Klimowicz A. In Vitro Human Skin Penetration, Antioxidant and Antimicrobial Activity of Ethanol-Water Extract of Fireweed (*Epilobium angustifolium* L.). *Molecules*, 2021, vol. 26, no. 2, article id: 329. DOI: 10.3390/molecules26020329
5. Karakaya S., Süntar I., Yakinci O.F., Sytar O., Ceribasi S., Dursunoglu B., Ozbek H., Guvenalp Z. In vivo bioactivity assessment on *Epilobium* species: A particular focus on *Epilobium angustifolium* and its components on enzymes connected with the healing process. *J. Ethnopharmacol.*, 2020, vol. 262, article id: 113207. DOI: 10.1016/j.jep.2020.113207
6. Tsarev V.N., Bazarnova N.G., Dubenskii M.M. *Chamerion angustifolium* (L.) chemical composition, biological activity (review). *Khimiya Ras-titel'nogo Syr'ya*, 2016, no. 4, pp. 15–26. (In Russian). DOI: 10.14258/jcprm.2016041549
7. Hryč B., Kljakić A.C., Cetiz M.V., Ak G., Zengin G., Senkardes I., Świątek Ł., Kunecki M., Salwa K. et al. Network pharmacology of *Epilobium angustifolium* metabolites in relation to *in vitro* analyses of its extracts. *Fitoterapia*, 2025, vol. 183, article id: 106552. DOI: 10.1016/j.fitote.2025.106552
8. Nowak A., Zielonka-Brzezicka J., Perużyńska M., Klimowicz A. *Epilobium angustifolium* L. as a Potential Herbal Component of Topical Products for Skin Care and Treatment-A Review. *Molecules*, 2022, vol. 27, no. 11, article id: 3536. DOI: 10.3390/molecules27113536
9. Piwowarski J.P., Bobrowska-Korczak B., Stanisławska I., Bielecki W., Wrzesien R., Granica S., Krupa K., Kiss A.K. Evaluation of the Effect of *Epilobium angustifolium* Aqueous Extract on LNCaP Cell Proliferation in In Vitro and In Vivo Models. *Planta Med.*, 2017, vol. 83, no. 14-15, pp. 1159–1168. DOI: 10.1055/s-0043-109372
10. Dreger M., Adamczak A., Foksowicz-Flaczyk J. Antibacterial and Antimycotic Activity of *Epilobium angustifolium* L. Extracts: A Review. *Pharmaceuticals (Basel)*, 2023, vol. 16, no. 10, article id: 1419. DOI: 10.3390/ph16101419
11. Esposito C., Santarcangelo C., Masselli R., Buonomo G., Nicotra G., Insolia V., D'Avino M., Caruso G., Buonomo A.R., Sacchi R. et al. *Epilobium angustifolium* L. extract with high content in oenothien B on benign prostatic hyperplasia: A monocentric, randomized, double-blind, placebo-controlled clinical trial. *Biomed Pharmacother.* 2021, vol. 138, article id: 111414. DOI: 10.1016/j.biopha.2021.111414
12. Babenko A., Turmagambetova A.S., Aleksyuk M.S., Zaitseva I.A., Sokolova N.S., Bogoyavlensky A.P., Berezin V.E. Antiviral activity of *Chamerion angustifolium* or *Epilobium angustifolium*. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2014, no. 6, pp. 81–82. Available at: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=5193> (accessed 19.11.2025)
13. Tahara Y., Fujita M., Zhang T., Wang D., Tateishi H., Togami A., Nyame P., Terasawa H., Monde N., Appiah-Kubi J. et al. Turkish Plants, Including Quercetin and Oenothien B, Inhibit the HIV-1 Release and Accelerate Cell Apoptosis. *Biol Pharm Bull.*, 2023, vol. 46, no. 11, pp. 1535–1547. DOI: 10.1248/bpb.b23-00328
14. Kamkin V., Kamarova A., Shalabayev B., Kussainov A., Anuarbekov M., Abeuov S. Comparative Analysis of the Efficiency of Medicinal Plants for the Treatment and Prevention of COVID-19. *Int J Biomater.*, 2022, no. 2022, article id: 5943649. DOI: 10.1155/2022/5943649

15. Kazachinskaja E.I., Chepurnov A.A., Kononova Yu.V., Shelemba A.A., Romanyuk V.V., Magomedov M.G., Shestopalov A.M. Inhibitory activity of tea compositions and their constituent ingredients on SARS-CoV-2 replication in vitro. *South of Russia: ecology, development*, 2022, vol. 17, no. 2, pp. 76–90. (In Russian). DOI: 10.18470/1992-1098-2022-2-76-90
16. Uminska K., Korinek M., Ivanauskas L., El-Shazly M., Georgiyants V., Chen Y.-L., Shukla M.K., Renadi S., Hwang T.-L., Chang F.-R. et al. Assessment of the Phenolics Content in *Epilobium angustifolium* and *Epilobium hirsutum* Extracts and Their Pharmacological Activity. *Arch Pharm (Weinheim)*, 2025, vol. 358, no. 5, article id: e12001. DOI: 10.1002/ardp.202400765
17. Evseeva S.B., Sysuev B.B. Plant raw material extracts as components of cosmetic products and formulations for topical administration: the product range, the production characteristics (Review). *Pharmacy & Pharmacology*, vol. 4, no. 3(16), pp. 4–37. DOI: 10.19163/2307-9266-2016-4-3-4-37
18. Kazachinskaja E.I., Chepurnov A.A., Shelemba A.A., Guseinova S.A., Magomedov M.G., Kononova Yu.V., Romanyuk V.V., Shestopalov A.M. Inhibitory activity of aqueous extracts of tea compositions, individual ingredients for their preparation and some plants against replication of Herpes simplex virus type 2 in vitro. *South of Russia: ecology, development*, 2022, vol. 17, no. 3, pp. 135–152. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2022-3-135-152
19. Kazachinskaja E.I., Chepurnov A.A., Romanyuk V.V., Romanyuk I.V., Kononova Yu.V., Shestopalov A.M. A method for obtaining an aqueous extract of *Epilobium angustifolium* L. which exhibits inhibitory activity against the SARS-CoV-2 coronavirus and herpes simplex virus type 2 in vitro. *Patent for an invention RU 2788172 C1*, 17.01.2023
20. Stamos J.D., Lee L.H., Taylor C., Elias T., Adams S.D. In Vitro and In Silico Analysis of the Inhibitory Activity of EGCG-Stearate against Herpes Simplex Virus-2. *Microorganisms*, 2022, vol. 10, no. 7, article id: 1462. DOI: 10.3390/microorganisms10071462
21. Kazachinskaja E.I., Romanova V.D., Ivanova A.V., Chepurnov A.A., Murtazaliev Z.A., Kononova Yu.V., Shaulo D.N., Romanyuk V.V., Shestopalov A.M. Inhibitory activity of dry ethanol extracts of *Artemisia* spp. on SARS-CoV-2 replication in vitro. *South of Russia: ecology, development*, 2022, vol. 17, no. 4, pp. 111–129. (In Russ.). DOI: 10.18470/1992-1098-2022-4-111-129
22. Benzekri R., Limam F., Bouslama L. Combination effect of three anti-HSV-2 active plant extracts exhibiting different modes of action. *Adv. Tradit. Med.*, 2020, no. 20, pp. 223–231. DOI: 10.1007/s13596-020-00430-0
23. Liu P., Zhong L., Xiao J., Hu Y., Liu T., Ren Z., Wang Y., Zheng K. Ethanol extract from *Artemisia argyi* leaves inhibits HSV-1 infection by destroying the viral envelope. *Virol.*, 2023, vol. 20, no. 1, article id: 8. DOI: 10.1186/s12985-023-01969-5
24. Kazachinskaja E.I., Zibareva L.N., Chepurnov A.A., Ivanova A.V., Kononova Yu.V., Shaulo D.N., Romanyuk V.V., Shestopalov A.M. The effectiveness of dry ethanol extracts of *Agrimonia pilosa* Ledeb. and some other plants of the Rosoideae subfamily of the Rosaceae family for inactivation of SARS-CoV-2 and herpes simplex virus of the second type. *Khimiya Ras-titel'nogo Syr'ya*, 2025, no. 2, pp. 286–299. Available at: <https://journal.asu.ru/cw/article/view/14782> (accessed: 19.02.2026)
25. Hassan S.T.S., Berchova-Bimova K., Šudomova M., Malanik M., Smejkal K., Rengasamy K.R.R. In Vitro Study of Multi-Therapeutic Properties of *Thymus bovei* Benth. Essential Oil and Its Main Component for Promoting Their Use in Clinical Practice. *J. Clin. Med.*, 2018, no. 7, article id: 283. DOI: 10.3390/jcm7090283
26. Kazachinskaja E.I., Velichko V.V., Romanova V.D., Ivanova A.V., Prokusheva D.L., Chepurnov A.A., Kononova Yu.V., Fu L., Shao Sh., Gulyaeva M.A., Shestopalov A.M. Inactivating and inhibitory activity of dry ethanol extracts of wormwood (*Artemisia* spp.) on herpes simplex virus of the 2 type in vitro. *South of Russia: ecology, development*, 2025, vol. 20, no. 2, pp. 14–36. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-2-2
27. Kazachinskaja E.I., Kononova Yu.V., Ivanova A.V., Zibareva L.N., Chepurnov A.A., Romanyuk V.V., Biibolatov A.A., Gulyaeva M.A., Shestopalov A.M. A method for obtaining aqueous and dry ethanol extracts of grass (a mixture of flowers with leaves) and a stalk of St. John's wort (*Hypericum perforatum* L.) with inhibitory activity on the replication of the SARS-CoV-2 coronavirus in vitro. *South of Russia: ecology, development*, 2023, vol. 18, no. 3, pp. 103–117. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2023-3-103-117
28. Velichko V.V., Kruglov D.S., Olennikov D.N., Oleshko E.D. Phenolic compounds and alkaloids of *Onosma simplicissima* (Boraginaceae) native to Western Siberia. *Khimiya Ras-titel'nogo Syr'ya*, 2025, no. 3, pp. 133–142. <https://doi.org/10.14258/jcpm.20250316840>
29. Šudomova M., Hassan S.T.S. Flavonoids with Anti-Herpes Simplex Virus Properties: Deciphering Their Mechanisms in Disrupting the Viral Life Cycle. *Viruses*, 2023, vol. 15, no. 12, article id: 2340. DOI: 10.3390/v15122340
30. White E.M., Stampfer S.D., Heldwein E.E. Expression, Purification, and Crystallization of HSV-1 Glycoproteins for Structure Determination. *Methods Mol Biol.*, 2020, no. 2060, pp. 377–393. DOI: 10.1007/978-1-4939-9814-2_23
31. Cheng H.-Y., Lin T.-C., Yang C.-M., Wang K.-C., Lin C.-C. Mechanism of action of the suppression of herpes simplex virus type 2 replication by pterocarin A. *Microbes Infect.*, 2004, no. 6, pp. 738–744. DOI: 10.1016/j.micinf.2004.03.009
32. Churqui M.P., Lind L., Thörn K., Svensson A., Savolainen O., Aranda K.T., Eriksson K. Extracts of *Equisetum giganteum* L. and *Copaifera reticulata* Ducke show strong antiviral activity against the sexually transmitted pathogen herpes simplex virus type 2. *J. Ethnopharmacol.*, 2018, no. 210, pp. 192–197. DOI: 10.1016/j.jep.2017.08.010
33. Benzekri R., Bouslama L., Papetti A., Hammami M., Smaoui A., Limam F. Anti HSV-2 activity of *Peganum harmala* (L.) and isolation of the active compound. *Microb Pathog.*, 2018, no. 114, pp. 291–298. DOI: 10.1016/j.micpath.2017.12.017
34. Donalisio M., Cagno V., Civra A., Gibellini D., Musumeci G., Rittà M., Ghosh M., Lembo D. The traditional use of *Vachellia nilotica* for sexually transmitted diseases is substantiated by the antiviral activity of its bark extract against sexually transmitted viruses. *J. Ethnopharmacol.*, 2018, no. 213, pp. 403–408. DOI: 10.1016/j.jep.2017.11.039
35. Chu Y., Lv X., Zhang L., Fu X., Song S., Su A., Chen D., Xu L., Wang Y., Wu Z., et al. Wogonin Inhibits in Vitro Herpes Simplex Virus Type 1 and 2 Infection by Modulating Cellular NF-κB and MAPK Pathways. *BMC Microbiol.*, 2020, vol. 20, article id: 227. DOI: 10.1186/s12866-020-01916-2
36. Rittà M., Marengo A., Civra A., Lembo D., Cagliero C., Kant K., Lal U.R., Rubiolo P., Ghosh M., Donalisio M. Antiviral Activity of a *Arisaema tortuosum* Leaf Extract and Some of Its Constituents against Herpes Simplex Virus Type 2. *Planta Med.*, 2020, vol. 86, pp. 267–275. DOI: 10.1055/a-1087-8303
37. Sochocka M., Sobczyński M., Ochlik M., Zwolińska K., Leszek J. Hampering Herpesviruses HHV-1 and HHV-2 Infection by Extract of *Ginkgo Biloba* (EGb) and Its Phytochemical Constituents. *Front. Microbiol.*, 2019, vol. 10, article id: 2367. DOI: 10.3389/fmicb.2019.02367
38. Čulenová M., Sychrová A., Hassan S.T.S., Berchová-Bírmová K., Svobodová P., Helclová A., Michnová H., Hošek J., Vasiliev H., Suchý P., Kuzminová G., Švajdlénka E., Gajdziok J., Čížek A., Suchý V., Šmejkal K. Multiple In vitro biological effects of phenolic compounds from *Morus alba* root bark. *J. Ethnopharmacol.*, 2020, no. 248, article id: 112296. DOI: 10.1016/j.jep.2019.112296
39. Hassan S.T.S., Švajdlénka E., Berchová-Bírmová K. Hibiscus sabdariffa L. and Its Bioactive Constituents Exhibit Antiviral Activity against HSV-2 and Anti-Enzymatic Properties against Urease by an ESI-MS Based Assay. *Molecules*, 2017, no. 22, article id: 722. DOI: 10.3390/molecules22050722
40. Bouyahya A., Taha D., Benali T., Zengin G., Omari N.E., Hachlafi N.E., Khalid A., Abdalla A.N., Ardianto C., Tan C.S., Ming L.C., Sahib N. Natural sources, biological effects, and pharmacological properties of cymaroside. *Biomed Pharmacother.*, 2023, no. 161, article id: 114337. DOI: 10.1016/j.biopha.2023.114337
41. Liu M., Faez I.K., Xiao Y., Wang X., Hu Z., Lai D. Virtual screening of active ingredients of traditional Chinese medicine in treating COVID-19 based on molecular docking and molecular dynamic simulation. *Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Za Zhi*, 2022, vol. 39, no. 5, pp. 1005–1014. DOI: 10.7507/1001-5515.202205021
42. El-Daly M.M., Bajrai L.H., Alandijany T.A., Alsaady I.M., Gattan H.S., Alhamdan M.M., Dwivedi V.D., Azhar E.I. Exploring *Echinacea angustifolia* for anti-viral compounds against Zika virus RNA-

dependent RNA polymerase: a computational study. *Sci Rep.*, 2025, vol. 15, no. 1, article id: 4060. DOI: 10.1038/s41598-025-88481-8

43. Gendrisch F., Esser P.R., Schempp C.M., Wölfe U. Luteolin as a modulator of skin aging and inflammation. *Biofactors*, 2021, vol. 47, no. 2, pp.170–180. DOI: 10.1002/biof.1699

44. Zhao X., Ren Z., Cao D., Huang Y. Luteolin alleviates Herpes Simplex Keratitis by inhibiting inflammatory responses via suppressing the PTGS2/NF- κ B signaling pathway. *Am J Transl Res.*, 2025, vol. 17, no. 5. P. 3307–3321. DOI: 10.62347/IQUZ8416

45. Rittà M., Marengo A., Civra A., Lembo D., Cagliero C., Kant K., Lal U.R., Rubiolo P., Ghosh M., Donalisio M. Antiviral Activity of a *Arisaema Tortuosum* Leaf Extract and Some of its Constituents against Herpes Simplex Virus Type 2. *Planta Med.*, 2020, vol. 86, no. 4, pp. 267–275. DOI: 10.1055/a-1087-8303

46. Sergiel I. Flavonoids – natural compounds with antiviral and anticancer potential. *Postepy Biochem.*, 2024, vol. 70, no. 4, pp. 474–482. DOI: 10.18388/pb.2021_563

47. Hadidi M., Liñán-Atero R., Tarahi M., Christodoulou M.C., Aghababaei F. The Potential Health Benefits of Gallic Acid: Therapeutic and Food Applications. *Antioxidants (Basel)*, 2024, vol. 13, no. 8, article id: 1001. DOI: 10.3390/antiox13081001

48. Ye S., Su F., Li J., Yu B., Xu L., Xiong T., Shao K., Yuan X. Enhanced in Vivo Antiviral Activity against Pseudorabies Virus through

Transforming Gallic Acid into Graphene Quantum Dots with Stimulation of Interferon-Related Immune Responses. *J. Mater. Chem. B.*, 2023, vol. 12, pp. 122–130. DOI: 10.1039/D3TB01844

49. Umar H.I., Siraj B., Ajayi A., Jimoh T.O., Chukwuemeka P.O. Molecular Docking Studies of Some Selected Gallic Acid Derivatives against Five Non-Structural Proteins of Novel Coronavirus. *J. Genet. Eng. Biotechnol.*, 2021, vol. 19, article id: 16. DOI: 10.1186/s43141-021-00120-7

50. Kratz J.M., Andrighetti-Fröhner C.R., Leal P.C., Nunes R.J., Yunes R.A., Trybala E., Bergström T., Barardi C.R.M., Simões C.M.O. Evaluation of anti-HSV-2 activity of gallic acid and pentyl gallate. *Biol Pharm Bull.*, 2008, vol. 31, no. 5, pp. 903–907. DOI: 10.1248/bpb.31.903

51. Tao J., Hu Q., Yang J., Li R., Li X., Lu C., Chen C., Wang L., Shattock R., Ben K. In vitro anti-HIV and -HSV activity and safety of sodium rutin sulfate as a microbicide candidate. *Antiviral Res.*, 2007, vol. 75, no. 3, pp. 227–233. DOI: 10.1016/j.antiviral.2007.03.008

52. Yi Y., Zhang M., Xue H., Yu R., Bao Y.-O., Kuang Y., Chai Y., Ma W., Wang J., Shi X. et al. Schaftoside inhibits 3CL^{pro} and PL^{pro} of SARS-CoV-2 virus and regulates immune response and inflammation of host cells for the treatment of COVID-19. *Acta Pharm Sin B.*, 2022, vol. 12, no. 11, pp. 4154–4164. DOI: 10.1016/j.apsb.2022.07.017

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Елена И. Казачинская внесла идею исследования, провела сбор растительного сырья и приготовление этанольных экстрактов, оформила литературный обзор, провела эксперименты по исследованию инактивирующей и ингибирующей активности экстрактов, а также обработала результаты. Лариса Н. Зибарева провела анализ БАВ высокоэффективной жидкостной хроматографией. Виктория В. Величко осуществила выбор основных групп определяемых веществ и провела пробоподготовку для анализа на спектрофотометре. Дарья Л. Прокушева провела пробоподготовку для анализа на спектрофотометре. Дмитрий С. Круглов проведение измерений спектров на спектрофотометре, их анализ и расчет содержания БАВ. Юлия В. Кононова работала с сухим растительным сырьем по разделению на отдельные части (листья, цветки, стебли), провела экстракцию для получения сухих экстрактов и эксперименты по тестированию цитотоксичности экстрактов, культивировала клетки *Vero*. Александр А. Чепурнов культивировал вирус, провел титрование вируса и подготовку aliquot с определенным инфекционным титром. Михаил Ю. Щелканов проводил научное консультирование и рецензирование статьи. Марина А. Гуляева руководила организационной и материальной частью лабораторного 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

Elena I. Kazachinskaia introduced the idea of the study, collected plant raw materials and prepared ethanol extracts, prepared a literature review, conducted experiments to study the inactivating and inhibitory activity of extracts, and processed the results. Larisa N. Zibareva analysed BAS with high-performance liquid chromatography. Victoriya V. Velichko undertook the choice of the main groups of determined substances and prepared samples for analysis by spectrophotometer. Dar'ya L. Prokusheva carried out sample preparation for analysis by spectrophotometer. Dmitriy S. Kruglov conducted measurements of spectra by spectrophotometer, their analysis and calculation of the content of biologically active substances. Yulia V. Kononova worked with dry plant raw materials by dividing them into separate parts (stems, inflorescences, leaves), carried out extraction to obtain dry extracts, conducted experiments for testing of cytotoxicity and cultivated *Vero* E6 cells. Alexander A. Chepurinov cultivated viruses, performed virus titration and aliquots with the appropriate prepared infection titer. Mikhail Yu. Shchelkanov conducted scientific consulting and review of the article. Marina A. Gulyaeva led the organisational and material part of the laboratory 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

Елена И. Казачинская / Elena I. Kazachinskaia <https://orcid.org/0000-0002-1856-6147>
 Лариса Н. Зибарева / Larisa N. Zibareva <https://orcid.org/0000-0002-4417-8340>
 Виктория В. Величко / Victoriya V. Velichko <https://orcid.org/0000-0002-9224-9350>
 Дмитрий С. Круглов / Dmitriy S. Kruglov <https://orcid.org/0000-0003-1904-7901>
 Дарья Л. Прокушева / Dar'ya L. Prokusheva <https://orcid.org/0009-0009-0480-2311>
 Юлия В. Кононова / Yulia V. Kononova <https://orcid.org/0000-0002-3677-3668>
 Марина А. Гуляева / Marina A. Gulyaeva <https://orcid.org/0000-0003-3945-5339>
 Михаил Ю. Щелканов / Mikhail Yu. Shchelkanov <https://orcid.org/0000-0001-8610-7623>
 Александр А. Чепурнов / Alexander A. Chepurinov <https://orcid.org/0000-0002-5966-8633>

Оригинальная статья / Original article

УДК: 619:578.842.1:616-076

DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-7



Выделение вируса африканской чумы свиней в первичной культуре клеток тестикул свиньи

Данила С. Моисеенко, Роман С. Чернышев, Ольга С. Пузанкова,

Вера Л. Гаврилова, Алексей С. Иголкин

Федеральный центр охраны здоровья животных, Владимир, Россия

Контактное лицо

Данила С. Моисеенко, аспирант, ветеринарный врач референтной лаборатории по африканской чуме свиней, Федеральный центр охраны здоровья животных; 600901 Россия, г. Владимир, ул. Гвардейская, 6.
Тел. +79191963812

Email moiseenko_ds@ARRIAH.RUORCID <https://orcid.org/0009-0003-4465-0179>

Формат цитирования

Моисеенко Д.С., Чернышев Р.С., Пузанкова О.С., Гаврилова В.Л., Иголкин А.С. Выделение вируса африканской чумы свиней в первичной культуре клеток тестикул свиньи // Юг России: экология, развитие. 2026. Т.21, N 2. С. 81-89.

DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-7

Получена 10 февраля 2026 г.

Прошла рецензирование 3 марта 2026 г.

Принята 25 апреля 2026 г.

Резюме

Разработка и валидация альтернативного метода выделения вируса АЧС из биологического материала от домашних свиней и диких кабанов в первичной культуре клеток тестикул свиньи.

Культуру клеток тестикул свиньи можно использовать для вирусывыделения в случае невозможности приобретения доноров, несмотря на меньшую аналитическую чувствительность (от 4.33 ± 0.33 до 5.76 ± 0.13 lg ГАД₅₀/см³) при сравнении со спленоцитами свиньи (от 5.0 ± 0.12 до 6.0 ± 0.14 lg ГАД₅₀/см³). Разработанный метод обладает 100 % специфичностью, 90.91 % диагностической чувствительностью при выделении вируса АЧС как из биологического материала от домашних свиней, так и от диких кабанов.

Проведенные исследования позволили расширить арсенал методов вирусологической диагностики АЧС. Оценка альтернативной культуры клеток, подходящей для выделения, позволила установить оптимальную посевную концентрацию клеток, при которой максимальный титр вируса АЧС может достигать 6.33 ± 0.06 lg ГАД₅₀/см³. Валидированный метод выделения вируса АЧС позволяет применять его в ветеринарных лабораториях при невозможности использования доноров.

Ключевые слова

АЧС, вирусологический метод, культура клеток, тестикулы свиньи.

Isolation of the African swine fever virus in primary cultures of pig testicular cells

Danila S. Moiseenko, Roman S. Chernyshev, Olga S. Puzankova,
Vera L. Gavrilova and Alexey S. Igolkin

Federal Centre for Animal Health Protection, Vladimir, Russia

Principal contact

Danila S. Moiseenko, Postgraduate student, veterinarian, ASF Reference Laboratory, Federal Center for Animal Health; 6 Gvardeyskaya St, Vladimir, Russia 600901.

Tel. +79191963812

Email moiseenko_ds@ARRIAH.RU

ORCID <https://orcid.org/0009-0003-4465-0179>

How to cite this article

Moiseenko D.S., Chernyshev R.S., Puzankova O.S., Gavrilova V.L., Igolkin A.S. Isolation of the African swine fever virus in primary cultures of pig testicular cells. *South of Russia: ecology, development*. 2026; 21(2):81-89. (In Russ.)
DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-7

Received 10 February 2026

Revised 3 March 2026

Accepted 25 April 2026

Abstract

Development and validation of an alternative method for isolating ASFV from biological materials from domestic pigs and wild boar in primary cultures using pig testes.

Pig testis cell culture can be used to isolate viruses if donors are not available, despite lower sensitivity (4.33 ± 0.33 – 5.76 ± 0.13 lg GAdE₅₀/cm³) compared to pig spleen cells (5.0 ± 0.12 – 6.0 ± 0.14 lg GAdE₅₀/cm³). The developed method has 100 % specificity and 90.91 % diagnostic sensitivity when isolating the ASFV from both biological material from domestic pigs and wild boars.

The studies conducted have made it possible to expand the arsenal of methods for virological diagnosis of ASF. Evaluation of an alternative cell culture suitable for isolation allowed us to establish the optimal inoculation concentration of cells, at which the high titer of the ASFV can reach 6.33 ± 0.06 lg GAdE₅₀/cm³. The validated method of ASFV isolation allows it to be used in veterinary laboratories when donors cannot be used.

Key Words

ASFV, virus isolation, cell culture, swine testicular (ST).

ВВЕДЕНИЕ

Африканская чума свиней (АЧС) – контагиозная, трансграничная болезнь, наносящая огромные экономические убытки во многих странах мира, вызываемая оболочечным вирусом с двухцепочечной ДНК (dsDNA). Вирус АЧС – единственный ДНК-содержащий арбовирус и представитель рода *Asfivirus* семейства *Asfarviridae* [1]. Из доклада Всемирной организации здравоохранения животных (ВОЗЖ) с января 2022 г. по февраль 2026 г., болезнь зарегистрирована в 72 странах. Число случаев среди домашних свиней составило 1 184 575 и 47 510 среди диких кабанов. В связи с неблагополучием по АЧС с января 2022 г. по февраль 2026 г. 2 490 557 голов домашних свиней было уничтожено [2].

Первое описание АЧС датируется 1921 годом (Кения). В 1957 году вирус был занесен из Африки в Португалию, что впоследствии привело к вспышкам болезни в различных европейских странах [3–5]. Занос вируса АЧС II генотипа в Россию произошел в 2007 году из Закавказья на территорию Чеченской республики [6]. К 2013 году эпизоотические очаги АЧС зарегистрированы на территории всех федеральных округов европейской части России. Летом 2019 года впервые обнаружили АЧС у домашних свиней, павших на территории крестьянско-фермерского хозяйства Приморского края [7]. По данным Россельхознадзора, на конец 2024 года зарегистрировано 2344 очагов АЧС (1398 среди домашних свиней и 946 среди дикого кабана) в 74 субъектах Российской Федерации. В период с 2025 по 2026 гг. вспышки АЧС в России не notificировали.

Ввиду отсутствия эффективных вакцин против АЧС в России специфическая профилактика остается невозможной, поэтому своевременная лабораторная диагностика является основным направлением в борьбе с распространением АЧС. Важной особенностью АЧС является инфекционный процесс: свиньи с подострым и хроническим течением обычно вырабатывают антитела против вируса АЧС через 11–14 суток после заражения. Синтез специфических антител в высоких титрах против структурных и неструктурных белков вируса АЧС не обеспечивает его элиминацию из инфицированного организма свиней [8]. Однако высокий титр антител и короткий срок сероконверсии позволяет проводить эффективную серологическую диагностику в выявлении животных с подострым и хроническим течениями АЧС, используя тест-системы преимущественно на основе иммуноферментного анализа (ИФА).

Важную роль в своевременном обнаружении вируса АЧС играет молекулярная диагностика. ДНК вируса АЧС выявляют с помощью метода полимеразной цепной реакции (ПЦР), обладающего высокой чувствительностью, специфичностью, экспрессностью и воспроизводимостью. ПЦР позволяет с высокой скоростью обнаружить геном вируса на ранних этапах заболевания животных в тканях и органах. Однако важно отметить, данный метод не может выявить инфекционно-активный вирусный агент. Это достигается за счет заражения чувствительных культур клеток (вирусовыделение и определение титра вируса) или естественно-восприимчивых животных (биопроба на свиньях). Комплекс представленных методов позволяет оценить культуральные, иммуно- и

молекулярно-биологические свойства изолятов вируса АЧС.

Выделение вируса АЧС в первичных культурах клеток свиней до сих пор остается актуальным методом из-за высокой чувствительности и достоверности постановки диагноза. В свою очередь, отсутствие фенотипического проявления вирусной репродукции в культуре клеток не всегда указывает на отрицательные результаты вирусовыделения. Отсутствие вируса АЧС должно подтверждаться вспомогательными методами (ПЦР, РПИФ и др.). Культивирование в первично-трипсинизированной культуре клеток спленоцитов свиньи (СС) позволяет получить материал с высоким титром вируса АЧС (более $6.0 \lg \text{ГАдE}_{50}/\text{см}^3$) в течение 12–24 ч. Процесс накопления вируса АЧС в культурах клеток костного мозга свиньи (КМС) и почки свиньи (СП) составляет 48 ч, а в тестикулах свиньи (ТС) – 48–72 ч, что подчеркивает предпочтительность использования СС в диагностике болезни [9]. Однако получение первичных культур клеток СС и КМС – трудозатратный и дорогостоящий процесс, требующий регулярной поставки животных-доноров. При этом клетки мононуклеарного ряда получают при отборе лёгких, почек, трубчатых костей или селезёнки исключительно от туш поросят-доноров. В культуре клеток ТС также присутствуют мононуклеары, но отбор тестикул поросят можно осуществлять при кастрации, необязательна эвтаназия животных [10].

В связи с этим целью исследования являлась разработка и валидация метода выделения вируса АЧС из биологического материала от домашних свиней и диких кабанов в первичной культуре клеток ТС. Данный метод должен обладать чувствительностью и специфичностью в пределах значений, позволяющих достоверно поставить диагноз на АЧС (80–100 %), и удовлетворять требованиям этики по использованию животных-доноров. Научная новизна заключается в расширении арсенала методов вирусологической диагностики АЧС, использовании в выделении вируса АЧС альтернативных культур клеток.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вирусы. В исследовании использовали вирулентные штаммы вируса АЧС: Мозамбик-78 V генотипа, Arm 07 II генотипа, Конго-49 I генотипа, Лиссабон-57 I генотипа, рекомбинантный штамм ASFV/Primorsky_2023/DP-4560.Rec I/II генотипов. При проверке аналитической специфичности метода использовали образцы вирусов классической чумы свиней (штамм Ши-мынь); репродуктивно-респираторный синдром свиней (штамм Иркутский 2007), болезни Ауески (штамм ВК). Исходный материал в форме лиофилизата импортировали из Всероссийской государственной коллекции экзотических типов вируса ящура и других патогенов животных ФГБУ «ВНИИЗЖ».

Культивирование и титрование вируса АЧС осуществляли в культуре клеток СС согласно методическим рекомендациям ФГБУ «ВНИИЗЖ» [11].

Стабилизированные эритроциты в рабочей концентрации 1:100 получали на физиологическом растворе для проведения реакции гемадсорбции (РГАД). У свиней кровь отбирали стерильно из сердца в объёме не менее $50\text{--}100 \text{ см}^3$ во флакон со стеклянными бусами, диаметром 5 мм. После взятия производили дефибрирование в течение 10–15 минут до образования кровяного сгустка. В ламинарном шкафу

биологической безопасности II класса осторожно отбирали кровь вокруг фибринового сгустка стерильной пипеткой в центрифужные пробирки объемом 50 см³ и затем добавляли к крови физиологический раствор 1/3 или 1/4 части от общего объема. Далее центрифугировали при 1000 об/мин в течение 10–15 минут. Надосадочную жидкость удаляли, а к осадку эритроцитов добавляли физиологический раствор. Отмывку эритроцитов производили 3–4 раза.

Культура клеток ТС. Для получения первично-трипсинизированной культуры клеток ТС использовали естественно восприимчивых клинически здоровых поросят-сосунков не старше 3–4 недельного возраста живой массой 6–12 кг, полученных из хозяйств, благополучных в отношении АЧС, КЧС и других инфекционных болезней. Также допустимо использование в качестве донорского материала тестикул хрячков (не старше 2-х месячного возраста), полученных при кастрации.

Эвтаназию поросят проводили в соответствии с межгосударственными стандартами по содержанию и уходу за лабораторными животными, принятыми Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации, а также согласно требованиям Директивы 2010/63/EU Европейского парламента и Совета Европейского союза от 22.09.2010 по охране животных, используемых в научных целях. В экспериментах были соблюдены институциональные и национальные стандарты по использованию лабораторных животных в соответствии с Consensus Author Guidelines for Animal Use. Тестикулы хрячков извлекали с помощью стерильных хирургических инструментов (ножниц, скальпеля и пинцета), изолируя мошонку, мышечно-эластическую оболочку, фасции семенника и препарируя до общей влажной оболочки, затем помещали в стерильные флаконы, транспортируя в биксе к помещению класса С.

Транспортировка тестикул хрячков, отобранных при кастрации, осуществлялась в стерильном физиологическом растворе с содержанием NaCl до 0.9 %, предварительно охлажденным до 4 °С.

Тестикулы освобождали от общей влажной оболочки, после этого 2–3 раза органы омывали питательной средой Игла (или физиологическим раствором) с добавлением бензилпенициллина натриевой или калиевой соли (1 млн ЕД) и стрептомицина сульфата (1 г), гентамицина (80 мкг). Затем измельчали органы на кусочки величиной 3–6 мм, помещали в культуральный флакон с площадью поверхности 75 см².

Кусочки тестикул трипсинизировали во флаконах площадью 75 см², для этого использовали раствор трипсина 0.25 % на солевой среде Эрла, заранее подогретого до 37 °С. Трипсинизацию проводили методом встряхивания органной суспензии в термостатируемом шейкере (при температуре 37±5 °С, 30 минут).

Суспензию клеток после первого цикла трипсинизации центрифугировали в течение 20 минут при 500 g. После удаления супернатанта осажденные клетки ресуспендировали в небольшом количестве ростовой питательной среды (5–10 мл) с добавлением 20 % фетальной сыворотки КРС. Трипсинизацию проводили 4–5 циклов.

Полученную суспензию клеток фильтровали через 8 слоев марли, нейлоновый фильтр для

деагрегации клеток с размером пор 40 мкм, доводили до экспериментально-оптимизированной посевной концентрации 400 тыс. кл/см³ и производили посев в культуральные планшеты на 96 лунок, затем инкубировали 22–26 ч при 37±5 °С в атмосфере 5 % CO₂. Через 24 ч меняли ростовую питательную среду Игла на поддерживающую (с 10 % содержанием фетальной сыворотки КРС) и добавляли суспензию дефибринированных эритроцитов свиньи до конечной концентрации 0.1–0.2 %.

Подготовка исследуемых проб. Образцы биологического материала для исследования поступали из эпизоотических очагов для подтверждения диагноза. Они передавались на вирусологические исследования после предварительного подтверждения диагноза в ПЦР. Перед работой материал гомогенизировали с помощью горизонтального прибора QIAGEN (Германия). Затем к измельченному биологическому материалу добавляли стерильный физиологический раствор для получения 10 % суспензии.

Данную суспензию переносили в стерильные пробирки и осветляли центрифугированием (3000 g, 5 мин), затем отбирали супернатант и пропускали его через фильтры (размер пор 0.45 мкм). В фильтрат вносили противомикробные средства (пенициллин 500 ЕД/см³, стрептомицин 500 мг/см³ или гентамицина сульфат 500 мкг/см³). Инкубировали при температуре от 2 до 8 °С в течение 60±10 минут.

Инфицирование культуры клеток. Для проведения анализа использовали культуральные 96-луночные планшеты с суточным субконфлюэнтным монослоем клеток тестикул свиньи из расчета 8 лунок (повторностей) на каждую испытываемую и две повторности – на контрольные образцы (1 отрицательный (ОКО) и 1 положительный (ПКО) образцы).

В качестве испытываемых проб выступали 10 % суспензии биологического материала (селезенки, лимфатических узлов и др.), приготовленные на физиологическом растворе. Наличие отрицательного контроля необходимо для выявления спонтанной гемадсорбции (неспецифической реакции). В качестве положительного контрольного образца использовали вируссодержащую суспензию референтного штамма Artn 07 с титром не менее 5.0 lg ГАД_{Е50}/см³.

В первые лунки с клетками и культуральной средой вносили по 0.01 см³ 10 % вируссодержащей суспензии, положительный и отрицательный контрольные образцы (по 0.01 см³) и затем пипетировали в каждой лунке (проводили последовательные 10-кратные разведения). Инкубацию осуществляли в течение 96 ч при температуре 37.0±0.5 °С в атмосфере 5 % CO₂.

Учет и интерпретация результатов. Оценку гемадсорбции проводили методом световой инвертированной микроскопии. Репродукция вируса АЧС в культуре клеток характеризовалась морфологическими изменениями инфицированных клеток, на поверхности которых адсорбировалось от 5 до 50 эритроцитов (рис. 1. А, В, С).

Если хотя бы в одной из повторности обнаруживали феномен гемадсорбции, то исследуемый образец признавали положительным на наличие вируса АЧС. При отсутствии гемадсорбирующих клеток планшеты подвергались заморозке при температуре не менее минус 50 °С в течение 3 часов, после чего суспензию культуры клеток размораживали и проводили следующий пассаж на ТС.

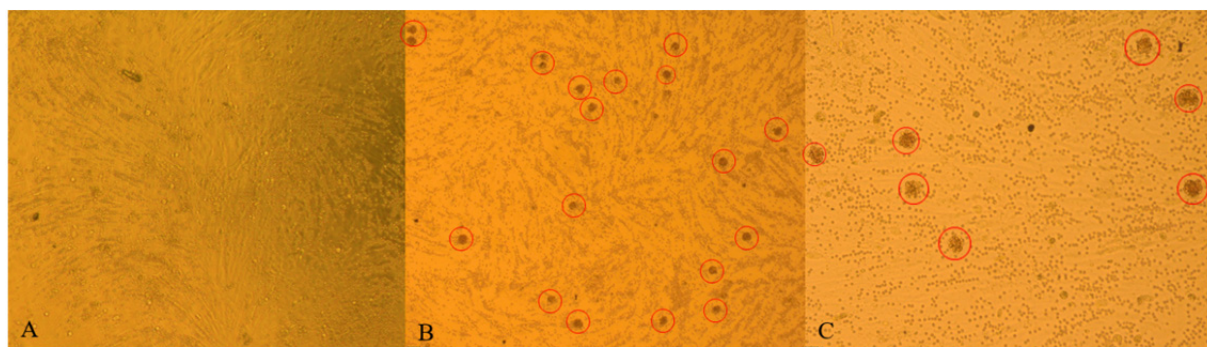


Рисунок 1. Результаты РГАд в культуре клеток ТС:

А – отрицательный результат (образец не содержит вируса АЧС, увеличение $\times 100$);

В – положительный результат (образец содержит вирус АЧС, увеличение $\times 100$);

С – гемадсорбирующие клетки (образец содержит вирус АЧС, увеличение $\times 200$)

Примечание: гемадсорбирующие инфицированные клетки обведены красным курсивом

Figure 1. Results of RGAd in ST cell culture:

A – negative result (sample does not contain ASFV, magnification $\times 100$);

B – positive result (sample contains ASFV, $\times 100$ magnification);

C – haemadsorbent cells (sample containing ASFV $\times 200$ magnified)

Note: haemadsorbent infected cells are highlighted in red italics

При отсутствии эффекта гемадсорбции в ТС на протяжении 5 пассажей, суспензию культуры клеток с 3, 4 и 5 пассажей исследовали методом ПЦР-РВ тест-системой ФГБУ «ВНИИЗЖ» согласно инструкции производителя. На протяжении 3–5 пассажей должно наблюдаться уменьшение показателя Ct (признака роста репликативной активности). Также образец считали отрицательным на наличие вируса АЧС при условии отсутствия Ct при исследовании материала 3, 4 и 5 пассажей.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пермиссивностью к вирусу АЧС обладают клетки мононуклеарного ряда и эндотелиоциты свиньи [12]. Однако тропизм могут иметь стромальные и клетки Лейдига тестикул свиньи [13]. В связи с этим увеличение титра вируса возможно благодаря расширению чувствительного компартмента (преимущественно, гистиоцитов, а также стромальных и клеток Лейдига) в гетерогенной клеточной популяции. Поскольку превалирующую часть культуры ТС занимают клетки сперматогенного эпителия, то необходима оптимизация условий культивирования, обеспечивающая снижение числа эпителиоподобных клеток, которые формируют конфлюэнтный монослой, и увеличение мононуклеарных [14]. Контактная

ингибция между эпителиальными и клетками другого ряда отрицательно влияет на накопление вируса. Предотвратить это явление можно благодаря сегрегации (фракционированию) клеточных субпопуляций методами селективной фильтрации/деградации или разделению временных интервалов роста клеток [15–16]. Крупным макрофагам требуется меньше времени для адгезии на субстрате, чем эпителиальным клеткам для образования конфлюэнтного монослоя [17]. Поскольку достижение 100 % конфлюэнтности в культуре ТС происходит на 3–4 сутки, а прикрепление макрофагов – через 6–20 часов после посева, то оптимальным временем заражения вирусом АЧС является 22–26 часов после начала культивирования ТС.

Оптимизация посевной концентрации клеток ТС для инфицирования вирусом АЧС

В качестве стандартных образцов вируса АЧС использовали вирусосодержащую суспензию референс-штамма Arm 07 в титре $6.0 \lg \text{ГАдЕ}_{50}/\text{см}^3$. Результаты приведены в таблице 1. Срок культивирования вируса – 96 ч, так как через 120 ч после инфицирования наблюдалась дезадгезия целевых клеток и значительная их ингибция конфлюэнтным монослоем эпителиоцитов.

Таблица 1. Результаты подбора посевной концентрации клеток ТС для увеличения титра вируса АЧС, $n=3$

Table 1. Results of selecting the seed concentration of ST cells to increase the ASFV titer, $n=3$

Посевная концентрация, клеток/ см^3 Inoculum concentration, cells/ см^3	Титр вируса АЧС ($\lg \text{ГАдЕ}_{50}/\text{см}^3 \pm \text{SD}$)
	через 96 ч после заражения ASFV titer ($\lg \text{HAD}_{50}/\text{см}^3 \pm \text{SD}$) 96 hours after infection
30 тыс./30k cells	$3,67 \pm 0,13$
50 тыс./50k cells	$4,54 \pm 0,13$
100 тыс./100k cells	$5,89 \pm 0,06$
200 тыс./200k cells	$5,68 \pm 0,13$
300 тыс./300k cells	$5,48 \pm 0,06$
400 тыс./400k cells	$6,33 \pm 0,06$
500 тыс./500k cells	$5,96 \pm 0,13$
600 тыс./600k cells	$5,87 \pm 0,21$
700 тыс./700k cells	$5,48 \pm 0,13$
800 тыс./800k cells	$5,76 \pm 0,06$

Из таблицы 1 следует, что при посевной концентрации клеток ТС 30–50 тыс./см³ происходило умеренно-низкое накопление вируса АЧС (от 3.67±0.13 до 4.54±0.13 lg ГАД_{Е50}/см³), при 100–300 тыс/см³ – стабильное накопление (от 5.89±0.06 до 5.48±0.06 ГАД_{Е50}/см³), а при 500–800 тыс/см³ характерен стационарный темп репродукции вируса (от 5.96±0.13 до 5.76±0.06 ГАД_{Е50}/см³). Оптимальной посевной концентрацией было 400 тыс/см³, при которой титр вируса АЧС несколько превосходил исходный (> 6.0 lg ГАД_{Е50}/см³) и

составил 6.33±0.06 lg ГАД_{Е50}/см³.

Определение аналитической специфичности

Разработанный метод выделения вируса АЧС показал достоверность и не демонстрировал ложноположительных или ложноотрицательных результатов. Так, для оценки аналитической специфичности была выбрана панель образцов вирусосодержащего материала. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. Аналитическая специфичность разрабатываемого метода, n=3

Table 2. Analytical specificity of the developed method, n=3

№ No.	Характеристика образца Sample Characteristics	Результат на наличие вируса АЧС Result for Presence of ASFV
1.	Вирус болезни Ауески, штамм «ВК» –ДЕП «VK»-DEP strain of pseudorabies virus	Отрицательный Negative
2.	Вирус классической чумы свиней, штамм «Ши-мынь» Classical swine fever virus, strain "Shimen"	Отрицательный Negative
3.	Вирус репродуктивно-респираторного синдрома свиней, штамм «Иркутский 2007» Porcine reproductive and respiratory syndrome virus, strain "Irkutsk 2007"	Отрицательный Negative
4.	Вирус АЧС, штамм «Мозамбик–78» V генотип ASFV, strain "Mozambique-78", genotype V	Положительный Positive
5.	Вирус АЧС, штамм «Arm 07» II генотипа ASFV, strain "Arm07", genotype II	Положительный Positive
6.	Вирус АЧС, штамм «Конго–49» I генотипа ASFV, strain "Congo-49", genotype I	Положительный Positive
7.	Вирус АЧС, штамм «Лиссабон–57» I генотипа ASFV, strain "Lisbon-57", genotype I	Положительный Positive
8.	Вирус АЧС, рекомбинантный штамм «ASFV/Primorsky-4560.Rec» I/II генотипов Recombinant ASFV strain "Primorsky 2023/DP-4560.Rec", genotypes I/II	Положительный Positive

Как показано в таблице 2, метод обладал специфичностью и позволил выявить гемадсорбирующие варианты вируса АЧС различных генотипов. В случае мониторинга циркуляции негемадсорбирующих вариантов в популяциях восприимчивых животных (диких кабанов и домашних свиней) рекомендована идентификация репродукции в ПЦР-РВ на 3–5 пассаже с определением динамики репликативной активности.

После проведения пяти пассажей исследуемых образцов суспензию культуры клеток исследовали в ПЦР-РВ. По результатам тестирования образцов геном вируса АЧС обнаруживали только в суспензии культуры клеток, где ранее наблюдали феномен гемадсорбции.

Определение сравнительной аналитической чувствительности первичных культур клеток ТС и СС к вирусу АЧС

Для этапа количественной оценки вирусосодержащего материала предпочтительно использование высокочувствительной биологической модели, способной поддерживать репродукцию вируса даже при небольшом числе его инфекционных частиц. С целью определения наличия потенциала культуры клеток ТС для титрования вируса АЧС проведена оценка аналитической чувствительности первичных культур

клеток ТС и СС (в качестве наиболее чувствительной) микрометодом в РГАД.

Готовили 8 последовательных 10-кратных разведений культуральной вирусосодержащей суспензии 4 изолятов вируса АЧС, выделенных на базе референтной лаборатории по АЧС. Заражение культур клеток ТС и СС выполняли из расчета 12 повторностей на 1 разведение. Учет реакции проводили ежедневно в реакции гемадсорбции (РГАД) методом регистрации специфического для вируса АЧС феномена под контролем световой инвертированной микроскопии. Окончательный результат детектировали на 120 ч после инфицирования (таблица 3). Титр вируса вычисляли по формуле Кербера в модификации Ашмарина.

Для всех изолятов титр вируса АЧС (4/4, 100 %), определенный в культуре клеток СС, превосходил показатели, полученные в культуре клеток ТС, что говорит о более низкой чувствительности последней. Дисперсия генеральной совокупности между титрами вируса АЧС в культурах клеток СС и ТС составила 0.23 lg ГАД_{Е50}/см³. Несмотря на незначительное расхождение, нельзя рекомендовать культуру клеток ТС для титрования вируса АЧС, так как для получения точных и достоверных результатов количественной оценки предпочтительнее использовать более чувствительные биологические модели.

Таблица 3. Результаты сравнительной аналитической чувствительности культур ТС и СС к изолятам вируса АЧС, n=3
Table 3. Results of comparative analytical sensitivity of ST and PS cultures to ASFV isolates, n=3

Изолят Isolate	Титр вируса АЧС (lg ГАД ₅₀ /см ³ ± SD) ASFV titer (lg HAD ₅₀ /cm ³ ± SD)	
	Результат на ТС Result on ST	Результат на СС Result on PS
ASFV/LNR/42–1	5.76 ± 0.13	6.0 ± 0.14
ASFV/DNR/894	5.0 ± 0.11	5.35 ± 0.10
ASFV/Chelyabynsk/4833	5.0 ± 0.17	5.33 ± 0.17
ASFV/Krasnodar/774–4	4.33 ± 0.33	5.0 ± 0.12

Определение диагностической чувствительности

Для определения диагностической чувствительности разрабатываемой методики проведены исследования 110 положительных на наличие вируса АЧС проб биологического материала от домашних свиней и диких кабанов (кровь, селезёнка, печень, лимфатические

узлы, костный мозг, мышечная ткань, лёгкие, продукция свиноводства: котлетное мясо). Образцы параллельно исследовали в культуре клеток СС (в качестве референтного метода). Результаты вирусовыделения представлены на рисунке 2.

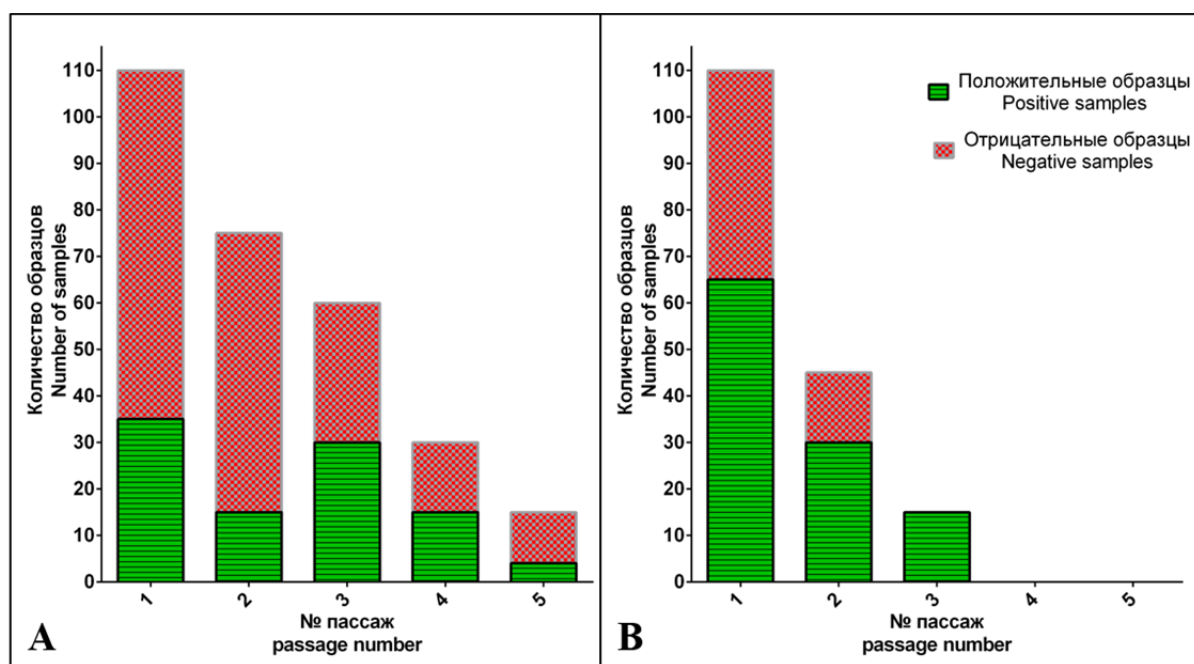


Рисунок 2. Диагностическая чувствительность выделения вируса АЧС в культуре клеток ТС из образцов биологического материала, n=110

A – выделение биологических образцов в культуре клеток ТС;

B – выделение биологических образцов в культуре клеток СС

Figure 2. Diagnostic sensitivity of ASFV isolation from biological material samples in ST cell culture, n=110

A – Isolation of biological samples using ST cells;

B – Isolation in PS cell cultures

При сравнительном анализе перmissивности первичных культур клеток установлено, что СС является более чувствительной биологической моделью для выделения вируса АЧС. Как показано на рисунке 1, для успешной изоляции вируса АЧС в культуре клеток ТС необходимо проводить пять пассажей, тогда как при аналогичном процессе вирусывыделения в СС – три пассажа. Диагностическая чувствительность метода выделения вируса АЧС в культуре клеток ТС составила 90.91 %, доля ложноотрицательных результатов – 9.09 %. Несмотря на это, показатель чувствительности > 80 % признается как удовлетворительный, что позволяет использовать систему культивирования ТС в диагностике АЧС и получении изолятов для научных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод выделения вируса АЧС в культуре клеток ТС обладает аналитической специфичностью, диагностической чувствительностью в 90.91 %. Однако данный метод не подходит для количественного анализа вследствие меньшей аналитической чувствительности по сравнению с титрованием вируса АЧС в культуре клеток СС.

В случае трудностей по получению культур клеток мононуклеарного происхождения в выделении вируса из образцов биологического материала может использоваться культура клеток ТС. Данный вариант позволил расширить арсенал методов вирусологической диагностики АЧС, использовать в изоляции вируса АЧС альтернативную культуру клеток, отвечающую стандартам биоэтики неиспользования животных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Galindo I., Alonso C. African swine fever virus: A review // *Viruses* 2017. V. 9. 103 p.
- African Swine Fever (ASF) Situation Report 74. URL: <https://www.woah.org/app/uploads/2026/03/asf-report-74.pdf> (дата обращения: 16.02.2026)
- Costard S., Mur L., Lubroth J., Sanchez-Vizcaino J. M., Pfeiffer D. U. Epidemiology of African swine fever virus // *Virus Res.* 2013. V. 173. N 1. P. 191–197. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2012.10.030>
- Dixon L.K., Sun H., Roberts H. African swine fever // *Antivir Res.* 2019. V. 165. P. 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.antiviral.2019.02.018>
- Eustace M.R. On a form of swine fever occurring in British East Africa (Kenya Colony) // *J. Comp Pathol Ther.* 1921. V. 34. P. 159–191. [https://doi.org/10.1016/S0368-1742\(21\)80031-4](https://doi.org/10.1016/S0368-1742(21)80031-4)
- Beltrán-Alcrudo D., Lubroth J., Depner K., Rocque S. African swine fever in the Caucasus // *EMPRES Watch*. 2008. V. 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3579.1200>
- Шотин А.Р., Иголкин А.С., Мазлум А., Шевченко И.В., Бардина Н.С., Морозова Е.О., Шевцов А.А. Африканская чума свиней в Приморском крае: эпизоотическая ситуация и молекулярно-биологические свойства изолята, выделенного из трубчатой кости от дикого кабана // *Ветеринария сегодня*. 2022. Т. 11. N 4. С. 347–358. <https://doi.org/10.29326/2304-196X-2022-11-4-347-358>
- Netherton C.L., Goatley L.C., Reis A.L., Portugal R., Nash R.H., Morgan S.B., Gault L., Nieto R., Norlin V., Gallardo C., Ho C.S., Sánchez-Cordón P.J., Taylor G., Dixon L.K. Identification and immunogenicity of african swine fever virus antigens // *Front. Immunol.* 2019. V.10. Article number: 1318. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.01318>
- Шарыпова Д.В., Жуков И.Ю., Власова Н.Н., Пузанкова О.С., Гаврилова В.Л., Иголкин А.С., Коропова Н.Н., Жбанова Т.В. Сравнительный анализ репродукционных свойств вируса африканской чумы свиней изолята Одинцово 02/14 в первичных культурах клеток // *Ветеринария сегодня*. 2017. Т. 20. N 1. С. 5–9.
- Takenouchi T., Masujin K., Suzuki S., Haraguchi S., Hiramatsu K., Kokuho T., Uenishi H. Establishment and characterization of the immortalized porcine lung-derived mononuclear phagocyte cell line // *Front Vet Sci.* 2022. V. 9. Article number: 1058124. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.1058124>
- Мазлум А., Шарыпова Д.В., Гаврилова В.Л., Пузанкова О.С., Жуков И.Ю., Аронова Е.В., Власова Н.Н., Иголкин А.С. Выделение и титрование вируса Африканской чумы свиней в культуре клеток селезенки свиньи: метод. рекомендации. Владимир: ФГБУ «ВНИИЗЖ», 2019. 24 с.
- Wilkinson P.J., Lawman M.J., Johnston R.S. African swine fever in Malta, 1978 // *Vet Rec.* 1980. V. 106. N 5. P. 94–97. <https://doi.org/10.1136/vr.106.5.94>
- Roszyk H., Franzke K., Breithaupt A., Deutschmann P., Pikalo J., Carrau T., Blome S., Sehl-Ewert J. The Role of Male Reproductive Organs in the Transmission of African Swine Fever-Implications for Transmission // *Viruses*. 2021. V. 14. N 1. <https://doi.org/10.3390/v14010031>
- Perrard-Sapori M.H., Chatelain P.C., Rogemond N., Saez J.M. Modulation of Leydig cell functions by culture with Sertoli cells or with Sertoli cell-conditioned medium: effect of insulin, somatomedin-C and FSH // *Mol Cell Endocrinol.* 1987. V. 50. P. 193–201. [https://doi.org/10.1016/0303-7207\(87\)90017-7](https://doi.org/10.1016/0303-7207(87)90017-7)
- Bernier M., Gibb W., Haour F., Collu R., Saez J.M., Ducharme J.R. Studies with purified immature porcine Leydig cells in primary culture // *Biol Reprod.* 1983. V. 29. N 5. P. 1172–1178. <https://doi.org/10.1095/biolreprod29.5.1172>
- Renier G., Gaulin J., Gibb W., Simard P., Leung T.K., Collu R., Ducharme J.R. Isolation, purification and culture of Sertoli cells from immature piglet testes // *Acta Endocrinol (Copenh)*. 1986. V. 111. N 1. P. 411–418. <https://doi.org/10.1530/acta.0.1110411>
- Dores C., Rancourt D., Dobrinski I. Stirred suspension bioreactors as a novel method to enrich germ cells from pre-pubertal pig testis // *Andrology*. 2015. V. 3. N 3. P. 590–597. <https://doi.org/10.1111/andr.12031>

REFERENCES

- Galindo I., Alonso C. African swine fever virus: A review. *Viruses*. 2017, vol. 9, 103 p.
- African Swine Fever (ASF) Situation Report 74. Available at: <https://www.woah.org/app/uploads/2026/03/asf-report-74.pdf> (accessed: 16.02.2026)
- Costard S., Mur L., Lubroth J., Sanchez-Vizcaino J. M., Pfeiffer D. U. Epidemiology of African swine fever virus. *Virus Res.*, 2013, vol. 173, no. 1, pp. 191–197. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2012.10.030>
- Dixon L.K., Sun H., Roberts H. African swine fever. *Antivir Res.*, 2019, vol. 165, pp. 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.antiviral.2019.02.018>
- Eustace M.R. On a form of swine fever occurring in British East Africa (Kenya Colony). *J. Comp Pathol Ther.*, 1921, vol. 34, pp. 159–191. [https://doi.org/10.1016/S0368-1742\(21\)80031-4](https://doi.org/10.1016/S0368-1742(21)80031-4)
- Beltrán-Alcrudo D., Lubroth J., Depner K., Rocque S. African swine fever in the Caucasus. *EMPRES Watch*, 2008, vol. 1, pp. 1–8. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3579.1200>
- Shotin A.R., Igolkin A.S., Mazloun A., Shevchenko I.V., Bardina N.S., Morozova E.O., Shevtsov A.A. African swine fever in the Primorsky Krai: disease situation and molecular and biological properties of the isolate recovered from a wild boar long bone. *Veterinary Science Today*, 2022, vol. 11, no. 4, pp. 347–358. (In Russian) <https://doi.org/10.29326/2304-196X-2022-11-4-347-358>
- Netherton C.L., Goatley L.C., Reis A.L., Portugal R., Nash R.H., Morgan S.B., Gault L., Nieto R., Norlin V., Gallardo C., Ho C.S., Sánchez-Cordón P.J., Taylor G., Dixon L.K. Identification and immunogenicity of african swine fever virus antigens. *Front. Immunol.*, 2019, vol. 10, article number: 1318. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.01318>
- Sharypova D.V., Zhukov I.Yu., Vlasova N.N., Puzankova O.S., Gavrilova V.L., Igolkin A.S., Koropova N.N., Zhanova T.V. Comparative analysis of the reproductive properties of the African swine fever virus isolate Odintsovo 02/14 in primary cell cultures. *Veterinariya segodnya [Veterinary Science Today]*. 2017, vol. 20, no. 1, pp. 5–9. (In Russian)
- Takenouchi T., Masujin K., Suzuki S., Haraguchi S., Hiramatsu K., Kokuho T., Uenishi H. Establishment and characterization of the immortalized porcine lung-derived mononuclear phagocyte cell line. *Front Vet Sci.*, 2022, vol. 9, article number: 1058124. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.1058124>
- Mazlum A., Sharypova D.V., Gavrilova V.L., Puzankova O.S., Zhukov I.Yu., Aronova E.V., Vlasova N.N., Igolkin A.S. *Vydelenie i titrovaniye virusa Afrikanской chumy svinei v kul'ture kletok selezenki svini: metod. rekomendatsii* [Isolation and titration of African swine fever virus in pig spleen cell culture: Methodological recommendations]. Vladimir, FGBI «ARRIAH», 2019, pp. 24. (In Russian)
- Wilkinson P.J., Lawman M.J., Johnston R.S. African swine fever in Malta, 1978. *Vet Rec.* 1980, vol. 106, no. 5, pp. 94–97. <https://doi.org/10.1136/vr.106.5.94>
- Roszyk H., Franzke K., Breithaupt A., Deutschmann P., Pikalo J., Carrau T., Blome S., Sehl-Ewert J. The Role of Male Reproductive Organs in the Transmission of African Swine Fever-Implications for Transmission. *Viruses*, 2021, vol. 14, no. 1. <https://doi.org/10.3390/v14010031>
- Perrard-Sapori M.H., Chatelain P.C., Rogemond N., Saez J.M. Modulation of Leydig cell functions by culture with Sertoli cells or with Sertoli cell-conditioned medium: effect of insulin, somatomedin-C and FSH. *Mol Cell Endocrinol.*, 1987, vol. 50, pp. 193–201. [https://doi.org/10.1016/0303-7207\(87\)90017-7](https://doi.org/10.1016/0303-7207(87)90017-7)
- Bernier M., Gibb W., Haour F., Collu R., Saez J.M., Ducharme J.R. Studies with purified immature porcine Leydig cells in primary culture. *Biol Reprod.*, 1983, vol. 29, no. 5, pp. 1172–1178. <https://doi.org/10.1095/biolreprod29.5.1172>
- Renier G., Gaulin J., Gibb W., Simard P., Leung T.K., Collu R., Ducharme J.R. Isolation, purification and culture of Sertoli cells from immature piglet testes. *Acta Endocrinol (Copenh)*, 1986, vol. 111, no. 1, pp. 411–418. <https://doi.org/10.1530/acta.0.1110411>
- Dores C., Rancourt D., Dobrinski I. Stirred suspension bioreactors as a novel method to enrich germ cells from pre-pubertal pig testis. *Andrology*, 2015, vol. 3, no. 3, pp. 590–597. <https://doi.org/10.1111/andr.12031>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Ольга С. Пузанкова и Вера Л. Гаврилова получали первично-трипсинизированную культуру клеток тестикул свиней. Данила С. Моисеенко и Роман С. Чернышев оптимизировали посевную концентрацию. Роман С. Чернышев определял способность к репродукции вируса АЧС в культуре клеток ТС. Данила С. Моисеенко, Роман С. Чернышев и Алексей С. Иголкин проанализировали данные, 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

Olga S. Puzankova and Vera L. Gavrilova obtained primary trypsinized culture of pig testicle cells. Danila S. Moiseenko and Roman S. Chernyshev optimised the seeding concentration. Roman S. Chernyshev determined the ability of ASFV to reproduce in ST cell culture. Danila S. Moiseenko, Roman S. Chernyshev and Alexey S. Igolkin analysed the data and wrote 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

Данила С. Моисеенко / Danila S. Moiseenko <https://orcid.org/0009-0003-4465-0179>

Роман С. Чернышев / Roman S. Chernyshev <https://orcid.org/0000-0003-3604-7161>

Ольга С. Пузанкова / Olga S. Puzankova <https://orcid.org/0000-0003-1584-3169>

Вера Л. Гаврилова / Vera L. Gavrilova <https://orcid.org/0000-0001-5843-2779>

Алексей С. Иголкин / Alexey S. Igolkin <https://orcid.org/0000-0002-5438-8026>

Оригинальная статья / Original article

УДК 598.2:591.553

DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-8



Орнитофауна центральной части Верхнеяузского водно-болотного комплекса национального парка «Лосиный остров» в послегнездовой период

Юрий И. Мануков, Егор М. Щелканов, Наталья А. Жбанкова

Государственный университет просвещения, Москва, Россия

Контактное лицо

Егор М. Щелканов, студент, кафедра общей биологии и биоэкологии, факультет естественных наук, Государственный университет просвещения; 105005 Россия, г. Москва, ул. Радио, 10А/2.
Тел. +79243215162
Email egorshchelkanov@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0202-958X>

Формат цитирования

Мануков Ю.И., Щелканов Е.М., Жбанкова Н.А. Орнитофауна центральной части Верхнеяузского водно-болотного комплекса национального парка «Лосиный остров» в послегнездовой период // Юг России: экология, развитие. 2026. Т. 21, N 2. С. 90-100. DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-8

Получена 2 марта 2026 г.

Прошла рецензирование 23 апреля 2026 г.

Принята 25 апреля 2026 г.

Резюме

Цель: изучение фауны диких птиц оценка состояния среды ее обитания на северо-востоке центральной части Верхнеяузского водно-болотного комплекса (ВЯВБК) на территории Национального парка «Лосиный остров» в послегнездовой период (август-октябрь 2021 г.).

Материалы и методы: маршрутные учеты, учеты во время пролетов, учеты в массовых скоплениях, полных визуальных учетов – в августе 2021 г. было выполнено 3 учета (10.08, 17.08, 25.08), в сентябре – 4 (04.IX, 11.IX, 18.IX, 22.IX), в октябре – 5 (02.X, 09.X, 13.X, 20.X, 27.X), в ноябре – 5 (03.XI, 10.XI, 20.XI, 21.XI, 24.XI). Общую жесткость воды определяли методом комплексонометрического титрования. Содержание гидрокарбонат-ионов определялось титриметрически. Для оценки содержания сульфат-ионов использовался турбидиметрический метод.

Качество воды ВЯВБК по исследованным показателям не представляет угрозы для орнитофауны. В результате визуальных учетов зафиксирован 21 вид диких птиц из 7 семейств: ястребиных (Accipitridae), зимородковых (Alcedinidae), утиных (Anatidae), цаплевых (Ardeidae), чайковых (Laridae), пастушковых (Rallidae) и поганковых (Podicipedidae). В структуре численности диких птиц на территории ВЯВБК как за весь период наблюдения, так и в отдельные месяцы доминировали утиные. Вторым по численности семейством являются пастушковые. В работе описано первое обнаружение широконоски (*Spatula clypeata*) и серой утки (*Mareca strepera*) в центральной части ВЯВБК.

В целях совершенствования природно-охранных мероприятий на территории Национального парка «Лосиный остров» целесообразно рассматривать ВЯВБК в качестве особо охраняемой природной территории.

Ключевые слова

Орнитофауна, Национальный парк «Лосиный остров», Верхнеяузский водно-болотный комплекс, видовой состав, численность, послегнездовой период.

Avifauna of the central part of the High Yauza wetland complex of the Losiny Ostrov National Park, Russia in the post-breeding period

Yury I. Manukov, Egor M. Shchelkanov and Natalia A. Zhbankova

State University of Education, Moscow, Russia

Principal contact

Egor M. Shchelkanov, student, Department of General Biology and Bioecology, Faculty of Natural Sciences, Federal State University of Education, 10A/2 Radio St, Moscow, Russia 105005.

Tel. +79243215162

Email egorshchelkanov@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0202-958X>

How to cite this article

Manukov Yu.I., Shchelkanov E.M., Zhbankova N.A. Avifauna of the central part of the High Yauza wetland complex of the Losiny Ostrov National Park, Russia in the post-breeding period. *South of Russia: ecology, development*. 2026; 21(2):90-100. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-8

Received 2 March 2026

Revised 23 April 2026

Accepted 25 April 2026

Abstract

Aim: Investigation of the fauna of wild birds and evaluation of the state of their aqueous habitats in the north-east of the central part of the High Yauza wetland complex (HYWC) on the territory of the Losiny Ostrove (Elk Island) National Park in the post-breeding period of August-October 2021. **Materials and methods:** route counting, counting during flights, accounting in mass clusters, complete visual counting. In August 2021, – 3 route countings were performed (10.08, 17.08, 25.08), in September – 4 (04.IX, 11.IX, 18.IX, 22.IX), in October – 5 (02.X, 09.X, 13.X, 20.X, 27.X) and in November – 5 (03.XI, 10.XI, 20.XI, 21.XI, 24.XI). The total hardness of the water was determined by complexometric titration. The content of bicarbonate ions was determined titrimetrically. The turbidimetric method was used to estimate the sulphate ion content.

According to the indicators studied the water quality in the HYWC does not pose a threat to avifauna. As a result of visual surveys, 21 species of wild birds from 7 families were recorded: Accipitridae, Alcedinidae, Anatidae, Ardeidae, Laridae, Rallidae and Podicipedidae. The structure of the number of wild birds in the territory of HYWC was dominated by duck birds, both during the entire observation period and in certain months. The second largest family is the Rallidae. The paper describes the first detection of Northern shoveler (*Spatula clypeata*) and Gadwall (*Mareca strepera*) in the central part of HYWC.

In order to improve nature protection measures on the territory of the Losiny Ostrova National Park, it is advisable to consider HYWC as a specially protected natural area.

Key Words

Avifauna, Losiny Ostrov National Park, High Yauza wetland complex, species composition, number, post-breeding period.

ВВЕДЕНИЕ

Для густонаселенного Московского региона изучение орнитофауны водно-болотных угодий, которые, с одной стороны, имеют средообразующее значение, а с другой стороны, подвергаются постоянно усиливающемуся антропогенному воздействию, актуально как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения.

Верхнеяузский водно-болотный комплекс (ВЯВБК), или Яузские болота, расположен в северной части Национального парка «Лосиный остров», на территории Московской области, в пределах городских округов Мытищи и Королев. ВЯВБК занимает долину р. Яуза протяженностью 11 км; ширина водно-болотного комплекса варьирует в пределах 0,5–4,1 км; общая площадь достигает 1000 га [1]. Национальный парк был основан в 1983 г., однако активное изучение орнитофауны западной (нижней) части ВЯВБК началось лишь в начале XXI века [1–7], в то время как в центральной части этих водно-болотных угодий подобные исследования до сих пор не проводились.

Целью данного исследования было изучение фауны диких птиц оценка состояния среды ее обитания на северо-востоке центральной части ВЯВБК Национального парка «Лосиный остров» в районе оз. Торфянка в послегнездовой период. В задачи исследований входило изучение химического состава воды и почвы, определение видового состава и численности птиц в августе-декабре 2021 г.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Район исследований – это карьер возле п. Торфопредприятие (городской округ Королев) с географическими координатами: 55,879813° с.ш., 37,841199° в.д. На месте затопления карьера образовано оз. Торфянка, оно же Байк-озеро, Тряпка или Карьер (длина береговой линии около 1,75 км).

Видовой состав и численность водоплавающих и околоводных птиц изучались с использованием комплекса методик, включающих в себя маршрутные учеты, учеты во время пролетов, учеты в массовых скоплениях, полных визуальных учетов на водно-болотных угодьях [8–12] в послегнездовой и миграционный периоды: 10.VIII–24.XI.2021.

В августе 2021 г. было выполнено 3 учета (10.08, 17.08, 25.08), в сентябре – 4 (04.IX, 11.IX, 18.IX, 22.IX), в октябре – 5 (02.X, 09.X, 13.X, 20.X, 27.X), в ноябре – 5 (03.XI, 10.XI, 20.XI, 21.XI, 24.XI). В начале декабря вся площадь открытой воды района исследований полностью покрылась льдом. Совокупное время учетных работ составило около 30 ч; общая длина учетных маршрутов превысила 32 км. Максимальная дальность определения обнаруженной птицы – 800 м. Площадь обследования водной поверхности составляла около 11,61 га. Сбор полевых данных производился по участку площадью 79,8 га, включающему как собственное оз. Торфянка, так и систему болот с южной стороны от карьера. Осмотр всей обследуемой площади производился с нескольких локаций на берегу, а также вдоль береговой линии озера. Для наблюдений использовались бинокли с кратностью увеличения 8×30. Фиксировали всех птиц преимущественно на открытой воде и в полете, просматривали близлежащие и дальние видимые крепи с тростниковыми и рогозовыми зарослями.

Отбор проб почвы для химического анализа осуществлялся согласно ГОСТ 17.4.3.01-83 и ГОСТ 17.4.4.02-84 [13–15].

Общую жесткость воды определяли методом комплексонометрического титрования [16–18]. Содержание гидрокарбонат-ионов определялось титриметрически [17–19]. Для оценки содержания сульфат-ионов использовался турбидиметрический метод [19].

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С северной, западной и восточной части берега оз. Торфянка хорошо виден открытый участок воды, который просматривается до противоположного берега. С южной стороны озеро просматривалось не полностью, из-за обширного заболоченного участка. Центральная часть ВЯВБК представлена болотами низинного кустарничково-лесного типа. Его окружает смешанный лес и разнотравный луг. Ландшафт составляет пологий склон от смешанного леса в сторону карьера и болота переходящий в покаты. На водоразделе между болотом и озером имеется холмистость с перепадами высот от 0,5 до 2,1 м. Северо-восток центральной части ВЯВБК в районе оз. Торфянка представляет собой достаточно обводненный участок Яузских болот, простирающийся вдоль русла р. Яуза с многочисленными каналами, которые используются для обводнения, развития водного транспорта и улучшения санитарного состояния территории. Здесь преобладают мелководные обширные плесы, озера и протяженные тростниковые крепи; встречаются заболоченные луга и участки леса. Южнее оз. Торфянка находится обширная заросшая, обводненная и заболоченная территория, образовавшаяся вследствие сбросов воды в долину р. Яузы в 1938 г. В целом, тип растительности района исследований можно охарактеризовать как болотный комплекс ассоциаций, состоящий из мозаичного разнотравно-злакового растительного покрова, образованного благодаря различным формам микрорельефа (кочки, гряды, мочажины и т.п.).

Генетический тип почвы в пределах ВЯВБК: лугово-болотная; подтип: торфяно-глеевая, характеризующаяся накоплением торфа в горизонте A_0 , для горизонта В характерно выраженное оглеение. В пробах почвы выявлены незначительное превышение железа, которое является элементом с наименьшим (третьим) классом опасности и достаточно распространено в почве (содержание 3–4 % от сухой массы), поэтому выявленную концентрацию металла можно считать приемлемой [15].

Вода в исследуемой локации ВЯВБК по исследуемым показателям соответствует качеству питьевой воды [18]. Результаты анализа воды на жесткость и содержание гидрокарбонат- и сульфат-ионов представлены в табл. 1.

Таким образом, условия среды обитания популяции водной и околоводной орнитофауны центральной части ВЯВБК Национального парка по состоянию качества воды и почвы можно считать оптимальными для птиц водного и околоводного экологических комплексов.

Август 2021 г. был достаточно теплым и сухим. Осень 2021 г. была умеренно теплой. Температура соответствовала средним многолетним показателям. В ноябре среднесуточные температуры воздуха понизились до отрицательных показателей (рис. 1).

Таблица 1. Некоторые параметры химического состава воды верхней (восточной) части Верхнеяузского водно-болотного комплекса

Table 1. Some parameters of the chemical composition of the water in the upper (eastern) part of the High Yauza wetland complex

Параметр Parameter	Количество измерений Number of Measurements	Единица измерения Unit of Measurement	Обнаруженные значения Detected Values	Предельно-допустимые концентрации Maximum Permissible Concentrations
Жесткость воды Water hardness	51	мг-экв/л / mg-eq/l	$4,45 \pm 0,05$	$\leq 7,00$
Содержание гидрокарбонат-ионов Bicarbonate ions content	51	мг/л / mg/l	$201,1 \pm 2,2$	≤ 300
Содержание сульфат-ионов Sulphate ions content	51	мг/л / mg/l	$80,3 \pm 1,7$	≤ 500

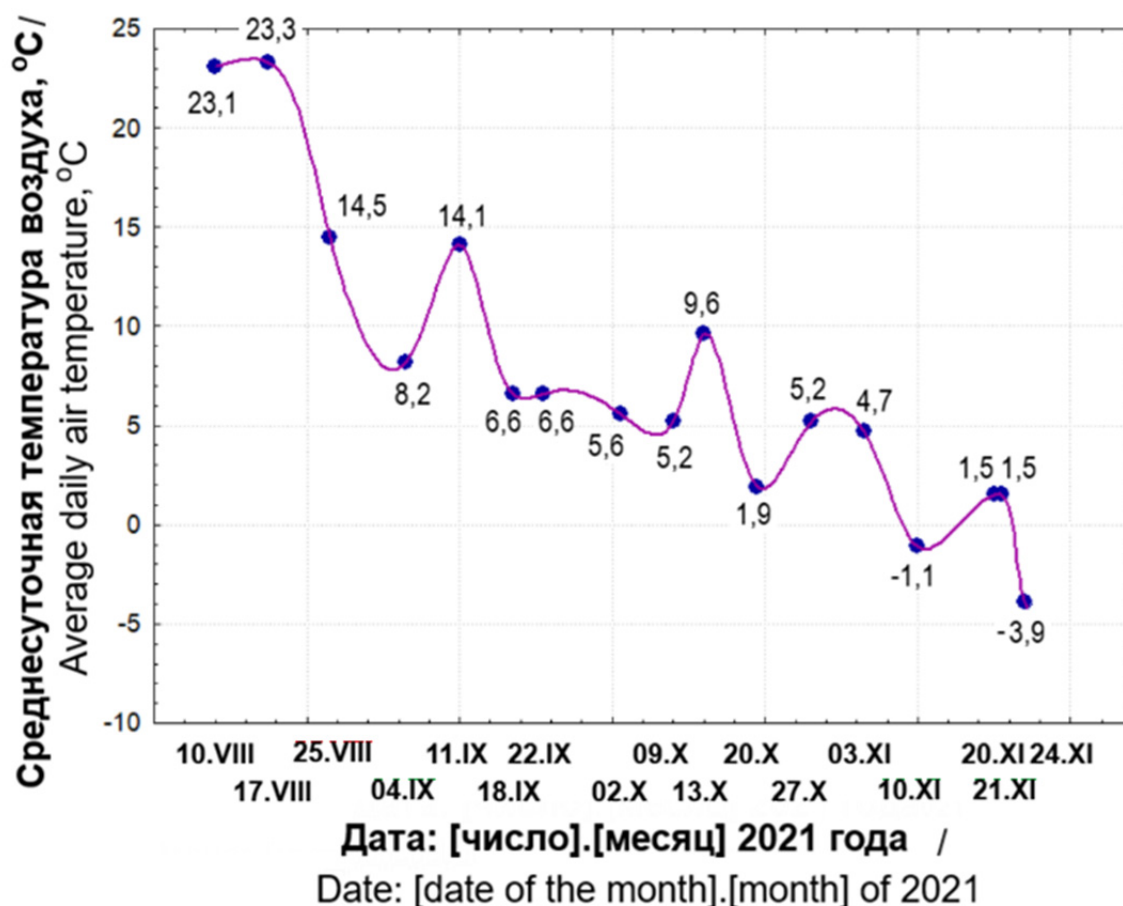


Рисунок 1. График колебаний среднесуточной температуры за период учетов в 2021 г. на Верхнеяузском водно-болотном комплексе (по данным [20])

Figure 1. Graph of fluctuations in the average daily temperature during the accounting period in 2021 at the High Yauza wetland complex (according to [20])

В результате визуальных учетов зафиксирован 21 вид диких птиц из 7 семейств (рис. 2): водоплавающих (13 видов), околоводных (5) и хищных (3) (табл. 2).

В августе на территории центральной части ВЯВБК были обнаружены 10 видов диких птиц (рис. 3А): водоплавающих (6 видов), околоводных (3) и хищных (1). Наиболее многочисленными видами были хохлатая чернеть (*Aythya fuligula*), обыкновенная кряква (*Anas platyrhynchos*), красноголовый нырок (*Aythya ferina*) и чомга (*Podiceps cristatus*). Чомги для гнездования используют тростниковые крепи, а открытое пространство озера – для охоты. Во все дни

наблюдений в основном наблюдалась одна небольшая группировка крякв; наибольшее количество птиц данного вида фиксировалась на пролете. Малая выпь (*Botaurus minutus*) обитает преимущественно в тихих густых зарослях оз. Торфянка и ведет скрытный образ жизни. Этот вид в Подмосковье является редкой птицей, населяет стоячие воды в прибрежных высоких зарослях [21], которые в большом количестве встречаются в пределах ВЯВБК. Во все дни августовских учетов мы фиксировали самку малой выпи. В группу малочисленных видов птиц входят красноголовый нырок, озерная чайка и камышица (*Gallinula*

chloropus). Это закономерно, поскольку озерные чайки уже в июле приступают к кочевкам. В начале августа фиксировались две ювенильные особи озерной чайки, в остальное время представители этого вида не

фиксировались. Камышницы фиксировались на юго-восточной стороне озера в месте небольшого пролива, в зарослях тростника.

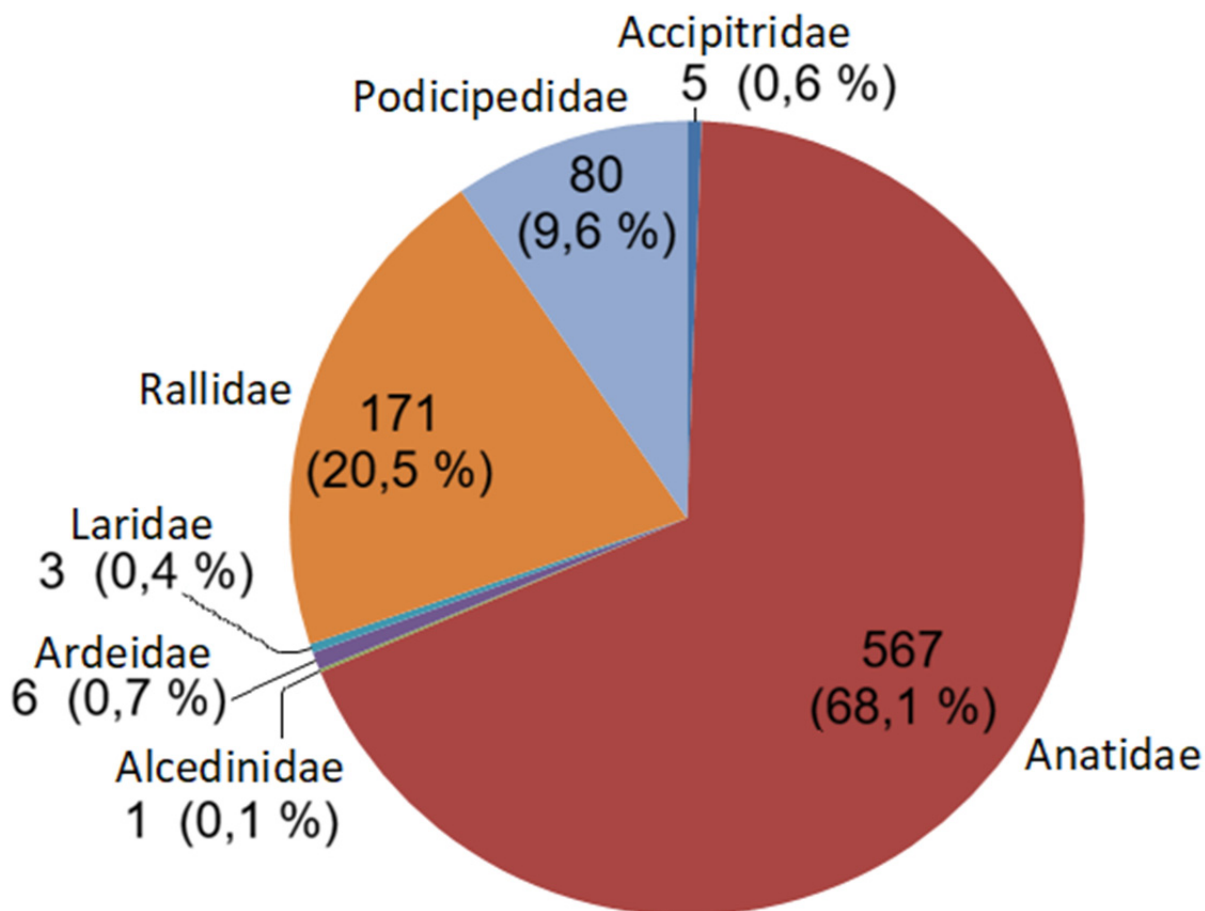


Рисунок 2. Распределение встреченных диких птиц на территории центральной части Верхнеяузского водно-болотного комплекса по семействам за весь период наблюдений (10.VIII–24.XI.2021)
Figure 2. Distribution of wild birds encountered in the central part of the High Yauza wetland complex by family over the entire observation period (10.VIII–24.XI.2021)

В сентябре-октябре в связи с сезонными миграциями (в первую очередь – водно-околоводного экологического комплекса) возросли численность и таксономическое разнообразие диких птиц на территории центральной части ВЯВБК (табл. 2, рис. 3 Б-В). Это универсальное явление для водно-болотных угодий, находящихся в пределах миграционных путей, в том числе – для ВЯВБК, входящего в систему восточно-европейского миграционного русла [22]. Сезонные скопления птиц в водно-болотных угодьях повышают интенсивность популяционных взаимодействий и вероятность заражения возбудителями инфекционных заболеваний [22–25].

В сентябре-октябре наиболее многочисленными видами диких птиц в центральной части ВЯВБК были кряква, лысуха (*Fulica atra*) и хохлатая черныш (табл. 2, рис. 3 Б–В). Лысух в большом количестве фиксировали с южной стороны от оз. Торфянка, между крепями – там они держались небольшими группами, однако их можно было часто видеть и на открытой воде. Центральная часть ВЯВБК служит хорошим местом для гнездования и обитания данного вида птиц, так как лысухи предпочитают

гнездиться в густых зарослях тростника, рогоза и камыша. Стоит отметить, что лысухам свойственно возвращаться на свои старые места гнездования, при этом обитание в данной местности лысух полностью верифицировано Ю.Ю. Блохиным при экспертной оценке состояния орнитофауны в 1998 г. [3]. До 2005 г. этот вид был немногочисленным, однако в настоящее время наблюдается положительная динамика его численности [1; 5–7].

Численность хохлатой черныши в сентябре-октябре возросла по сравнению с августовскими учетами. Пик численности наблюдался 18.IX. Последующий спад численности связан с сезонным перелетом.

Вплоть до конца сентября отмечалась высокая доля (66,1–79,5 %) сеголетних особей чомги. Пик этого показателя пришелся на 11.IX и совпал с пиком абсолютной численности этого вида (табл. 2). Такое количество подросших птенцов свидетельствует об успешности гнездования больших поганок, которые выбирают для гнездования преимущественно просторные мелководные озера с тростниковыми укрытиями.

Таблица 2. Видовой состав и характеристики встречаемости[#] диких птиц в верхней (восточной) части Верхнеяузского водно-болотного комплекса
Table 2. Species composition and occurrence characteristics[#] of wild birds in the upper (eastern) part of the High Yauza wetland complex

Экокомплекс Ecological Complex	Отряд Order	Семейство Family	Вид Species	Количество регистраций диких птиц, особей / Number of wild bird registration, individuals																					
				10.	17.	25.	VIII	VIII	04.	11.	18.	22.	IX	02.	09.	13.	20.	27.	X	03.	X	10.	20.	21.	24.
				VIII	VIII	VIII	VIII	VIII	IX	IX	IX	IX	IX	X	X	X	X	X	X	XI	XI	XI	XI	XI	XI
Водоплавающие птицы / Waterfowl	Anseriformes	Anatidae	Чирок-свистунок (<i>Anas crecca</i>) ^{М1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0,4	0	0	0	0	0
			Обыкновенная кряква (<i>Anas platyrhynchos</i>)	15	7	11	11,0	11	86	22	14	33,3	9	5	120	16	9	31,8	11	1	1	0	0	0	2,4
			Красногловый нырок (<i>Aythya ferina</i>) ^{М1}	6	7	10	7,7	6	0	1	0	1,8	0	0	1	1	1	0,6	0	1	0	0	0	0	2,0
			Хохлатая черныш (<i>Aythya fuligula</i>)	19	12	7	12,7	10	18	27	12	16,8	9	6	4	0	0	3,8	0	0	0	0	0	0	7,3
			Гоголь (<i>Bucephala clangula</i>) ^{М1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	3	1,8	0	2	0	0	0	0,4
			Лебедь-кликун (<i>Cygnus cygnus</i>) ^{Л1}	0	0	0	0	0	0	0	1	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1
			Лебедь-шипун (<i>Cygnus olor</i>)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	9	2	0	0	3,2	2	9	0	0	0	0	2,2
			Серая утка (<i>Mareca strepera</i>) ^{Л3, М1}	0	0	0	0	0	0	3	0	0,8	0	2	0	0	0	0,4	0	0	0	0	0	0	0,3
			Широконоска (<i>Spatula clypeata</i>) ^{М1}	0	0	0	0	0	0	5	1	1,5	0	2	1	2	0	1,0	0	0	0	0	0	0	0,6
			Огарь (<i>Tadorna fenuginea</i>)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	4	4	0	3,0	0	0	0	0	0	0,9
	Gruiformes	Rallidae	Лысуха (<i>Fulica atra</i>) ^{М1}	3	7	8	6,0	25	9	20	8	15,5	5	14	1	62	0	16,4	0	0	0	0	0	0	9,5
			Камышица (<i>Gallinula chloropus</i>)	1	2	3	2,0	1	0	0	2	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5
			Чомга (<i>Podiceps cristatus</i>)	18	7	10	11,7	8	14	9	6	9,3	2	0	1	2	1	1,2	1	1	1	0	0	0	4,7
Сумма / Sum	3 отряда 3 orders	3 семейства 3 families	13 видов 13 species	62	42	49	51,0	61	127	87	44	79,8	34	43	134	93	14	63,6	14	14	0	0	0	5,6	48,1

Околоводные птицы Shore birds	Coraciiformes	Alcedinidae	Обыкновенный зимородок (<i>Alcedo atthis</i>) ¹²		0	1	0	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1			
		Gruiformes	Lariidae	Озерная чайка (<i>Chroicocephalus ridibundus</i>)	2	0	0	0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1		
				Сизая чайка (<i>Larus canus</i>)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1		
				Серая цапля (<i>Ardea cinerea</i>) ^{13, M0}	0	0	0	0	0	2	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	
	Pelecaniformes	Ardeidae	Малая выпь (<i>Botaurus minutus</i>) ^{13, M1}	1	1	1	1,0	0	1	0	0	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2		
Сумма / Sum	3 отряда 3 orders	3 семейства 3 families	5 видов 5 species	3	2	1	2,0	0	3	0	0	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,6		
Хищные птицы / Predatory birds	Accipitriformes		Ястреб-тетеревятник (<i>Accipiter gentilis</i>) ^{M5}	0	0	0	0	0	0	0	1	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1		
			Канюк обыкновенный (<i>Buteo buteo</i>) ^{M1}	0	0	0	0	0	0	2	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1		
			Болотный луны (<i>Circus aeruginosus</i>) ^{M1}	1	0	0	0,3	0	1	0	0	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	
		Сумма / Sum	1 семейство 1 family	3 вида 3 species	1	0	0	0,3	0	1	2	1	1,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	
Итого Total	6 отрядов 6 orders	7 семейств 7 families	21 вид 21 species	66	44	50	53,3	61	131	89	45	81,5	34	43	134	93	15	63,8	14	14	0	0	5,6	49,0

Для получения значения плотности представленные в таблице значения встречаемости (измеренное или усредненное) необходимо разделить на площадь учетного участка, равную 79,8 га /
To obtain the density value the occurrence value shown in the table (measured or averaged) must be divided by the area of the accounting site equal to 79.8 ha

* Среднее значение за соответствующий период / The average value for the corresponding period

¹² Вид входит в п-ую категорию редкости Красной книги Московской области [26] / The species is included in the n-th exotic category of the Red Book of Moscow region [26]

^{M1} Вид входит в п-ую категорию редкости Красной книги Москвы [27] / The species is included in the n-th exotic category of the Red Book of Moscow [27]

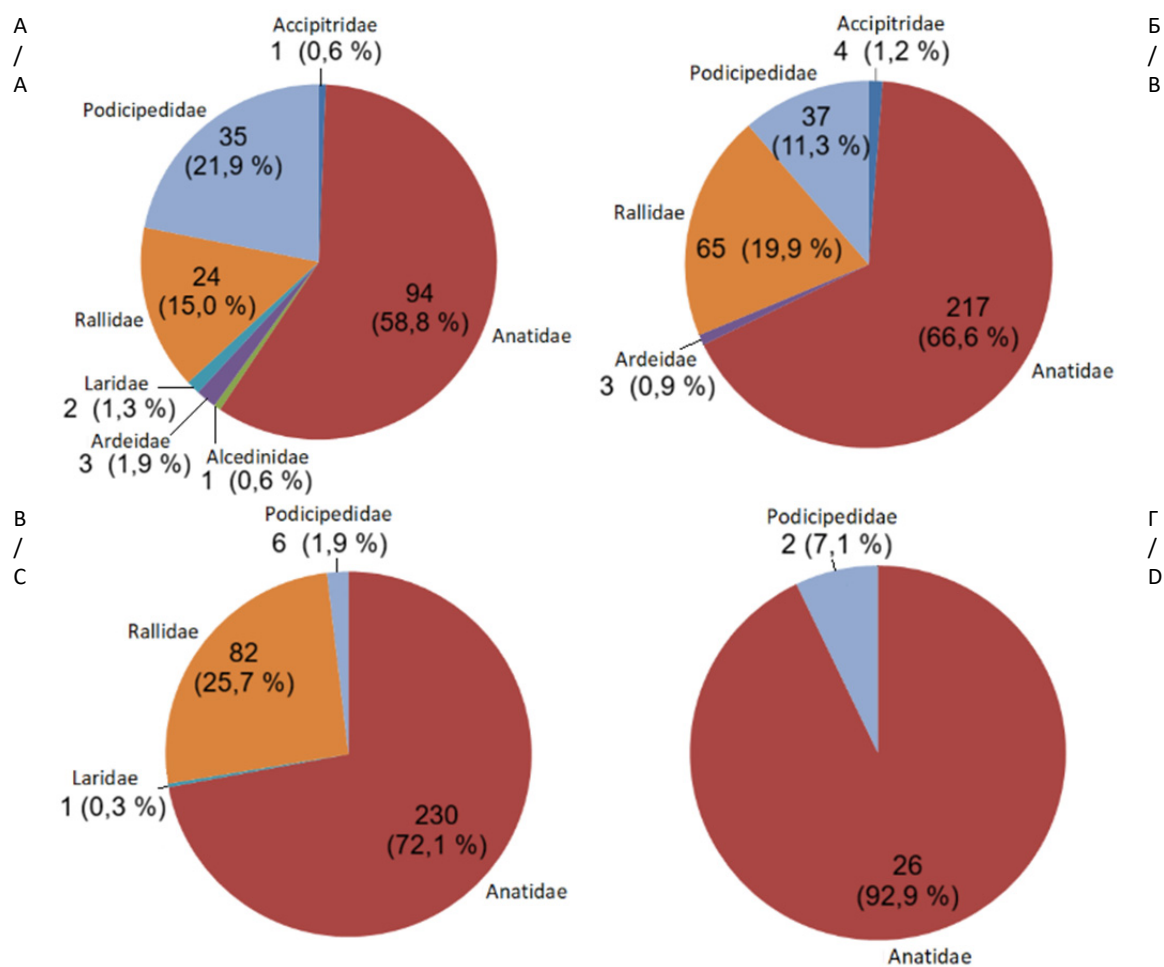


Рисунок 3. Распределение встреченных диких птиц на территории центральной части Верхнеяузского водно-болотного комплекса по семействам: А – в августе; Б – в сентябре; В – в октябре; Г – в ноябре
Figure 3. Distribution of wild birds encountered in the central part of the High Yauza wetland complex by family: A – in August; B – in September; C – in October; D – in November

Огарей (*Tadorna ferruginea*), гоголей (*Bucephala clangula*) и лебедей (*Cygnus* spp.) мы наблюдали на водно-болотной системе с южной стороны от оз. Торфянка, где они плавали между камышовыми, рогозовыми и тростниковыми колками. Эти виды птиц мы не регистрировали в августе, что, вероятно, связано с тем, что данная территория болотного комплекса имеет обширные густые трудно просматриваемые заросли, которые к осени значительно оголились.

Одиночный лебедь-кликун (*Cygnus cygnus*), издававший в полете издавал звонкие звуки, был отмечен 22.IX: он скрылся в зарослях тростника. В ВЯВБК лебедей-кликуну наблюдали еще с 1990-х годов, хотя при экспертной инвентаризации в 1998 г. их не обнаружили [5]. Достоверная регистрация лебедя-кликуну на территории Лосиног Острова в центральной части ВЯВБК, близ п. Торфпредприятие, была зафиксирована 11.11.2019, когда сотрудник Национального парка В.В. Солодушкин представил фотографию 12 лебедей-кликуну [1].

Лебеди-шипуну (*Cygnus olor*) впервые были отмечены нами 02.X на южной стороне озера: 2 взрослые особи и 3 ювенильные. При учете 09.X был обнаружен летящий над южными болотами клин лебедей-шипуну. 13.X мы зафиксировали наличие 2 взрослых лебедей, пролетающих в направлении с востока на запад. Всех лебедей мы наблюдали с

пригорка на южном берегу оз. Торфянка. В общей сложности было выявлено наличие двух семей лебедей-шипуну. Иногда наблюдалось интересное поведение этих птиц, похожее на брачное. Лебедь-шипун для территории Лосиног острова является сравнительно недавно появившейся птицей – первые достоверные встречи отмечены в 2015 г. [5].

Красноголовый нырок отмечался нами 18 сентября в количестве 10 особей. Этот вид на территории ВЯВБК не образует многочисленных скоплений. Период отлета нырков пришелся на конец сентября. В октябре нами наблюдалась одинокая самка, которая регистрировалась постоянно на открытой глади водоема до наступления отрицательных температур и ледостава.

Обнаруженные нами широконоски (*Spatula clypeata*) – первая фиксация датирована 18.X (табл. 2) – это первая встреча этого вида в ВЯВБК. Широконоски в основном держались рядом с лысухами, крякками и огарями на южной стороне оз. Торфянка. Низкая численность широконосок обусловлена малочисленностью здесь данного вида и сроками отлета, который у них начинается в сентябре.

Серые утки (*Mareca strepera*), также впервые обнаруженные в ВЯВБК, и чирки-свистунки (*Anas crecca*), по-видимому, не относятся к местной

популяции и являются случайными мигрирующим особями.

Пара серых цапель была зафиксирована на пролете 11.IX. Есть сведения, что пара серых цапель проводило время летом 2019 г. на болоте у Лосяной биостанции [1]. Гнездование данного вида птиц на территории ВЯВБУ пока не доказано.

Озерные чайки (*Chroicocephalus ridibundus*), фиксировавшиеся в августе, не встречались в осенний период (табл. 2). Это обусловлено тем, что озерные чайки покидают гнездовую колонию в первой декаде августа и приступают к кочевкам, переходящим в осенний отлет.

В послемиграционный период (в октябре-ноябре) численность птиц резко снизилась в связи с их отлетом на зимовки. При исследовании в этот период можно определить окончательные сроки отлета птиц (сроки отлета первых особей, остальной массы и последних), последовательность отлета, его запаздывание, а также узнать, какие птицы остаются на зимовку в ВЯВБК. В двадцатых числах ноября вся водная поверхность в окрестностях оз. Торфянка покрылась льдом.

Таким образом, как за весь период наблюдений (рис. 2), так и в отдельные месяцы (рис. 3) в структуре численности диких птиц на территории ВЯВБК доминировали утиные (Anatidae), причём их доля монотонно возрастала: с 58,8 % до 92,9 % (в среднем, 68,1 %). Пастушковые (Rallidae) являются вторым по численности семейством за исключением ноября (рис. 2–3).

Необходимо учитывать тот факт, что при подсчете общего числа обитаемых на данной территории птиц не всех уток можно наблюдать во время учета, следовательно, и зафиксировать их, поскольку многие птицы скрываются в зарослях. Согласно методике И.М. Сапетиной, полученные данные по учету в августе необходимо увеличить на 30 %, так как в августе удается зарегистрировать около 70 % уток [10]. Для чаек нет смысла рассчитывать плотность популяции по данным наблюдения, поскольку радиальный разлёт чаек начинается сразу же после завершения гнездового периода, приходящегося на июль, а отлет чаек к зимовочным ареалам начинается уже в августе. Серая цапля (*Ardea cinerea*), лебедь-шипун и лебедь-кликун гнездятся за пределами Лосяного острова, и территория этого Национального парка является для них только кормовыми угодьями. Хотя серая утка изредка гнездится на территории ВЯВБК, в 2021 г. она была здесь только на кормежке. Огарь селятся в степной зоне Евразии на открытых водоемах, и для Подмоскovie является залетным с селитебных территорий и нерегулярно гнездящимся видом [28].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Национальный парк «Лосяной остров» является не только крупнейшим лесным массивом на территории Москвы, но и содержит на своей территории крупнейшую водно-болотную систему (ВЯВБК). Последняя, по-видимому, сохранится не только в ближнесрочной, но и в среднесрочной перспективе, поскольку даже при острой необходимости строительства инфраструктурных или линейных объектов водно-болотные угодья, как наименее удобные для строительства, будут задействованы в

последнюю очередь. Регулярный учет диких птиц на территории ВЯВБК позволяет оперативно выявлять изменения видового состава, численности их популяций и распределение птиц в различных типах биотопов. Такие данные помогают оценивать состояние экосистем, уровень антропогенной нагрузки и прогнозировать дальнейшие изменения природной среды с целью принятия своевременных мер по сохранению биологического разнообразия региона.

В целях совершенствования природно-охранных мероприятий на территории Национального парка «Лосяной остров» целесообразно рассматривать ВЯВБК в качестве особо охраняемой природной территории. Расположенные поблизости высшие учебные заведения могли бы взять на себя проведение регулярных учетов и проведение научно-образовательных экскурсий по экологическим тропам, что будет существенно способствовать не только повышению качества и предметной ориентации образовательного процесса, но и сохранению биологического разнообразия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Солоха А.В. Мониторинг водных птиц мытищинских плавней в летне-осенний период // Вестник охотоведения. 2021. Т. 18. N 1. С. 28–35.
2. Арсеньева Е.В., Мануков Ю.И. Гнездовая и послегнездовая орнитофауна Верхнеуэского водно-болотного комплекса национального парка «Лосяной остров» // Материалы 8-й Международной научно-практической конференции «Экологические проблемы промышленных городов», Саратов, 20-22 апреля 2017. С. 308–311.
3. Блохин Ю.Ю., Молочаев А.В., Блохин А.Ю. Летнее население водоплавающих птиц Лосяного острова // Казарка. Бюллетень Рабочей группы по гусеобразным Северной Евразии. 2001. N 7. С. 256–265.
4. Ганицкий И.В. Фауна птиц национального парка «Лосяной остров» (проблемы инвентаризации) // В кн.: Состояние природной среды национального парка «Лосяной остров» (по данным мониторинга за 2003–2005 гг.). Пушкино, 2006. С. 98–101.
5. Мануков Ю.И., Арсеньева Е.В. Фауна водоплавающих птиц Верхнеуэского водно-болотного комплекса национального парка «Лосяной остров» // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2017. N 2. С. 6–13. <https://doi.org/10.18384/2310-7189-2017-2-6-13>
6. Солоха А.В., Арсеньева Е.В. Весенне-летнее население водных птиц Мытищинских плавней // Вестник охотоведения. 2021. Т. 18. N 4. С. 253–259.
7. Солоха А.В. Сезонные аспекты в населении птиц Яэзских болот национального парка «Лосяной остров» // Русский орнитологический журнал. 2025. Т. 34. N 2545. С. 2805–2811.
8. Кандалова Г.К., Панченко В.Г., Приклонский С.Г. Методические указания по учету водоплавающих птиц. Москва: Колос, 1971. 16 с.
9. Равкин Ю.С., Челинцев Н.Г. Методические рекомендации по комплексному маршрутному учёту птиц. Москва: ВНИИ «Природа», 1990. 33 с.
10. Сапетин Я.В., Иванчев В.П., Кашенцева Т.А., Лавровский В.В., Приклонский С.Г. Птицы Окского заповедника и сопредельных территорий (биология, численность, охрана). Т. 1. Неворобыные птицы. Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2005. 320 с.
11. Bibby C.J., Burgess N.D., Hill D.A., Mustoe S.H. Bird census techniques. London: Academic Press, 2000. 257 p.
12. Delany S. Guidelines for national coordinators of the International Waterbird Census (IWC). URL: https://www.researchgate.net/publication/267398930_Guidelines

- _for_Participants_in_the_International_Waterbird_Census_IWC (дата обращения: 25.02.2026)
13. Учебно-полевая практика по ботанике: Пособие для студентов-заочников биологических факультетов педагогических институтов. Москва: Просвещение, 1975. 160 с.
 14. Мамонтов В.Г. Химический анализ почв и использование аналитических данных. Санкт-Петербург: Лань, 2019. 328 с.
 15. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Москва: Роспотребнадзор, 2021. 1029 с.
 16. Лурье Ю.Ю., Рыбникова А.И. Химический анализ производственных сточных вод. Москва: Химия, 1974. 336 с.
 17. Новиков Ю.В., Ласточкина К.О., Болдина Э.Н. Методы определения вредных веществ в воде водоемов. Москва: Медицина, 1981. 376 с.
 18. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Москва: Роспотребнадзор, 2001. 59 с.
 19. Петренко Д.Б., Марченко Д.Ю. Практическое руководство по химическому анализу природных и промышленных объектов. Москва: МГОУ, 2021. 78 с.
 20. Архив погоды в Королеве. URL: https://mete9.ru/archive_v_koroleve/JX5X
 21. Лапшин Н.В., Зимин В.Б., Артемьев А.В., Хохлова Т.Ю. Ресурсные виды птиц. Водоплавающие птицы // В кн.: Мониторинг и сохранение биоразнообразия таежных экосистем Европейского Севера России. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. С. 105–125.
 22. Львов Д.К., Ильичев В.Д. Миграции птиц и перенос возбудителей инфекций. Москва: Наука, 1979. 270 с.
 23. Львов Д.К., Щелканов М.Ю., Дерябин П.Г., Бурцева Е.И., Галкина И.В., Гребенникова Т.В., Прилипов А.Г., Усачев Е.В., Ляпина О.В., Шляпкинова О.В., Поглазов А.Б., Славский А.А., Морозова Т.Н., Васильев А.В., Забережный А.Д., Джаркенов А.Ф., Габбасов Ф.Б., Евдокимова М.И., Алипер Т.И., Литвин К.Е., Громашевский В.Л., Власов Н.А., Яшкуллов К.Б., Ковтунов А.И., Онищенко Г.Г., Непоклонов Е.А., Suarez D.L. Эпизоотия среди лебедей-шипун (Cygnus olor) в нижней дельте Волги (ноябрь 2005 г.), вызванная высокопатогенным вирусом гриппа А / H5N1 // Вопросы вирусологии. 2006. Т. 51. № 3. С. 10–16.
 24. Львов Д.К., Щелканов М.Ю., Дерябин П.Г., Прилипов А.Г., Фролов А.В., Федякина И.Т., Бурцева Е.И., Шляпкинова О.В., Поглазов А.Б., Альховский С.В., Галкина И.В., Иголкин А.В., Аканина Д.С., Гребенникова Т.В., Киреев Д.Е., Варкентин А.В., Славский А.А., Морозова Т.Н., Самохвалов Е.И., Литвин К.Е., Виткова О.Н., Щербакова Л.О., Ирза В.Н., Дрыгин В.В., Калмыков М.В., Фонтанецкий А.С., Забережный А.Д., Шевкопляс В.Н., Митенко Е.А., Щербина И.А., Алипер Т.И., Громашевский В.Л., Власов Н.А., Непоклонов Е.А., Suarez D. Эпизоотия среди диких и домашних птиц, вызванная высоковирулентным вирусом гриппа А / H5N1 генотипа 2.2 (Цинхай–Сибирский) на пути осенних миграций в северо-восточной части бассейна Азовского моря (Краснодарский край) // Вопросы вирусологии. 2008. Т. 53. № 2. С. 14–19.
 25. Lvov D.K., Shchelkanov M.Yu., Alkhovsky S.V., Deryabin P.G. Zoonotic viruses of Northern Eurasia. Taxonomy and Ecology. Academic Press, 2015. 452 p.
 26. Красная книга города Москвы. Москва: Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы, 2022. 849 с.
 27. Красная книга Московской области. Москва: Министерство экологии и природопользования Московской области, Комиссия по редким и находящимся под угрозой исчезновения видам животных, растений и грибов Московской области, 2018. 809 с.
 28. Арсеньева Е.В. Водоплавающие и околводные птицы: Атлас-определитель. Москва: Авторская книга, 2016. 96 с.
 - okhotovedeniya [Bulletin of Hunting Science]. 2021, vol. 18, no. 1, pp. 28-35. (In Russian)
 2. Arsenyeva E.V., Manukov Yu.I. Gnezhdovaya i poslegnezhdovaya ornitofauna Verkhneyauzskogo vodno-bolotnogo kompleksa natsional'nogo parka «Losinyi ostrov» [Nesting and Post-Nesting Avifauna of the High Yauza Wetland Complex of the National Park "Losiny Ostrov"]. *Materialy 8-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Ekologicheskie problemy promyshlennykh gorodov»*, Saratov, 20-22 aprelya 2017 [Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference "Environmental Problems of Industrial cities", Saratov, April 20-22, 2017]. Saratov, 2017, pp. 308-311. (In Russian)
 3. Blokhin Yu.Yu., Molochaev A.V., Blokhin A.Y. Summer population of waterfowl on Losiny Ostrov. Kazarka. Byulleten' Rabochei gruppy po guseobraznym Severnoi Evrazii [Kazarka. Bulletin of the Working Group on Geese of Northern Eurasia]. 2001, no. 7, pp. 256-265. (In Russian)
 4. Ganitsky I.V. Fauna of birds of the "Losiny Ostrov" National Park (inventory problems). In: *Sostoyanie prirodnoi sredy natsional'nogo parka «Losinyi ostrov» (po dannym monitoringa za 2003–2005 gg.)* [The State of the Natural Environment of the "Losiny Ostrov" National Park (According to Monitoring Data for 2003-2005)]. Pushkino, 2006, pp. 98-101. (In Russian)
 5. Manukov Yu.I., Arsenyeva E.V. Fauna of waterfowl of the high Yauza wetland complex of the National park "Losiny Ostrov". *Bulletin of the Moscow State Regional University. Series: Natural Sciences*. 2017, no 2, pp. 6-13. (In Russian) <https://doi.org/10.18384/2310-7189-2017-2-6-13>
 6. Solokha A.V., Arsenyeva E.V. The spring-summer population of aquatic birds of the Mytishchi floodplains. *Vestnik okhotovedeniya* [Bulletin of Hunting Science]. 2021, vol. 18, no 4, pp. 253-259. (In Russian)
 7. Solokha A.V. Seasonal aspects in the bird population of the Yauza wetland of the Losiny Ostrov National Park. *Russkii ornitologicheskii zhurnal* [Russian Ornithological Journal]. 2025, vol. 34, no. 2545, pp. 2805-2811. (In Russian)
 8. Kandalova G.K., Panchenko V.G., Priklonsky S.G. *Metodicheskie ukazaniya po uchetu vodoplavayushchikh ptits* [Methodological Guidelines for Accounting Waterfowl]. Moscow, Kolos Publ., 1971, 16 p. (In Russian)
 9. Ravkin Yu.S., Chelintsev N.G. *Metodicheskie rekomendatsii po kompleksnomu marshrutnomu uchetu ptits* [Methodological Recommendations on Integrated Route Accounting of Birds]. Moscow, VNI Priroda Publ., 1990, 33 p. (In Russian)
 10. Sapetin Ya.V., Ivanchev V.P., Kashentseva T.A., Lavrovsky V.V., Priklonsky S.G. *Ptitsy Okskogo zapovednika i soprodel'nykh territorii (biologiya, chislennost', okhrana). T. 1. Nevorob'inye ptitsy* [Birds of the Oka Nature Reserve and Adjacent Territories (Biology, Abundance, Protection). Volume 1. Non-Passerine Birds]. Moscow, Association of Scientific Publications of the KMC Publ., 2005, 320 p. (In Russian)
 11. Bibby C.J., Burgess N.D., Hill D.A., Mustoe S.H. Bird census techniques. London, Academic Press, 2000. 257 p.
 12. Delany S. Guidelines for national coordinators of the International Waterbird Census (IWC). URL: https://www.researchgate.net/publication/267398930_Guidelines_for_Participants_in_the_International_Waterbird_Census_IWC (date of access: 25.02.2026)
 13. *Uchebno-polevaya praktika po botanike: Posobie dlya studentov-zaochnikov biologicheskikh fakul'tetov pedagogicheskikh institutov* [Field Practice in Botany: A Manual for Part-Time Students of Biological Faculties of Pedagogical Institutes]. Moscow, Prosveshchenie Publ., 1975, 160 p. (In Russian)
 14. Mamontov V.G. *Khimicheskii analiz pochv i ispol'zovanie analiticheskikh dannykh* [Chemical Analysis of Soils and the Use of Analytical Data]. Saint Petersburg: Lan', 2019, 328 p. (In Russian)
 15. Sanitary and Epidemiological Rules and Regulations 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. Moscow: Russian Federal or Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, 2021, 1029 p. (In Russian)

REFERENCES

1. Solokha A.V. Monitoring of aquatic birds of the Mytishchi floodplains in the summer and autumn period. *Vestnik*

16. Lurie Yu.Y., Rybnikova A.I. *Khimicheskii analiz proizvodstvennykh stochnykh vod* [Chemical Analysis of Industrial Wastewater]. Moscow, Khimiya Publ., 1974, 336 p. (In Russian)
17. Novikov Yu.V., Lastochkina K.O., Boldina E.N. *Metody opredeleniya vrednykh veshchestv v vode vodoemov* [Methods for the Determination of Harmful Substances in the Water of Reservoirs]. Moscow, Medicine Publ., 1981, 376 p. (In Russian)
18. Sanitary and Epidemiological Rules and Regulations 2.1.4.1074-01. Drinking water. Hygienic requirements for the water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control. Moscow: Russian Federal or Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, 2001, 59 p. (In Russian)
19. Petrenko D.B., Marchenko D.Y. *Prakticheskoe rukovodstvo po khimicheskomu analizu prirodnnykh i promyshlennykh ob"ektov* [Practical Guide to Chemical Analysis of Natural and Industrial Objects]. Moscow, Moscow State Education University Publ., 2021, 78 p. (In Russian)
20. *Arkhir pogody v Koroleve* [Weather Archive in Korolev]. Available at: https://meteo9.ru/archive_v_koroleve/JX5X (accessed 20.04.2026)
21. Lapshin N.V., Zimin V.B., Artemyev A.V., Khokhlova T.Y. Resource-based bird species. Waterfowl. In: *Monitoring i sokhranenie bioraznoobraziya taezhnykh ekosistem Evropeiskogo Severa Rossii* [Monitoring and Conservation of Biodiversity of Taiga Ecosystems of the European North of Russia]. Petrozavodsk, Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 2010, pp. 105-125. (In Russian)
22. Lvov D.K., Ilyichev V.D. *Migratsii ptits i perenos vzbuditelei infektsii* [Bird Migration and Transmission of Infectious Agents]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 270 p. (In Russian)
23. Lvov D.K., Shchelkanov M.Yu., Deryabin P.G., Burtseva E.I., Galkina I.V., Grebennikova T.V., Prilipov A.G., Usachev E.V., Lyapina O.V., Shlyapnikova O.V., Poglavov A.B., Slavsky A.A., Morozova T.N., Vasiliev A.V., Zaberezhny A.D., Dzharkenov A.F., Gabbasov F.B., Evdokimova M.I., Aliper T.I., Litvin K.E., Gromashevsky V.L., Vlasov N.A., Yashkulov K.B., Kovtunov A.I., Onishchenko G.G., Nepoklonov E.A., Suarez D.L. Highly pathogenic influenza A/H5N1 virus caused epizooty among mute swans (*Cygnus olor*) in the lower estuary of the Volga river (November 2005). *Voprosy virusologii* [Problems in Virology]. 2006, vol. 51, no. 3, pp. 10-16. (In Russian)
24. Lvov D.K., Shchelkanov M.Yu., Deryabin P.G., Prilipov A.G., Frolov A.V., Fedyakina I.T., Burtseva E.I., Shlyapnikova O.V., Poglavov A.B., Alkhovsky S.V., Galkina I.V., Igolkin A.V., Akanina D.S., Grebennikova T.V., Kireev D.E., Varkentin A.V., Slavsky A.A., Morozova T.N., Samokhvalov E.I., Litvin K.E., Vitkova O.N., Shcherbakova L.O., Irza V.N., Drygin V.V., Kalmykov M.V., Fontanetsky A.S., Zaberezhny A.D., Shevkoplyas V.N., Mitenko E.A., Shcherbina I.A., Aliper T.I., Gromashevsky V.L., Vlasov N.A., Nepoklonov E.A., Suarez D. Epizooty caused by highly virulent influenza virus A/H5N1 of genotype 2.2 (Qinghai-Siberian) among wild and domestic birds on the paths of fall migrations in the northeastern part of the basin of the Sea of Azov (Krasnodar Territory). *Voprosy virusologii* [Problems in Virology]. 2008, vol. 53, no. 2, pp. 14-19. (In Russian)
25. Lvov D.K., Shchelkanov M.Yu., Alkhovsky S.V., Deryabin P.G. Zoonotic viruses of Northern Eurasia. *Taxonomy and Ecology*. Academic Press, 2015. 452 p.
26. *Krasnaya kniga goroda Moskvy* [Red Book of the City of Moscow]. Moscow, Department of Natural Resources Management and Environmental Protection of the city of Moscow Publ., 2022, 849 p.
27. *Krasnaya kniga Moskovskoi oblasti* [Red Book of the Moscow Region]. Moscow: Ministry of Ecology and Nature Management of the Moscow Region, Commission on Rare and Endangered Species of Animals, Plants and Fungi of the Moscow Region, 2018, 809 p.
28. Arsenyeva E.V. *Vodoplavayushchie i okolovodnye ptitsy: Atlas-opredelitel'* [Waterfowl and Near-Water Birds: A Definitive Atlas]. Moscow, Author's Book Publ., 2016, 96 p. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Юрий И. Мануков, Егор М. Щелканов и Наталья А. Жбанкова подготовили текст статьи, подбирали научную литературу по тематике статьи и проводили анализ данных. Юрий И. Мануков дополнительно разработал дизайн исследования, собирал учётные данные, разработал концепцию статьи и утверждал ее финальную версию. 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

Yury I. Manukov, Egor M. Shchelkanov and Natalia A. Zhbankova prepared the text of the article, selected scientific literature on the topic of the article and conducted data analysis. Yury I. Manukov additionally designed the study, collected credentials, developed the concept of the article and approved its final version. 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 И. Мануков / Yury I. Manukov <https://orcid.org/0000-0002-4537-4036>
 Егор М. Щелканов / Egor M. Shchelkanov <https://orcid.org/0000-0003-0202-958X>
 Наталья А. Жбанкова / Natalia A. Zhbankova <https://orcid.org/0009-0001-3178-9142>



Фитохимические соединения: свойства, экологическая безопасность и перспективы применения

Ксения А. Маленкина^{1,2}, Азамат Е. Аринжанов¹

¹Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

²Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

Контактное лицо

Ксения А. Маленкина, ассистент кафедры медико-биологической техники, Оренбургский государственный университет; 460018 Россия, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13.

Тел. +79228247154

Email malyonkina.m@yandex.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7781-9028>

Формат цитирования

Маленкина К.А., Аринжанов А.Е.

Фитохимические соединения: свойства, экологическая безопасность и перспективы применения // Юг России: экология, развитие. 2026. Т.21, N 2. С. 101-113. DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-9

Получена 9 февраля 2025 г.

Прошла рецензирование 14 ноября 2025 г.

Принята 25 апреля 2026 г.

Резюме

Цель: изучить видовое разнообразие и биологические свойства фитохимических веществ, в том числе перспективность их применения в кормопроизводстве.

Фитохимические вещества представляют собой эффективную альтернативу антибиотическим препаратам. Выраженные седативные, антиоксидантные, противоопухолевые, иммуномодулирующие и ростостимулирующие свойства таких соединений обуславливают их применение в пищевой промышленности, медицине и животноводстве. Ввиду отсутствия токсического влияния и кумуляции в организме, включение фитохимических веществ в рационы в составе добавок является актуальным направлением исследований сельскохозяйственной науки. Широкое распространение получили кумарины, терпены и терпеноиды, полифенолы и флавоноиды, беталаины и хиноны. Значительная роль веществ растений связана с благоприятным влиянием на микробиоценоз кишечника, обуславливающая развитие питательной среды для местной микрофлоры с подавлением кишечных патогенов. Как ингибиторы кворум-сенсинга, фитохимические вещества способны воздействовать на механизм синтеза биопленки, что приводит к значительному сокращению популяций агрессивной микрофлоры. Немаловажен экологический аспект применения таких веществ, связанный со снижением нагрузки агротехнического сектора на атмосферу.

Фитохимические вещества являются прекрасной альтернативой антибиотическим препаратам с доказанной эффективностью. Неконтролируемое использование антибиотиков в кормопроизводстве представляет опасность, как для животного, так и для человека. В этой связи, исследование фитохимических веществ является актуальной задачей, так как открывает перспективы для получения потенциально новых безопасных и высокоэффективных кормовых препаратов.

Ключевые слова

Фитохимические соединения, фитобиотики, кормление, микроорганизмы, кворум-сенсинг, антибиотики, антиоксидантные свойства.

Properties and prospects of using phytochemicals

Kseniya A. Malenkina^{1,2} and Azamat E. Arinzhanov¹

¹Orenburg State University, Orenburg, Russia

²Federal Scientific Centre for Biological Systems and Agrotechnologies, Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

Principal contact

Kseniya A. Malenkina, Assistant, Department of Biomedical Engineering, Orenburg State University; 13 Pobedy St, Orenburg, Russia 460018.

Tel. +7(922)824-71-54

Email malyonkina.m@yandex.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7781-9028>

How to cite this article

Malenkina K.A., Arinzhanov A.E. Properties and prospects of using phytochemicals. *South of Russia: ecology, development*. 2026; 21(2):101-113. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-9

Received 9 February 2025

Revised 14 November 2025

Accepted 25 April 2026

Abstract

To study species diversity and biological properties of phytochemicals, including the prospects of their application in fodder production.

Phytochemicals provide an effective alternative to antibiotic drugs. They have proven to be sedative, antioxidant, antitumor, immunomodulating and growth-stimulating herbal substances. Due to the lack of toxic effects and accumulation in the body, the inclusion of phytochemicals in diets as part of feed additives is an actual practice of agricultural science. Coumarins, terpenes and terpenoids, polyphenols and flavonoids, betalains and quinones are widely spread. A significant role of phytonutrients is associated with a beneficial effect on intestinal microbiocenosis, which causes the development of a nutrient medium for local microflora with the suppression of intestinal pathogens. As quorum sensing inhibitors, phytochemicals are able to affect the mechanism of biofilm synthesis, which leads to a significant reduction in populations of aggressive flora. The environmental aspect of the use of such substances is important, related to reducing the burden of the agrotechnical sector on the atmosphere.

Phytochemicals are an excellent alternative to an antibiotic drug with proven effectiveness. The uncontrolled use of antibiotics in feed production poses a danger to both animals and humans. In this regard, the study of phytochemicals is an urgent task, as it opens up the possibility of obtaining potentially new safe and highly effective feed preparations.

Key Words

Phytochemicals, phytobiotics, feeding, microorganisms, quorum-sensing, antibiotics, antioxidant properties.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время численность населения неуклонно растет в геометрической прогрессии и достигла 8 млрд. человек. В этой связи, растет потребность человека в качественной и сбалансированной продукции. Для решения этой задачи встал вопрос о поиске способов регуляции и контроля за производимой продукцией на мировом рынке.

В России с 2020 года вступил в силу Федеральный закон «Об органической продукции», при этом многие сельхозтоваропроизводители не готовы к полному переходу на производство такой категории продуктов. Для восполнения спроса на сбалансированную по всем необходимым микронутриентам мясную продукцию, необходим пересмотр кормовой базы объектов животноводства и рыбоводства. Практика показала, что полная реализация заложенных в сельскохозяйственных животных и гидробионтах продуктивных качеств возможна при использовании в рационе различных биологически активных кормовых добавок [1]. Первыми такими добавками стали антибиотические препараты. Однако, практика их использования, в частности, неконтролируемое и чрезмерное включение их в кормовые рационы, показала отрицательный эффект, заключающийся в токсическом влиянии антибиотиков на животных в процессе их кумуляции в организме, и соответственно представляющем опасность для человека [2].

Внедрение антибиотических препаратов в клиническую практику является, несомненно, важным инструментом борьбы с различными инфекционными заболеваниями. Одновременно, постоянно растущий уровень устойчивости патогенов к противомикробным препаратам ставит под угрозу здоровье населения. Обладая огромным количеством и разнообразием генов устойчивости к антибиотикам, многие бактериальные штаммы демонстрируют устойчивость к антибиотикам разного спектра. Выраженная резистентность микрофлоры к антибиотикам, бесконтрольное применение, а также сопряженный с этим ущерб для экономики привели к введению запрета использования противомикробных препаратов во многих странах [3; 4].

В этой связи, стали актуальным поиск и внедрение в ветеринарную практику препаратов, способных не только эффективно бороться с патогенной микрофлорой, но повышать продуктивные качества животных. Одними из таких являются фитохимические вещества, представляющие собой структурно разнообразные вторичные метаболиты растений.

ОБСУЖДЕНИЕ

Исходя из химической природы фитохимические вещества можно разделить на следующие основные классы [5]:

- терпены, включая каротиноиды, монотерпены, сапонины, некоторые тритерпеноиды;
- фенольные соединения: флавоноиды, гидроксикоричные кислоты, лигнаны, стильбеноиды и алкилрезорцинолы;
- беталаины, включая бетацианины и бетаксантины, индольные соединения;
- производные пурина;
- хиноны.

Известно, что 25 % существующих на сегодняшний день лекарственных средств получены из растительных экстрактов [6]. Все части растений были задействованы человеком в своей деятельности. Так, семена, листья и корни включались в состав приправ древними цивилизациями. В Индии пользовались спросом как специи и приправы черный перец и корица, в том числе в медицине. В Древнем Египте травы использовались в религиозных таинствах и обрядах. Греки замечали седативный и снотворный эффект одних растений и бодрящее действие других. Кроме того, некоторые экстракты растений, например, оливковое масло, нередко включалось в лечебную терапию [7]. С развитием науки, растения и их экстракты стали использоваться как биологически активные добавки [8].

В целом, механизм воздействия растительных экстрактов на организм человека и животных выяснен не до конца. Многочисленные исследования демонстрируют роль фитохимических веществ в противораковых, нейропротекторных, лечении метаболических нарушений и других заболеваний. Наиболее распространенными и изученными фитонутриентами являются полифенолы, фитостеролы, сапонины и каротиноиды, в том числе, катехины, куркумины, антоцианы, кверцетин и хлорогеновая кислота [9; 10].

Терпены

Терпены представляют обширную группу непредельных углеводородов, основу которых составляет пятиатомная разветвленная углеродная цепь изопрена с производными гетероатомами. Термин «терпен» впервые явил себя при изучении немецкими учеными химической структуры эфирного масла сосны (*Terpentin* – скипидар). Терпены, имеющие в своей химической структуре атомы кислорода, являются терпеноидами.

На сегодняшний день разнообразность терпеновых представляет собой широкий спектр соединений, различающихся по типу углеродного скелета. В зависимости от числа входящих в молекулы терпеноидов карбоциклов они бывают моноциклическими, бициклическими, трициклическими и т.д. Существуют циклические и ациклические терпеноиды.

Монотерпены представлены в высших растениях, в частности в эфирных маслах хвойных представителей фауны: мирцен – компонент хмеля, оцимен – компонент масла базилика, гераниол, линалоол, цитранеллол – содержатся в маслах цитрусовых, цветочных. Ациклические представители монотерпеновых выполняют роль феромонов насекомых – веществ, обеспечивающих химическую коммуникацию, в частности, управление поведением, развитием и размножением. Среди бициклических кетонов монотерпенового ряда выделяют камфору – антисептическое и аналептическое лекарственное средство, применяющее в медицине как препарат, тонизирующий дыхательный и сосудодвигательный центр. Фарнезол, как ациклический сексвитерпен, обнаружен во многих растениях, в частности в эфирных маслах цветков липы и ландыша.

Многие исследования продемонстрировали выраженный биологический эффект терпеноидов, в том числе: антисептическое, противогрибковое,

антибактериальное, противовирусное, противовоспалительное, антиоксидантное, стимулятор роста и аппетита, спазмолитическое, иммуномодулирующее воздействие. Особый интерес для науки представляют тимол и его изомер карвакрол – основные компоненты эфирных масел тимьяна и душицы. Так, включение карвакрола и тимола в рацион птицы показало синергетический эффект добавки, связанный с усилением всасывательной способности оболочки кишечника, снижение уровня холестерина, модуляцию развития микробиоты [11]. Похожий результат был получен в исследованиях Gabriela M. (2020), где также был достигнут высокий уровень антиоксидантной защиты организма в связи стимуляцией небелковых тиолов, действующих как внутриклеточные восстановители. Отмечено, что кормовые добавки на основе сочетанного воздействия карвакрола, тимола, коричного альдегида и куркумина снижают содержание свободных радикалов в организме цыплят-бройлеров, поддерживает иммунную активность на высоком уровне за счет усиленной пролиферации лимфоцитов, а также способствуют снижению патогенного заражения птицы кокцидиями [12].

Сапонины представляют собой производные тритерпеновой группы и гликозидов. Ввиду большого разнообразия соединений, главным образом, выделяют сапонины стероидные, гликозидные и тритерпеновые. В своем большинстве, сапонины тритерпенового ряда применяются в пищевой промышленности. В природе сапонины содержатся в коре (береза повислая, калина обыкновенная), семенах (наперстянка красная), листьях (толокнянка обыкновенная, мята перечная) плодах (клюква болотная, боярышник кроваво-красный) и соцветиях (календула обыкновенная, липа сердцевидная), клубнях (диоскорея кавказская) и луковицах (зопник клебеноносный) высших лекарственных растений [13].

Многочисленные исследования и оценка безопасности сапонинов при включении *per os* показывают усиленную биodeградацию соединений без изменений своей структуры под воздействием кишечной микрофлоры. В этой связи, интенсивное выведение из организма продуктов, содержащих гликозиды, теряющие свою токсичность при связывании с гидрофобными соединениями на выходе, обеспечивает безопасное включение сапонинов в рацион животных. Включение сапонинов в рацион мышей купировало стремительно развивающуюся анафилактическую кожную реакцию у животных [14].

Каратиноиды представляют собой группу изопреноидов, универсальных в своем применении. В частности, велика их роль в синтезе провитамина А и его предшественника – β -каротина, являющиеся мощными антиоксидантами, препятствуя возникновению раковых образований, особенности свободных радикалов кислорода и полиненасыщенных кислот. Биосинтез каратиноидов осуществляется фотосинтезирующими бактериями, водорослями и грибами. Известно, что в условиях избыточного освещения хлорофиллы растений переходя в возбужденное триплетное состояние, могут активизировать процессы образования активных форм кислорода (АФК) с диссипацией энергии. В этом случае, каратиноиды способны тушить возбужденное состояние хлорофиллов. Находясь в том же триплетном состоянии, каратиноиды релаксируют триплетный

хлорофилл и синглетный кислород, минимизируя проявление АФК [15].

Фенольные соединения

Фенольные соединения представляют собой класс ароматических соединений с выраженной биологической активностью, содержащие одну или несколько гидроксильных групп. Фенольные соединения являются предметом обширного спектра исследований по причине потребления человеком продуктов питания, содержащих фенолы, а также применения их в медицинской практике [16].

Физиологическая роль фенольных соединений включает в себя антиоксидантное воздействие, выражаемое в уменьшении содержания АФК, возникающие в результате возникновения стрессовых факторов. Среди фенольных соединений выделяют простые фенолы, в частности гидрохинон, резорцин, пирокатехин, находящиеся в форме гликозидов и сложных эфиров. Выявлено, что гидрохинон проявляет выраженную антибактериальную активность, в том числе против золотистого стафилококка (*Staphylococcus aureus*), позволяет применять гидрохинон как компонент противомикробных лекарств [17]. Производные резорцина позволяют ингибировать ферментативную активность GDP-маннозопирофосфорилазы, катализирующей синтез маннозы, необходимого структурного элемента поверхности лейшманий [18].

Антиоксидантная активность флавоноидов обусловлена расположением функциональных групп вокруг ядерной структуры. Подавление образования АФК, хелатирование микроэлементов, вызывающих образование свободных радикалов, лежит в основе механизма купирования окислительного стресса. Так, фунгицидный потенциал масла листьев коричника гималайского (*Cinnamomum tamala*) обусловлен присутствием в них флавоноидных соединений, рекомендованных для применения против грибковой порчи продуктов, в частности, аспергилла (*Aspergillus niger*, *Aspergillus fumigatus*), кандиды (*Candida albicans*), ризопуса (*Rhizopus stolonifer*) пенициллина (*Penicillium* spp.) [19].

В последние годы стратегия использования флавоноидов в противоопухолевой терапии демонстрирует высокий уровень эффективности своей деятельности [20].

Гидроксикоричные кислоты (ГКК), как производные фенольных соединений, также могут применяться как компоненты противораковых препаратов. Ввиду высокой реактивной способности, в частности, усилении биологической активности хитозана, а также выраженному синергетическому эффекту соединений, ГКК могут быть компонентами противоопухолевой терапии. Хитозан известен своими выраженными антибактериальными, иммуномодулирующими свойствами, а также в роли носителя лекарственных веществ [21]. Структурные компоненты ГКК, в частности, орто-дигидроксибензильная группа и модификации карбоксильной функции, обеспечивающие процесс этерификации и амидирования, обуславливают их антиоксидантную активность. [22].

Кофейная кислота является одной из наиболее распространенных ГКК и способствует снижению выработки оксида азота и простагландина E2, а также уровня мРНК – фактора некроза опухоли (TNF)- α ,

индуцируемой NO-синтазы, обеспечивая тем самым снижение воспалительной активности очага воздействия [23].

Лигнаны – метаболиты, образованные из двух молекул фенилпропаноидов. Лигнаны характеризуются как фенольные метаболиты растений, состоящих из двух *p*-пропилбензольных фрагментов, и имеют большое разнообразие форм в зависимости от характера циклизации, наличия и расположения атома кислорода. Наиболее известными являются сезамин и сезамолин, считающиеся основными лигнанами кунжута. Биологическая активность лигнанов зависит от трансформации их гликозидов и агликонов кишечными бактериями в энтеролигнаны, некоторые из которых являются фитоэстрогенами [24].

По мнению Landete J.M. (2012), лигнаны действуют как антиоксиданты против повреждения ДНК и перекисного окисления липидов, инициируемых азотосодержащими 2,2'-азобис(2-амидинопропан) дигидрохлоридами, генерирующими свободные радикалы. Также, энтеролигнаны или их растительные источники могут модулировать экспрессию и деградацию белка эстрогена и, следовательно, влиять на гормональный статус [24; 25].

Стильбеноиды представляют собой группу фенольных соединений – фитоалексинов, характеризующихся как антимикробные соединения, производимые *de novo* для защиты растения от грибковой инфекции и токсинов. Среди наиболее распространенных стильбеноидов выделяют ресвератрол (виноград вида *Vitis*, красное вино), птеростильбен (птерокарпус мешковидный *Pterocarpus marsupium*, виноград рода *Vitis* и черника рода *Vaccinium*), гнетол (голосеменное растение рода *Gnetum*). Стильбены демонстрируют низкую биодоступность, в значительной степени обусловленную быстрым и экстенсивным метаболизмом в кишечнике и печени во время и после абсорбции. С точки зрения стабильности, стильбеноиды чувствительны к теплу, воздуху, свету и окислительным ферментам.

Действие стильбенов на животных имеет дозозависимый эффект. Так, потребление ресвератрола в дозировке 150 мг/сутки снижает систолическое артериальное давление, тогда как более низкие дозы значительного эффекта не оказывают. Кроме того, ресвератрол (100 мкМ) ослабляет ишемически-реперфузионное повреждение в неонатальных кардиомиоцитах, подвергшихся высокой активности свободных форм кислорода, сообщает Liu Ya (2015) [26].

Производные ресвератрола показывают значительную резистентность в отношении грамположительных бактерий, в частности, по отношению к бактериям *Listeria monocytogenes*, что достигается за счет повреждения цитоплазматической мембраны со значительной ее деполаризацией, потерей целостности и серьезными морфологическими изменениями [27].

По мнению Ito T. (2018) олигостильбеноиды признаны потенциально эффективными против противовирусных заболеваний. Производные стильбеноидов звездчатки топяной (*Salvia uliginosa*) показали выраженное антивирусное действие в отношении вируса простого герпеса типа 1 и типа 2, а также вируса гриппа А. Олигостильбеноидные соединения проявляли сильную противовирусную

активность с широким противовирусным спектром, что создает перспективу их дальнейшего изучения [28].

Алкилрезорцинолы (АР), в отличие от других фенольных соединений, являются продуктом синтеза не только растительных организмов, но и грибов и бактерий, обладающие липофильными полифенольными структурами. У микроорганизмов АР являются компонентами плазматических мембран, способные повышать их жесткость и защищать клетки от неблагоприятных факторов окружающей среды, опасных патогенов, в том числе, антибиотиков. АР обнаружены в растительной кожуре, листьях и семенах многих растений, в частности, в злаковых, манговых и орехах [29].

По мнению Liu J. (2023) включение пшеничных алкилрезорцинолов в рацион мышей профилактирует ожирение и связанную с ним резистентность к инсулину. Скармливание мышам АР способствовало минимизации проявления негативных факторов с последующей продукцией бактериальных штаммов *Bacteroides*, *Bifidobacterium* и *Akkermansia*, индуцирующих короткоцепочечные жирные кислоты [30].

Похожие результаты были получены Zabolotneva A.A. и коллегами. Зависимость уровня АР в кишечнике от метаболической активности микробиоты обуславливает феномен чувствительности к кворуму бактерий, которые также влияют на состав микробиоты кишечника и метаболизм хозяина [31].

Беталаины

Беталаины представляют собой водорастворимые соединения, в частности пигменты индольного происхождения, содержащиеся в таких растениях, как свекла, целозия, амарант, бугенвиллия, некоторые кактусы, имеют схожую химическую организацию с антоцианами флавоноидов [32].

Включение в рацион крыс беталаинов способствовало сохранению гомеостаза печени, в частности, от окислительной деградации. Исследования продемонстрировало выраженный антиканцерогенный эффект беталаинов в составе свекольного сока. Так, в крови крыс отмечено высокое содержание NDEA и снижение уровня креатинина [33].

Индольные алкалоиды широко распространены в природе, в частности, в растениях семейств кутровые (*Apocynaceae*), лоховые (*Elaeagnaceae*), и спорыньи (*Clavicipitaceae*). Это класс азотосодержащих метаболитов триптофана с выраженной биологической активностью. Некоторые из индольных соединений (индол-3-карбинол, аскорбиген, индол-3-ацетонитрил), способны индуцировать монооксигеназную систему и ферментов из ряда ксенобиотиков. Индол-3-карбоксальдегид (ИЗА) обладает выраженным противоопухолевым, антиканцерогенным и антиоксидантным эффектом, которые обуславливают его применение в медицинской практике и кормлении животных. Многочисленные исследования метаболитов триптофана выявили их положительное воздействие на метаболизм печени и иммунной системы [34].

Yuan P. с коллегами (2024) при исследовании цисплатина установлена выраженная нефротоксичность, характеризующиеся усилением скорости кровотока в почечных артериях с последующим ослаблением патологической деградации почечных канальцев. Подавление воспалительных очагов в почках, снижение экспрессии генов, в частности,

аутофагии и апоптоза служит важной теоретической базой для разработки новых препаратов [35].

ИЗА снижает параклеточную проницаемость, повышает трансэпителиальное электрическое сопротивление и увеличивает количество белков плотных соединений желудочно-кишечного тракта (ЖКТ). Так, введение в рацион поросят-отъемышей кормовой добавки с ИЗА оказало существенное влияние на разнообразие и биомассу микробиоты кишечника. Ввиду прямой зависимости между здоровьем кишечника и общим физиологическим состоянием животных, прикорм с ИЗА продемонстрировал, также, увеличение среднесуточного привеса поросят [36].

Пурин и его производные

Пурин представляет собой гетероциклическое соединение с четырьмя атомами азота, содержащее два конденсированных кольца – пиримидиновое и имидазольное, и существующее в виде двух таутомерных форм [37].

Пуриновые соединения, находящиеся в морских гидробионтах, в частности, цианобактериях, водорослях, грибах и губках, обладают широким спектром противоопухолевых свойств – антипролиферативные, антиангиогенные, индуцирующие апоптоз, способствующие цитотоксичности путем ингибирования активности топоизомеразы и полимеризации тубулина.

Среди пуриновых алкалоидов широко распространены кофеин и никотин. Например, кофеин обладает нейропротекторной активностью. В частности, захват цистеина метаболитами пуриновых алкалоидов – параксантином, теофиллином, теобромином, монометилксантинами – способствуют увеличению внутриклеточного глутатиона с последующей стабилизацией работы нейронов коры головного мозга [38].

Аденозин, как пуриновый нуклеозид, является важным компонентом энергоносителей живого организма – АТФ, АДФ, АМФ. Диффундируя из клетки и с последующей активацией рецепторов A_1 и A_2 для снабжения клеток кислородом, адениновый нуклеотид восстанавливает баланс потребления и восполнения энергии внутри тканей. Кроме того, аденозин рассматривается как мощный антиоксидант и нейромодулятор. Предупреждение травм во время гипоксии и ишемического приступа обуславливает высвобождение нейротрансмиттеров, ингибирующих нервную дегенерацию и гибель клеток. Здесь же проявляется противоспазмолитический эффект при снижении динамики освобождения глутамата и купирования нейронального всплеска [39]. Пероральное скормливание кофеина ягнятам в дозировке 20 мг/кг живого веса способствовало снижению отхода с 30 % до 9 % [40].

Кумарины

Кумарины представляют собой слитые шестичленные кислородсодержащие бензогетероциклы, соединяющие два синтетически полезных кольца: α -пирон и бензол. История кумаринов началась 200 лет назад – название класса произошло от растения диптерикс душистый (*Dipteryx odorata*), из которого простейший представитель этого семейства, сам кумарин, был выделен немецким ученым Фогелем Г.В. в 1820 году. Кумарины широко распространены в растительном мире, в том числе среди бобовых (*Fabaceae*), зонтичные

(*Umbelliferae*), рутовые (*Rutaceae*), камнеломковые (*Saxifragaceae*).

Кумарины активно используются в пищевой промышленности в качестве фурицидных и антиоксидантных веществ. Многие препараты, содержащие кумариновый фрагмент, такие как эскулетин, изофраксидин, псорален, варфарин, аценокумарин, фенпрокумон, дикумарол, каланолид А, хлорикромен, новобиоцин были использованы в качестве потенциальных терапевтических агентов для клинического лечения [41].

Видовое разнообразие кумариновых веществ по структурной организации подразделяется:

- простейшие кумарины;
- окси-, алкокси, метилendioксикумарины;
- фуранокумарины (фурукумарины);
- пиранокумарины.

Велика роль кумаринов, как антикоагулянтных компонентов фармакологических препаратов. Так, дикумарин, как антикоагулянт непрямого действия, является производным кумарина, внедренный в медицинскую практику для профилактики и лечения тромбозов и тромбофлебитов. Высокая гепатотоксичность вещества препятствует повсеместному применению в составе фармакологических веществ. Являясь продуктом брожения, дикумарин сам по себе не является причиной низкой свертываемости крови. Однако, преобразование в процессе брожения грибами в 4-гидроксикумарин, а далее в дикумарол обуславливает антикоагулирующие свойства. В настоящее время, дикумарол заменен веществами схожей природы на основе варфарина, но с меньшей токсичностью.

В природе фитобиотические вещества, зачастую, существуют в смесях, чем обуславливается выраженный синергетический эффект. Так, сесквитерпеновый кумарин фарнезиферол С (ФС), производный терпеновых и кумариновых соединений, обладает уникальной химической структурой, за счет чего реализуется цитотоксическая, апоптотическая, противоопухолевая, антимутагенная и противовирусная активность. В частности, исследование Alam M. (2016) демонстрирует противораковые свойства ФС. В процессе анализа неочищенного экстракта ферулы (*Ferula narthex*), одна из выделенных фракций показала противоопухолевую активность в отношении клеток РС3 (рак предстательной железы) и характеризует растительные метаболиты как компоненты препаратов противоопухолевого профиля с выраженным действием [42].

Нарушения экспрессии тирозиназы определяет накопление меланина, что связано с возникновением нескольких нарушений пигментации кожи, таких как мелазма, старческие пятна, веснушки и даже злокачественные опухоли меланомы. Masuri S. (2023) с коллегами показали положительную динамику меланина при использовании производных кумарина, в частности умбеллиферона, действующих как ингибиторы тирозиназы [43].

Кумаринсодержащие вещества, в частности кумермицин А1, хлоробиоцин и новобиоцин, способны связываться с В-субъединицей ДНК-гиразы в бактериях и ингибировать суперспирализацию ДНК путем блокирования активности АТФазы [44].

Результаты исследования дихлорметанового экстракта корней прангоса (*Prangos hulusii*)

подтверждает выраженную антибиотическую активность кумариновых соединений, в частности, против сенной палочки (*Bacillus subtilis*), и палочки Фридлендера (*Klebsiella pneumoniae*) при концентрациях 5 мкг/мл MIC и 63 мкг/мл, соответственно [45].

Антибиотическая особенность кумариновых производных обуславливает их антикворум активность. Чувство кворума (QS) является основным молекулярным механизмом, участвующим в адаптации бактерий к окружающей среде хозяина, а также, играет важнейшую коммуникативную роль в микробных сообществах. Важным условием существования и выживания бактериальных штаммов, в том числе контролируемых QS, является образование полисахаридной биопленки, за счет которой осуществляется рост и защита популяции от неблагоприятных факторов среды. Кумарины обладают выраженными антивирулентными свойствами, в частности ингибируют образование биопленки бактерий. Действие кумаринсодержащих веществ направлено, в большей степени, на подавление образования и роста микробной биопленки, чем на угнетение самих бактериальных штаммов [46]. Так, выявлено влияние дигидрокумарина на продукцию виолацеина (*Chromobacterium violaceum*), необходимого для жизнедеятельности бактериальной клетки. Клетки *Chromobacterium violaceum*, обработанные дигидрокумарином, показали снижение продукции виолацеина по сравнению с контрольными клетками. Однако, значительное снижение наблюдалось только при дозе дигидрокумарина 6,3 мМ, при которой продукция виолацеина была снижена примерно на 70,1 %. Кроме того, дигидрокумарин ингибировал образование биопленки бактерий *Hafnia alvei*, не подавляя ее рост, что указывает на то, что ингибиторная активность биопленки дигидрокумарина не была обусловлена антибактериальным эффектом [47].

Похожее исследование Lee J.-H. (2014) подтвердило антибиопленочный эффект идентифицированных кумаринов и впервые продемонстрировало выраженные антибиопленочные свойства умбеллиферона с использованием тест-объекта *Escherichia coli* O157:H7 [48].

Известно, что уреазы являются ферментами, катализирующим гидролиз мочевины. Однако, бактериальное происхождение фермента, зачастую, индуцирует патогенез многих заболеваний, в частности, печени. Так, *Helicobacter pylori* способен выделять уреазу в желудок, где фермент катализирует процесс преобразования мочевины с последующим выделением высокого содержания аммиака в кровь, вызывая гипераммониемию. Включение кумаринов в рацион может способствовать ускоренному выведению как продуктов метаболизма болезнетворных патогенов, так и минимизировать рост и развитие самих бактериальных [49].

Анкилозирующий спондилит – аутоиммунное воспалительное заболевание, связанное с воспалением и разрушением суставов. Современные фармакологические препараты способны облегчить симптоматику и проявление болезни, но с значительными побочными эффектами. Исследование Хи J. (2023) на мышах продемонстрировало ингибирующую способность изофраксидина в отношении экспрессии генов и белков остеогенных

факторов при концентрации 0–20 мкМ. Замечено, что изофраксидин купирует пролиферацию и дифференцировку субклона 14 MC3T3-E1 и может рассматриваться как потенциальная лекарственная терапия для лечения патологического остеогенеза [50].

Высокая противовоспалительная активность изофраксидина выявлена, также, в исследовании Su X. (2019). Результаты показали, что изофраксидин ослабляет индуцированное IL-1 β увеличение факторов воспаления и цитокинов, включая оксид азот, индуцируемую NO-синтазу, циклооксигеназу-2, простагландина E2, играя важную роль в снижении уровня воспаления при дегенерации межпозвоночных дисков [51].

Перспективы использования фитохимических веществ

Высокие темпы роста населения существенно влияют на расширение животноводческого комплекса. Соответственно, влияние продуктов метаболизма животных на текущую экологическую обстановку в мире вызывает обеспокоенность многих ученых. Выделение в атмосферу метана, соединений азота и фторированных газов создает серьезный климатический риск. В этой связи, включение фитохимических веществ в рацион в целях минимизации уровня загрязненности атмосферы является как никогда актуальным и эффективным решением [52].

Химические вещества растительной природы способны значительно снижать выработку метана и других в рубце крупного рогатого скота. Так, включение в рацион КРС танинов позволяет повысить уровень использования азота организмом. Полученные результаты исследования демонстрируют уменьшение экскреции мочевины с мочой со смещением экскреции азота из мочи в фекалии [53].

Танины в составе дубильных веществ обладают направленным антиканцерогенным и противоопухолевым эффектом, что способствует усилению антиоксидантных способностей иммунной системы. Способность дубильных веществ связываться с белком до образования танин-белковых комплексов, стабильных к деградации в рубце жвачных животных, позволяет исключить микробную диссоциацию перевариваемого протеина и ускорить его усвоение [54].

Дубильные вещества, сапонины, алкалоиды и эфирные масла в составе кормовых рационов в значительной степени влияют на сокращение выделения азота и метана животными в окружающую среду. В основе положительного воздействия фитобiotиков на процесс ферментации рубца КРС лежит нейтрализация патогенной микробной активности с последующей стимуляцией роста благоприятной микрофлоры. Так, флавоноиды в комплексе с дубильными веществами расщепляются микроорганизмами рубца кишечника жвачных, в особенности патогенных бактерий (*Selenomonas ruminantium*) и стрептококков (*Streptococcus* spp.), до галловой и элаговой кислот с последующим превращением в резорцин в виде метаболитов мочи, который, в свою очередь, ингибирует выделение газов, в частности азота из организма [55].

Результативная борьба с птичьим кокцидиозом, в рамках которой применялись фитогенные препараты, подтверждает высокий уровень

антипаразитарной активности фитохимических веществ [56].

Другим опасным заболеванием является лейшманиоз, инициируемый паразитическими протистами широкого спектра рода лейшмания (*Leishmania*), основные переносчики которого – москиты рода *Phlebotomus* и *Lutzomyia*. Несмотря на широкое распространение переносчиков заболевания, лейшманиоз трудно и мало диагностируем, что усиливает уровень риска, как для животных, так и для человека. Симптоматика заболевания включает в себя снижение аппетита, вялость, потеря массы тела, поражения кожи и лимфатических узлов, глаз, слизистых оболочек, рвота и диарея. Исследование Swami R. (2024) позволило по-иному взглянуть на лечение опасного заболевания. Фитохимические вещества, в частности, фенольные соединения растений, пагубно влияют на онтогенез попавших в организм животного протист. Применение фитогеников совместно с наночастицами открывает новые перспективы для лечения заболеваний за счет синергии высокой биологической активности частиц и выраженного влияния фитоекстрактов [57].

По мнению Lexing L. (2021), фитобиотики обладают большим потенциалом в качестве заменителей антибиотиков и могут стать перспективной добавкой в животноводстве. Так, семена коикса (*Coix lacryma-jobi*) снижают pH желудочного сока и увеличивают плотность и длину ворсинок кишечника, что позволяет получать высокий суточный привес и стабилизировать иммунологические параметры поросят во время отъема. Кормовые добавки с экстрактом пахиверии (*Pacheveria myrtilla*) поддерживают подвижность сперматозоидов, целостность акросом и потенциал митохондриальной мембраны за счет ингибирования дефосфорилирования белка, вызванного АФК [58].

Введение коричневого альдегида в рацион сельскохозяйственной птицы повышало врожденный иммунитет и обеспечивало усиленную защиту от живой паразитарной инфекции, согласно исследованиям Lillehoj H.S. (2012). Скармливание корыцы совместно с карвакром и стручковым перцем показало синергетическое усиление иммунитета кишечника против кишечных паразитарных и бактериальных инфекций [59].

Одними из источников веществ широкого спектра действия являются цитрусовые, содержащие в своем составе флавоноиды (гесперидин и нарингин), лимонноиды (лимонин и номилин), а также каротиноиды (бета-каротин и лютеин). Например, нарингин ингибирует многие злокачественные новообразования, усиливает чувствительность к инсулину, а также способствует активизации механизмов защиты от бактериальных и вирусных заболеваний [60].

Возможность контролировать бактериальное взаимодействие играет немаловажную роль для решения проблемы резистентности микробов к антибиотическим препаратам. Включение в кормовые рационы препаратов-ингибиторов кворум сенсинга (QQS) открывает новые перспективы для управления функциональной и морфологической дифференциацией бактерий, включая синтез антибиотиков и формирование биопленок [61]. Так, фураноны красной водоросли (*Delisea pulchra*) способствуют деградации

белка-рецептора AHL граммотрицательных бактерий, способствующего коммуникации между бактериями при достижении ими определенной плотности. Сходство химической структуры растительных экстрактов с сигнальной структурой QS, в частности белка AHL, создает необходимые условия для инициации разрушения бактериальных популяций изнутри. Так, внесение ментолового экстракта терминалии (*Terminalia chebula*) в популяцию агробактерий (*Agrobacterium tumefaciens*) продемонстрировало достоверное снижение продукции внеклеточных факторов вирулентности, регуляции генов аутоиндукто-синтазы (*lasI* и *rhlI*) [62].

Фитохимические вещества показывают свою перспективность использования в области рыбоводства. Включение фитодобавок в рыбохозяйственную практику способствует повышению продуктивных показателей, усилению иммунитета и снижению отхода поголовья, а также контролю параметров водной среды [63]. Стремление к использованию природных источников, позволяющих активизировать защитные системы организма, ускоряющих прирост массы и улучшающих продуктивные качества гидробионтов, привело исследователей к использованию в рационах рыб терпенов, фенольных соединений, сапонинов и алкалоидов. Так, Martínez-Antequera (2023) выявлена высокая биологическая активность фенольных соединений, а также высокая скорость их выведения из организма рыб [64]. Похожий эффект был достигнут при использовании экстрактов растений с содержанием изопротеидных и изолипидных рационов на основе некрахмальных полисахаридов (НПС). Содержание в кормовой диете морского большеротого окуня (*Micropterus salmoides*) НПС до 9 % демонстрирует отсутствие негативного влияния на рост и физиологию кишечника [65].

Результаты исследований Feher M. (2021) демонстрируют благоприятную динамику полезных бактерий кишечника рыб – клостридий (*Clostridium*) и лактобактерий (*Lactobacillus*), и сокращение численности патогенов рода *Shewanella*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Aeromonas*, при добавлении в рацион фитобиотиков [66].

Морские галофиты известны науке как растения, произрастающие на засоленных почвах морских побережий, а также в приливно-отливной зоне морей. Уникальная особенность таких растений заключается в способности переносить высокие концентрации растворенных солей, а также демонстрировать высокие темпы роста в условиях высокой минерализованности. Благодаря агротехническим методам и фитохимическому профилированию, галофиты становятся новым источником кормовых добавок. Введение до 10 % экстракта солероса (*Salicornia ramosissima*) в рацион европейского морского окуня (*Dicentrarchus labrax*) демонстрировало тканеспецифическое антиоксидантное улучшение показателей, а также, минимизацию окислительного стресса и факторов, негативно влияющих на белковый метаболизм, в частности на синтез ДНК [67].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фитохимические вещества, как нутриенты природного происхождения, играют важную роль в модуляции благоприятных иммунных реакций, профилактике

заболеваний желудочно-кишечного тракта, и способны как прямо, так и косвенно взаимодействовать с ферментными веществами, повышая их активность и эффективность. На сегодняшний день, исходя из результатов многочисленных исследований происхождения, структуры и характера взаимодействия с другими нутрицевтиками, а также широкий спектр разнообразных форм растительных метаболитов, высокая эффективность, биодоступность и низкая токсичность открывают широкие перспективы не только в кормопроизводстве, но и в животноводстве в целом.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-76-10054.

ACKNOWLEDGMENT

The work was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 23-76-10054.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Меднова В.В., Ляшук А.Р., Буяров В.С. Использование фитобиотиков в животноводстве (обзор) // Биология в сельском хозяйстве. 2021. N 1 (30). С. 11–16.
- Багно О.А., Прохоров О.Н., Шевченко С.А., Шевченко А.И., Дядичкина Т.В. Фитобиотики в кормлении сельскохозяйственных животных (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2018. T. 53. N 4. С. 687–697.
- Laws M., Shaaban A., Rahman K.M. Antibiotic resistance breakers: current approaches and future directions // FEMS Microbiol Reviews. 2019. N 43(5). P. 490–516. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuz014>
- Baquero F. Threats of antibiotic resistance: an obliged reappraisal // International Microbiology. 2021. N 24. P. 499–506. <https://doi.org/10.1007/s10123-021-00184-y>
- Leonova A., Arlia-Ciommo A., Piano A., Svistkova V., Lutchman V., Medkour Y., Titorenko V. I. Longevity Extension by Phytochemicals // Molecules. 2015. V. 20. N 4. P. 6544–6572. <https://doi.org/10.3390/molecules20046544>
- Diniz do Nascimento L., Moraes A.A.B., Costa K.S.D., Pereira Galúcio J.M., Taube P.S., Costa C.M.L., Neves Cruz J., Faria L.J.G. Bioactive Natural Compounds and Antioxidant Activity of Essential Oils from Spice Plants: New Findings and Potential Applications // Biomolecules. 2020. N 10(7). P. 988. <https://doi.org/10.3390/biom10070988>
- Freedman P. History of Spices // Handbook of Eating and Drinking. 2020. N 9. P. 77–91. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14504-0_9
- Bower A., Marquez S., de Mejia E.G. The Health Benefits of Selected Culinary Herbs and Spices Found in the Traditional Mediterranean Diet // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2016. N 56(16). P. 2728–2746. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.805713>
- Rathaur P. Metabolism and Pharmacokinetics of Phytochemicals in the Human Body // Curr Drug Metab. 2019. N 20(14). P. 1085–1102. doi: 10.2174/1389200221666200103090757
- Kan J., Wu F., Wang F., Zheng J., Cheng J., Li Y., Yang Y., Du J. Phytonutrients: Sources, bioavailability, interaction with gut microbiota, and their impacts on human health // Frontiers in Nutrition. 2022. N 9. Article id: 960309. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.960309>
- Hashemipour H., Khaksar V., Rubio L.A., Veldkamp T., Krimpen M.M. Effect of feed supplementation with a thymol plus carvacrol mixture, in combination or not with an NSP-degrading enzyme, on productive and physiological parameters of broilers fed on wheat-based diets // Animal Feed Science and Technology. 2016. V. 211. P. 117–131. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.09.023>
- Galli G.M., Gerbet R.R., Griss L.G., Fortuoso B.F., Petrolini T.G., Boiago M.M., Souza C.F., Baldissera M.D., Mesadri J., Wagner R., Rosa G., Mendes R.E., Gris A., Da Silva A.S. Combination of herbal

- components (curcumin, carvacrol, thymol, cinnamaldehyde) in broiler chicken feed: Impacts on response parameters, performance, fatty acid profiles, meat quality and control of coccidia and bacteria // Microbial Pathogenesis. 2020. V. 139. Article id: 103916. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2019.103916>
- Фаттахова Г.А., Канарский А.В. Сапонины как биологически активные вещества растительного происхождения // Вестник Казанского технологического университета. 2014. N 3. С. 196–201.
- Маслова Т.Г., Марковская Е.Ф., Слемнев Н.Н. Функции каротиноидов в листьях высших растений (обзор) // Журнал общей биологии. 2020. T. 81. N 4. С. 297–310.
- Ma C., He N., Zhao Y., Xia D., Wei J., Kang W. Antimicrobial Mechanism of Hydroquinone // Applied Biochemistry and Biotechnology. 2019. N 89(4). P. 1291–1303. <https://doi.org/10.1007/s12010-019-03067-1>
- Levaique H., Pamard O., Apel C., Bignon J., Arriola M., Kuhner R., Awang K., Loiseau P.M., Litaudon M., Pomel S. Alkyl-Resorcinol Derivatives as Inhibitors of GDP-Mannose Pyrophosphorylase with Antileishmanial Activities // Molecules. 2021. N 26(6). Article id: 1551. <https://doi.org/10.3390/molecules26061551>
- Курдюков Е.Е., Плешакова Д.А., Глебова Н.Н., Неклюдова В.А., Водопьянова О.А., Гаранина Е.О. Флавоноиды: классификация, биологические свойства и перспективы использования в медицине // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. N 11 (137). С. 1–6. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.143>
- Sun Q., Liu Q., Zhou X., Wang X., Li H., Zhang W., Yuan H., Sun Ch. Flavonoids regulate tumor-associated macrophages – From structure-activity relationship to clinical potential (Review) // Pharmacological Research. 2022. V. 184. Article id: 106419. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2022.106419>
- Ojeda-Hernández D.D., Canales-Aguirre A.A., Matias-Guiu J.A., Matias-Guiu J., Gómez-Pinedo U., Mateos-Díaz J.C. Chitosan–Hydroxycinnamic Acids Conjugates: Emerging Biomaterials with Rising Applications in Biomedicine // International Journal of Molecular Sciences. 2022. N 23(20). Article id: 12473. <https://doi.org/10.3390/ijms232012473>
- Razzaghi-Asl N., Garrido J., Khazraei H., Borges F., Firuzi O. Antioxidant properties of hydroxycinnamic acids: a review of structure-activity relationships // Current Medicinal Chemistry. 2013. N 20(36). P. 4436–4450. <https://doi.org/10.2174/09298673113209990141>
- Yang W.S., Jeong D., Yi Y.S., Park J.G., Seo H., Moh S.H., Hong S., Cho J.Y. IRAK1/4-targeted anti-inflammatory action of caffeic acid // Mediators Inflamm. 2023. N 20. Article id: 518183. <https://doi.org/10.1155/2013/518183>
- Zduńska K., Dana A., Kolodziejczak A., Rotsztein H. Antioxidant Properties of Ferulic Acid and Its Possible Application // Skin Pharmacol Physiol. 2018. N 31(6). P. 332–336. <https://doi.org/10.1159/000491755>
- Andargie M., Vinas M., Rathgeb A., Möller E., Karlovsky P. Lignans of Sesame (*Sesamum indicum* L.): A Comprehensive Review // Molecules. 2021. N 26(4). Article id: 883. <https://doi.org/10.3390/molecules26040883>
- Landete J.M. Plant and mammalian lignans: A review of source, intake, metabolism, intestinal bacteria and health // Food Research International. 2012. V. 46. N 1. P. 410–424. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.12.023>
- Lei X.Y., Liu S.H., Zhao Y.X., Guo M.J., Tao L., Shen X.C., Zhang N.L. Lignans and Flavonoids from *Cajanus cajan* (L.) Millsp. and Their α -Glucosidase Inhibitory Activities // Chemical Biodiversity. 2022. N 19(11). Article id: 202200414. <https://doi.org/10.1002/cbdv.202200414>
- Liu Ya., Ma W., Zhang P., He Sh., Huang D., Effect of resveratrol on blood pressure: A meta-analysis of randomized controlled trials // Clinical Nutrition. 2015. V. 34. N 1. P. 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2014.03.009>
- Mattio L.M., Dallavalle S., Musso L. et al. Antimicrobial activity of resveratrol-derived monomers and dimers against foodborne pathogens // Scientific Reports. 2019. N 9. Article id: 19525. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55975-1>
- Ito T., Hayashi K., Nishiguchi M., Hayashi T., Iinuma M. Resveratrol oligomer C-glucosides and anti-viral resveratrol

- tetramers isolated from the stem bark of *Shorea uliginosa* // *Phytochemistry Letters*. 2018. V. 28. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2018.07.026>
29. Zabolotneva A.A., Shatova O.P., Sadova A.A., Shestopalov A.V., Roumiantsev S.A. An Overview of Alkylresorcinols Biological Properties and Effects // *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*. 2022. N 5. Article id: 4667607. <https://doi.org/10.1155/2022/4667607>
30. Liu J., Zhang D., Yang Z., Hao Y., Wang Z., Wang J., Wang Z. Wheat Alkylresorcinols Modulate Glucose Homeostasis through Improving GLP-1 Secretion in High-Fat-Diet-Induced Obese Mice // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2023. N 71(43). P. 16125–16136. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c04664>
31. Zabolotneva A.A., Gaponov A.M., Roumiantsev S.A., Vasiliev I.Y., Grigoryeva T.V., Kit O.I., Zlatnik E.Y., Maksimov A.Y., Goncharova A.S., Novikova I.A., Appolonova S.A., Markin P.A., Shestopalov A.V. Alkylresorcinols as New Modulators of the Metabolic Activity of the Gut Microbiota // *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. N 24(18). Article id: 14206. <https://doi.org/10.3390/ijms241814206>
32. Sadowska-Bartos z I., Bartosz G. Biological Properties and Applications of Betalain // *Molecules*. 2021. N 26(9). Article id: 2520. <https://doi.org/10.3390/molecules26092520>
33. Krajka-Kuźniak V., Szafer H., Ignatowicz E., Adamska T., Baer-Dubowska W. Beetroot juice protects against N-nitrosodiethylamine-induced liver injury in rats // *Food and Chemical Toxicology*. 2012. V. 50. N 6. P. 2027–2033. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.03.062>
34. Liu X., Liu R., Wang Y. Indole-3-carboxaldehyde alleviates acetaminophen-induced liver injury via inhibition of oxidative stress and apoptosis // *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2024. V. 710. Article id: 149880. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2024.149880>
35. Yuan P., Feng A., Wei Y., Li S., Fu Y., Wang X., Guo M., Feng W., Zheng X. Indole-3-carboxaldehyde alleviates cisplatin-induced acute kidney injury in mice by improving mitochondrial dysfunction via PKA activation // *Food Chem Toxicol*. 2024. N 186. Article id: 114546. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2024.114546>
36. Zhang R., Huang G., Ren Yu., Wang H., Ye Ya., Guo J., Wang M., Zhu W., Yu K. Effects of Dietary Indole-3-carboxaldehyde Supplementation on Growth Performance, Intestinal Epithelial Function, and Intestinal Microbial Composition in Weaned Piglets // *Frontiers in Nutrition*. 2022. V. 9. Article id: 896815. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.896815>
37. Мясникович А.А., Тишковец Е.В. Патогенетическое значение нарушений механизмов регуляции метаболизма пуринов // *Научное обозрение. Медицинские науки*. 2020. N 2. С. 40–45.
38. Matsumura N., Kinoshita C., Bhadrprasit W., Nakaki T., Aoyama K. A purine derivative, paraxanthine, promotes cysteine uptake for glutathione synthesis // *Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2023. N 151(1). P. 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.jphs.2022.11.001>
39. Портер Д.Р. Производные пурина в качестве модуляторов активности TNF. Патент RU2684644C1. ЮСБ БАЙФАРМА СПРЛ. 2019. 73 с.
40. Robertson S.M., Friend M.A., Doran G.S., Edwards S. Caffeine supplementation of ewes during lambing may increase lamb survival // *Animal*. 2018. V. 12. N 2. P. 376–382. <https://doi.org/10.1017/S1751731117001446>
41. Annunziata F., Pinna C., Dallavalle S., Tamborini L., Pinto A. An Overview of Coumarin as a Versatile and Readily Accessible Scaffold with Broad-Ranging Biological Activities // *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. N 21(13). Article id: 4618. <https://doi.org/10.3390/ijms21134618>
42. Alam M., Khan A., Wadood A., Khan A., Bashir S., Aman A., Jan A.K., Rauf A., Ahmad B., Khan A.R. Farooq U. Bioassay-Guided Isolation of Sesquiterpene Coumarins from *Ferula narthex* Bioss: A New Anticancer Agent // *Frontiers in Pharmacology*. 2016. N 7. Article id: 26. <https://doi.org/10.3389/fphar.2016.00026>
43. Masuri S., Era B., Pintus F., Cadoni E., Cabiddu M.G., Fais A., Pivetta T. Hydroxylated Coumarin-Based Thiosemicarbazones as Dual Antityrosinase and Antioxidant Agents // *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. N 24(2). Article id: 1678. <https://doi.org/10.3390/ijms24021678>
44. Feng D., Zhang A., Yang Y., Yang P. Coumarin-containing hybrids and their antibacterial activities // *Arch Pharm (Weinheim)*. 2020. N 53(6). Article id: 1900380. <https://doi.org/10.1002/ardp.201900380>
45. Tan N., Yazıcı-Tütüniş S., Bilgin M., Tan E., Miski M. Antibacterial Activities of Pyrenylated Coumarins from the Roots of *Prangos hulusii* // *Molecules*. 2017. N 22(7). Article id: 1098. <https://doi.org/10.3390/molecules22071098>
46. El-Sawy E.R., Abdel-Aziz M.S., Abdelmegeed H., Kirsch G. Coumarins: Quorum Sensing and Biofilm Formation Inhibition // *Molecules*. 2024. N 29(19). Article id: 4534. <https://doi.org/10.3390/molecules29194534>
47. Hou H. M., Jiang F., Zhang G. L., Wang J. Y., Zhu Ya H., Liu X. Y. Inhibition of *Hafnia alvei* H4 Biofilm Formation by the Food Additive Dihydrocoumarin // *Journal of Food Protection*. 2017. V. 80. N 5. P. 842–847. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-16-460>
48. Lee J.-H., Kim Y.-G., Cho H.S., Ryu S.Y., Cho M.H., Lee J. Coumarins Reduce Biofilm Formation and the Virulence of *Escherichia coli* O157:H7 // *Phytomedicine*. 2024. N 21. P. 1037–1042.
49. Asghar H., Asghar H., Asghar T. A Review on Anti-urease Potential of Coumarins // *Current Drug Targets*. 2021. N 22(17). P. 1926–1943. <https://doi.org/10.2174/1389450122666210222091412>
50. Xu J., Ji W. Isofraxidin inhibits the proliferation and differentiation of the osteoblast MC3T3-E1 subclone 14 cell line // *Cellular and Molecular Biology*. 2023. N 69(15). P. 44–50. <https://doi.org/10.14715/cmb/2023.69.15.7>
51. Su X., Liu B., Gong F., Yin J., Sun Q., Gao Y., Lv Z., Wang X. Isofraxidin attenuates IL-1 β -induced inflammatory response in human nucleus pulposus cells // *Journal of Cellular Biochemistry*. 2019. N 20(8). P. 13302–13309. <https://doi.org/10.1002/jcb.28604>
52. Zhao Y., Liu M., Jiang L., Guan L. Could natural phytochemicals be used to reduce nitrogen excretion and excreta-derived N₂O emissions from ruminants? // *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 202. N 14(1). P. 140. <https://doi.org/10.1186/s40104-023-00942-0>
53. Ahmed M.G., Elwakeel E.A., El-Zarkouny S.Z., Al-Sagheer A.A. Environmental impact of phytobiotic additives on greenhouse gas emission reduction, rumen fermentation manipulation, and performance in ruminants: an updated review // *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. N 31(26). P. 37943–37962. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33664-5>
54. Кубасова Е.Д., Крылов И.А., Корельская Г.В., Пантюхова К.А., Кубасов Р.В. Противопухолевые и противовоспалительные свойства дубильных веществ растительного происхождения и перспективы их использования в фармации // *Здоровье и образование в XXI веке*. 2022. N 12. С. 55–60.
55. Abd'quadri-Abojukoro A.N., Nsahla I.V. Evaluating the Effects of Some Selected Medicinal Plant Extracts on Feed Degradability, Microbial Protein Yield, and Total Gas Production In Vitro // *Animals (Basel)*. 2023. N 13(4). P. 702. <https://doi.org/10.3390/ani13040702>
56. El-Shall N.A., Abd El-Hack M.E., Albaqami N.M., Khafaga A.F., Taha A.E., Swelum A.A., El-Saadony M.T., Salem H.M., El-Tahan A.M., AbuQamar S.F., El-Tarabily K.A., Elbestawy A.R. Phytochemical control of poultry coccidiosis: a review // *Poultry Science Journal*. 2022. N 101(1). Article id: 101542. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101542>
57. Swami R., Aggarwal K. The Prospects of Phytomedicines and Nanomedicines to Treat Leishmaniasis: A Comprehensive Review // *Current drug research reviews*. 2024. N 16(3). P. 308–318. DOI: 10.2174/2589977515666230725105141
58. Li L., Sun X., Zhao D., Dai H. Pharmacological Applications and Action Mechanisms of Phytochemicals as Alternatives to Antibiotics in Pig Production // *Frontiers in Immunology*. 2021. N 12. Article id: 798553. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.798553>
59. Valenzuela-Grijalva N.V., Pinelli-Saavedra A., Muhlia-Almazan A. et al. Dietary inclusion effects of phytochemicals as growth

promoters in animal production // *Journal of Animal Science and Technology*. 2017. N 59. P. 8. <https://doi.org/10.1186/s40781-017-0133-9>

60. Ahmed S., Khan H., Aschner M., Hasan M.M., Hassan S.T.S. Therapeutic potential of naringin in neurological disorders // *Food Chem. Toxicol Food and Chemical Toxicology*. 2019. N 132. Article id: 110646.

61. Asfour H.Z. Anti-Quorum Sensing Natural Compounds. *Journal of Microscopy and Ultrastructure*. 2018. N 6(1). P. 1–10. https://doi.org/10.4103/JMAU.JMAU_10_18

62. Nazzaro F., Fratianni F., Coppola R. Quorum Sensing and Phytochemicals. *International Journal of Molecular Sciences*. 2013. N 14(6). P. 12607–12619. <https://doi.org/10.3390/ijms140612607>

63. Abdel-Latif H.M.R., Yilmaz S., Kucharczyk D. Editorial: Functionality and applications of phytochemicals in aquaculture nutrition // *Frontiers in Veterinary Science*. 2023. N 10. Article id: 1218542. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1218542>

64. Martínez-Antequera F.P., López-Ruiz R., Martos-Sitcha J.A., Mancera J.M., Moyano F.J. Assessing differences in the bioaccessibility of phenolics present in two wine by-products using an in-vitro model of fish digestion // *Frontiers in Veterinary Science*. 2023. N 10. Article id: 1151045. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1151045>

65. Liu Y., Fan J., Huang H., Zhou H., Cao Y., Zhang Y., Jiang W., Zhang W., Deng J., Tan B. High dietary non-starch polysaccharides detrimental to nutrient digestibility, digestive enzyme activity, growth performance, and intestinal morphology in largemouth bass, *Micropterus salmoides* // *Frontiers in Nutrition*. 2022. N 9. Article id: 1015371. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1015371>

66. Feher M., Fauszt P., Tolnai E., Fidler G., Pesti-Asboth G., Stágel A., Szucs I., Biro S., Remenyik J., Páholcsék M., Stundl L. Effects of phytonutrient-supplemented diets on the intestinal microbiota of *Cyprinus carpio* // *PLoS One*. 2021. N 16(4). Article id: 0248537. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248537>

67. Marçal R., Sousa P., Marques A., Pereira V., Guilherme S., Barreto A., Costas B., Rocha R.J.M., Pacheco M. Exploring the Antioxidant and Genoprotective Potential of *Salicornia ramosissima* Incorporation in the Diet of the European Seabass (*Dicentrarchus labrax*) // *Animals (Basel)*. 2023. N 14(1). Article id: 93. <https://doi.org/10.3390/ani14010093>

REFERENCES

1. Mednova V.V., Lyashuk A.R., Buyarov V.S. The use of phytobiotics in animal husbandry (review). *Biologiya v sel'skom khozyaistve [Biology in agriculture]*. 2021, no. 1 (30), pp. 11–16. (In Russian)

2. Bagno O.A., Prokhorov O.N., Shevchenko S.A., Shevchenko A.I., Dyadichkina T.V. Phytobiotics in the feeding of farm animals (review). *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural biology]*. 2018, vol. 53, no. 4, pp. 687–697.

3. Laws M., Shaaban A., Rahman K.M. Antibiotic resistance breakers: current approaches and future directions. *FEMS Microbiol Reviews*, 2019, no. 43(5), pp. 490–516. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuz014>

4. Baquero F. Threats of antibiotic resistance: an obliged reappraisal. *International Microbiology*, 2021, no. 24, pp. 499–506. <https://doi.org/10.1007/s10123-021-00184-y>

5. Leonova A., Arlia-Ciommo A., Piano A., Svistkova V., Lutchman V., Medkour Y., Titorenko V.I. Longevity Extension by Phytochemicals. *Molecules*, 2015, vol. 20, no. 4, pp. 6544–6572. <https://doi.org/10.3390/molecules20046544>

6. Diniz do Nascimento L., Moraes A.A.B., Costa K.S.D., Pereira Galúcio J.M., Taube P.S., Costa C.M.L., Neves Cruz J., Faria L.J.G. Bioactive Natural Compounds and Antioxidant Activity of Essential Oils from Spice Plants: New Findings and Potential Applications. *Biomolecules*, 2020, no. 10(7), Article id: 988. <https://doi.org/10.3390/biom10070988>

7. Freedman P. History of Spices. *Handbook of Eating and Drinking*, 2020, no. 9, pp. 77–91. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14504-0_9

8. Bower A., Marquez S., de Mejia E.G. The Health Benefits of Selected Culinary Herbs and Spices Found in the Traditional Mediterranean Diet. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*,

2016, no. 56(16), pp. 2728–2746. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.805713>

9. Rathaur P. Metabolism and Pharmacokinetics of Phytochemicals in the Human Body. *Curr Drug Metab.*, 2019, no. 20(14), pp. 1085–1102. <https://doi.org/10.2174/1389200221666200103090757>

10. Kan J., Wu F., Wang F., Zheng J., Cheng J., Li Y., Yang Y., Du J. Phytonutrients: Sources, bioavailability, interaction with gut microbiota, and their impacts on human health. *Frontiers in Nutrition*. 2022, no. 9, Article id: 960309. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.960309>

11. Hashemipour H., Khaksar V., Rubio L.A., Veldkamp T., Krimpen M.M. Effect of feed supplementation with a thymol plus carvacrol mixture, in combination or not with an NSP-degrading enzyme, on productive and physiological parameters of broilers fed on wheat-based diets. *Animal Feed Science and Technology*, 2016, vol. 211, pp. 117–131. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.09.023>

12. Galli G.M., Gerbet R.R., Griss L.G., Fortuoso B.F., Petrolli T.G., Boiago M.M., Souza C.F., Baldissera M.D., Mesadri J., Wagner R., Rosa G., Mendes R.E., Gris A., Da Silva A.S. Combination of herbal components (curcumin, carvacrol, thymol, cinnamaldehyde) in broiler chicken feed: Impacts on response parameters, performance, fatty acid profiles, meat quality and control of coccidia and bacteria. *Microbial Pathogenesis*, 2020, vol. 139, article id: 103916. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2019.103916>

13. Fattakhova G.A., Kanarskii A.V. Saponins as biologically active substances of plant origin. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Kazan Technological University]*. 2014, no. 3, pp. 196–201. (In Russian)

14. Maslova T.G., Markovskaya E.F., Slemnev N.N. The functions of carotenoids in the leaves of higher plants (review). *Zhurnal obshchei biologii [Journal of General Biology]*. 2020, vol. 81, no. 4, pp. 297–310. (In Russian)

15. Ma C., He N., Zhao Y., Xia D., Wei J., Kang W. Antimicrobial Mechanism of Hydroquinone. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2019, no. 89(4), pp. 1291–1303. <https://doi.org/10.1007/s12010-019-03067-1>

16. Levaïque H., Pamard O., Apel C., Bignon J., Arriola M., Kuhner R., Awang K., Loiseau P.M., Litaudon M., Pomel S. Alkyl-Resorcinol Derivatives as Inhibitors of GDP-Mannose Pyrophosphorylase with Antileishmanial Activities. *Molecules*, 2021, no. 26(6), article id: 1551. <https://doi.org/10.3390/molecules26061551>

17. Kurdyukov E.E., Pleshakova D.A., Glebova N.N., Neklyudova V.A., Vodop'yanova O.A., Garanina E.O. Flavonoids: classification, biological properties and prospects of use in medicine. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal [International Scientific Research Journal]*. 2023, no. 11 (137), pp. 1–6. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.143>

18. Sun Q., Liu Q., Zhou X., Wang X., Li H., Zhang W., Yuan H., Sun Ch. Flavonoids regulate tumor-associated macrophages – From structure-activity relationship to clinical potential (Review). *Pharmacological Research*, 2022, vol. 184, article id: 106419. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2022.106419>

19. Ojeda-Hernández D.D., Canales-Aguirre A.A., Matias-Guiu J.A., Matias-Guiu J., Gómez-Pinedo U., Mateos-Díaz J.C. Chitosan–Hydroxycinnamic Acids Conjugates: Emerging Biomaterials with Rising Applications in Biomedicine. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, no. 23(20), article id: 12473. <https://doi.org/10.3390/ijms232012473>

20. Razzaghi-Asl N., Garrido J., Khazraei H., Borges F., Firuzi O. Antioxidant properties of hydroxycinnamic acids: a review of structure-activity relationships. *Current Medicinal Chemistry*, 2013, no. 20(36), pp. 4436–50. <https://doi.org/10.2174/09298673113209990141>

21. Yang W.S., Jeong D., Yi Y.S., Park J.G., Seo H., Moh S.H., Hong S., Cho J.Y. IRAK1/4-targeted anti-inflammatory action of caffeic acid. *Mediators Inflamm.*, 2023, no. 20, article id: 518183. <https://doi.org/10.1155/2013/518183>

22. Zduńska K., Dana A., Kolodziejczak A., Rotsztein H. Antioxidant Properties of Ferulic Acid and Its Possible Application. *Skin Pharmacol Physiol.*, 2018, no. 31(6), pp. 332–336. <https://doi.org/10.1159/000491755>

23. Andargie M., Vinas M., Rathgeb A., Möller E., Karlovsky P. Lignans of Sesame (*Sesamum indicum* L.): A Comprehensive

- Review. *Molecules*, 2021, no. 26(4), article id: 883. <https://doi.org/10.3390/molecules26040883>
24. Landete J.M. Plant and mammalian lignans: A review of source, intake, metabolism, intestinal bacteria and health. *Food Research International*, 2012, vol. 46, no. 1, pp. 410–424. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.12.023>
25. Lei X.Y., Liu S.H., Zhao Y.X., Guo M.J., Tao L., Shen X.C., Zhang N.L. Lignans and Flavonoids from *Cajanus cajan* (L.) Millsp. and Their α -Glucosidase Inhibitory Activities. *Chemical Biodiversity*, 2022, no. 19(11), article id: 202200414. <https://doi.org/10.1002/cbdv.202200414>
26. Liu Ya., Ma W., Zhang P., He Sh., Huang D. Effect of resveratrol on blood pressure: A meta-analysis of randomized controlled trials. *Clinical Nutrition*, 2015, vol. 34, no. 1, pp. 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2014.03.009>
27. Mattio L.M., Dallavalle S., Musso L. et al. Antimicrobial activity of resveratrol-derived monomers and dimers against foodborne pathogens. *Scientific Reports*, 2019, no. 9, article id: 19525. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55975-1>
28. Ito T., Hayashi K., Nishiguchi M., Hayashi T., Iinuma M. Resveratrol oligomer C-glucosides and anti-viral resveratrol tetramers isolated from the stem bark of *Shorea uliginosa*. *Phytochemistry Letters*, 2018, vol. 28, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2018.07.026>
29. Zabolotneva A.A., Shatova O.P., Sadova A.A., Shestopalov A.V., Roumiantsev S.A. An Overview of Alkylresorcinols Biological Properties and Effects. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 2022, no. 5, article id: 4667607. <https://doi.org/10.1155/2022/4667607>
30. Liu J., Zhang D., Yang Z., Hao Y., Wang Z., Wang J., Wang Z. Wheat Alkylresorcinols Modulate Glucose Homeostasis through Improving GLP-1 Secretion in High-Fat-Diet-Induced Obese Mice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, no. 71(43), pp. 16125–16136. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c04664>
31. Zabolotneva A.A., Gaponov A.M., Roumiantsev S.A., Vasiliev I.Y., Grigoryeva T.V., Kit O.I., Zlatnik E.Y., Maksimov A.Y., Goncharova A.S., Novikova I.A., Appolonova S.A., Markin P.A., Shestopalov A.V. Alkylresorcinols as New Modulators of the Metabolic Activity of the Gut Microbiota. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, no. 24(18), article id: 14206. <https://doi.org/10.3390/ijms241814206>
32. Sadowska-Bartosz I., Bartosz G. Biological Properties and Applications of Betalain. *Molecules*, 2021, no. 26(9), article id: 2520. <https://doi.org/10.3390/molecules26092520>
33. Krajka-Kuźniak V., Szafer H., Ignatowicz E., Adamska T., Baer-Dubowska W. Beetroot juice protects against N-nitrosodiethylamine-induced liver injury in rats. *Food and Chemical Toxicology*, 2012, vol. 50, no. 6, pp. 2027–2033. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.03.062>
34. Liu X., Liu R., Wang Y. Indole-3-carboxaldehyde alleviates acetaminophen-induced liver injury via inhibition of oxidative stress and apoptosis. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2024, vol. 710, article id: 149880. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2024.149880>
35. Yuan P., Feng A., Wei Y., Li S., Fu Y., Wang X., Guo M., Feng W., Zheng X. Indole-3-carboxaldehyde alleviates cisplatin-induced acute kidney injury in mice by improving mitochondrial dysfunction via PKA activation. *Food Chem Toxicol.*, 2024, no. 186, article id: 114546. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2024.114546>
36. Zhang R., Huang G., Ren Yu., Wang H., Ye Ya., Guo J., Wang M., Zhu W., Yu K. Effects of Dietary Indole-3-carboxaldehyde Supplementation on Growth Performance, Intestinal Epithelial Function, and Intestinal Microbial Composition in Weaned Piglets. *Frontiers in Nutrition*, 2022, vol. 9, article id: 896815. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.896815>
37. Myasnikovich A.A., Tishkovets E.V. Pathogenetic significance of disorders of purine metabolism regulation mechanisms. Nauchnoe obozrenie. Meditsinskie nauki [Scientific review. Medical Sciences]. 2020, no. 2, pp. 40–45.
38. Matsumura N., Kinoshita C., Bhadrprasit W., Nakaki T., Aoyama K. A purine derivative, paraxanthine, promotes cysteine uptake for glutathione synthesis. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2023, no. 151(1), pp. 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.jphs.2022.11.001>
39. Porter D.R. Purine derivatives as modulators of TNF activity. Patent RU2684644C1. YuSB BAIFARMA SPRL. 2019, 73 p.
40. Robertson S.M., Friend M.A., Doran G.S., Edwards S. Caffeine supplementation of ewes during lambing may increase lamb survival. *Animal*, 2018, vol. 12, no. 2, pp. 376–382. <https://doi.org/10.1017/S1751731117001446>
41. Annunziata F., Pinna C., Dallavalle S., Tamborini L., Pinto A. An Overview of Coumarin as a Versatile and Readily Accessible Scaffold with Broad-Ranging Biological Activities. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, no. 21(13), article id: 4618. <https://doi.org/10.3390/ijms21134618>
42. Alam M., Khan A., Wadood A., Khan A., Bashir S., Aman A., Jan A.K., Rauf A., Ahmad B., Khan A.R. Farooq U. Bioassay-Guided Isolation of Sesquiterpene Coumarins from *Ferula narthex* Bioss: A New Anticancer Agent. *Frontiers in Pharmacology*, 2016, no. 7, article id: 26. <https://doi.org/10.3389/fphar.2016.00026>
43. Masuri S., Era B., Pintus F., Cadoni E., Cabiddu M.G., Fais A., Pivetta T. Hydroxylated Coumarin-Based Thiosemicarbazones as Dual Antityrosinase and Antioxidant Agents. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, no. 24(2), article id: 1678. <https://doi.org/10.3390/ijms24021678>
44. Feng D., Zhang A., Yang Y., Yang P. Coumarin-containing hybrids and their antibacterial activities. *Arch Pharm (Weinheim)*, 2020, no. 53(6), article id: 1900380. <https://doi.org/10.1002/ardp.201900380>
45. Tan N., Yazıcı-Tütüniş S., Bilgin M., Tan E., Miski M. Antibacterial Activities of Pyrenylated Coumarins from the Roots of *Prangos hulusii*. *Molecules*, 2017, no. 22(7), article id: 1098. <https://doi.org/10.3390/molecules22071098>
46. El-Sawy E.R., Abdel-Aziz M.S., Abdelmegeed H., Kirsch G. Coumarins: Quorum Sensing and Biofilm Formation Inhibition. *Molecules*, 2024, no. 29(19), article id: 4534. <https://doi.org/10.3390/molecules29194534>
47. Hou H.M., Jiang F., Zhang G.L., Wang J.Y., Zhu Ya H., Liu X.Y. Inhibition of *Hafnia alvei* H4 Biofilm Formation by the Food Additive Dihydrocoumarin. *Journal of Food Protection*, 2017, vol. 80, no. 5, pp. 842–847. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-16-460>
48. Lee J.-H., Kim Y.-G., Cho H.S., Ryu S.Y., Cho M.H., Lee J. Coumarins Reduce Biofilm Formation and the Virulence of *Escherichia coli* O157:H7. *Phytomedicine*, 2024, no. 21, pp.1037–1042.
49. Asghar H., Asghar H., Asghar T. A Review on Anti-urease Potential of Coumarins. *Current Drug Targets*, 2021, no. 22(17), pp.1926–1943. <https://doi.org/10.2174/1389450122666210222091412>
50. Xu J., Ji W. Isofraxidin inhibits the proliferation and differentiation of the osteoblast MC3T3-E1 subclone 14 cell line. *Cellular and Molecular Biology*, 2023, no. 69(15), pp. 44–50. <https://doi.org/10.14715/cmb/2023.69.15.7>
51. Su X., Liu B., Gong F., Yin J., Sun Q., Gao Y., Lv Z., Wang X. Isofraxidin attenuates IL-1 β -induced inflammatory response in human nucleus pulposus cells. *Journal of Cellular Biochemistry*, 2019, no. 20(8), pp.13302–13309. <https://doi.org/10.1002/jcb.28604>
52. Zhao Y., Liu M., Jiang L., Gao L. Could natural phytochemicals be used to reduce nitrogen excretion and excreta-derived N₂O emissions from ruminants? *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2022, no. 14(1), article id: 140. <https://doi.org/10.1186/s40104-023-00942-0>
53. Ahmed M.G., Elwakeel E.A., El-Zarkouny S.Z., Al-Sagheer A.A. Environmental impact of phytobiotic additives on greenhouse gas emission reduction, rumen fermentation manipulation, and performance in ruminants: an updated review. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, no. 31(26), pp. 37943–37962. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33664-5>
54. Kubasova E.D., Krylov I.A., Korel'skaya G.V., Pantyukhova K.A., Kubasov R.V. Antitumor and anti-inflammatory properties of tannins of plant origin and prospects for their use in pharmacy. Zdorov'e i obrazovanie v XXI veke [Health and education in the XXI century]. 2022, no. 12, pp. 55–60 (In Russian)
55. Abd'quadri-Abojukoro A.N., Nsahlai I.V. Evaluating the Effects of Some Selected Medicinal Plant Extracts on Feed Degradability, Microbial Protein Yield, and Total Gas Production In Vitro. *Animals*

(*Basel*), 2023, no. 13(4), article id: 702.

<https://doi.org/10.3390/ani13040702>

56. El-Shall N.A., Abd El-Hack M.E., Albaqami N.M., Khafaga A.F., Taha A.E., Swelum A.A., El-Saadony M.T., Salem H.M., El-Tahan A.M., AbuQamar S.F., El-Tarabily K.A., Elbestawy A.R. Phytochemical control of poultry coccidiosis: a review. *Poultry Science Journal*, 2022, no. 101(1), article id: 101542.

<https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101542>

57. Swami R., Aggarwal K. The Prospects of Phytomedicines and Nanomedicines to Treat Leishmaniasis: A Comprehensive Review. *Current drug research reviews*, 2024, no. 16(3), pp. 308–318. DOI: 10.2174/2589977515666230725105141

58. Li L., Sun X., Zhao D., Dai H. Pharmacological Applications and Action Mechanisms of Phytochemicals as Alternatives to Antibiotics in Pig Production. *Frontiers in Immunology*, 2021, no. 12, article id: 798553.

<https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.798553>

59. Valenzuela-Grijalva N.V., Pinelli-Saavedra A., Muhlia-Almazan A. et al. Dietary inclusion effects of phytochemicals as growth promoters in animal production. *Journal of Animal Science and Technology*, 2017, no. 59, article id: 8.

<https://doi.org/10.1186/s40781-017-0133-9>

60. Ahmed S., Khan H., Aschner M., Hasan M.M., Hassan S.T.S. Therapeutic potential of naringin in neurological disorders. *Food Chem, Toxicol Food and Chemical Toxicology*. 2019, no. 132, article id: 110646.

61. Asfour H.Z. Anti-Quorum Sensing Natural Compounds. *Journal of Microscopy and Ultrastructure*, 2018, no. 6(1), pp. 1–10.

https://doi.org/10.4103/JMAU.JMAU_10_18

62. Nazzaro F., Fratianni F., Coppola R. Quorum Sensing and Phytochemicals. *International Journal of Molecular Sciences*, 2013,

no. 14(6), pp. 12607–12619.

<https://doi.org/10.3390/ijms140612607>

63. Abdel-Latif H.M.R., Yilmaz S. Kucharczyk D. Editorial: Functionality and applications of phytochemicals in aquaculture nutrition. *Frontiers in Veterinary Science*, 2023, no. 10, article id: 1218542. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1218542>

64. Martínez-Antequera F.P., López-Ruiz R., Martos-Sitcha J.A., Mancera J.M., Moyano F.J. Assessing differences in the bioaccessibility of phenolics present in two wine by-products using an in-vitro model of fish digestion. *Frontiers in Veterinary Science*, 2023, no. 10, article id: 1151045.

<https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1151045>

65. Liu Y., Fan J., Huang H., Zhou H., Cao Y., Zhang Y., Jiang W., Zhang W., Deng J. Tan B. High dietary non-starch polysaccharides detrimental to nutrient digestibility, digestive enzyme activity, growth performance, and intestinal morphology in largemouth bass, *Micropterus salmoides*. *Frontiers in Nutrition*, 2022, no. 9, article id: 1015371. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1015371>

66. Feher M., Fauszt P., Tolnai E., Fidler G., Pesti-Asboth G., Stágel A., Szucs I., Biro S., Remenyik J., Páholcsek M., Stundl L. Effects of phytonutrient-supplemented diets on the intestinal microbiota of *Cyprinus carpio*. *PLoS One*, 2021, no. 16(4), article id: 0248537.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248537>

67. Marçal R, Sousa P, Marques A., Pereira V., Guilherme S., Barreto A., Costas B., Rocha R.J.M., Pacheco M. Exploring the Antioxidant and Genoprotective Potential of *Salicornia ramosissima* Incorporation in the Diet of the European Seabass (*Dicentrarchus labrax*). *Animals (Basel)*, 2023, no. 14(1), article id: 93. <https://doi.org/10.3390/ani14010093>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Ксения А. Маленкина и Азамат Е. Аринжанов проанализировали данные, корректировали рукопись до подачи в редакцию, представили фактический материал. Оба автора 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

Kseniya A. Malenkina and Azamat E. Arinzhonov analysed the data, corrected the manuscript before submitting it to the editorial office and presented the factual material. Both 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

Ксения А. Маленкина / Kseniya A. Malenkina <https://orcid.org/0000-0002-7781-9028>

Азамат Е. Аринжанов / Azamat E. Arinzhonov <https://orcid.org/0000-0001-6534-7118>

Оригинальная статья / Original article

УДК 551.584.4

DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-10



Сезонная и суточная изменчивость потоков CO₂ и CH₄ у поверхности почвы в лесных и травянистых экосистемах черноморского побережья Краснодарского края

Маргарита В. Кочкина¹, Дарья А. Карпунина², Дарья С. Леонова², Владимир В. Пушкин³,
Александр В. Ольчев^{1,2}, Александр А. Полухин¹, Сергей К. Гулев¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Геленджик, Россия

Контактное лицо

Маргарита В. Кочкина, инженер лаборатории экспериментальной физики океана, Институт океанологии имени П. П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН); 117997 Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, 36.

Тел. +79067835460

Email moreinty@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0009-0000-2763-8344>

Формат цитирования

Кочкина М.В., Карпунина Д.А., Леонова Д.С., Пушкин В.В., Ольчев А.В., Полухин А.А., Гулев С.К. Сезонная и суточная изменчивость потоков CO₂ и CH₄ у поверхности почвы в лесных и травянистых экосистемах черноморского побережья Краснодарского края // Юг России: экология, развитие. 2026. Т.21, N 2. С. 114-124. DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-10

Получена 17 октября 2025 г.

Прошла рецензирование 14 января 2026 г.

Принята 25 апреля 2026 г.

Резюме

В работе представлена оценка влияния опада и структуры растительного покрова на потоки диоксида углерода (CO₂) и метана (CH₄) у поверхности почвы в природных экосистемах черноморского побережья Северного Кавказа. Полевые исследования проводились на карбоновом полигоне Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Краснодарский край, район Геленджика) в летние сезоны 2024 и 2025 годов с использованием автоматической почвенной камеры и портативного инфракрасного газоанализатора LI-7810. Одновременно с измерениями почвенных потоков проводились наблюдения за температурой и влажностью почвы. Установлено, что наличие растительного опада приводит к увеличению эмиссии CO₂ за счёт усиления дыхательной активности почвенных микроорганизмов и растений, а также одновременно усиливает процессы метанотрофии, обеспечивая дополнительное поглощение CH₄. Отмечена выраженная сезонная и суточная изменчивость интенсивности газообмена, обусловленная температурно-влажностными условиями и типом растительности. Наибольшие значения потоков CO₂ и CH₄ зафиксированы на травянистых участках, отличающихся более высокой инсоляцией и интенсивным прогревом почвы. Полученные результаты восполняют дефицит данных наблюдений для черноморского побережья Северного Кавказа и подтверждают их высокую чувствительность к климатическим колебаниям. Материалы исследования могут быть использованы для уточнения параметров моделей углеродного цикла, совершенствования национальной системы мониторинга парниковых газов и разработки региональных стратегий адаптации к климатическим изменениям.

Ключевые слова

Потоки CO₂, потоки CH₄, растительный опад, углеродный цикл, почвенное дыхание, метанотрофия, лесные экосистемы, травянистые экосистемы, Северный Кавказ.

Seasonal and daily variability of CO₂ and CH₄ fluxes at the soil surface in forest and grassland ecosystems of the Black Sea coast of Krasnodar Territory, Russia

Margarita V. Kochkina¹, Daria A. Karpunina², Daria S. Leonova², Vladimir V. Pushkin³, Alexander V. Olchev^{1,2}, Alexander A. Polukhin¹ and Sergey K. Gulev¹

¹Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³Southern Branch of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Gelendzhik, Russia

Principal contact

Margarita V. Kochkina, Engineer, Laboratory of Experimental Ocean Physics, P. P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences; 36 Nakhimovsky Prospekt, Moscow, Russia 117997. Tel. +79067835460

Email moreinty@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0009-0000-2763-8344>

How to cite this article

Kochkina M.V., Karpunina D.A., Leonova D.S., Pushkin V.V., Olchev A.V., Polukhin A.A., Gulev S.K. Seasonal and daily variability of CO₂ and CH₄ fluxes at the soil surface in forest and grassland ecosystems of the Black Sea coast of Krasnodar Territory, Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2026; 21(2):114-124. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-10

Received 17 October 2025

Revised 14 January 2026

Accepted 25 April 2026

Abstract

This paper evaluates the influence of plant litter and vegetation structure on soil fluxes of carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) in natural ecosystems on the Black Sea coast of the North Caucasus. Field studies were conducted at a carbon supersite operated by the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences in the Gelendzhik district of Krasnodar Territory during the summers of 2024 and 2025. An automatic soil chamber and a LI-7810 infrared gas analyser were used in the study. In addition, soil flux, temperature, and moisture measurements were conducted. The presence of plant litter was found to increase CO₂ emissions, while simultaneously enhancing methanotrophic processes and promoting CH₄ uptake. Significant seasonal and daily variability in gas exchange was observed due to variations in temperature, humidity and vegetation types. The highest CO₂ and CH₄ fluxes were recorded in grassy areas with better insolation and intense soil warming. A stable dependence of fluxes on soil temperature and moisture was revealed. The results obtained fill a gap in observational data for the region where aridity is increasing and abnormal weather events are becoming more frequent. Therefore, research into carbon exchange is particularly relevant. This study can improve the accuracy of carbon cycle models, develop a national monitoring network for greenhouse gas fluxes and propose regional adaptation strategies to climate change.

Key Words

CO₂ fluxes, CH₄ fluxes, plant litter, carbon cycle, soil respiration, methanotrophy, forest ecosystems, grassland ecosystems, Northern Caucasus.

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемые в настоящее время высокие темпы изменения климатических условий в глобальном масштабе большинством экспертов связываются с повышением концентрации парниковых газов в атмосфере, и прежде всего, углекислого газа (CO_2) и метана (CH_4), от антропогенных и природных источников. Их динамика рассматривается как один из ключевых факторов глобального потепления и напрямую отражается на функционировании климатических процессов в различных географических регионах. С учётом ключевой роли природных экосистем в регулировании атмосферного баланса парниковых газов, особое значение приобретают исследования, направленные на изучение процессов, определяющих потоки CO_2 и CH_4 и углеродный баланс этих экосистем [1; 2].

Наземные экосистемы выполняют двойную функцию: с одной стороны, растительный покров экосистем поглощает CO_2 в процессе фотосинтеза и аккумулирует его в органическом веществе, а с другой – экосистемы выделяют CO_2 в атмосферу в результате дыхания растений и разложения почвенной органики. Кроме того, в зависимости от активности почвенных микробных сообществ и условий среды экосистемы могут, как выделять, так и поглощать CH_4 [3; 4]. Потоки этих парниковых газов между почвой и атмосферой являются центральным звеном глобального углеродного цикла. Их пространственная и временная изменчивость отражает ключевые механизмы функционирования экосистем и позволяет уточнить их вклад в климатические процессы.

Особая роль в формировании углеродного баланса экосистем принадлежит почве – сложной биогеохимической системе, в которой сосредоточены основные процессы накопления и высвобождения углерода, определяющие обмен CO_2 и CH_4 между экосистемой и атмосферой [5; 3]. В почве протекают процессы почвенного дыхания и метанотрофии, определяющие баланс углеродных потоков. Существенное влияние на эти процессы оказывает растительный опад – источник свежего органического углерода для микробных сообществ [6; 7]. Растительный опад представляет собой совокупность отмерших частей растений (листьев, хвои, веточек, коры, плодов), накапливающихся на поверхности почвы и служащих основным источником органического вещества в наземных экосистемах. Он обеспечивает поступление углерода и питательных элементов в почвенную систему, формируя субстрат для микроорганизмов и определяя интенсивность процессов разложения, минерализации и дыхания почвы [8].

Поступление опада запускает так называемый «инициирующий эффект ризосферы» (*priming effect*) – изменение скорости минерализации органического вещества почвы под влиянием нового субстрата [9]. Этот эффект проявляется, когда добавление свежего органического вещества стимулирует активность микроорганизмов, ускоряя разложение не только нового, но и старого («фонового») органического углерода. В зависимости от условий *priming effect* может усиливать эмиссию CO_2 или, напротив, способствовать стабилизации органического углерода в

почве, одновременно изменяя интенсивность процессов метанотрофии [6; 10].

Однако интенсивность дыхания и метанопоглощения определяется не только поступлением органического вещества, но и внешними факторами – температурой, атмосферными осадками и освещённостью, которые регулируют активность микроорганизмов и растений [11; 12]. Избыточное увлажнение или перегрев почвы могут замедлять биотические процессы, изменяя баланс газообмена и направление потоков парниковых газов.

Несмотря на значительный прогресс в изучении механизмов почвенного газообмена, региональные особенности этих процессов, особенно в экосистемах Северного Кавказа, остаются пока малоизученными. Между тем именно в этом регионе в последние десятилетия наблюдаются ускоренные темпы климатических изменений, проявляющиеся в аридизации климата, увеличении продолжительности засушливых периодов и учащении экстремальных погодных явлений. Эти изменения оказывают комплексное воздействие на функционирование экосистем и могут существенно перераспределять их роль в глобальном углеродном цикле. Учитывая высокую продуктивность и разнообразие экосистем Северного Кавказа, изучение потоков CO_2 и CH_4 в этом регионе, очевидно, имеет не только региональное, но и глобальное значение.

Важным шагом к восполнению дефицита данных о потоках парниковых газов в разных регионах России стало развитие сети карбоновых полигонов, создаваемых в рамках национальных и международных климатических инициатив [13; 14]. Эти стационарные экспериментальные площадки предназначены для круглогодичного мониторинга потоков парниковых газов и изучения факторов, определяющих углеродный цикл экосистем. Данные, полученные на карбоновых полигонах, позволяют оценивать пространственно-временную изменчивость эмиссии и поглощения CO_2 и CH_4 , формировать научную основу для управления углеродным балансом и разработки стратегий смягчения климатических последствий.

Настоящее исследование направлено на оценку потоков CO_2 и CH_4 в почвах природных экосистем черноморского побережья Северного Кавказа, а также определение влияния на потоки растительного опада и различий в структуре растительности (лесные и травянистые экосистемы) в летние сезоны 2024 и 2025 годов [6; 9]. Особое внимание уделено сезонной и суточной динамике газообмена, что позволяет глубже понять механизмы взаимодействия почвы, растительности и климатических факторов, формирующих углеродный баланс экосистем Северного Кавказа, а также восполнить дефицит данных наблюдений для региона, достаточно уязвимого к современным климатическим изменениям.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования потоков парниковых газов у поверхности почвы проводились на базе карбонового полигона Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, расположенного вблизи г. Геленджик (Краснодарский край, Черноморское побережье Северного Кавказа). Климат исследуемой территории относится к переходному типу от восточно-средиземноморского к

влажному субтропическому, с преимущественно сухим и теплым летом, и мягкой зимой [9]. Береговая часть карбонового полигона отличается неоднородным рельефом и высокой пространственной неоднородностью растительного покрова, представленного травянистыми, кустарниковыми и древесными формациями. Преобладающий тип почв – дерново-карбонатные. Северная часть карбонового полигона занимает около 25 % общей площади и покрыта преимущественно сосновым лесом, в составе которого доминирует сосна пицундская (лат. *Pinus brutia* var. *pityusa*). В древесном ярусе встречается также дуб пушистый (лат. *Quercus pubescens*). Практически отсутствует кустарниковый ярус, травяной и моховой покров. Второй участок характеризуется преобладанием кустарниковой поросли и травянистой растительности. Наиболее распространенным видом кустарников является держидерево (лат. *Paliurus spinachristi*), реже встречается грабник (лат. *Betulaceae*), единично – сумах дубильный (лат. *Rhus coriaria*). Среди травянистых форм часто отмечается иглица понтийская (лат. *Ruscus aculeatus*). Площадь данного участка составляет около 75 % территории береговой части карбонового полигона.

Для оценки пространственной изменчивости газообмена на исследуемой территории было выделено 17 экспериментальных площадок, классифицированных по структуре растительности на лесные и травянистые типы. Для каждой группы площадок дополнительно учитывалось наличие или отсутствие растительного опада. Для анализа суточной динамики газообмена из общего числа площадок были выбраны четыре наиболее репрезентативные, характеризующиеся типичной структурой и видовыми особенностями растительности.

Измерения потоков CO₂ и CH₄ выполнялись с использованием почвенной камеры Smart Chamber (LI-COR, США), соединенной с инфракрасным газоанализатором LI-7810 (LI-COR, США), который обеспечивал одновременное определение концентраций и потоков искоемых парниковых газов с высокой точностью [15]. Продолжительность экспозиции камеры составляла 2–3 минуты, а количество повторных измерений на каждой площадке – не менее трёх. Температура и влажность почвы регистрировались датчиком HydraProbe (Stevens, США) на глубине 5 см.

Наблюдения потоков парниковых газов на экспериментальных участках проводились регулярно, начиная с 2022 года. С 2024 года в программу исследований было включено изучение влияния вклада растительного опада на формирование результирующих потоков. В 2024 и 2025 годах измерения охватывали весь летний период, что позволило проанализировать как сезонную, так и суточную изменчивость потоков парниковых газов.

Обработка данных осуществлялась в соответствии с методическими рекомендациями по исследованиям на карбоновых полигонах Российской Федерации [15]. Расчёт потоков осуществлялся с помощью встроенного программного обеспечения измерительного комплекса. Статистическая обработка данных проводилась в среде Microsoft Excel: для каждой измерительной площадки определялись средние значения потоков и их стандартные

отклонения, а также фиксировались различия между вариантами экспериментов (опад/без опада, лес/травостой). Для визуализации сезонной и суточной динамики газообмена использовались стандартные графические инструменты Microsoft Excel.

Выбранный дизайн эксперимента и примененный подход к обработке данных обеспечили сопоставимость результатов между различными участками и позволили выявить влияние растительного опада и структуры растительности на потоки CO₂ и CH₄ у поверхности почвы.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Летняя изменчивость потоков за 2024 и 2025 годы

Потоки парниковых газов, измеренные на территории карбонового полигона, характеризовались ярко выраженной сезонной и межгодовой изменчивостью. В разные периоды летних сезонов 2024 и 2025 годов скорость эмиссии CO₂ почвой существенно варьировала, что было связано, прежде всего, с различиями температурно-влажностных условий на отдельных участках (рис. 1–2).

Сравнение динамики температуры и влажности почвы в летние сезоны 2024 и 2025 гг. (рис. 2) показало, что лето 2024 года отличалось более высокими температурами и пониженной влажностью почвы по сравнению с 2025 годом. Наибольшие значения эмиссии CO₂ наблюдались в июне, когда сочетание умеренных температур и достаточного увлажнения способствовало активной жизнедеятельности растений и почвенных микроорганизмов. К августу скорость выделения CO₂ почвой снижалась вследствие иссушения верхнего слоя почвы и ослабления активности почвенной биоты. В более жарком и сухом 2024 году общая эмиссия CO₂ была ниже, чем в 2025 году, когда умеренные температуры и более равномерное распределение осадков обеспечивали устойчивый уровень дыхательных процессов (рис. 3, 4).

Пространственная неоднородность потоков внутри полигона также была весьма заметной. Различия определялись как структурой растительного покрова, так и особенностями рельефа. Оптимальный фон температуры и почвенной влажности способствовали активизации почвенного дыхания, тогда как перегрев и дефицит почвенной влаги вели к угнетению микробной активности и снижению интенсивности эмиссии CO₂. Высокая чувствительность почвенного дыхания к изменениям атмосферных условий подчеркивает его значимую роль в кратковременных изменениях углеродного баланса экосистем.

Анализ пространственно-временной изменчивости потоков CH₄ показал, что почвы карбонового полигона на протяжении всего периода наблюдений сохраняли устойчивую способность к поглощению CH₄ (рис. 4). Амплитуда поглощения варьировала в зависимости от погодных условий и заметно различалась между участками с разным типом растительного покрова. Наибольшие значения регистрировались при умеренной почвенной влажности и средних температурах, тогда как периоды интенсивного перегрева и засухи сопровождались снижением метанотрофной активности.



Рисунок 1. Географическое расположение карбонового полигона Института океанологии им. П. П. Shirshov РАН с обозначением местоположения экспериментальных площадок

Figure 1. Geographical location of the carbon supersite of the P. P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, with locations of experimental plots

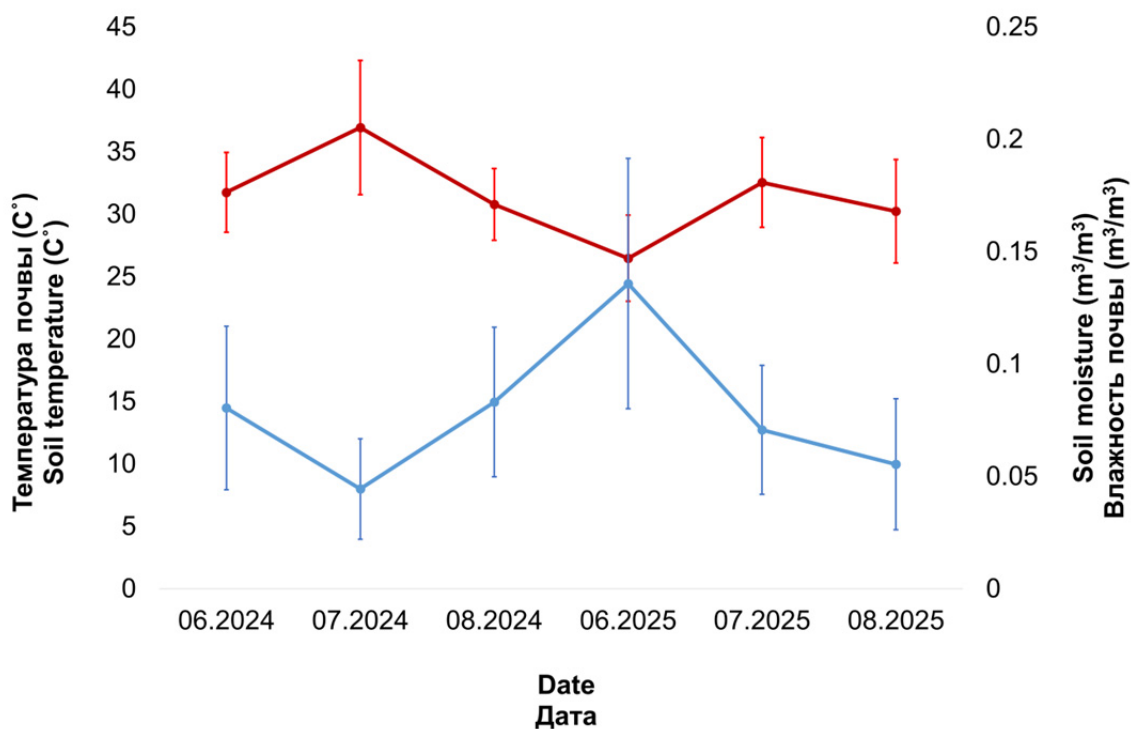


Рисунок 2. Сезонная изменчивость температуры и влажности почвы в летние сезоны 2024 и 2025 годов

Figure 2. Seasonal variability of soil temperature and moisture in the summer seasons of 2024 and 2025

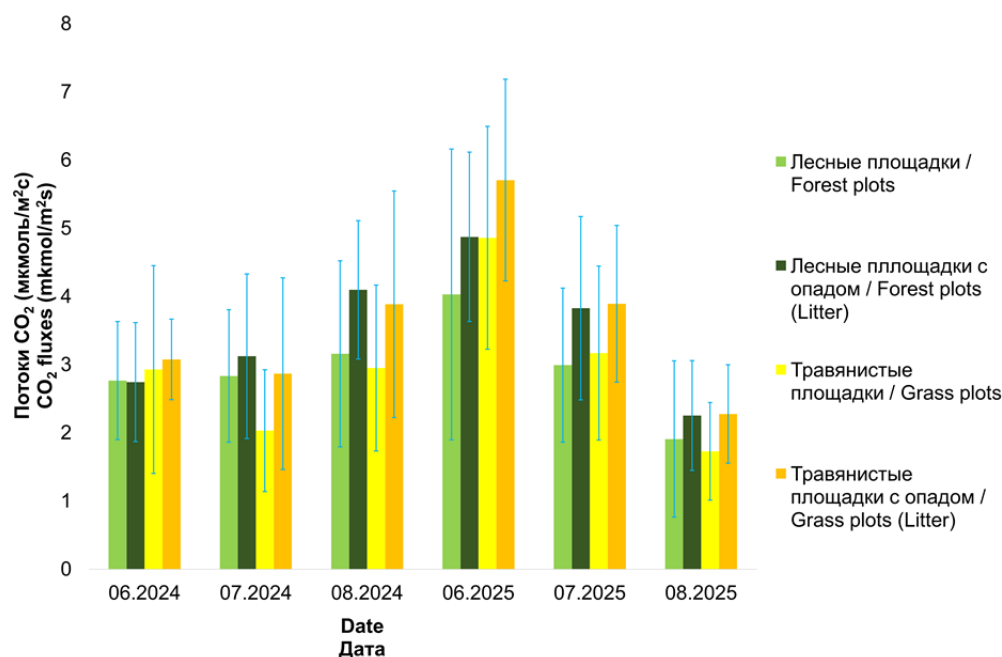


Рисунок 3. Сезонная изменчивость потоков CO₂ на лесных и травянистых участках полигона в летние сезоны 2024 и 2025 годов

Figure 3. The seasonal variability of CO₂ emissions in forest and grassland sites of the carbon polygon in summer seasons of 2024 and 2025

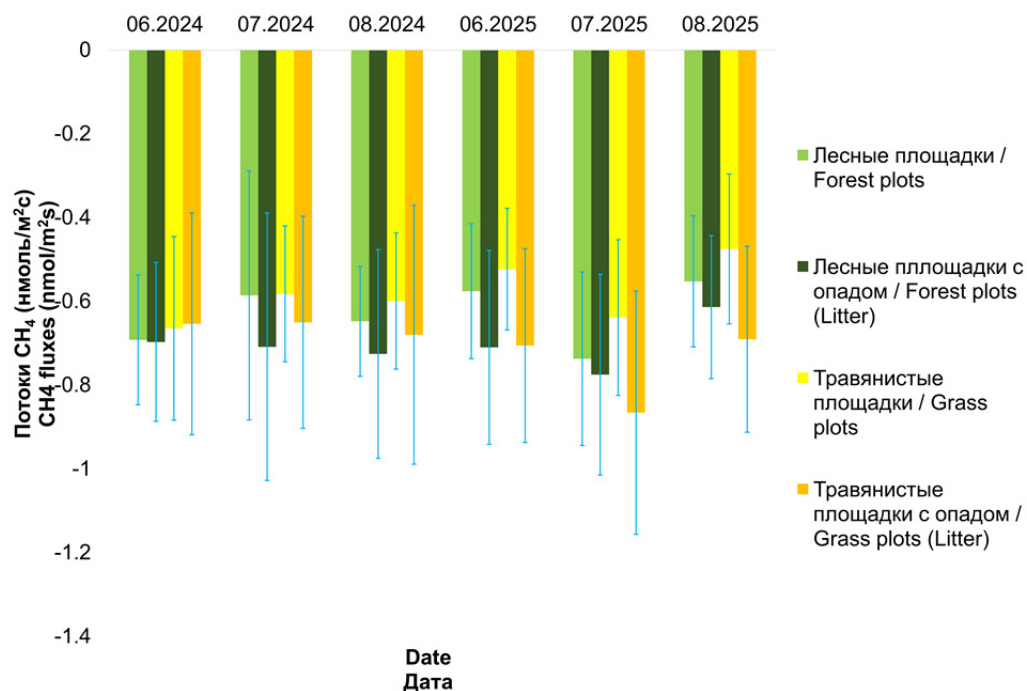


Рисунок 4. Сезонная изменчивость потоков CH₄ на лесных и травянистых участках полигона в летние сезоны 2024 и 2025 годов

Figure 4. The seasonal variability of CH₄ fluxes in forest and grassland sites of the carbon polygon in summer seasons of 2024 and 2025

Поглощение CH₄ также отличалось хорошо выраженной сезонной изменчивостью, хотя ее амплитуда была меньше, чем у потоков CO₂. Максимальные значения поглощения CH₄ наблюдались в июле, когда сочетание температуры и влажности было наиболее благоприятным для функционирования метанотрофов. К августу, на фоне перегрева и дефицита почвенной влаги, интенсивность поглощения CH₄ снижалась. В целом, в течение всего периода наблюдений почвы

сохраняли роль устойчивого поглотителя CH₄, однако величина потоков варьировала в зависимости от микроклиматических условий и структуры растительного покрова (рис. 4).

Анализ роли опада в формировании результирующих потоков, показал, что во все летние месяцы наблюдалось достаточно характерное увеличение эмиссии CO₂ до 20 % на лесных и травянистых участках с опадом по сравнению с

участками без него. Одновременно отмечалась тенденция к усилению поглощения CH_4 в присутствии опада. Исключение составляют потоки CO_2 и CH_4 , измеренные в июне 2024 года, когда существенных различий между вариантами с опадом и без него не выявлено (рис. 3–4).

Таким образом, летняя динамика потоков парниковых газов в 2024–2025 годах отражает тесную взаимосвязь газообмена почвы с температурно-влажностными условиями и структурой растительного покрова. Более благоприятные условия влагообеспеченности и умеренные температуры способствовали устойчивой активности дыхания почвы и усилению поглощения CH_4 , тогда как периоды засухливости сопровождались ослаблением обоих процессов. Особое значение имело присутствие растительного опада, который усиливал эмиссию CO_2 и одновременно

стимулировал поглощение CH_4 , выступая важным регулятором почвенного углеродного обмена в исследуемых экосистемах.

Суточная изменчивость потоков парниковых газов на лесной и травянистой экспериментальных площадках за 2024 год

Для более детального анализа кратковременных колебаний газообмена CO_2 и CH_4 на исследуемой территории были проведены измерения суточной динамики потоков на выбранных репрезентативных площадках в лесной и травянистой частях карбонового полигона летом 2024 года. Эти наблюдения позволили выявить характерные суточные ритмы эмиссии CO_2 и поглощения CH_4 , а также оценить влияние растительного опада и микроклиматических условий на их интенсивность (рис. 5–6).

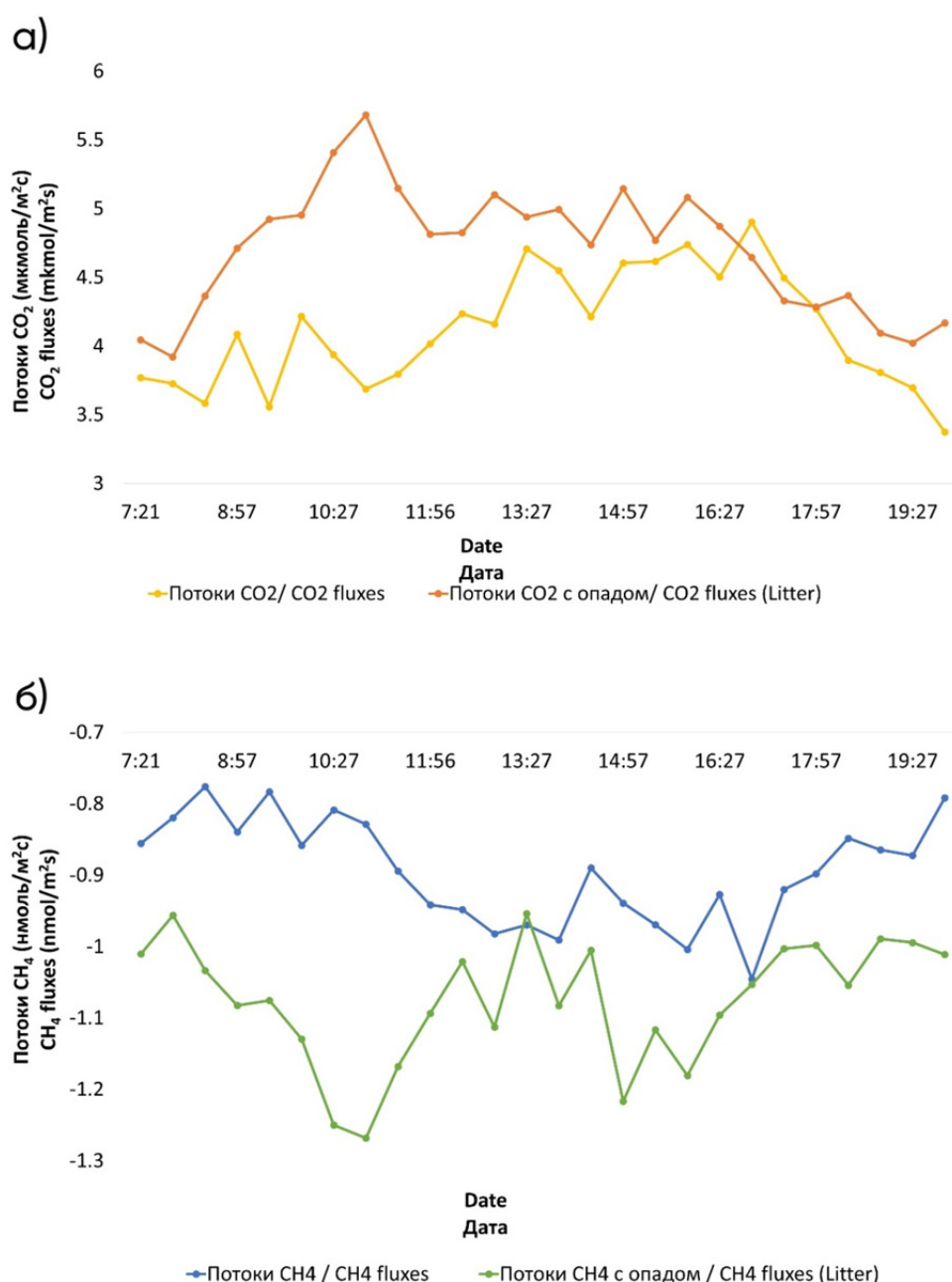


Рисунок 5. Дневной ход потоков парниковых газов (CO_2 – 5а, CH_4 – 5б), на лесной площадке, 2024 год
Figure 5. Diurnal variations in greenhouse gas fluxes (CO_2 – 5a, CH_4 – 5b) at a forest site, 2024

На площадке в северной части полигона, покрытой древесной растительностью, наблюдалась чётко выраженная суточная цикличность эмиссии CO_2 . Максимальные значения регистрировались в утренние часы, когда постепенное повышение температуры почвы активизировало процессы дыхания микроорганизмов и корневых систем растений. К вечеру интенсивность выделения CO_2 снижалась, что отражало спад биологической активности при снижении температуры (рис. 5а). На участках с опадом эмиссия CO_2 была выше, чем на участках без опада, что

указывает на стимулирующее влияние свежего органического субстрата на микробное дыхание.

Поглощение CH_4 на лесной площадке демонстрировало противоположную динамику по отношению к эмиссии CO_2 . Наибольшие значения поглощения приходились на утренние и дневные часы, когда сочетание оптимальной влажности и температуры почвы обеспечивало максимальную активность метанотрофов. На участках с опадом интенсивность поглощения CH_4 была выше, что согласуется с повышенной активностью микробных сообществ верхнего слоя почвы (рис. 5б).

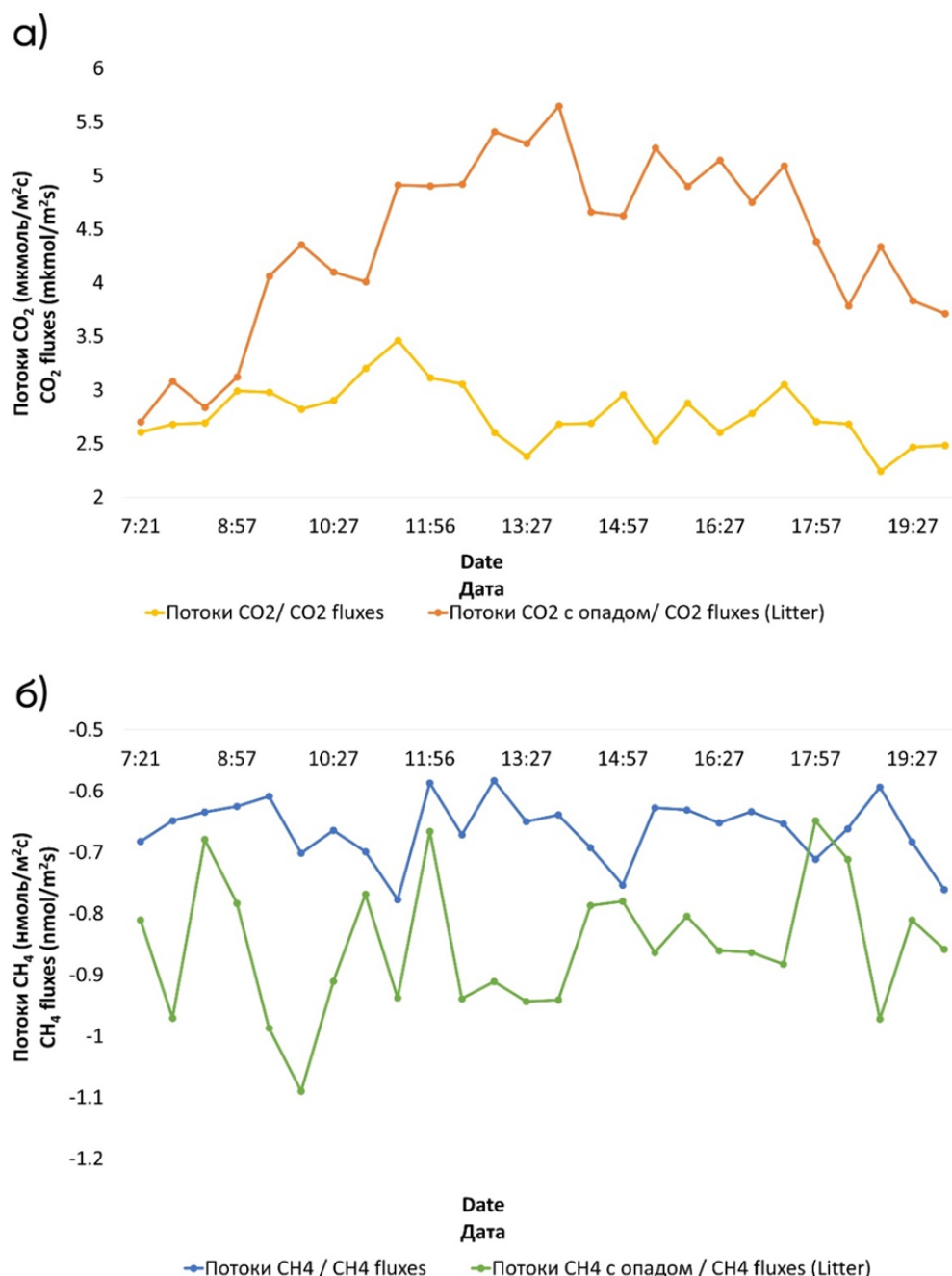


Рисунок 6. Дневной ход потоков парниковых газов (CO_2 – 6а, CH_4 – 6б), на травянистой площадке, 2024 год
Figure 6. Diurnal variations in greenhouse gas fluxes (CO_2 – 6a, CH_4 – 6b) at a grassland site, 2024

В южной части полигона, на участках с травянистой и кустарниковой растительностью (рис. 6а, 6б), амплитуда суточных колебаний потоков парниковых газов у поверхности почвы была значительно выше. Это

обусловлено главным образом отсутствием древесного яруса, и как следствие, более высокой солнечной инсоляцией, вызывающей более резкие колебания температуры поверхности почвы. Пик эмиссии CO_2

приходился на середину дня, совпадая с максимальным прогревом почвы, тогда как минимальные значения наблюдались в ночные и предутренние часы. Поглощение CH_4 также изменялось в течение суток, достигая максимальных значений утром и снижаясь к вечеру на фоне иссушения поверхностного слоя почвы.

В целом, суточная динамика потоков CO_2 и CH_4 отражает тесную связь между активностью почвенной биоты и колебаниями микроклиматических параметров. Наличие растительного опада усиливало как эмиссию CO_2 , так и поглощение CH_4 , что подтверждает его важную роль в поддержании энергетического и функционального баланса почвенных микробных сообществ.

Полученные данные свидетельствуют, что сезонная и суточная динамика потоков CO_2 и CH_4 у поверхности почвы в исследованных экосистемах определяется не только метеорологическими условиями, но и структурой растительного покрова, а также наличием растительного опада. Эти факторы влияют на формирование температурно-влажностных условий почвы и активность почвенной микробиоты, что напрямую отражается на интенсивности углеродного обмена.

В обоих типах исследуемых растительных сообществ на карбоновом полигоне наблюдалась четко выраженная сезонная изменчивость потоков, связанная с чередованием влажных и засушливых периодов. При этом на участках с травянистой растительностью амплитуда колебаний была выше, чем в лесных, вследствие большей инсоляции и более резких изменений температуры и влажности верхнего слоя почвы. В дневном ходе потоков CO_2 максимальные значения приходились на середину дня, что совпадало с наибольшим прогревом почвы, тогда как в лесных участках пик эмиссии наблюдался в утренние часы, при оптимальном сочетании температуры и влажности для почвенного дыхания. Суточные изменения поглощения CH_4 почвой, напротив, достигали максимума утром и днем, что связано с активизацией метанотрофных бактерий при умеренной влажности, аналогично закономерностям, отмеченным и для других типов экосистем [16; 17].

Ключевым фактором, определяющим интенсивность почвенных потоков, являлось наличие растительного опада. Его присутствие постоянно усиливало эмиссию CO_2 как на лесных, так и на травянистых участках, что отражает стимулирующее влияние свежего органического субстрата на микробное дыхание (priming effect) [6; 8; 11]. Этот эффект наиболее выражен в периоды оптимального почвенного увлажнения, когда микробное сообщество активно использует поступающий органический материал. Одновременно фиксировалось усиление поглощения CH_4 , что согласуется с результатами других исследований, где наличие опада способствует развитию и активности метанотрофных сообществ [18; 19]. Таким образом, растительный опад не только активизирует дыхательные процессы почвы, но и способствует поддержанию её функции как поглотителя CH_4 .

Сравнение лесных и травянистых участков выявило принципиальные различия в механизмах газообмена. В лесных биотопах с плотным слоем опада эмиссия CO_2 была менее чувствительна к кратковременным температурным колебаниям, а

поглощение CH_4 сохраняло стабильность. Это объясняется буферной ролью слоя опада, который поддерживает постоянную влажность и температуру в верхних горизонтах почвы. На травянистых участках, напротив, высокая инсоляция и иссушение почвы вызывали более сильные суточные колебания: эмиссия CO_2 возрастала днем, а поглощение CH_4 снижалось при сильном перегреве. Подобные различия подчеркивают регулирующее значение структуры растительного покрова для пространственной изменчивости углеродного обмена, что соответствует выводам Лейтнера и др. [18] и Цзяна и др. [19] о важной роли опада и структуры растительного полога в стабилизации микроклиматических условий.

В целом, выявленные различия между лесными и травянистыми экосистемами показывают, что растительный опад является не только источником органического вещества, но и ключевым фактором, стабилизирующим температурно-влажностные условия почвы и активность микробных сообществ. Его влияние прослеживается как в сезонных, так и в суточных масштабах, обеспечивая устойчивость экосистем к изменениям внешней среды.

Таким образом, экосистемы прибрежных районов Краснодарского края характеризуются высокой чувствительностью углеродного обмена к температурно-влажностным параметрам и структурным особенностям растительности. Полученные результаты дополняют существующие представления о региональной специфике почвенного газообмена и могут быть использованы для уточнения параметров моделей углеродного цикла. Интеграция данных наблюдений, полученных на карбоновых полигонах, в биогеохимические модели позволит более точно оценить температурную и влажностную зависимость почвенного дыхания и метанотрофии, а также уточнить вклад южных экосистем России в национальный углеродный баланс [17; 18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование показало, что температурно-влажностные условия оказывают решающее влияние на интенсивность почвенного газообмена в прибрежных травянистых и лесных экосистемах Северного Кавказа. Экстремально жаркое и засушливое лето 2024 года сопровождалось снижением активности почвенной микробиоты, что приводило к ослаблению как эмиссии CO_2 , так и поглощению CH_4 . Напротив, более мягкие и более влажные условия лета 2025 года способствовали стабилизации дыхательных процессов и поддержанию более устойчивого газообмена. Эти различия подчёркивают высокую чувствительность экосистем региона к климатическим колебаниям и усилению процессов аридизации.

Одним из ключевых результатов исследования стало подтверждение значимой роли растительного опада как регулятора почвенного углеродного обмена. Его присутствие увеличивало эмиссию CO_2 за счёт стимуляции микробного дыхания и одновременно усиливало процессы метанотрофии, способствуя поглощению CH_4 . Этот эффект соответствует концепции *priming effect* и демонстрирует, что взаимодействие почвы со свежим органическим материалом является важнейшим механизмом формирования экосистемного углеродного баланса.

Сравнение лесных и травянистых экосистем показало, что микроклиматические условия и структура растительности определяют как амплитуду, так и динамику потоков парниковых газов. Более высокие значения эмиссии CO₂ и поглощения CH₄ на участках с преобладанием травянистой растительности связаны с лучшей инсоляцией и более интенсивным прогревом почвы, что подтверждает ведущую роль температурного и светового режимов в регулировании газообмена наземных экосистем.

Учитывая ключевое значение почвенного покрова в регулировании регионального и глобального углеродного баланса, полученные результаты существенно расширяют представления о механизмах углеродного обмена в экосистемах Северного Кавказа – регионе, где дефицит данных наблюдений особенно ощутим на фоне ускоряющихся климатических изменений.

С практической точки зрения результаты исследования могут быть использованы для совершенствования региональных биогеохимических моделей и создания систем мониторинга, обеспечивающих более точное прогнозирование реакции экосистем на процессы аридизации и увеличение повторяемости экстремальных погодных явлений.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением временных рядов наблюдений, охватом других сезонов года и экстремальных климатических ситуаций, а также с более детальным изучением роли микробного сообщества и химического состава растительного опада в формировании результирующих потоков. Это позволит уточнить вклад экосистем Северного Кавказа в региональный углеродный баланс и повысить достоверность глобальных прогнозов, учитывающих уязвимость южных регионов России к климатическим изменениям.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают признательность Институту океанологии РАН за помощь в организации полевых работ на карбоновом полигоне в районе Геленджика. Работа выполнена при финансовой поддержке темы госзадания (проект № FMWE-2023-0001).

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to acknowledge the assistance of the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences in organising fieldwork at the carbon site near Gelendzhik. This work was carried out with financial support from a state funding programme (project No. FMWE-2023-0001).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chapin F.S., Matson P.A., Mooney H.A. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer, New York, 2002. 436 p.
2. Olchev A.V. Estimation of Carbon Dioxide and Methane Emissions and Absorption by Land and Ocean Surfaces in the 21st Century // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2025. V. 61. P. 74–100. DOI: 10.1134/S0001433825701166
3. Bond-Lamberty B., Ballantyne A., Berryman E., Fluet-Chouinard E., Jian J., Morris K.A., Rey A., Vargas R. Twenty years of progress, challenges, and opportunities in measuring and understanding soil respiration // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2024. V. 129. N 2. 26 p. <https://doi.org/10.1029/2023JG007637>

4. Schaufler G., Kitzler B., Schindlbacher A., Skiba U., Sutton M.A., Zechmeister-Boltenstern S. Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature // *European Journal of Soil Science*. 2010. V. 61. P. 683–696. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01277.x>
5. Prescott C.E. Litter decomposition: What controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? // *Biogeochemistry*. 2010. V. 101. P. 133–149. DOI: 10.1007/s10533-010-9439-0
6. Zhang L. et al. Non-Native Plant Litter Enhances Soil Carbon Dioxide Emissions in an Invaded Annual Grassland // *PLoS ONE*. 2014. V. 9. 8 p. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092301>
7. Sayer E.J. Using experimental manipulation to assess litter effects // *Biological Reviews*. 2006. V. 81. N 1. P. 1–31. DOI: 10.1017/S1464793105006846
8. Cotrufo M.F., Wallenstein M., Boot C., Denef K., Paul E. Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? // *Global Change Biology*. 2013. V. 19. P. 988–995.
9. Кочкина М.В., Солдаткина М.А., Сатосина Е.М., Ильичев И.А., Романенко В.А., Кременецкий В.В., Ольчев А.В., Гулев С.К. Пространственная и временная изменчивость потоков диоксида углерода и метана у поверхности почвы на береговом участке карбонового полигона в Краснодарском крае // *Грозненский естественнонаучный бюллетень*. 2023. Т. 3. N 4. С. 58–64.
10. Wang B., Zha T. S., Jia X., Wu B., Zhang Y. Q., Qin S. G., Soil moisture modifies respiration/flux response to temperature // *Biogeosciences*. 2014. V. 11. P. 259–268. DOI: 10.5194/bg-11-259-2014
11. Blagodatskaya E., Kuzyakov Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: critical review // *Biology and Fertility of Soils*. 2008. V. 45. P. 115–133. DOI: 10.1007/s00374-008-0334-y
12. Kuzyakov Y. Priming effects: interactions between living and dead organic matter // *Soil Biology & Biochemistry*. 2010. V. 42. P. 1363–1371. DOI: 10.1016/j.soilbio.2010.04.003
13. Гулев С.К., Ольчев А.В. Карбоновые полигоны: мониторинг, геоинформационные системы, секвестрационные технологии. Москва: Научный мир, 2025. 420 с.
14. Куричева О.А., Авилов В.К., Варлагин А.В., Гитарский М.Л., Дмитриченко А.А. и др. Мониторинг экосистемных потоков парниковых газов на территории России: сеть RuFlux // *Известия РАН. Серия Географическая*. 2023. Т. 87. N 4. С. 512–535. <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052>
15. Методические рекомендации для организации проведения метеорологических наблюдений, измерений потоков парниковых газов и составляющих углеродного баланса на карбоновых полигонах и их обработки. URL: <https://car-bonpolygons.ru/assets/EC-meteo-observationsguide.pdf> (дата обращения: 26.09.2025)
16. Bowden R.D., Newkirk K.M., Rullo G.M. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions // *Soil Biology and Biochemistry*. 1998. V. 30. N 12. P. 1591–1597.
17. Jiang J., Wang, Y.-P., Zhang, H., Yu, M., Liu, F., Xia, S., Yan, J. et al. Contribution of Litter Layer to Greenhouse Gas Fluxes between Atmosphere and Soil Varies with Forest Succession // *Forests*. 2022. V. 13. N 4. Article id: 544. <https://doi.org/10.3390/f13040544>
18. Leitner S., Sae-Tun O., Kranzinger L., Zechmeister-Boltenstern S., Zimmermann M. Contribution of litter layer to soil greenhouse gas emissions in a temperate beech forest // *Plant and Soil*. 2016. V. 403. P. 455–469. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2771-3>
19. Walkiewicz A., Rafalska A., Bulak P., Bieganski A., Osborne B. How Can Litter Modify the Fluxes of CO₂ and CH₄ from Forest Soils? A Mini-Review // *Forests*. 2021. V. 12. Article id: 1276. <https://doi.org/10.3390/f12091276>

REFERENCES

1. Chapin F.S., Matson P.A., Mooney H.A. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer, New York, 2006, 436 p.

2. Olchev A.V. Estimation of Carbon Dioxide and Methane Emissions and Absorption by Land and Ocean Surfaces in the 21st Century. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2025, vol. 61, pp. 74–100. DOI: 10.1134/S0001433825701166
3. Bond-Lamberty B., Ballantyne A., Berryman E., Fluet-Chouinard E., Jian J., Morris K.A., Rey A., Vargas R. Twenty years of progress, challenges, and opportunities in measuring and understanding soil respiration. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2024, vol. 129, no. 2, 26 p. <https://doi.org/10.1029/2023JG007637>
4. Schaufler G., Kitzler B., Schindlbacher A., Skiba U., Sutton M.A., Zechmeister-Boltenstern S. Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature. *European Journal of Soil Science*, 2010, vol. 61, pp. 683–696. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01277.x>
5. Prescott C.E. Litter decomposition: What controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? *Biogeochemistry*, 2010, vol. 101, pp. 133–149. DOI: 10.1007/s10533-010-9439-0
6. Zhang L. et al. Non-Native Plant Litter Enhances Soil Carbon Dioxide Emissions in an Invaded Annual Grassland. *PLoS ONE*, 2014, vol. 9, 8 p. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092301>
7. Sayer E.J. Using experimental manipulation to assess litter effects. *Biological Reviews*, 2006, vol. 81, no. 1, pp. 1–31. DOI: 10.1017/S1464793105006846
8. Cotrufo M.F., Wallenstein M., Boot C., Deneff K., Paul E. Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology*. 2013, vol. 19, pp. 988–995.
9. Kochkina M.V., Soldatkina M.A., Satosina Ye.M., Il'ichev I.A., Romanenko V.A., Kremenetskiy V.V., Ol'chev A.V., Gulev S.K. Spatial and temporal variability of carbon dioxide and methane fluxes near the soil surface in the coastal area of the carbon polygon in Krasnodar Krai. *Groznenskiy estestvennonauchnyi byulleten'* [Grozny Natural Science Bulletin]. 2023, vol. 8, no. 4(34), pp. 58–64. (In Russian)
10. Wang B., Zha T.S., Jia X., Wu B., Zhang Y.Q., Qin S.G. Soil moisture modifies respiration/flux response to temperature. *Biogeosciences*, 2014, vol. 11, pp. 259–268. DOI: 10.5194/bg-11-259-2014
11. Blagodatskaya E., Kuzyakov Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: critical review. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, vol. 45, pp. 115–131. DOI: 10.1007/s00374-008-0334-y
12. Kuzyakov Y. Priming effects: interactions between living and dead organic matter. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, vol. 42, pp. 1363–1371. DOI: 10.1016/j.soilbio.2010.04.003
13. Gulev S.K., Olchev A.V. *Karbonovye poligony: monitoring, geoinformatsionnye sistemy, sekvestratsionnye tekhnologii* [Carbon Polygons: Monitoring, Geographic Information Systems, and Sequestration Technologies]. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2025, 420 p. (In Russian)
14. Kuricheva O.A., Avilov V.K., Varlagin A.V., Gitarskii M.L., Dmitrichenko A.A., et al. Monitoring of ecosystem fluxes of greenhouse gases in Russia: the RuFlux network. *Izvestiya Rossiiskaya Akademii Nauk, Seriya Geograficheskaya*, 2023, vol. 87, no. 4, pp. 512–535. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052>
15. Methodological recommendations for organizing meteorological observations, measuring greenhouse gas flows and carbon balance components at carbon polygons and their processing. Available at: (accessed 26.09.2025). (In Russian)
16. Bowden R.D., Newkirk K.M., Rullo G.M. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions. *Soil Biology and Biochemistry*. 1998, vol. 30, no. 12, pp. 1591–1597.
17. Jiang J., Wang Y.-P., Zhang H., Yu M., Liu F., Xia S., Yan J., et al. Contribution of litter layer to greenhouse gas fluxes between atmosphere and soil varies with forest succession. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 4, article id: 544. <https://doi.org/10.3390/f13040544>
18. Leitner S., Sae-Tun O., Kranzinger L., Zechmeister-Boltenstern S., Zimmermann M. Contribution of litter layer to soil greenhouse gas emissions in a temperate beech forest. *Plant and Soil*, 2016, vol. 403, pp. 455–469. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2771-3>
19. Walkiewicz A., Rafalska A., Bulak P., Bieganski A., Osborne B. How can litter modify the fluxes of CO₂ and CH₄ from forest soils? A mini-review. *Forests*, 2021, vol. 12, article id: 1276. <https://doi.org/10.3390/f12091276>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Маргарита В. Кочкина проводила анализ и обработку данных. Александр В. Ольчев редактировал рукопись. Дарья А. Карпунина, Дарья С. Леонова и Владимир В. Пушкин проводили полевые исследования. Александр А. Полухин и Сергей К. Гулев занимались задачами администрирования и финансирования исследований. Маргарита В. Кочкина и Александр В. Ольчев 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

Margarita V. Kochkina performed the data analysis and processing. Alexander V. Olchev edited the manuscript. Daria A. Karpunina, Daria S. Leonova and Vladimir V. Pushkin conducted the field observations. Alexander A. Polukhin and Sergey K. Gulev were responsible for research administration and funding. Margarita V. Kochkina and Alexander V. Olchev wrote 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

Маргарита В. Кочкина / Margarita V. Kochkina <https://orcid.org/0009-0000-2763-8344>
 Дарья А. Карпунина / Daria A. Karpunina <https://orcid.org/0009-0004-5027-7750>
 Дарья С. Леонова / Daria S. Leonova <https://orcid.org/0009-0008-7806-0659>
 Владимир В. Пушкин / Vladimir V. Pushkin <https://orcid.org/0009-0008-5702-1693>
 Александр В. Ольчев / Alexander V. Olchev <https://orcid.org/0000-0002-6144-5826>
 Александр А. Полухин / Alexander A. Polukhin <https://orcid.org/0000-0003-1708-1428>
 Сергей К. Гулев / Sergey K. Gulev <https://orcid.org/0000-0002-4296-5121>

Оригинальная статья / Original article

УДК: 632.937.15

DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-11



Потенциал штаммов *Pseudomonas chlororaphis* BZR 245-F и *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 для биоконтроля гриба *Fusarium graminearum* и его микотоксинов

Татьяна М. Сидорова¹, Михаил М. Астахов¹, Надежда Н. Гогина², Анжела М. Асатурова¹¹Федеральный научный центр биологической защиты растений, Краснодар, Россия²Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт птицеводства, Сергиев-Посад, Россия

Контактное лицо

Татьяна М. Сидорова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр биологической защиты растений»; 350039 Россия, г. Краснодар, ул. Калинина, 62.

Тел. +79280387012

Email 0166505@mail.ruORCID <https://orcid.org/0000-0003-4281-5278>

Формат цитирования

Сидорова Т.М., Астахов М.М., Гогина Н.Н., Асатурова А.М. Потенциал штаммов *Pseudomonas chlororaphis* BZR 245-F и *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 для биоконтроля гриба *Fusarium graminearum* и его микотоксинов // Юг России: экология, развитие. 2026. Т.21, N 2. С. 125-133. DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-11

Получена 21 января 2026 г.

Прошла рецензирование 10 марта 2026 г.

Принята 25 апреля 2026 г.

Резюме

Проведена *in vitro* оценка влияния жидкой культуры (ЖК) и супернатанта бактерий *P. chlororaphis* BZR 245-F и *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 на содержание ДНК гриба *F. graminearum* и микотоксинов ДОН, 3-ацетил-ДОН, 15-ацетил-ДОН, ДОН-3-гликозид, ниваленол, фузаренон Х, ЗЕН, α -зеараленол, β -зеараленол, а также на степень корреляции этих показателей.

Исследования выполнены с использованием адаптированного СТАВ-метода и ВЭЖХ с масс-спектрометрическим детектированием. ЖК и супернатант бактерий *P. chlororaphis* BZR 245-F и *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 не снижают содержание ДНК гриба *F. graminearum* 60318, зачастую отмечается даже стимулирование синтеза ДНК (на 5–12 %). Супернатант *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 способствует значительному увеличению содержания ДНК гриба *F. graminearum*, почти в 2 раза (на 96 %) по сравнению с контролем. Оба штамма *Pseudomonas* существенно не изменяют содержание ДОН. Содержание 15-ацетил-ДОНа и 3-ацетил-ДОНа подавляется супернатантами обоих исследуемых штаммов (на 14–28 %), особенно *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 (на 32 %). ЖК и супернатанты бактерий в значительной степени (до 94–115 %) способствуют накоплению ЗЕН и его производных (α - и β -зеараленола).

Обнаруженная существенная (от умеренной до высокой) корреляционная связь между ДНК гриба и количеством 15- и 3-ацетил-ДОН, а также между ДНК гриба и количеством α - и β -зеараленола свидетельствует о наличии у штаммов *P. chlororaphis* BZR 245-F и *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 потенциала для биоконтроля гриба *F. graminearum* и его микотоксинов.

Ключевые слова

Биоконтроль, бактерии *Pseudomonas*, *Fusarium graminearum*, микотоксины, дезоксиниваленол, зеараленон.

Potential of *Pseudomonas chlororaphis* BZR 245-F and *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 strains for biocontrol of *Fusarium graminearum* and its mycotoxins

Tatyana M. Sidorova¹, Mikhail M. Astakhov¹, Nadezhda N. Gogina² and Angela M. Asaturova¹

¹Federal Scientific Centre for Biological Plant Protection, Krasnodar, Russia

²Federal Scientific Centre, All-Russian Research and Technological Institute of Poultry Farming, Sergiev Posad, Russia

Principal contact

Tatyana M. Sidorova, PhD (Biology), Senior Researcher, Federal Scientific Centre for Biological Plant Protection; 62 Kalinina St, Krasnodar, Russia 350039.

Tel. +79280387012

Email 0166505@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4281-5278>

How to cite this article

Sidorova T.M., Astakhov M.M., Gogina N.N., Asaturova A.M. Potential of *Pseudomonas chlororaphis* BZR 245-F and *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 strains for biocontrol of *Fusarium graminearum* and its mycotoxins. *South of Russia: ecology, development*. 2026; 21(2):125-133. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-11

Received 21 January 2026

Revised 10 March 2026

Accepted 25 April 2026

Abstract

In vitro evaluation was conducted assessment of the effect of liquid culture (LC) and supernatant of *P. chlororaphis* BZR 245-F and *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 on the DNA content of *F. graminearum* and the mycotoxins DON, 3-acetyl-DON, 15-acetyl-DON, DON-3-glycoside, nivalenol, fusarenol X, ZEN, α -zearealenol, β -zearealenol and the degree of correlation between these parameters.

The studies were performed using an adapted CTAB method and HPLC with mass spectrometric detection.

LC and supernatant of *P. chlororaphis* BZR 245-F and *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 do not reduce the DNA content of *F. graminearum* 60318; DNA synthesis is often stimulated (by 5–12 %). Supernatant of *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 significantly increased the DNA content of the fungus *F. graminearum*, almost twofold (by 96 %) compared to the control. Both *Pseudomonas* strains did not significantly alter DON content. The content of 15-acetyl-DON and 3-acetyl-DON was suppressed by the supernatants of both strains (by 14–28 %), especially by *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 (by 32 %). FAs and bacterial supernatants significantly (up to 94–115 %) promoted the accumulation of ZEN and its derivatives (α - and β -zearealenol).

The observed significant (moderate to high) correlation between fungal DNA and the amount of 15- and 3-acetyl-DON, as well as between fungal DNA and the amount of α - and β -zearealenol, indicates that *P. chlororaphis* BZR 245-F and *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 strains have potential for biocontrol of the fungus *F. graminearum* and its mycotoxins.

Key Words

Biocontrol, *Pseudomonas* bacteria, *Fusarium graminearum*, mycotoxins, deoxynivalenol, zearealenone.

ВВЕДЕНИЕ

Токсигенные грибы – патогенные микроорганизмы, продуцирующие микотоксины и вызывающие микозы и микотоксикозы. По данным ФАО, 25 % мирового производства зерна загрязнено микотоксинами. Токсины, продуцируемые *Fusarium*, вредны для здоровья человека и животных [1]. Различные виды рода *Fusarium* могут продуцировать широкий спектр микотоксинов, среди которых наиболее известны трихотеценовые микотоксины. Среди них, Т-2 и НТ-2 токсины, Т-2 триол, неосоланиол, диацетоксисцирпенол относятся к трихотеценовым микотоксинам группы А, ДОН, его ацетилированные производные 3-ацетил-ДОН), 15-ацетил-ДОН, ДОН-3-глюкозид, ниваленол и его ацетилированное производное фузаренон-Х – к трихотеценовым микотоксинам группы Б. ЗЕН и его производные (α - и β -зеараленолы), фумонизины, монилиформин и боверицин также являются микотоксинами, продуцируемыми фузариевыми грибами [2; 3].

В последнее десятилетие во всем мире возросло внимание к наличию нескольких структурно близких микотоксинов рода *Fusarium* в злаках, а также в продуктах питания и кормах на их основе, часто называемых «модифицированными микотоксинами». Наиболее распространенными модифицированными формами ДОН и ЗЕН, которые встречаются вместе с их нативными формами, являются дезоксиниваленол-3-глюкозид, ацетилированные производные 3-ацетилдезоксиниваленол и 15-ацетилдезоксиниваленол, α -зеараленол и β -зеараленол. ДОН-3-глюкозид, часто описываемый как «замаскированный» ДОН, вырабатывается как часть защитной системы растений и, таким образом, представляет собой механизм детоксикации путем ферментативной конъюгации ДОН с глюкозным фрагментом. Наличие структурно родственных микотоксинов *Fusarium* вызывает всё большую озабоченность в области безопасности пищевых продуктов и кормов, поскольку предполагается, что модифицированные микотоксины могут существенно способствовать общей токсичности. Усиление токсического воздействия на здоровье модифицированными микотоксинами может быть, как прямым, так и косвенным, путём превращения (например, гидролиза во время пищеварения) в их исходные формы [4]. Интерес к модифицированным микотоксинам в последние годы возрос. Большинство исследований подтверждают необходимость сосредоточиться на модифицированных формах ДОН и ЗЕН. Конъюгированные микотоксины могут появляться после метаболизма живыми растениями, грибами и млекопитающими или после обработки пищевых продуктов [5; 6].

Как патоген, так и инфицированные растения могут химически модифицировать ДОН и ЗОН, включая ацетилирование, глюкозидирование и сульфатирование. С точки зрения практического контроля кормов ДОН-3-глюкозид, 3- и 15-ацетил-ДОН, α -зеараленол и β -зеараленол могут вносить существенный вклад в общую токсичность [6]. Поэтому мы приходим к выводу, что эти модифицированные микотоксины следует анализировать в будущих программах мониторинга микотоксинов вместе с ДОН и ЗЕН в кормовой кукурузе, чтобы избежать рисков для здоровья животных. Кроме того, ориентировочные

значения для ДОНа и ЗЕНа в продуктах, предназначенных для кормления животных, установленные в Рекомендации Комиссии 2006/576/ЕС, могут быть слишком высокими и должны быть пересмотрены, например, путем включения суммы микотоксинов, состоящей из исходного микотоксина и его сопутствующих модифицированных форм, чтобы избежать недооценки фактического загрязнения микотоксинами кормовой кукурузы.

Аналитические стратегии обнаружения и количественного определения ДОН и ЗЕН хорошо известны и отработаны, но часто не позволяют распознать соответствующие метаболиты, которые поэтому также называются «замаскированными» микотоксинами. Для мониторинга уровней метаболитов ДОН и ЗЕН в злаках и продуктах питания на их основе разработан метод ЖХ-МС-МС, позволяющий одновременно определять ДОН, ЗЕН и восемь их скрытых метаболитов, а именно дезоксиниваленол-3-глюкозид, 3-ацетилдезоксиниваленол, зеараленон-4-глюкозид, α -зеараленол, β -зеараленол, α -зеараленон-4-глюкозид, β -зеараленон-4-глюкозид и зеараленон-4-сульфат [7; 8].

В настоящее время для защиты растений от болезней, вызванных патогенными микроорганизмами, широко используются химические препараты. Их эффективность высока, однако, накапливаясь в природных экосистемах, многие из этих веществ или их производных могут наносить вред растениям, животным и человеку. В связи с этим одним из методов борьбы с фитопатогенной микрофлорой могло бы стать использование микроорганизмов, обладающих способностью активно заселять ризосферу и ризоплану растений, используя питательные вещества, поставляемые растениями в составе экзометаболитов. Такие бактерии способны контролировать развитие фитопатогенов в ризосфере растений как за счет конкуренции за экологическую нишу источники углерода и энергии, так и продуцируя различные антифунгальные метаболиты или гидролитические ферменты, разрушающие клеточные стенки грибов [9].

Виды *Pseudomonas* демонстрируют метаболическую универсальность, что позволяет им проявлять активность в различных экологических нишах. Метаболиты бактерий *Pseudomonas* часто сравнивают с молекулярными «швейцарскими армейскими ножами» из-за их большого структурного разнообразия и широкого спектра антимикробных и экологических функций [10]. Благодаря продукции антимикробных соединений, литических ферментов и летучих органических соединений, бактерии рода *Pseudomonas* подавляют распространение фитопатогенов и обеспечивают защиту их растениям-хозяевам. Более того, индукция системной резистентности у растений-хозяев, опосредованная *Pseudomonas*, подготавливает растения к усилению защитных реакций, усиливая их устойчивость к атакам патогенов [11]. Флуоресцентные псевдомонады, выделенные из листьев пшеницы, были охарактеризованы с точки зрения их антагонистического потенциала и таксономии в отношении защиты сельскохозяйственных культур от заражения грибами *Fusarium* и *Alternaria*, вызывающими заболевания пшеницы. С помощью анализа двойной культуры было обнаружено ингибирование роста гриба у 40 изолятов

из 175 флуоресцентных псевдомонад. Двадцать два антагониста были способны подавлять штаммы *Fusarium*, а также *Alternaria*. Результаты исследования позволяют предположить, что псевдомонады в филлосфере сельскохозяйственных культур могут способствовать естественной защите растений [12; 13; 14]. Несмотря на то, что на основе псевдомонад уже разработано много биопрепаратов для растениеводства и очистки окружающей среды, поиск и изучение активных штаммов микроорганизмов рода *Pseudomonas* продолжает представлять значительный интерес для расширения возможности их применения, как в аграрной, так и природоохранной практике [15].

При исследовании бактерий *P. chlororaphis* BZR 245-F и *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 нами было выявлено, что эти штаммы обладают способностью продуцировать ряд антигрибных соединений. Это свойство вполне объясняет обнаруженную *in vitro* антигрибную активность бактерий по отношению к грибу *F. graminearum*. Содержание ДОН и ЗЕН в отдельных вариантах опыта падает как при обработке жидкой культурой, так и супернатантом бактерий *P. chlororaphis* BZR 245-F и *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 [16; 17]. Однако информация о влиянии этих штаммов на присутствие наиболее распространенных модифицированных форм ДОН и ЗЕН, которые могут существенно способствовать общей токсичности, отсутствует.

Цель работы — оценка *in vitro* влияния жидкой культуры и супернатанта бактерий *P. chlororaphis* BZR 245-F и *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 на содержание ДНК гриба *F. graminearum*, микотоксинов ДОН, 3-ацетил-ДОН, 15-ацетил-ДОН, ДОН-3-гликозид, ниваленол, фузаренон Х, ЗЕН, α -зеараленол, β -зеараленол, а также на степень корреляции этих показателей.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования — штаммы бактерий *P. chlororaphis* BZR 245-F и *Pseudomonas* sp. BZR 523-2, выделенные из станций юга России, введенные в БРК ФГБНУ ФНЦБЗР «Государственная коллекция энтомоакарифагов и микроорганизмов» (<https://fncbzh.ru/brk-i-unu/unique-installation-1/>) и перспективные для разработки на их основе биопрепаратов для защиты растений от фитопатогенных грибов, культура фитопатогенного гриба *F. graminearum* 60318 из «Государственной коллекции микроорганизмов, патогенных для растений и их вредителей» ФГБНУ ВИЗР. Исследования проводились на базе лаборатории микробиологической защиты растений ФГБНУ ФНЦБЗР (г. Краснодар) с использованием УНУ «Технологическая линия для получения микробиологических средств защиты растений нового поколения» (<https://fncbzh.ru/brk-i-unu/unique-installation-2/>), отдела физиологии и биохимии Федерального государственного бюджетного научного учреждения Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт птицеводства» (г. Сергиев-Посад), лаборатории микологии и фитопатологии Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений» (г. Санкт-Петербург).

ЖК бактерий получали при культивировании на питательной среде Кинга В в термостатированных качалках (New Brunswick Scientific) при 150 об./мин. в

конических колбах, объемом 250 мл, при объеме питательной среды 100 мл в течение 72 ч. Количество колониеобразующих единиц (КОЕ) в 1 мл ЖК определяли по окончании культивирования методом Коха (глубинным способом) с помощью системы для автоматического подсчета колоний Color Qcount, Spiral Biotech [18]. Супернатант жидкой культуры бактерий *P. chlororaphis* BZR 245-F и *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 получали центрифугированием на центрифуге 5810 (Германия) с использованием углового ротора при 10000 об./мин. 30 мин. [19].

Опыт по оценке влияния ЖК и супернатанта бактериальных штаммов на рост и содержание микотоксинов *F. graminearum* *in vitro* проводили на субстрате зерно пшеницы по модифицированной методике [20]. Для этого 100 г зерна помещали в коническую колбу, объемом 750 мл. После увлажнения и дробной стерилизации зерно засевали суспензией спор гриба *F. graminearum* и жидкой культурой либо супернатантом (20 мл) бактерии. Культивирование проводилось при +25°C в темноте в течение 18 сут. После чего зерно извлекали из колбы, довели до воздушно-сухого состояния, и провели его анализ на содержание ДНК гриба и микотоксинов.

ДНК гриба *F. graminearum* выделяли из 200 мг муки с помощью адаптированного СТАВ-метода [21]. Концентрацию ДНК, полученной из муки и мицелия гриба, оценивали с использованием флуориметра Qubit 2.0 с набором реагентов Quant-iT dsDNA HS Assay Kit (Thermo Fisher Scientific). Исходная концентрация ДНК, выделенной из чистой культуры *F. graminearum*, доводилась до 10 нг/мл и использовалась для построения калибровочной кривой в десятикратных последовательных разбавлениях от 10–1 до 10–6 нг/мкл. ДНК из зерна будет использована в диапазоне концентраций 5–50 нг/мкл.

Анализ зерна по вариантам опыта на содержание микотоксинов: ДОН, 3-ацетил-дезоксиниваленол, 15-ацетил-дезоксиниваленол, дезоксиниваленол-3-гликозид, ниваленол, фузаренон Х, ЗЕН, α -зеараленол, β -зеараленол проводили в отделе физиологии и биохимии ФГБНУ ФНЦ «Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт птицеводства» РАН методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием (ГОСТ 34140-2017) с использованием комплекса оборудования Agilent с масс-спектрометром G6465A Ultivo LC/TQ и жидкостным хроматографом Agilent Infinity 1260 LC Systems (Германия) [22]. Для этого проба зерна 100 г измельчалась на лабораторной мельнице и просеивалась через сито с отверстиями диаметром 0,5 мм, перемешивалась. 5,00 г подготовленной пробы помещали в вialу или полипропиленовую пробирку вместимостью 50 мл, 25 мл раствора для экстракции (смесь ацетонитрила, деионизированной воды и уксусной кислоты), помещали на 30 сек в вибрационный шейкер, затем — для перемешивания в течение 60 мин на качающийся шейкер. Центрифугирование при 3500 g в течение 20 мин. В микроцентрифужную пробирку внесено 500 мкл подвижной фазы А и 500 мкл верхнего слоя экстракта. Центрифугирование при 15000 g при температуре +4° С в течение 20 мин. Пипеточным дозатором отбирали 700 мкл верхнего слоя экстракта и профильтровывали через микрофильтр с нейлоновой мембраной в вialу

для ВЭЖХ-МС/МС анализа. Хромато-масс-спектрометр включали в соответствии с руководством (инструкцией) по эксплуатации и устанавливали параметры рабочих режимов масс-спектрометрического детектирования и хроматографического разделения. В соответствии с данными, полученными при анализе градуировочных растворов, проводили количественную обработку хроматограмм с использованием программного обеспечения, получая значения массовой концентрации микотоксинов в анализируемой пробе.

Статистическая обработка экспериментальных данных всех опытов осуществлялась с использованием статистических программ STATGRA-PHICS (Statistical graphics System). Для оценки достоверности различий в содержании ДНК гриба, уровнях микотоксинов использовался метод Дункана. Корреляции между содержанием ДНК гриба и уровнями микотоксинов оценивались с помощью коэффициента корреляции Пирсона с порогом значимости $p \leq 0,05$ [23–26]. Связь между признаками оценивали по шкале Чеддока (количественная мера тесноты связи/ качественная характеристика силы связи: от 0,1 до 0,3 – слабая; от

0,3 до 0,5 – умеренная; от 0,5 до 0,7 – заметная; от 0,7 до 0,9 – высокая; от 0,9 до 0,99 – весьма высокая).

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты настоящего исследования позволяют предположить, что несмотря на способность бактерий *P. chlororaphis* BZR 245-F и *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 продуцировать большой набор метаболитов различных структур [17], антигрибной потенциал по отношению к *F. graminearum* не всегда срабатывает *in vitro* в полной мере. Проведенные исследования влияния ЖК и супернатанта штаммов *P. chlororaphis* BZR 245-F и *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 на содержание в опытных образцах ДНК гриба *F. graminearum* 60318 не выявили *in vitro* ингибирования содержания ДНК гриба, зачастую отмечалась даже стимуляция роста (рис. 1). Стимулирующим свойством обладали как ЖК бактерий, так и их супернатант. Супернатант *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 способствовал значительному увеличению содержания ДНК гриба *F. graminearum*, почти в 2 раза по сравнению с контролем.

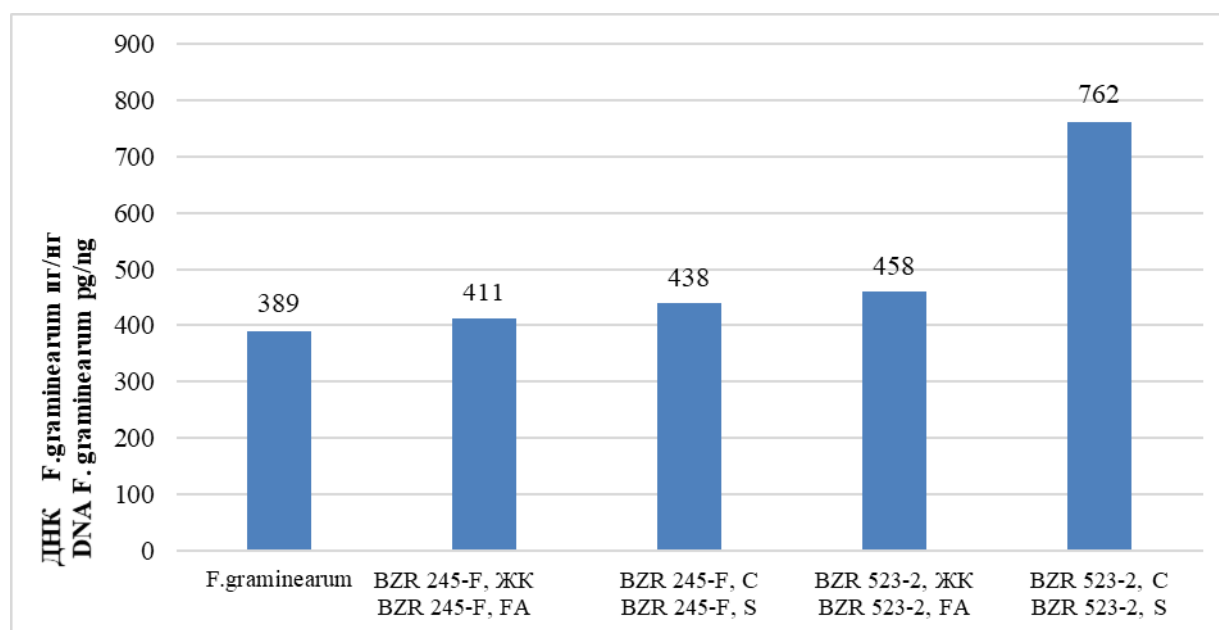


Рисунок 1. Содержание ДНК *F. graminearum* при культивировании гриба совместно с ЖК и супернатантом (С) бактерий *Pseudomonas* *in vitro*

Figure 1. DNA content of *F. graminearum* during cultivation of the fungus together with FA and supernatant (S) of *Pseudomonas* bacteria *in vitro*

Это может быть связано с тем, что антагонистическое действие псевдомонад не всегда определяется наличием антибиотических метаболитов. В нескольких сообщениях о псевдомонадах, связанных с растениями, также указывается на роль сидерофоров, литических ферментов, цианистого водорода и аммиака [13], а также летучих органических соединений в ингибировании грибных фитопатогенов. Вопрос о том, какое значение летучие органические соединения имеют в окружающей среде, а тем более в филлосфере, в пограничном слое между растительной поверхностью и воздушным пространством, часто поднимается в публикациях многих исследователей. В закрытых отсеках, таких как, например, подустычная камера, которая преимущественно заселена бактериями и благоприятна для проникновения патогенов, летучие вещества могут достигать эффективных ингибирующих

концентраций [13; 14]. Было показано, что феназины вызывают индуцированную системную резистентность у фасоли и риса [27].

Эффективная биологическая борьба с грибами рода *Fusarium* должна обеспечивать как подавление распространения гриба в поле, так и предотвращение образования микотоксинов. Детоксикация микотоксинов путем трансформации их структуры является горячей темой исследований во всем мире. В настоящее время методы детоксикации ДОН в основном включают физическую обработку, химическую очистку и биологическую очистку [28]. Поскольку биологические методы могут уменьшить или удалить ДОН в мягких условиях и оказывать незначительное влияние на сенсорные характеристики и вкусовые качества кормов, биологическая детоксикация ДОН стала для людей

первым выбором для детоксикации кормов. Использование детоксицирующих ферментов и микроорганизмов (грибов, бактерий и других микроорганизмов) для контроля и детоксикации ДОН в зернах и продуктах из них может эффективно предотвратить попадание ДОН в пищевую цепочку и, следовательно, снизить его неблагоприятное воздействие на здоровье.

Полученные результаты показывают, что проведенный *in vitro* опыт по влиянию бактерий на токсинопродукцию гриба *F. graminearum* 60318 не выявил значительного влияния на накопление микотоксинов (табл. 1). По крайней мере оба штамма

Pseudomonas существенно не изменяли содержание ДОН по сравнению с контролем. На накопление ацелированных форм ДОН воздействие бактерий *P. chlororaphis* BZR 245-F и *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 было более значимым. Содержание 15-ацетил-ДОНа и 3-ацетил-ДОНа подавлялось супернатантами обоих исследуемых штаммов, при этом наиболее существенно оно снижалось в присутствии супернатанта *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 (25–32 %). Однако оба штамма *Pseudomonas* способствовали накоплению ДОН-3-глюкозида и его производных (α - и β -зеараленол) (до 94–115 %).

Таблица 1. Содержание микотоксинов *F. graminearum* при культивировании гриба совместно с ЖК и супернатантом бактерий *Pseudomonas in vitro*

Table 1. Mycotoxin content of *F. graminearum* during cultivation of the fungus together with FA and supernatant of *Pseudomonas* bacteria *in vitro*

Вариант опыта Experimental option	Содержание микотоксина, мкг/г Mycotoxin content, µg/g								
	ДОН DON	15-Ац-ДОН 15-Ac-DON	3-Ац-ДОН 3-Ac-DON	ДОН-3-глюкозид DON-3-glucoside	ЗЕН ZEN	α -зеараленол α -zearalenol	β -зеараленол β -zearalenol	Ниваленол Nivalenol	Фузаренон X Fusarenol X
<i>F. graminearum</i>	21 394 ^{ab}	328 ^a	2 479 ^a	11 ^{ab}	2 280 ^e	56 ^{ab}	19 ^{ab}	158 ^c	0 ^a
<i>P. chlororaphis</i> BZR 245-F, ЖК LC	27 953 ^{ab}	442 ^e	3 278 ^{bcd}	61 ^a	4 432 ^{bcd}	97 ^{ab}	32 ^{ab}	468 ^{ab}	31 ^a
<i>P. chlororaphis</i> BZR 245-F, C S	21 966 ^{ab}	284 ^e	2 052 ^e	39 ^a	3 399 ^a	77 ^c	41 ^a	373 ^{ab}	36
<i>Pseudomonas</i> sp. BZR 523-2, ЖК LC	23 867 ^{bcd}	305 ^{ab}	2 234 ^{ab}	58 ^{ab}	3 777 ^{ab}	81 ^a	29 ^{ab}	164 ^a	45 ^{ab}
<i>Pseudomonas</i> sp. BZR 523-2, C S	20 082 ^{cde}	225 ^{ab}	1 790 ^c	51 ^c	3 576 ^{bcd}	70 ^a	20 ^a	149 ^a	0 ^{ab}

Примечание: Данные, входящие в одну группу (латинские буквы) в пределах сорта, не имеют достоверных различий по критерию Дункана на уровне значимости 95 %

Note: The data included in the same group (Latin letters) within a variety do not have reliable differences according to Duncan's criterion at the 95 % significance level

Полученные результаты свидетельствуют, что несмотря на способность бактерий стимулировать рост гриба *F. graminearum*, идет ингибирование содержания отдельных микотоксинов. Этот факт, вероятно, может быть связан с подавлением токсинпродуцирующих свойств гриба, а также с возможной биodeградацией уже синтезированных микотоксинов.

При изучении взаимосвязи изменения двух параметров (содержание ДНК гриба *F. graminearum* и микотоксинов) при совместном культивировании гриба и бактерий (ЖК и супернатант) (табл. 2) в отдельных вариантах выявлена высокая степень корреляции как положительная, так и отрицательная. Для вариантов опыта, в которых анализировались 15- и 3-ацетил-ДОН, корреляция была от слабой до умеренной.

Таким образом, обнаружена слабая корреляция между содержанием ДНК гриба *F. graminearum* и микотоксинов ДОН и ЗЕН при культивировании гриба совместно с ЖК и супернатантом бактерий *Pseudomonas in vitro*. Однако корреляционная связь между ДНК гриба и количеством

15- и 3-ацетил-ДОН, а также между ДНК гриба и количеством α - и β -зеараленола повышается (от умеренной до высокой). На основании полученных результатов можно сделать вывод, что при исследовании биоконтролирующих агентов необходимо анализировать не только содержание ДНК гриба, но и основных микотоксинов ДОН и ЗЕН и их производных.

Сообщалось о значительном снижении производства микотоксинов *F. graminearum* в зерне пшеницы под действием биоконтролирующих штаммов *Bacillus* и *Pseudomonas* как в лабораторных, так и в полевых экспериментах [29]. Однако несмотря на явное ингибирование *in vitro*, наблюдаемое в лабораторных условиях, результаты биологического контроля *Pseudomonas* часто варьируются в полевых условиях [30]. Поэтому результаты, полученные для бактерий *P. chlororaphis* BZR 245-F и *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 *in vitro*, будут проверены на растениях пшеницы в условиях полевого опыта.

Таблица 2. Корреляция между содержанием ДНК *F. graminearum* и микотоксинов при культивировании гриба совместно с ЖК и супернатантом бактерий *Pseudomonas in vitro* (коэффициент Пирсона при $p \leq 0,05$)
Table 2. Correlation between the DNA content of *F. graminearum* and mycotoxins during cultivation of the fungus together with FA and the supernatant of *Pseudomonas* bacteria *in vitro* (Pearson coefficient at $p \leq 0.05$)

Вариант опыта Experimental Option	Коэффициент Пирсона Pearson's Coefficient								
	ДОН DON	15-Ац-ДОН 15-Ac-DON	3-Ац-ДОН 3-Ac-DON	ДОН-3-глюкозид DON-3-glucoside	ЗЕН ZEN	α-зеара-ленол α-zearal enol	β-зеара-ленол β-zearal enol	Нивал-енол Nivale no	Фузаре-нон X Fusare non X
<i>F. graminearum</i>	-0,05	-0,58	-0,42	0,77	-0,08	-0,04	-0,42	0,79	-
<i>P. chlororaphis</i> BZR 245-F, ЖК LC	-0,05	-0,58	0,43	-0,89	-0,08	0,99	0,93	0,14	-1,00
<i>P. chlororaphis</i> BZR 245-F, С S	-0,05	-0,15	0,43	-0,52	-0,08	-0,04	0,93	0,14	-1,00
<i>Pseudomonas</i> sp. BZR 523-2, ЖК LC	-0,05	-0,15	0,43	-0,89	-0,08	0,99	-0,42	0,74	-1,00
<i>Pseudomonas</i> sp. BZR 523-2, С S	-0,05	0,53	-0,08	-0,89	0,14	-0,55	-0,42	0,74	-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании *in vitro* влияния ЖК и супернатанта штаммов *P. chlororaphis* BZR 245-F и *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 на содержание в опытных образцах ДНК гриба *F. graminearum* 60318 ингибирование содержания ДНК гриба не выявлено, зачастую отмечалась даже стимуляция накопления ДНК. Проведенный *in vitro* опыт по влиянию бактерий *P. chlororaphis* BZR 245-F и *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 на ДОН гриба *F. graminearum* 60318 не выявил существенного изменения содержания микотоксина по сравнению с контролем. Содержание 15-ацетил-ДОНа и 3-ацетил-ДОНа подавлялось супернатантами обоих исследуемых штаммов, при этом наиболее существенно оно снижалось в присутствии супернатанта *Pseudomonas* sp. BZR 523-2. Накопление ДОН-3-глюкозида стимулировалось обоими штаммами *Pseudomonas*. Культивирование *in vitro* гриба *F. graminearum* 60318 ЖК в присутствии супернатантов бактерий *P. chlororaphis* BZR 245-F и *Pseudomonas* sp. BZR 523-2 способствует накоплению ЗЕН и его производных (α- и β-зеараленол) по сравнению с контролем (гриб *F. graminearum* 60318 без бактерий). Обнаружена слабая корреляция между содержанием ДНК гриба *F. graminearum* и микотоксинов ДОН и ЗЕН при культивировании гриба совместно с ЖК и супернатантом бактерий *Pseudomonas in vitro*. Корреляционная связь между ДНК гриба и количеством 15- и 3-ацетил-ДОН, а также между ДНК гриба и количеством α- и β-зеараленола изменяется от умеренной до высокой.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 25-26-00203
<https://rscf.ru/project/25-26-00203/>.

ACKNOWLEDGMENT

This study was supported by grant No. 25-26-00203
from the Russian Science Foundation
<https://rscf.ru/project/25-26-00203/>.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левитин М.М. Токсигенные грибы на зерновых культурах в России // Микология и фитопатология. 2024. Т. 58. N 5. С. 341–347. <https://doi.org/10.31857/S0026364824050017>
2. Гаврилова О.П., Гагкаева Т.Ю., Орина А.С., Гогина Н.Н. Разнообразие грибов рода *Fusarium* и их микотоксинов в зерне из азиатской части России. Микология и фитопатология. 2022. Т. 56. N 3. С. 194–206. <https://doi.org/10.31857/S0026348220300353>
3. Alisaac E., Mahlein A.-K. *Fusarium* head blight on wheat: biology, modern detection and diagnosis and integrated disease management // Toxins. 2023. V. 15(3). P. 192. <https://doi.org/10.3390/toxins15030192>
4. Birr T., Jensen T., Preußke N., Frank D. Sönnichsen F.D., De Boevre M., Hasler M., Verret H.K. Occurrence of *Fusarium* mycotoxins and their modified forms in forage maize cultivars // Toxins. 2021. V. 13(2). P. 110. <https://doi.org/10.3390/toxins13020110>
5. Rychlik M., Humpf H.U., Marko D., Dänicke S., Mally A., Berthiller F., Horst Klaffke H., Lorenz N. Proposal of a comprehensive definition of modified and other forms of mycotoxins including “masked” mycotoxins // Mycotoxin Res. 2014. V. 30. P. 197–205. <https://doi.org/10.1007/s12550-014-0203-5>
6. Berthiller F., Schuhmacher R., Adam G., Krska R. Formation, determination and significance of masked and other conjugated mycotoxins // Anal Bioanal Chem. 2009. V. 395. P. 1243–1252. <https://doi.org/10.1007/s00216-009-2874-x>
7. Vendl O., Berthiller F., Crews C., Krska R. Simultaneous determination of deoxynivalenol, zearalenone, and their major masked metabolites in cereal-based food by LC–MS–MS // Anal Bioanal Chem 2009. V. 395. P. 1347–1354. <https://doi.org/10.1007/s00216-009-2873-y>
8. Pfleger F., Schwake-Anduschus C. Relevance of zearalenone and its modified forms in bakery products // Mycotoxin res. 2023. V. 39. P. 153–163. <https://doi.org/10.1007/s12550-023-00493-3>
9. Лукаткин А.А., Лукаткин А.С. Изучение влияния *Pseudomonas* sp. на фитопатогенные грибы при совместном культивировании // Доклады Башкирского университета. 2021. Т. 6. N 5. С. 322–327. <https://doi.org/10.33184/dokbsu-2021.5.5>
10. Gu Y.-L., Li J.-Z., Li Y., Cong S., Wang J., MaY.-N., Wei H.-L. *Pseudomonas* cyclic lipopeptide medpeptin: biosynthesis and modulation of plant immunity // Engineering. 2023. V. 28. P. 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.05.016>
11. Alattas H., Glick B.R., Murphy D.V., Scott C. Harnessing *Pseudomonas* spp. for sustainable plant crop protection // Front. microbial. 2024. V. 15 <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1485197>
12. Müller T., Behrendt U., Ruppel S., Waydbrink G., Müller M.E.H. Fluorescent *Pseudomonads* in the phyllosphere of wheat: potential

- antagonists against fungal phytopathogens // *Curr Microbiol.* 2016. V. 72. P. 383–389. <https://doi.org/10.1007/s00284-015-0966-8>
13. Ibrahim E., Nasser R., Hafeez R., Ogunyemi S.O., Abdallah Y., Khattak A.A., Shou L., Zhang Y., Ahmed T., Hatamleh A.A., Al-Dosary M.A., Ali H.M., Luo J., Li B. Biocontrol efficacy of endophyte *Pseudomonas poae* to alleviate *Fusarium* seedling blight by refining the morphophysiological attributes of wheat // *Plants.* 2023. V. 12(2). P. 2277. <https://doi.org/10.3390/plants12122277>
14. Abbas A., Yli-Mattila T. Biocontrol of *Fusarium graminearum*, a causal agent of *Fusarium* head blight of wheat, and deoxyvalenol accumulation: from *in vitro* to *in planta* // *Toxins.* 2022. V. 14(5). P. 299. <https://doi.org/10.3390/toxins14050299>
15. Коршунова Т.Ю., Бакаева М.Д., Кузина Е.В., Рафикова Т.Ф., Четвериков С.П., Четверикова Д.В., Логинов О.Н. Роль бактерий рода *Pseudomonas* в устойчивом развитии агроэкосистем и защите окружающей среды (обзор) // *Прикладная биохимия и микробиология.* 2021. Т. 57. N 3. С. 211–227. <https://doi.org/10.31/S0555109921030089>
16. Аллахвердян В.В., Сидорова Т.М., Темердашев А.З., Асатунова А.М., Томашевич Н.С. Изучение влияния бактерий рода *Pseudomonas* на рост и токсинопродукцию гриба *Fusarium graminearum* *in vitro* // *Юг России: экология, развитие.* 2023. Т. 18. N 4 (69). С. 104–113. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-4-104-113>
17. Sidorova T.M., Tomashevich N.S., Allahverdyan V.V., Tupertsev B.S., Kostyukovich Yu.I., Asaturova A.M. New *Pseudomonas* bacterial strains: biological activity and characteristic properties of metabolites // *Microorganisms.* 2023. Т. 11. №8. P.1943. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11081943>
18. Нетрусов А.И., Егорова М.А., Захарчук Л.М. и др. Практикум по микробиологии / Под ред. А.И. Нетрусова. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 608 с.
19. Сидорова Т.М., Асатунова А.М., Хомяк А.И., Томашевич Н.С. Выделение и характеристика антигрибных метаболитов штаммов *Bacillus subtilis* BZR 336g и *Bacillus subtilis* BZR 517 модифицированным методом биоавтографии // *Сельскохозяйственная биология.* 2019. N 5. С. 178–185. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2019.1.rus>
20. Shi K., Yang P., Li J., Wu H., Li K., Guan S. Biocontrol of *Fusarium graminearum* growth and deoxynivalenol production in wheat grains using bacterial antagonists // *International journal of environmental research and public health.* 2014. V. 11(1). P. 1094–1105. <https://doi.org/10.3390/ijerph110101094>
21. Орина А.С., Гаврилова О.П., Галкаева Т.Ю. Адаптация метода количественной ПЦР для выявления представителей микробиоты зерновых культур // *MIR J.* 2018. N 5(1). С. 71–77. <https://doi.org/10.18527/2500-2236-2018-5-1-71-77>
22. Santoyo G., Rojas-Sánchez B., Julie Hernández-Salmerón J., Hernández-León R., Rojas-Solis D., Moreno-Hagelsieb G., del Carmen Orozco-Mosqueda M. Outstanding biocontrol and plant growth promotion traits of *Pseudomonas fluorescens* UM270 and other plant-associated *Pseudomonas* // *Physiological and Molecular Plant Pathology.* 2025. V. 138. Article number: 102672. <https://doi.org/10.1016/j.pmp.2025.102672>
23. Hammer O., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontol. electron.*, 2001, 4, 178kb.
24. Alisaac E., Rathab A., Karlovsky P., Mahlein A.-K. *Fusarium* head blight: effect of infection timing on spread of *Fusarium graminearum* and spatial distribution of deoxynivalenol within wheat spikes // *Microorganisms.* 2020. V. 9(1). P. 79. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9010079>
25. Саадалов Т.Б., Мырзаибраимов Р.М., Абдуллаева Ж.Д. Методика расчета коэффициента корреляции Фехнера и Пирсона, и их области применения // *Бюллетень науки и практики.* 2021. Т. 7. N 10. С. 270–276. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/71/31>
26. Кравченко К.И., Минеева Т.А. Использование линейного коэффициента корреляции для определения характера связи между переменными // *Тенденции развития науки и образования.* 2020. <https://doi.org/10.18411/trnio-02-2022-41>
27. Ma Z., Hua G.K.H., Ongena M., Höfte M. Role of phenazines and cyclic lipopeptides produced by *Pseudomonas* sp. CMR12a in induced systemic resistance on rice and bean // *Environ Microbiol.* 2016. V. 8. P. 896–904. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.12454>
28. Yao Y., Long M. The biological detoxification of deoxynivalenol: a review // *Food and chemical toxicology.* 2020. V. 145. P. 11649. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111649>
29. Müller T., Behrendt U., Ruppel S., von der Waydrink G., Müller E.H. Fluorescent pseudomonads in the phyllosphere of wheat: potential antagonists against fungal phytopathogens // *Curr Microbiol.* 2016. V. 72. P. 383–389 <https://doi.org/10.1007/s00284-015-0966-8>
30. Lakshmikanthan M., Muthu S., Krishnan K., Duraisamy N., Abdi G. Biocontrol potential of *Pseudomonas fluorescens*: Phenazine mediated antifungal activity against phytopathogens // *Mol Biol Rep.* 2025. V. 52. P. 806. <https://doi.org/10.1007/s11033-025-10697-8>

REFERENCES

- Levitin M.M. Toxigenic fungi on grain crops in Russia. *Mycology and phytopathology*, 2024, vol. 58, no. 5, pp. 341–347. <https://doi.org/10.31857/S0026364824050017>
- Gavrilova O.P., Gagkaeva T.Yu., Orina A.S., Gogina N.N. Diversity of fungi of the genus *Fusarium* and their mycotoxins in grain from the Asian part of Russia. *Mycology and phytopathology*, 2022, vol. 56, no. 3, pp. 194–206. <https://doi.org/10.31857/S002634822030035>
- Alisaac E., Mahlein A.-K. *Fusarium* head blight on wheat: biology, modern detection and diagnosis and integrated disease management. *Toxins*, 2023, vol. 15(3), pp. 192. <https://doi.org/10.3390/toxins15030192>
- Birr T., Jensen T., Preußke N., Frank D. Sönnichsen F.D., De Boevre M., Hasler M., Verret H.K. Occurrence of *Fusarium* mycotoxins and their modified forms in forage maize cultivars. *Toxins*, 2021, vol. 13(2), p. 110. <https://doi.org/10.3390/toxins13020110>
- Rychlik M., Humpf HU., Marko D., Dänicke S., Mally A., Berthiller F., Horst Klaffke H., Lorenz N. Proposal of a comprehensive definition of modified and other forms of mycotoxins including “masked” mycotoxins. *Mycotoxin Res.*, 2014, vol. 30, pp. 197–205. <https://doi.org/10.1007/s12550-014-0203-5>
- Berthiller F., Schuhmacher R., Adam G., Krska R. Formation, determination and significance of masked and other conjugated mycotoxins. *Anal Bioanal Chem.* 2009. V. 395. P. 1243–1252. <https://doi.org/10.1007/s00216-009-2874-x>
- Vendl O., Berthiller F., Crews, C., Krska R. Simultaneous determination of deoxynivalenol, zearalenone, and their major masked metabolites in cereal-based foods by LC–MS–MS. *Anal Bioanal Chem.* 2009. V. 395. P. 1347–1354. <https://doi.org/10.1007/s00216-009-2873-y>
- Pfleger F., Schwake-Anduschus C. Relevance of zearalenone and its modified forms in bakery products. *Mycotoxin res.* 2023, vol. 39, pp. 153–163. <https://doi.org/10.1007/s12550-023-00493-3>
- Lukatkin A. A., Lukatkin A. S. Study of the influence of *Pseudomonas* sp. on phytopathogenic fungi during co-cultivation. *Reports of Bashkir University*, 2021, vol. 6, no. 5, pp. 322–327 <https://doi.org/10.33184/dokbsu-2021.5.5>
- Gu Y.-L., Li J.-Z., Li Y., Cong S., Wang J., Ma Y.-N., Wei H.-L. *Pseudomonas* cyclic lipopeptide medpeptin: biosynthesis and modulation of plant immunity. *Engineering*, 2023, vol. 28, pp. 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.05.016>
- Alattas H., Glick B.R., Murphy D.V., Scott C. Harnessing *Pseudomonas* spp. for sustainable plant crop protection. *Front. microbial.* 2024. V.15 <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1485197>
- Müller T., Behrendt U., Ruppel S., Waydrink G., Müller M.E.H. Fluorescent Pseudomonads in the phyllosphere of wheat: potential antagonists against fungal phytopathogens. *Curr Microbiol.* 2016. V. 72. P. 383–389. <https://doi.org/10.1007/s00284-015-0966-8>
- Ibrahim E., Nasser R., Hafeez R., Ogunyemi S.O., Abdallah Y., Khattak A.A., Shou L., Zhang Y., Ahmed T., Hatamleh A.A., Al-Dosary M.A., Ali H.M., Luo J., Li B. Biocontrol efficacy of endophyte *Pseudomonas poae* to alleviate *Fusarium* seedling blight by refining the morphophysiological attributes of wheat. *Plants.* 2023. V.12(2). P.2277 <https://doi.org/10.3390/plants12122277>
- Abbas A., Yli-Mattila T. Biocontrol of *Fusarium graminearum*, a causal agent of *Fusarium* head blight of wheat, and deoxyvalenol accumulation: from *in vitro* to *in planta*. *Toxins.* 2022. V. 14(5) P.299. <https://doi.org/10.3390/toxins14050299>

15. Korshunova T.Yu., Bakaeva M.D., Kuzina E.V., Rafikova T.F., Chetverikov S.P., Chetverikova D.V., Loginov O.N. The role of bacteria of the genus *Pseudomonas* in the sustainable development of agroecosystems and environmental protection (review). *Applied Biochemistry and Mycobiology*. 2021. Vol. 57. No. 3. Pp. 211-227. <https://doi.org/10.31/S0555109921030089>
16. Allakhverdyan V.V., Sidorova T.M., Temerdashev A.Z., Asaturova A.M., Tomashevich N.S. Study of the effect of bacteria of the genus *Pseudomonas* on the growth and toxin production of the fungus *Fusarium graminearum* in vitro. *South of Russia: Ecology, Development*. 2023. Vol. 18. No. 4 (69). P. 104-113. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-4-104-113>
17. Sidorova T.M., Tomashevich N.S., Allakhverdyan V.V., Tupertsev B.S., Kostyukevich Yu.I., Asaturova A.M. New *Pseudomonas* bacterial strains: biological activity and characteristic properties of metabolites. *Microorganisms*. 2023. Vol. 11. No. 8. P. 1943. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11081943>
18. Netrusov A.I., Egorova M.A., Zakharchuk L.M. and others. *Microbiology Workshop* / Ed. by A.I. Netrusov. - Moscow: Academy Publishing Center, 2005 - 608 p.
19. Sidorova T.M., Asaturova A.M., Khomyak A.I., Tomashevich N.S. Isolation and Characterization of Antifungal Metabolites of *Bacillus subtilis* BZR 336g and *Bacillus subtilis* BZR 517 Strains by a Modified Bioautography Method // *Agricultural Biology*. 2019. No. 5. P. 178-185 <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2019.1.rus>
20. Shi K., Yang P., Li J., Wu H., Li K., Guan S. Biocontrol of *Fusarium graminearum* growth and deoxynivalenol production in wheat grains using bacterial antagonists // *International journal of environmental research and public health*. - 2014. - Vol. 11 (1). - P. 1094-1105. <https://doi.org/10.3390/ijerph110101094>
21. Orina A.S., Gavrilova O.P., Gagkaeva T.Yu. Adaptation of the quantitative PCR method for identifying representatives of the mycobiota of grain crops // *MIR J*. 2018. No. 5 (1). P. 71-77. <https://doi.org/10.18527/2500-2236-2018-5-1-71-77>
22. Santoyo G., Rojas-Sánchez B., Julie Hernández-Salmerón J., Hernández-León R., Rojas-Solis D., Moreno-Hagelsieb G., del Carmen Orozco-Mosqueda M. Outstanding biocontrol and plant growth promotion traits of *Pseudomonas fluorescens* UM270 and others plant-associated *Pseudomonas*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2025, vol. 138, article number:102672. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2025.102672>
23. Hammer O., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontol. electron.*, 2001, 4, 178kb.
24. Alisaac E., Rathab A., Karlovsky P., Mahlein A.-K. *Fusarium* head blight: effect of infection timing on the spread of *Fusarium graminearum* and spatial distribution of deoxynivalenol within wheat spikes // *Microorganisms*. 2020. V.9(1). P.79 <https://doi.org/10.3390/microorganisms9010079>
25. Saadalov T.Y., Myrzaibraimov R.M., Abdullaeva Zh.D. Methodology for calculating the Fechner and Pearson correlation coefficients and their areas of application. *Bulletin of Science and Practice*, 2021, vol. 7, no. 10, pp. 270–276. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/71/31>
26. Kravchenko K.I., Mineeva T.A. Using the linear correlation coefficient to determine the nature of the relationship between variables. *Trends in the Development of Science and Education*. 2020. <https://doi.org/10.18411/trnio-02-2022-41>
27. Ma Z., Hua G.K.H., Ongena M., Höfte M. Role of phenazines and cyclic lipopeptides produced by *Pseudomonas* sp. CMR12a in induced systemic resistance on rice and bean. *Environ Microbiol*, 2016, vol. 8, pp. 896–904. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.12454>
28. Yao Y., Long M. The biological detoxification of deoxynivalenol: a review. *Food and chemical toxicology*. 2020. V. 145. P. 11649. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111649>
29. Müller T., Behrendt U., Ruppel S., von der Waydbrink G., Müller E.H. Fluorescent pseudomonads in the phyllosphere of wheat: potential antagonists against fungal phytopathogens. *Curr Microbiol.*, 2016, vol. 72, pp. 383–389 <https://doi.org/10.1007/s00284-015-0966-8>
30. Lakshmikanthan M., Muthu S., Krishnan K., Duraisamy N., Abdi G. Biocontrol potential of *Pseudomonas fluorescens*: Phenazine mediated antifungal activity against phytopathogens. *Mol Biol Rep*. 2025. V. 52. P. 806 <https://doi.org/10.1007/s11033-025-10697-8>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Татьяна М. Сидорова разработала концепцию, определила методологию, провела исследование, проанализировала результаты, написала статью. Михаил М. Астахов и Надежда Н. Гогина провели исследования, проанализировали данные. Анжела М. Асатунова разработала концепцию, проанализировала результаты. 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

Tatyana M. Sidorova developed the concept, defined the methodology, conducted the research, analysed the results and wrote the article. Mikhail M. Astakhov and Nadezhda N. Gogina conducted the research and analysed the data. Angela M. Asaturova developed the concept and analyzed the results. All authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Татьяна М. Сидорова / Tatyana M. Sidorova <https://orcid.org/0000-0003-4281-5278>
 Михаил М. Астахов / Mikhail M. Astakhov <https://orcid.org/0000-0003-3712-1343>
 Надежда Н. Гогина / Nadezhda N. Gogina <https://orcid.org/0000-0003-1937-286X>
 Анжела М. Асатунова / Angela M. Asaturova <https://orcid.org/0000-0002-0060-1995>

Адъюванты в ветеринарии и механизмы их действия

Ольга П. Хрипко¹, Дмитрий И. Коновалов^{1,2}, Александра В. Глущенко²,
Михаил А. Шестопалов^{1,2}, Александр Ю. Алексеев^{2,3}

¹Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

²Федеральный исследовательский центр Фундаментальной и трансляционной медицины,
НИИ Вирусологии, Новосибирск, Россия

³Институт экологии и устойчивого развития, Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

Контактное лицо

Михаил А. Шестопалов, д.х.н., проф. РАН,
г.н.с. ИНХ СО РАН, г.н.с. Федеральный
исследовательский центр Фундаментальной и
трансляционной медицины; 630090 Россия,
Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 3.
Тел. +79139576252
Email shtopy@niic.nsc.ru
ORCID <http://orcid.org/0000-0001-9833-6060>

Формат цитирования

Хрипко О.П., Коновалов Д.И., Глущенко А.В.,
Шестопалов М.А., Алексеев А.Ю. Адъюванты в
ветеринарии и механизмы их действия // Юг
России: экология, развитие. 2026. Т.21, N 2.
С. 134-145. DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-12

Получена 22 декабря 2025 г.

Прошла рецензирование 5 февраля 2026 г.

Принята 25 апреля 2026 г.

Резюме

Адъюванты играют ключевую роль в современной ветеринарной вакцинологии, определяя эффективность вакцин для сельскохозяйственных животных. В контексте растущего спроса на экономически оптимальные и безопасные иммунопрепараты, понимание молекулярных основ действия адъювантов становится критически важным. Данный обзор охватывает пять основных типов адъювантов – минеральные (гидроксид и фосфат алюминия), масляные эмульсии, растительные сапонины, бактериальные компоненты (CpG, MPLA) и наноструктурированные системы (липосомы, PLGA, инулин) – и описывает их действие через пять ключевых механизмов: (1) усиление гуморального ответа (выработка нейтрализующих антител); (2) активацию клеточного иммунитета (дифференцировка Th1, генерация цитотоксических Т-лимфоцитов); (3) формирование депо антигена (продолжительная стимуляция); (4) активацию врожденного иммунитета (распознавание паттернов, воспаление); (5) торможение избыточного воспаления. Анализируется видовая зависимость эффективности адъювантов, связанная с различиями в рецепторах врожденного иммунитета между видами животных. Обсуждаются побочные эффекты традиционных адъювантов (гранулемы, системное воспаление, снижение продуктивности) и стратегии их минимизации. Выявлены новые направления развития – синтетические иммуномодуляторы, биоразлагаемые наночастицы и логически обоснованные комбинированные системы, обеспечивающие оптимальный иммунный ответ без развития нежелательных реакций. Полученные знания применяются в разработке более эффективных, безопасных и экономичных вакцин для профилактики инфекционных заболеваний сельскохозяйственных животных.

Ключевые слова

Адъюванты, вакцины, сельскохозяйственные животные, иммунный ответ, гуморальный иммунитет, клеточный иммунитет, наночастицы, безопасность.

Adjuvants in veterinary medicine and their mechanisms of action

Olga P. Khripko¹, Dmitry I. Konovalov^{1,2}, Alexandra V. Glushchenko²,
Michael A. Shestopalov^{1,2} and Alexander Yu. Alekseev^{2,3}

¹Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

²Research Institute of Virology, Federal Research Centre of Fundamental and Translational Medicine, Novosibirsk, Russia

³Institute of Ecology and Sustainable Development, Dagestan State University, Makhachkala, Russia

Principal contact

Michael A. Shestopalov, D.Sc., Professor, Russian Academy of Sciences, Principal Researcher, Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences & principal Researcher, Research Institute of Virology, Federal Research Centre of Fundamental and Translational Medicine; 3 Acad. Lavrentieva Ave., Novosibirsk, Russia 630090.

Tel. +79139576252

Email shtopy@niic.nsc.ru

ORCID <http://orcid.org/0000-0001-9833-6060>

How to cite this article

Khripko O.P., Konovalov D.I., Glushchenko A.V., Shestopalov M.A., Alekseev A.Yu. Adjuvants in veterinary medicine and their mechanisms of action. *South of Russia: ecology, development*. 2026; 21(2):134-145. (In Russ.)

DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-12

Received 22 December 2025

Revised 5 February 2026

Accepted 25 April 2026

Abstract

Adjuvants play a pivotal role in contemporary veterinary vaccinology, determining the efficacy of vaccines for farm animals. Given the growing demand for economically optimal and safe immunological preparations, understanding the molecular basis of adjuvant action becomes critically important. This review encompasses five major types of adjuvants—mineral (aluminum hydroxide and phosphate), oil emulsions, plant-derived saponins, bacterial components (CpG, MPLA), and nanostructured systems (liposomes, PLGA, inulin)—and describes their mechanisms of action through five key pathways: (1) enhancement of humoral response (production of neutralizing antibodies); (2) activation of cellular immunity (Th1 differentiation, generation of cytotoxic T lymphocytes); (3) formation of antigen depot (prolonged stimulation); (4) activation of innate immunity (pattern recognition, inflammation); (5) suppression of excessive inflammation. The species-dependent efficacy of adjuvants is analysed, attributable to differences in innate immunity receptors among animal species. Side effects of traditional adjuvants (granulomas, systemic inflammation, reduced productivity) and strategies for their minimization are discussed. Novel developmental directions were identified—synthetic immunomodulators, biodegradable nanoparticles and rationally designed combination systems that ensure optimal immune response without unwanted reactions. The knowledge obtained is being applied to the development of more effective, safe and economical vaccines for the prevention of infectious diseases in farm animals.

Key Words

Adjuvants, vaccines, farm animals, immune response, humoral immunity, cellular immunity, nanoparticles, safety.

ВВЕДЕНИЕ

Создание эффективной системы профилактики инфекций является необходимым условием для производства высококачественной и безопасной животноводческой продукции. Вакцинация является краеугольным камнем такой системы, особенно в условиях промышленного животноводства. Несмотря на наличие глобальной сети международных ветеринарных служб, эпизоотии продолжают наносить колоссальный экономический ущерб: вспышка африканской чумы свиней приводит к потерям на миллиарды долларов, ящур дестабилизирует мировые рынки скотоводческой продукции, бешенство остаётся смертельным заболеванием, как для животных, так и для людей, столкнувшихся с заражённым животным. На этом фоне совершенствование вакцинного арсенала становится вопросом, как здоровья животного, так и экономической безопасности, и борьбы с глобальными зоонозами.

Вакцины на основе живых аттенуированных (ослабленных) патогенов долгое время считались «золотым стандартом» благодаря высокой иммуногенности и способности вызывать как гуморальный (антительный), так и клеточный иммунитет. Однако ревертирование вакцинного штамма к дикому патогенному фенотипу остаётся реальным и технически неустранимым риском. Поэтому современная тенденция развития ветеринарных вакцин сместилась в сторону использования инактивированных или субъединичных препаратов – более безопасных, но менее иммуногенных. Это создало острую научно-практическую задачу: как обеспечить достаточный иммунный ответ при использовании мёртвого антигена, уменьшить необходимую антигенную нагрузку и снизить стоимость вакцины без ущерба для защиты? Ответ на этот вопрос дали адъюванты.

Адъюванты (от лат. *adjuvans* – помогающий) – это вещества или системы, которые встраиваются в состав вакцины и резко усиливают иммунный ответ организма на введённый антиген. Благодаря адъювантам одна и та же вакцина может быть сформирована по-разному в зависимости от целевого вида животного, целевой болезни и экономических параметров производства. Масштабы применения адъювантов в ветеринарии ошеломляющи: примерно 87% всех коммерческих инактивированных вакцин для животных содержат адъюванты, причём оставшиеся 13 % используют комбинированные адъювантные системы. Соли алюминия (применяются с начала XX века) занимают лидирующую позицию в ≈48 % препаратов, масляные эмульсии встречаются в ≈20 % вакцин, сапонины (растительные иммуномодуляторы) – в третьей по частоте группе [1].

Несмотря на повсеместность применения, механизмы действия адъювантов долго оставались загадкой, обозначаемой исследователями как «чёрный ящик». За последние два десятилетия, благодаря развитию молекулярной иммунологии, стало известно, что адъюванты функционируют путём активации врождённого иммунитета – древней защитной системы, распознающей опасность через специфические рецепторы (например, Toll-подобные и NOD-подобные рецепторы). Каждый класс адъювантов имеет свой «молекулярный почерк» активации врождённого иммунитета, что предопределяет

характер формируемого адаптивного ответа (тип антител, баланс Th1/Th2, активация цитотоксических Т-лимфоцитов). Однако выбор адъюванта требует осторожности: адъюванты способны вызывать и нежелательные побочные эффекты – локальные гранулёмы и абсцессы, системное воспаление, повышение температуры, снижение продуктивности, и в редких случаях (например, при хроническом использовании у кошек) развитие сарком в месте инъекции.

Новый виток развития адъювантной технологии связан с появлением наноматериалов – частиц субмикронного размера, способных доставлять антиген и одновременно служить сигналом опасности. Такие системы позволяют достичь высокой эффективности при минимальных побочных эффектах. Однако внедрение инновационных адъювантов в ветеринарную практику идёт медленно из-за высокой стоимости и требовательности нормативных органов к доказательству безопасности и эффективности. Таким образом, актуальность настоящего обзора заключается в систематизации современных знаний о механизмах действия адъювантов, анализе их клинического применения в контексте различных видов животных и болезней, а также в выявлении перспективных направлений развития, которые смогут удовлетворить растущие требования к эффективности, безопасности и экономичности ветеринарных вакцин.

ОБСУЖДЕНИЕ

Механизмы действия адъювантов у сельскохозяйственных животных

Адъюванты способны усиливать иммунный ответ посредством нескольких ключевых механизмов. Во-первых, они влияют на гуморальный иммунитет – стимулируют выработку антител В-лимфоцитами [2]. Во-вторых, многие адъюванты активируют клеточное звено – помогают в дифференцировке Т-хелперов и активации цитотоксических Т-лимфоцитов, тем самым укрепляя противои инфекционную защиту. В-третьих, адъюванты создают депо антигена в организме, продлевая время его воздействия на иммунную систему. И, наконец, адъюванты взаимодействуют с врожденным иммунитетом – запускают начальный воспалительный сигнал через врождённые рецепторы. Рассмотрим эти механизмы подробнее.

Усиление гуморального иммунитета (антительный ответ)

Основной задачей многих вакцин, особенно против внеклеточных бактерий и вирусов, является индукция высокого титра специфических, в частности, нейтрализующих антител [3; 4]. Адъюванты значительно усиливают гуморальный иммунный ответ по нескольким направлениям [4]. Они способствуют увеличению общего количества продуцируемых антител, повышают их аффинность (прочность связывания с антигеном) и продлевают период их циркуляции в организме [5; 6]. Это достигается за счет более эффективной активации В-лимфоцитов и Т-хелперов 2 типа (Th2), которые продуцируют цитокины (ИЛ-4, ИЛ-5, ИЛ-13), необходимые для пролиферации и дифференцировки В-клеток в плазматические клетки, секретирующие антитела [2; 7; 8]. Адъюванты, такие как соли алюминия и масляные эмульсии типа O/W, являются классическими

индукторами Th2-ответа и, соответственно, мощными стимуляторами продукции антител. Кроме того, создавая локальное воспаление и обеспечивая пролонгированное высвобождение антигена, адъюванты способствуют формированию и поддержанию герминативных центров в лимфоузлах – структур, где происходит созревание В-клеточного ответа и переключение изотипов антител [9; 10].

Концентрация нейтрализующих антител в крови животных после применения адъювантных вакцин обычно в разы превышает таковую после введения одного антигена без адъюванта [11]. Например, введение инактивированной вакцины против ящура с адъювантом (алюминий + сапонин или масло) крупному рогатому скоту приводит к развитию высоких титров вируснейтрализующих антител, тогда как без адъюванта иммунный ответ часто недостаточен для защиты от патогена [12]. Адъюванты способствуют также созреванию антител – повышению их авидности, благодаря более длительной антигенной стимуляции центров размножения в лимфоидных органах [4]. В ряде случаев отмечается переключение классов иммуноглобулинов: например, масляные адъюванты у свиней стимулируют выработку IgG2, ассоциированных с противовирусной активностью, в то время как без адъюванта преобладал бы IgG1. Кроме того, адъюванты могут усиливать секрецию антител на слизистых оболочках. Присутствие эффективного адъюванта в оральной или аэрозольной вакцине стимулирует локальный синтез IgA, который важен для защиты дыхательных путей и кишечника [13; 14].

Одной из причин усиления гуморального ответа является депо-эффект адъювантов – антиген дольше доступен иммунной системе, происходит повторная стимуляция В-клеток. Кроме того, адъюванты активируют дендритные клетки и макрофаги, которые эффективнее представляют антиген В-лимфоцитам и Т-хелперам в лимфоузлах. Повышенная выработка цитокинов (ИЛ-1, ИЛ-6 и др.) и экспрессия коstimуляторных молекул под действием адъювантов создают оптимальные условия для дифференцировки В-лимфоцитов в антителообразующие клетки [15; 16]. Например, CpG-олигонуклеотиды напрямую поляризуют иммунный ответ в сторону продуцирования антител субклассами IgG2a/IgG2b у мышей (аналог Th1-ассоциированных IgG у животных), повышая тем самым способность сыворотки нейтрализовать патоген [17]. Сапонины Quil A помимо прочего вызывают высвобождение цитокина ИЛ-4, который необходим для переключения классов иммуноглобулинов и созревания гуморального ответа [3; 17]. В эксперименте на крупном рогатом скоте группа, получившая вакцину против ящура с сапонином QS-21, уже через 7 дней продемонстрировала наличие вируснейтрализующих антител в высоком титре, в то время как у контрольных животных без QS-21 антительный ответ развивался медленнее [12; 18]. Таким образом, адъюванты ускоряют и усиливают развитие гуморального иммунитета, что крайне важно для быстрого создания защиты при угрозе эпизоотии.

Стимуляция клеточного иммунитета

(Th1/Th2-ответ, цитотоксические Т-лимфоциты)

Для защиты от внутриклеточных патогенов (вирусов, некоторых бактерий и простейших) одной лишь выработки антител недостаточно, требуется сильный

клеточный иммунный ответ [19]. Адъюванты играют ключевую роль в поляризации иммунного ответа в сторону Т-хелперов 1 типа (Th1) [20]. Клеточный иммунитет – второй ключевой компонент адаптивной иммунной системы, включающий активацию Т-лимфоцитов (Т-хелперов, цитотоксических Т-лимфоцитов, Т-клеток памяти) и макрофагов для уничтожения инфицированных клеток и внутриклеточных патогенов [21]. Не все вакцины способны полноценно индуцировать клеточный ответ – например, инактивированные вакцины без адъювантов зачастую формируют преимущественно антительный иммунитет и слабо защищают от инфекций, протекающих внутри клеток (бруцеллёз, туберкулёз, РПС и др.). Адъюванты позволяют преодолеть этот недостаток, сдвинув иммунный ответ в нужном направлении. Клеточный тип иммунного ответа характеризуется продукцией цитокинов, таких как интерферон-гамма (ИФН-γ) и ИЛ-2, которые активируют макрофаги для уничтожения поглощенных ими патогенов и способствуют развитию цитотоксических Т-лимфоцитов (CTL, или CD8+ Т-клеток). Адъюванты, такие как сапонины и агонисты TLR (например, CpG-ОДН), целенаправленно активируют дендритные клетки таким образом, что те начинают продуцировать ИЛ-12 – ключевой цитокин, направляющий дифференцировку наивных Т-хелперов по Th1-пути [22; 23].

Многие адъюванты-бустеры (особенно бактериальные TLR-лиганды и сапонины) склоняют дифференцировку CD4+ Т-хелперов к типу Th1, что сопровождается продукцией цитокинов ИФН-γ, ИЛ-2 и активацией макрофагов. Так, добавление CpG-ОДН в вакцину против бешенства для лисиц показало усиление Th1-иммунитета: возрос синтез ИФН-γ, тогда как уровень ИЛ-5 (Th2-маркера) снизился по сравнению с вакциной на одном алюминии [24]. Для крупного рогатого скота продемонстрировано, что комбинация классического адъюванта (масляной эмульсии) с CpG значительно усиливала клеточный ответ на вакцину против бычьего респираторного синцитиального вируса:росло число антиген-специфических ИФН-γ-продуцирующих Т-клеток по результатам ELISPOT-анализа, что коррелировало с лучшей защитой при инфицировании вирусом [25]. Сапониновый адъювант Quil A также мощно активирует клеточное звено: например, у поросят Quil A при совместном введении с живой вакциной против РПС увеличил относительное количество CD4+ Т-лимфоцитов и уровень ИФН-γ в крови, улучшая клиническую защиту от вирулентного штамма [3; 26].

Особенно важной для защиты от вирусов является активация цитотоксических Т-лимфоцитов (CTL), уничтожающих инфицированные клетки. Обычно инактивированные вакцины почти не вызывают CTL-ответ, но с помощью специальных адъювантов можно стимулировать кросс-презентацию антигена через MHC I-путь [4]. Некоторые адъюванты, в частности сапонины в составе ISCOMs, способствуют перекрестной презентации антигена [27]. Этот механизм позволяет экзогенным антигенам (поступившим извне клетки) попасть на молекулы MHC класса I, что является необходимым условием для активации CD8+ Т-клеток [28]. Активированные CTL распознают и уничтожают инфицированные клетки организма, что является важнейшим механизмом элиминации вирусных инфекций [29]. Сапонины (Quil A, QS-21) как раз

связаться тем, что повышают CTL-ответ – предположительно за счёт образования пор в клеточных мембранах и облегчения попадания антигена в цитозоль антигенпрезентирующих клеток (АПК) [30]. В экспериментах на модельных антигенах QS-21 увеличивал в 5–10 раз частоту CD8⁺ Т-клеток, специфичных к антигену, по сравнению с вакциной без адьюванта [28; 31]. Также комбинированные адьюванты, содержащие TLR-лиганды, способствуют развитию CTL: к примеру, адьювантная система Advax CpG (полисахарид инулин + CpG-55.2) индуцировала сильный CD8⁺ Т-клеточный ответ у хорьков в вакцине против COVID-19, обеспечивая защиту от вируса без участия антител [32]. Всё больше данных указывает, что для многих болезней животных (бруцеллёз, туберкулёз, лейкоз, ряд вирусных инфекций) необходим именно Th1/CTL-ответ, и без адьювантов этого не добиться.

Адьюванты также влияют на баланс Th1/Th2. Например, минеральные соли алюминия традиционно считаются Th2-ориентирующими (антительный ответ, высокий IgE, что даже может вести к аллергизации) [33–35]. Масляные эмульсии хоть и дают мощное антителообразование, в чистом виде тоже склоняются к Th2, но меньше повышают IgE, чем алюминиевые адьюванты [12; 36]. Бактериальные адьюванты (MPLA, CpG) и сапонины сдвигают иммунный ответ к Th1 или смешанному типу (Th1/Th2 одновременно) [37]. В идеале комбинированная вакцина должна вызывать оба типа иммунного ответа. Этого пытаются достичь, применяя комбинированные адьюванты – например, сочетания алюминия и MPLA (адьювант AS04) даёт выраженный нейтрализующий антительный ответ (вклад алюминия) одновременно с активацией Th1 (вклад MPLA) [37; 38]. У животных подобный подход также изучается: так, смесь масляного и бактериального адьюванта (например, эмульсия + CpG) может дать лучшую защиту от таких заболеваний, как бешенство, нежели каждый из адьювантов по отдельности.

Формирование депо антигена (продолгованное действие вакцины)

Одним из первых описанных механизмов действия адьювантов был так называемый «депо-эффект» [19]. Этот механизм заключается в удержании антигена в месте инъекции и его медленном, постепенном высвобождении в течение недель или даже месяцев [39]. Такое продолгованное присутствие антигена имитирует естественное течение инфекционного процесса и обеспечивает длительную стимуляцию иммунной системы, что приводит к формированию более мощного и стойкого иммунитета [40]. Классическими «депо-адьювантами» являются соли алюминия, которые адсорбируют антиген на поверхности своих частиц, и масляные эмульсии типа «вода-в-масле», которые физически инкапсулируют антиген в водных каплях внутри масляной фазы [1; 19]. Хотя роль депо-эффекта несомненна, особенно для эмульсий, современные исследования показывают, что для солей алюминия не менее, а возможно, и более важным механизмом является их способность вызывать локальное воспаление и напрямую активировать клетки врожденного иммунитета [1; 38; 41].

Минеральные адьюванты (гидроксид и фосфат алюминия) прочно адсорбируют антиген на своей поверхности. После инъекции нерастворимые частицы

алюминия оседают в тканях и удерживают связанный антиген. Постепенно (в течение часов и дней) антиген десорбируется и подхватывается иммунными клетками [39]. Таким образом, даже однократная инъекция создаёт эффект «продолгования»: антиген не сразу выводится организмом, а продолжает стимулировать иммунную систему. Это снижает потребность в частых ревакцинациях. Однако для алюминия депо-эффект относительно короткий (несколько дней), поэтому вакцины на основе этого адьюванта обычно требуют повторной дозы через 2 – 4 недели.

Гораздо более выраженный депо-эффект образуют масляные адьюванты [42]. В случае эмульсии W/O (неполный адьювант Фрейнда, Montanide ISA 206 и др.) антиген и вовсе заключён во внутренней водной фазе, окружённой слоем масла [42]. После введения такие капли масла могут оставаться в месте инъекции на протяжении недель и даже месяцев, медленно высвобождая антиген [43]. Это обеспечивает длительную антигенную стимуляцию, порой эквивалентную нескольким ревакцинациям. Поэтому инактивированные масляные вакцины часто вводятся однократно с последующей бустерной дозой лишь через несколько месяцев (в противоположность алюминиевым, требующим двухкратной иммунизации с коротким интервалом) [42]. Например, вакцина против ящура на масляном адьюванте Montanide обычно вводится разово и даёт иммунитет более чем на 6 месяцев, тогда как на алюминии + сапонин – на 3–4 месяца и требует двукратного введения [12; 44; 45]. Депо-эффект масел также важен для преодоления материнских антител: хотя новорождённый поросёнок может иметь пассивные антитела, долго присутствующий антиген в масляной капле рано или поздно «переждёт» спад материнских иммуноглобулинов и будет распознан иммунной системой, формируя активный ответ [12; 18; 46].

Полимерные наночастицы и липосомы аналогично могут играть роль депо. Биополимер поли(лактид-ко-гликолид) (PLGA) разрушается гидролизом в тканях, и скорость разрушения можно регулировать размерами и составом частиц [47]. Антиген внутри таких микрокапсул «скрыт» от немедленной деградации организмом, а высвобождение происходит по мере разложения полимера – от нескольких дней до недель [48; 49]. Это позволяет поддерживать антигенемию и стимуляцию иммунных клеток длительное время после вакцинации. Например, опыт с PLGA-микросферами для вакцины против паразитарной инфекции овец показал, что устойчивость к заражению сохранялась дольше (на 30–40 % по времени) по сравнению с традиционной вакциной, благодаря затяжному высвобождению антигена из микросфер [50].

Депо-эффект важен не только для продолжительности, но и для усиления общего иммунного ответа: большое количество антигена, введённое сразу, может быстро элиминироваться организмом или приводить к толерантности, а постепенная подача малыми порциями более эффективно вызывает созревание аффинности антител и формирование клеток памяти [4]. Однако чрезмерно длительное депо нежелательно, так как может приводить к хроническому воспалению и повреждению тканей (например, парафинового масла, остающегося месяцами и образующего гранулёмы). Поэтому

современные адъюванты стремятся создать оптимальное депо – достаточное по времени, но полностью рассасывающееся в конце. Метаболизируемые масла (сквален) и биоразлагаемые частицы (PLGA, инулин) в этом отношении лучше традиционных – после выполнения своей функции они исчезают из организма, не оставляя хронического очага [51].

Влияние на врожденный иммунитет (активация макрофагов, дендритных клеток и др.)

Врожденный иммунитет является «первой линией» защиты организма и ключевым модулем запуска адаптивного иммунного ответа. Активация врожденного иммунитета является отправной точкой и необходимым условием для развития любого адаптивного иммунного ответа, индуцированного адъювантом [19]. Практически все адъюванты действуют через активацию компонентов врожденного иммунитета – иначе они не смогли бы эффективно усилить вакцинный ответ. При введении вакцины адъювант распознаётся либо клетками врожденного иммунитета (макрофагами, дендритными клетками, нейтрофилами), либо вызывает локальное стерильное воспаление, которое привлекает эти клетки. Адъюванты действуют как сигналы опасности, которые распознаются паттерн-распознающими рецепторами (PRR) на поверхности и внутри АПК, в первую очередь дендритных клеток и макрофагов [52; 53]. Это взаимодействие запускает каскад событий:

- **Индукция воспаления:** В месте введения вакцины адъювант вызывает высвобождение эндогенных сигналов опасности (DAMPs) из поврежденных клеток и стимулирует продукцию провоспалительных цитокинов и хемокинов. Это приводит к развитию локальной воспалительной реакции и привлечению в очаг большого количества иммунных клеток (нейтрофилов, моноцитов), которые усиливают иммунный ответ [15].

- **Активация АПК:** Адъюванты способствуют захвату (фагоцитозу) антигена дендритными клетками и макрофагами. Одновременно, взаимодействуя с PRR (например, TLR), они запускают процесс созревания АПК [54]. Созревшие АПК увеличивают экспрессию на своей поверхности ко-стимуляторных молекул (CD80, CD86) и молекул МНС, необходимых для эффективной презентации антигена Т-лимфоцитам [28].

- **Миграция АПК:** Активированные адъювантом дендритные клетки мигрируют из места инъекции в регионарные дренирующие лимфатические узлы, где они представляют антиген наивным Т-лимфоцитам, запуская тем самым адаптивный иммунный ответ [55].

Минеральные адъюванты (алюминий) активируют врожденный иммунитет механически и химически: кристаллы гидроксида алюминия адсорбируют комплемент и сывороточные белки, вызывая эффект «постороннего тела». Макрофаги устремляются фагоцитировать частицы алюминия с антигеном, при этом сами частицы не перевариваются полностью и могут повреждать фаголизосомы, что ведёт к активации инфламасомы (NLRP3) внутри макрофага [56; 57]. Это вызывает секрецию ИЛ-1 β и ИЛ-18, усиливающих воспаление и дальнейший приток иммунных клеток. Кроме того, в зоне инъекции алюминий стимулирует тучные клетки выделять медиаторы (например, АТФ), которые являются сигналами опасности (DAMPs) [57]. Совокупно это

переводит локальную среду в «боевое» состояние, необходимое для запуска адаптивного иммунитета.

Масляные эмульсии воздействуют на врожденный иммунитет ещё сильнее. Гидрофобные масляные капли в тканях немедленно вызывают асептическое воспаление: разрушаются некоторые клетки в месте введения, высвобождая DAMPs (например, HMGB1, молочную кислоту и др.), активируется комплемент (по альтернативному пути на поверхности масляных капель), выделяются хемоаттрактанты для нейтрофилов [58]. В течение часов после инъекции в область вакцины проникают нейтрофилы и моноциты из крови. Нейтрофилы начинают фагоцитировать антиген и выделять активные вещества (различные протеазы, дефензины), которые привлекают ещё больше иммунных клеток. Активированные нейтрофилы могут выбрасывать нити ДНК (NETs), такой процесс способен активировать, к примеру, сапониновые адъюванты [59]. NETs образуют матрицу, содержащую бактерицидные ферменты и удерживающую антиген на месте, что полезно при вакцинации против бактерий. Моноциты, попадая в ткань, дифференцируются в макрофаги и дендритные клетки. Масляный адъювант «активирует» их, связываясь с низкоаффинными рецепторами липидов и за счёт продуктов тканевого повреждения. Активированные макрофаги усиливают экспрессию МНС II, начинают более эффективно презентировать антиген и секретировать цитокины (ИЛ-1, ИЛ-12), необходимые для Т-клеточной активации [60].

Бактериальные адъюванты обладают наиболее прямым действием на врожденный иммунитет, поскольку эволюционно рассчитаны на него. CpG-олигонуклеотид, попав внутрь дендритной клетки, взаимодействует с TLR9, что запускает сигнальный каскад MyD88 и в итоге приводит к секреции больших количеств ИФН- α этой клеткой [61; 62]. ИФН- α – мощный противовирусный цитокин, «включающий» антивиральное состояние во всех окружающих клетках и стимулирующий активацию NK-клеток [61]. Параллельно дендритная клетка под воздействием CpG созревает: повышается экспрессия на её мембране ко-стимулирующих молекул, важных для взаимодействия с Т-лимфоцитами (МНС I/II, CD80, CD86) [16; 63; 64]. Через 12–24 часа после вакцинации такие созревшие дендритные клетки мигрируют в дренирующий лимфоузел и представляют там антиген Т-лимфоцитам, иницируя адаптивный иммунитет. MPLA аналогично действует через TLR4 на клетках врожденного иммунитета (особенно на АПК – клетках Лангерганса кожи, дендритных клетках) индуцирует их созревание [54]. В отличие от полного ЛПС, MPLA запускает в основном MyD88-независимый путь сигнала, ведущий к продукции иммуномодулирующих цитокинов (типа ИФН- β) без чрезмерного выброса факторов, вызывающих «цитокиновый шторм» (ФНО, ИЛ-1) [38]. В итоге MPLA «мягко» активирует врожденный иммунитет, стимулируя нужные звенья без избыточного воспаления [38; 65; 66].

Адъюванты в виде наночастиц могут взаимодействовать с врожденным иммунитетом иными способами. Например, упомянутый адъювант Advax (δ -инулин) оказывается способен напрямую привлекать нейтрофилы и моноциты без индукции заметного воспаления или некроза тканей [67]. Инулин – растительный полисахарид – активирует комплемент по

альтернативному пути, продуцируя хемотаксические фрагменты C3a и C5a, которые зовут фагоциты к месту инъекции. Прибывшие клетки быстро поглощают частицы инулина с адсорбированным антигеном и перевозят их в лимфоузлы для презентации. Интересно, что Advax при этом не вызывает выброса провоспалительных цитокинов (ИЛ-6, ФНО) сверх нормального – видимо, потому что не повреждает клетки и не содержит PAMP [68]. Это объясняет, почему Advax не даёт местных побочных реакций, хотя эффективно повышает иммуногенность вакцины. Другие наноматериалы, такие как катионные липосомы, наоборот, кратковременно повышают проницаемость клеточных мембран, что может имитировать вирусную инфекцию и стимулировать рецепторы типа NLRP3 [69; 70].

В целом, активация врождённой иммунной системы – необходимое условие работы адьюванта. Без него адаптивный иммунитет (Т- и В-клетки) попросту не «увидел» бы угрозы и не отреагировал должным образом на введённый антиген. Именно поэтому «голые» антигены (особенно очищенные субъединицы) часто слабо иммуногенны: они не содержат в себе никаких сигнальных молекул опасности и могут быть восприняты иммунной системой как нечто безвредное, подлежащее игнорированию или толерантности. Адьювант исправляет это, обеспечивая контекст опасности для антигена и направляя развитие иммунного ответа по желаемому сценарию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Адьюванты играют критически важную роль в эффективности вакцин для сельскохозяйственных животных. Они позволяют инактивированным и субъединичным вакцинам вызывать полноценный иммунный ответ – сопоставимый или даже превосходящий таковой при натуральной инфекции. С применением адьювантов стало возможным контролировать многие опасные болезни (ящур, бешенство, лептоспироз, кокцидиоз и др.) без использования живых возбудителей. Основные типы адьювантов – минеральные соли алюминия, масляные эмульсии, сапонины, бактериальные компоненты, наночастицы – различаются по механизмам действия, что отражается на характере формируемого иммунитета. Минеральные адьюванты эффективны для усиления гуморального (антительного) ответа, масляные – создают сильный и продолжительный иммунитет, сапонины и TLR-лиганды – стимулируют клеточный иммунитет (Th1, CTL). Комбинируя их, можно добиться оптимального баланса иммуногенности. Однако применение адьювантов требует соблюдения баланса с безопасностью. Слишком сильные адьюванты могут вызывать локальные повреждения (абсцессы, гранулёмы), системные реакции (лихорадку, воспаление), что способно снизить продуктивность животных и качество продукции. Поэтому в практике подбираются такие дозы и формы введения, которые дают максимум пользы при минимуме вреда.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-16-20088) и Правительства Новосибирской области. Авторы благодарят Министерство науки и

высшего образования Российской Федерации.

ACKNOWLEDGMENT

The work was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 25-16-20088) and the Government of the Novosibirsk Region. The authors thank the Ministry of science and higher education of the Russian Federation.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Хрипко О.П., Коновалов Д.И., Глущенко А.В., Алексеев А.Ю., Шестопалов М.А. Адьюванты для сельскохозяйственных животных: текущее состояние // Ветеринарный фармакологический вестник. 2025. Т. 33. N. 4. С. 54-65. <https://doi.org/10.65173/2541-8203.2025.33.4.005>
- Sicard T., Kassardjian A., Julien J.P. B cell targeting by molecular adjuvants for enhanced immunogenicity. *Expert Review of Vaccines*, 2020, vol. 19, no. 11, pp. 1023-1039. <https://doi.org/10.1080/14760584.2020.1857736>
- Yao Y., Zhang Z., Yang Z. The combination of vaccines and adjuvants to prevent the occurrence of high incidence of infectious diseases in bovine. *Frontiers in Veterinary Science*, 2023, vol. 10, article number 1243835. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1243835>
- Zhao T., Cai Y., Jiang Y., He X., Wei Y., Yu Y., Tian X. Vaccine adjuvants: mechanisms and platforms. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 2023, vol. 8, no. 1, article number 283. <https://doi.org/10.1038/s41392-023-01557-7>
- Dougan M. Checkpoint Blockade Toxicity and Immune Homeostasis in the Gastrointestinal Tract. *Frontiers in Immunology*, 2017, vol. 8, article number 1547. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2017.01547>
- Stills H.F., Jr. Adjuvants and antibody production: dispelling the myths associated with Freund's complete and other adjuvants. *ILAR Journal*, 2005, vol. 46, no. 3, pp. 280-293. <https://doi.org/10.1093/ilar.46.3.280>
- Ko E.J., Lee Y.T., Kim K.H., Jung Y.J., Lee Y., Denning T.L., Kang S.M. Effects of MF59 Adjuvant on Induction of Isotype-Switched IgG Antibodies and Protection after Immunization with T-Dependent Influenza Virus Vaccine in the Absence of CD4+ T Cells. *Journal of Virology*, 2016, vol. 90, no. 15, pp. 6976-6988. <https://doi.org/10.1128/jvi.00339-16>
- Moyer T.J., Kato Y., Abraham W., Chang J.Y.H., Kulp D.W., Watson N., Turner H.L., Menis S., Abbott R.K., Bhiman J.N., Melo M.B., Simon H.A., Herrera-De la Mata S., Liang S., Seumois G., Agarwal Y., Li N., Burton D.R., Ward A.B., Schief W.R., Crotty S., Irvine D.J. Engineered immunogen binding to alum adjuvant enhances humoral immunity. *Nature Medicine*, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 430-440. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0753-3>
- Csuka D., Simon D., Hobor R., Uray K., Prohaszka Z., Banlaki Z., Jani P.K., Szilagyi A., Hudecz F., Rajczy K., Beke G., Boros Major A., Tordai A., Illes Z., Berki T., Czirjak L., Fust G. Serum concentration of immunoglobulin G-type antibodies against the whole Epstein-Barr nuclear antigen 1 and its aa35-58 or aa398-404 fragments in the sera of patients with systemic lupus erythematosus and multiple sclerosis. *Clinical and Experimental Immunology*, 2013, vol. 171, no. 3, pp. 255-262. <https://doi.org/10.1111/cei.12022>
- Pedersen G.K., Wørzner K., Andersen P., Christensen D. Vaccine Adjuvants Differentially Affect Kinetics of Antibody and Germinal Center Responses. *Frontiers in Immunology*, 2020, vol. 11, article number 579761. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.579761>
- Spickler A.R., Roth J.A. Adjuvants in veterinary vaccines: modes of action and adverse effects. *Journal of Veterinary Internal Medicine*, 2003, vol. 17, no. 3, pp. 273-281. <https://doi.org/10.1111/j.1939-1676.2003.tb02448.x>
- Dalsgaard K., Jensen M.H., Sorensen K.J. Saponin adjuvants. IV. Evaluation of the adjuvant quil A in the vaccination of cattle against foot-and-mouth disease. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 1977, vol. 18, no. 3, pp. 349-360. <https://doi.org/10.1186/BF03548432>
- Stillman Z.S., Decker G.E., Dworzak M.R., Bloch E.D., Fromen C.A. Aluminum-based metal-organic framework nanoparticles as pulmonary vaccine adjuvants. *Journal of Nanobiotechnology*, 2023,

- vol. 21, no. 1, article number 39. <https://doi.org/10.1186/s12951-023-01782-w>
14. Lin Y.L., Chow Y.H., Huang L.M., Hsieh S.M., Cheng P.Y., Hu K.C., Chiang B.L. A CpG-adjuvanted intranasal enterovirus 71 vaccine elicits mucosal and systemic immune responses and protects human SCARB2-transgenic mice against lethal challenge. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, no. 1, article number 10713. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28281-5>
 15. Turley J.L., Lavelle E.C. Resolving adjuvant mode of action to enhance vaccine efficacy. *Current Opinion in Immunology*, 2022, vol. 77, article number 102229. <https://doi.org/10.1016/j.coi.2022.102229>
 16. Kobayashi H., Horner A.A., Takabayashi K., Nguyen M.D., Huang E., Cinman N., Raz E. Immunostimulatory DNA pre-priming: a novel approach for prolonged Th1-biased immunity. *Cellular Immunology*, 1999, vol. 198, no. 1, pp. 69-75. <https://doi.org/10.1006/cimm.1999.1572>
 17. Eckl-Dorna J., Batista F.D. BCR-mediated uptake of antigen linked to TLR9 ligand stimulates B-cell proliferation and antigen-specific plasma cell formation. *Blood*, 2009, vol. 113, no. 17, pp. 3969-3977. <https://doi.org/10.1182/blood-2008-10-185421>
 18. Heegaard P.M., Dedieu L., Johnson N., Le Potier M.F., Mockey M., Mutinelli F., Vahlenkamp T., Vascellari M., Sørensen N.S. Adjuvants and delivery systems in veterinary vaccinology: current state and future developments. *Archives of Virology*, 2011, vol. 156, no. 2, pp. 183-202. <https://doi.org/10.1007/s00705-010-0863-1>
 19. Wilson-Welder J.H., Torres M.P., Kipper M.J., Mallapragada S.K., Wannemuehler M.J., Narasimhan B. Vaccine adjuvants: current challenges and future approaches. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2009, vol. 98, no. 4, pp. 1278-1316. <https://doi.org/10.1002/jps.21523>
 20. Vogel F.R. Improving vaccine performance with adjuvants. *Clinical Infectious Diseases*, 2000, vol. 30 Suppl 3, no., pp. S266-S270. <https://doi.org/10.1086/313883>
 21. McNeela E.A., Mills K.H. Manipulating the immune system: humoral versus cell-mediated immunity. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2001, vol. 51, no. 1-3, pp. 43-54. [https://doi.org/10.1016/s0169-409x\(01\)00169-7](https://doi.org/10.1016/s0169-409x(01)00169-7)
 22. Krieg A.M. CpG motifs in bacterial DNA and their immune effects. *Annual Review of Immunology*, 2002, vol. 20, no., pp. 709-760. <https://doi.org/10.1146/annurev.immunol.20.100301.064842>
 23. Verthelyi D., Ishii K.J., Gursel M., Takeshita F., Klinman D.M. Human peripheral blood cells differentially recognize and respond to two distinct CPG motifs. *The Journal of Immunology*, 2001, vol. 166, no. 4, pp. 2372-2377. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.166.4.2372>
 24. Rolland-Turner M., Farre G., Muller D., Rouet N., Boue F. Immunological tools for the assessment of both humoral and cellular immune responses in Foxes (*Vulpes vulpes*) using ovalbumin and cholera toxin B as an antigenic model. *Vaccine*, 2004, vol. 22, no. 31-32, pp. 4163-4172. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2004.06.050>
 25. Gershwin L.J., Behrens N.E., McEligot H.A., Carvallo-Chaigneau F.R., Crum L.T., Gunnarson B.M., Corbeil L.B. A recombinant subunit vaccine for bovine RSV and *Histophilus somni* protects calves against dual pathogen challenge. *Vaccine*, 2017, vol. 35, no. 15, pp. 1954-1963. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2017.01.059>
 26. Charentantanakul W., Pongjaroenkit S. Co-administration of saponin quail A and PRRSV-1 modified-live virus vaccine up-regulates gene expression of type I interferon-regulated gene, type I and II interferon, and inflammatory cytokines and reduces viremia in response to PRRSV-2 challenge. *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 2018, vol. 205, no., pp. 24-34. <https://doi.org/10.1016/j.vetimm.2018.10.005>
 27. Huis In 't Veld L.G., Cornelissen L.A., van den Bogaard L., Ansems M., Ho N.I., Adema G.J. Saponin-based adjuvant uptake and induction of antigen cross-presentation by CD11b+ dendritic cells and macrophages. *NPJ Vaccines*, 2025, vol. 10, no. 1, article number 15. <https://doi.org/10.1038/s41541-024-01056-y>
 28. Ho N.I., Huis In 't Veld L.G.M., Raaijmakers T.K., Adema G.J. Adjuvants Enhancing Cross-Presentation by Dendritic Cells: The Key to More Effective Vaccines? *Frontiers in Immunology*, 2018, vol. 9, article number 2874. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2018.02874>
 29. Chen K., Wang N., Zhang X., Wang M., Liu Y., Shi Y. Potentials of saponins-based adjuvants for nasal vaccines. *Frontiers in Immunology*, 2023, vol. 14, article number 1153042. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1153042>
 30. Lorent J.H., Quetin-Leclercq J., Minget-Leclercq M.P. The amphiphilic nature of saponins and their effects on artificial and biological membranes and potential consequences for red blood and cancer cells. *Organic and Biomolecular Chemistry*, 2014, vol. 12, no. 44, pp. 8803-8822. <https://doi.org/10.1039/c4ob01652a>
 31. Lacaille-Dubois M.A. Updated insights into the mechanism of action and clinical profile of the immunoadjuvant QS-21: A review. *Phytomedicine*, 2019, vol. 60, article number 152905. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2019.152905>
 32. Petrovsky N. Clinical development of SpikoGen®, an Advax-CpG55.2 adjuvanted recombinant spike protein vaccine. *Human Vaccines and Immunotherapeutics*, 2024, vol. 20, no. 1, article number 2363016. <https://doi.org/10.1080/21645515.2024.2363016>
 33. Lindblad E.B. Aluminium adjuvants – in retrospect and prospect. *Vaccine*, 2004, vol. 22, no. 27-28, pp. 3658-3668. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2004.03.032>
 34. Reed S.G., Tomai M., Gale M.J., Jr. New horizons in adjuvants for vaccine development. *Current Opinion in Immunology*, 2020, vol. 65, pp. 97-101. <https://doi.org/10.1016/j.coi.2020.08.008>
 35. Gupta R.K., Siber G.R. Comparison of adjuvant activities of aluminium phosphate, calcium phosphate and stearyl tyrosine for tetanus toxoid. *Biologicals*, 1994, vol. 22, no. 1, pp. 53-63. <https://doi.org/10.1006/biol.1994.1008>
 36. Aucouturier J., Dupuis L., Ganne V. Adjuvants designed for veterinary and human vaccines. *Vaccine*, 2001, vol. 19, no. 17-19, pp. 2666-2672. [https://doi.org/10.1016/s0264-410x\(00\)00498-9](https://doi.org/10.1016/s0264-410x(00)00498-9)
 37. Çokçalışkan C., Türkoğlu T., Sareyyüpoğlu B., Uzunlu E., Babak A., Özbilge B.B., Gülyaz V. QS-21 enhances the early antibody response to oil adjuvant foot-and-mouth disease vaccine in cattle. *Clinical and Experimental Vaccine Research*, 2016, vol. 5, no. 2, pp. 138-147. <https://doi.org/10.7774/cevr.2016.5.2.138>
 38. Pulendran B., Arunachalam P.S., O'Hagan D.T. Emerging concepts in the science of vaccine adjuvants. *Nature Reviews Drug Discovery*, 2021, vol. 20, no. 6, pp. 454-475. <https://doi.org/10.1038/s41573-021-00163-y>
 39. Gupta R.K., Rost B.E., Relyveld E., Siber G.R. *Adjuvant properties of aluminum and calcium compounds*, in: Vaccine Design. Pharmaceutical Biotechnology, ed. M. F. In: Powell, Newman, M.J. (eds), Springer, Boston, MA., 1995, vol. 6, pp. 229-248.
 40. Lan J., Feng D., He X., Zhang Q., Zhang R. Basic Properties and Development Status of Aluminum Adjuvants Used for Vaccines. *Vaccines*, 2024, vol. 12, no. 10, pp. 1187. <https://doi.org/10.3390/vaccines12101187>
 41. Tritto E., Mosca F., De Gregorio E. Mechanism of action of licensed vaccine adjuvants. *Vaccine*, 2009, vol. 27, no. 25-26, pp. 3331-3334. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2009.01.084>
 42. Xing J., Zhao X., Li X., Fang R., Sun M., Zhang Y., Song N. The recent advances in vaccine adjuvants. *Frontiers in Immunology*, 2025, vol. 16, article number 1557415. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1557415>
 43. Janeway C.A., Travers P., Walport M., Shlomchik M.J. *Immunobiology*, Garland Science. New York, NY, USA, 2001. 600 p.
 44. Choi J.H., You S.H., Ko M.K., Jo H.E., Shin S.H., Jo H., Lee M.J., Kim S.M., Kim B., Lee J.S., Park J.H. Improved immune responses and safety of foot-and-mouth disease vaccine containing immunostimulating components in pigs. *Journal of Veterinary Science*, 2020, vol. 21, no. 5, article number e74. <https://doi.org/10.4142/jvs.2020.21.e74>
 45. Cloete M., Dungu B., Van Staden L.I., Ismail-Cassim N., Vosloo W. Evaluation of different adjuvants for foot-and-mouth disease vaccine containing all the SAT serotypes. *Onderstepoort Journal of Veterinary Research*, 2008, vol. 75, no. 1, pp. 17-31. <https://doi.org/10.4102/ojvr.v75i1.84>
 46. Sandbulte M.R., Platt R., Roth J.A., Henningson J.N., Gibson K.A., Rajão D.S., Loving C.L., Vincent A.L. Divergent immune responses and disease outcomes in piglets immunized with

- inactivated and attenuated H3N2 swine influenza vaccines in the presence of maternally-derived antibodies. *Virology*, 2014, vol. 464-465, pp. 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.virol.2014.06.027>
47. Ling X., Dong Z., He J., Chen D., He D., Guo R., He Q., Li M. Advances in Polymer-Based Self-Adjuvanted Nanovaccines. *Small*, 2025, vol. 21, no. 16, article number e2409021. <https://doi.org/10.1002/sml.202409021>
48. Cassaidy B.J., Moser B.A., Solanki A., Chen Q., Shen J., Gotsis K., Lockhart Z., Rutledge N., Rosenberger M.G., Dong Y., Davis D., Esser-Kahn A.P. Immune Potentiation of PLGA Controlled-Release Vaccines for Improved Immunological Outcomes. *ACS Omega*, 2024, vol. 9, no. 10, pp. 11608-11614. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06552>
49. Comberlato A., Paloja K., Bastings M.M.C. Nucleic acids presenting polymer nanomaterials as vaccine adjuvants. *Journal of Materials Chemistry B*, 2019, vol. 7, no. 41, pp. 6321-6346. <https://doi.org/10.1039/c9tb01222b>
50. Stanley A.C., Buxton D., Innes E.A., Huntley J.F. Intranasal immunisation with Toxoplasma gondii tachyzoite antigen encapsulated into PLG microspheres induces humoral and cell-mediated immunity in sheep. *Vaccine*, 2004, vol. 22, no. 29-30, pp. 3929-3941. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2004.04.022>
51. Roth G.A., Picece V., Ou B.S., Luo W., Pulendran B., Appel E.A. Designing spatial and temporal control of vaccine responses. *Nature Reviews Materials*, 2022, vol. 7, no. 3, pp. 174-195. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00372-2>
52. Luo Q., Ahmed W., Dai Y., Mohsin A., Hang H., Zhuang Y., Guo M. Evaluation of a Virus-like Nanoparticle Porcine Circovirus Type-2 (PCV2) Capsid Protein Fused with the Pig Immunoglobulin Fc Fragment as a Novel Vaccine Candidate against PCV2 in Mice. *Vaccines*, 2021, vol. 9, no. 10, article number 1128. <https://doi.org/10.3390/vaccines9101128>
53. Facciola A., Visalli G., Laganà A., Di Pietro A. An Overview of Vaccine Adjuvants: Current Evidence and Future Perspectives. *Vaccines*, 2022, vol. 10, no. 5, article number 819. <https://doi.org/10.3390/vaccines10050819>
54. Jeon D., Hill E., McNeel D.G. Toll-like receptor agonists as cancer vaccine adjuvants. *Human Vaccines and Immunotherapeutics*, 2024, vol. 20, no. 1, article number 2297453. <https://doi.org/10.1080/21645515.2023.2297453>
55. Hop H.T., Simborio H.L., Reyes A.W.B., Arayan L.T., Min W., Lee H.J., Kim D.H., Chang H.H., Kim S. Immunogenicity and protective effect of recombinant Brucella abortus Ndk (rNdk) against a virulent strain B. abortus 544 infection in BALB/c mice. *FEMS Microbiology Letters*, 2015, vol. 362, no. 4, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnv003>
56. Nooraie S., Sarkar Lotfabadi A., Akbarzadehmoallemkolaei M., Rezaei N. Immunogenicity of Different Types of Adjuvants and Nano-Adjuvants in Veterinary Vaccines: A Comprehensive Review. *Vaccines*, 2023, vol. 11, no. 2, pp. 453. <https://doi.org/10.3390/vaccines11020453>
57. Quandt D., Rothe K., Baerwald C., Rossol M. GPRC6A mediates Alum-induced Nlrp3 inflammasome activation but limits Th2 type antibody responses. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, article number 16719. <https://doi.org/10.1038/srep16719>
58. Seubert A., Calabro S., Santini L., Galli B., Genovese A., Valentini S., Aprea S., Colaprico A., D'Oro U., Giuliani M.M., Pallaoro M., Pizza M., O'Hagan D.T., Wack A., Rappuoli R., De Gregorio E. Adjuvanticity of the oil-in-water emulsion MF59 is independent of Nlrp3 inflammasome but requires the adaptor protein MyD88. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, vol. 108, no. 27, pp. 11169-11174. <https://doi.org/10.1073/pnas.1107941108>
59. Fossum C., Hjertner B., Ahlberg V., Chareerntantanakul W., McIntosh K., Fuxler L., Balagunaseelan N., Wallgren P., Lövgren Bengtsson K. Early inflammatory response to the saponin adjuvant Matrix-M in the pig. *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 2014, vol. 158, no. 1-2, pp. 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.vetimm.2013.07.007>
60. Filipczak N., Yalamarty S.S.K., Li X., Pathrikar T.V., Pinapati R., Vanjara B., Torchilin V. Neutrophil extracellular traps: Formation, pathological roles, and nanoparticle-based therapeutic targeting strategies. *Journal of Controlled Release*, 2025, vol. 387, article number 114220. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2025.114220>
61. Gantner B.N., Simmons R.M., Canavera S.J., Akira S., Underhill D.M. Collaborative induction of inflammatory responses by dectin-1 and Toll-like receptor 2. *Journal of Experimental Medicine*, 2003, vol. 197, no. 9, pp. 1107-1117. <https://doi.org/10.1084/jem.20021787>
62. Verthelyi D., Zeuner R.A. Differential signaling by CpG DNA in DCs and B cells: not just TLR9. *Trends in Immunology*, 2003, vol. 24, no. 10, pp. 519-522. [https://doi.org/10.1016/s1471-4906\(03\)00243-6](https://doi.org/10.1016/s1471-4906(03)00243-6)
63. Krieg A.M., Yi A.K., Matson S., Waldschmidt T.J., Bishop G.A., Teasdale R., Koretzky G.A., Klinman D.M. CpG motifs in bacterial DNA trigger direct B-cell activation. *Nature*, 1995, vol. 374, no. 6522, pp. 546-549. <https://doi.org/10.1038/374546a0>
64. Davis H.L., Weeratna R., Waldschmidt T.J., Tygrett L., Schorr J., Krieg A.M. CpG DNA is a potent enhancer of specific immunity in mice immunized with recombinant hepatitis B surface antigen. *The Journal of Immunology*, 1998, vol. 160, no. 2, pp. 870-876. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.160.2.870>
65. Didierlaurent A.M., Morel S., Lockman L., Giannini S.L., Bisteau M., Carlsen H., Kielland A., Vosters O., Vanderheyde N., Schiavetti F., Larocque D., Van Mechelen M., Garçon N. AS04, an aluminum salt- and TLR4 agonist-based adjuvant system, induces a transient localized innate immune response leading to enhanced adaptive immunity. *The Journal of Immunology*, 2009, vol. 183, no. 10, pp. 6186-6197. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.0901474>
66. Blanco-Pérez F., Goretzki A., Wolfheimer S., Schülke S. The vaccine adjuvant MPLA activates glycolytic metabolism in mouse mDC by a JNK-dependent activation of mTOR-signaling. *Molecular Immunology*, 2019, vol. 106, no., pp. 159-169. <https://doi.org/10.1016/j.molimm.2018.12.029>
67. Ryan N.M., Hess J.A., Nakhale M., Ferguson A.A., Stump W., Belko S., Monane R., Pugliese R.S., Petrovsky N., Makepeace B.L., Gray S.A., Carter D., Lustigman S., Abraham D. Vaccination against *Onchocerca volvulus* induces IgG-mediated protective immunity dependent on neutrophils and complement. *NPJ Vaccines*, 2025, vol. 10, no. 1, article number 221. <https://doi.org/10.1038/s41541-025-01267-x>
68. Akin I., Akdas S., Ceylan M.N., Altiner S., Aribal Ayral P., Yazihan N. Evaluation of the safety and efficacy of Advax(TM) as an adjuvant: A systematic review and meta-analysis. *Advances in Medical Sciences*, 2022, vol. 67, no. 1, pp. 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.advms.2021.09.002>
69. Bruchard M., Rebé C., Derangère V., Togbé D., Ryffel B., Boidot R., Humblin E., Hamman A., Chalmin F., Berger H., Chevrier A., Limagne E., Apetoh L., Végran F., Ghiringhelli F. The receptor NLRP3 is a transcriptional regulator of TH2 differentiation. *Nature Immunology*, 2015, vol. 16, no. 8, pp. 859-870. <https://doi.org/10.1038/ni.3202>
70. Lee W., Kingstad-Bakke B., Paulson B., Larsen A., Overmyer K., Marinaik C.B., Dulli K., Toy R., Vogel G., Mueller K.P., Tweed K., Walsh A.J., Russell J., Saha K., Reyes L., Skala M.C., Sauer J.D., Shayakhmetov D.M., Coon J., Roy K., Suresh M. Carbomer-based adjuvant elicits CD8 T-cell immunity by inducing a distinct metabolic state in cross-presenting dendritic cells. *PLOS Pathogens*, 2021, vol. 17, no. 1, article number e1009168. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1009168>

REFERENCES

1. Khripko O.P., Konovalov D.I., Glushchenko A.V., Alekseev A.Y., Shestopalov M.A. Adjuvants for farm animals: current status. *Bulletin of Veterinary Pharmacology*, 2025, vol. 33, no. 4, pp. 54-65. (In Russian) <https://doi.org/10.65173/2541-8203.2025.33.4.005>
2. Sicard T., Kassardjian A., Julien J.P. B cell targeting by molecular adjuvants for enhanced immunogenicity. *Expert Review of Vaccines*, 2020, vol. 19, no. 11, pp. 1023-1039. <https://doi.org/10.1080/14760584.2020.1857736>
3. Yao Y., Zhang Z., Yang Z. The combination of vaccines and adjuvants to prevent the occurrence of high incidence of infectious diseases in bovine. *Frontiers in Veterinary Science*, 2023, vol. 10, article number 1243835. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1243835>
4. Zhao T., Cai Y., Jiang Y., He X., Wei Y., Yu Y., Tian X. Vaccine adjuvants: mechanisms and platforms. *Signal Transduction and*

- Targeted Therapy*, 2023, vol. 8, no. 1, article number 283. <https://doi.org/10.1038/s41392-023-01557-7>
5. Dougan M. Checkpoint Blockade Toxicity and Immune Homeostasis in the Gastrointestinal Tract. *Frontiers in Immunology*, 2017, vol. 8, article number 1547. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2017.01547>
 6. Stills H.F., Jr. Adjuvants and antibody production: dispelling the myths associated with Freund's complete and other adjuvants. *ILAR Journal*, 2005, vol. 46, no. 3, pp. 280-293. <https://doi.org/10.1093/ilar.46.3.280>
 7. Ko E.J., Lee Y.T., Kim K.H., Jung Y.J., Lee Y., Denning T.L., Kang S.M. Effects of MF59 Adjuvant on Induction of Isotype-Switched IgG Antibodies and Protection after Immunization with T-Dependent Influenza Virus Vaccine in the Absence of CD4+ T Cells. *Journal of Virology*, 2016, vol. 90, no. 15, pp. 6976-6988. <https://doi.org/10.1128/jvi.00339-16>
 8. Moyer T.J., Kato Y., Abraham W., Chang J.Y.H., Kulp D.W., Watson N., Turner H.L., Menis S., Abbott R.K., Bhiman J.N., Melo M.B., Simon H.A., Herrera-De la Mata S., Liang S., Seumois G., Agarwal Y., Li N., Burton D.R., Ward A.B., Schief W.R., Crotty S., Irvine D.J. Engineered immunogen binding to alum adjuvant enhances humoral immunity. *Nature Medicine*, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 430-440. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0753-3>
 9. Csuka D., Simon D., Hobor R., Uray K., Prohaszka Z., Banlaki Z., Jani P.K., Szilagyi A., Hudecz F., Rajczy K., Beke G., Boros Major A., Tordai A., Illes Z., Berki T., Czirjak L., Fust G. Serum concentration of immunoglobulin G-type antibodies against the whole Epstein-Barr nuclear antigen 1 and its aa35-58 or aa398-404 fragments in the sera of patients with systemic lupus erythematosus and multiple sclerosis. *Clinical and Experimental Immunology*, 2013, vol. 171, no. 3, pp. 255-262. <https://doi.org/10.1111/cei.12022>
 10. Pedersen G.K., Wørzner K., Andersen P., Christensen D. Vaccine Adjuvants Differentially Affect Kinetics of Antibody and Germinal Center Responses. *Frontiers in Immunology*, 2020, vol. 11, article number 579761. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.579761>
 11. Spickler A.R., Roth J.A. Adjuvants in veterinary vaccines: modes of action and adverse effects. *Journal of Veterinary Internal Medicine*, 2003, vol. 17, no. 3, pp. 273-281. <https://doi.org/10.1111/j.1939-1676.2003.tb02448.x>
 12. Dalsgaard K., Jensen M.H., Sorensen K.J. Saponin adjuvants. IV. Evaluation of the adjuvant quail A in the vaccination of cattle against foot-and-mouth disease. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 1977, vol. 18, no. 3, pp. 349-360. <https://doi.org/10.1186/BF03548432>
 13. Stillman Z.S., Decker G.E., Dworzak M.R., Bloch E.D., Fromen C.A. Aluminum-based metal-organic framework nanoparticles as pulmonary vaccine adjuvants. *Journal of Nanobiotechnology*, 2023, vol. 21, no. 1, article number 39. <https://doi.org/10.1186/s12951-023-01782-w>
 14. Lin Y.L., Chow Y.H., Huang L.M., Hsieh S.M., Cheng P.Y., Hu K.C., Chiang B.L. A CpG-adjuvanted intranasal enterovirus 71 vaccine elicits mucosal and systemic immune responses and protects human SCARB2-transgenic mice against lethal challenge. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, no. 1, article number 10713. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28281-5>
 15. Turley J.L., Lavelle E.C. Resolving adjuvant mode of action to enhance vaccine efficacy. *Current Opinion in Immunology*, 2022, vol. 77, article number 102229. <https://doi.org/10.1016/j.coi.2022.102229>
 16. Kobayashi H., Horner A.A., Takabayashi K., Nguyen M.D., Huang E., Cinman N., Raz E. Immunostimulatory DNA pre-priming: a novel approach for prolonged Th1-biased immunity. *Cellular Immunology*, 1999, vol. 198, no. 1, pp. 69-75. <https://doi.org/10.1006/cimm.1999.1572>
 17. Eckl-Dorna J., Batista F.D. BCR-mediated uptake of antigen linked to TLR9 ligand stimulates B-cell proliferation and antigen-specific plasma cell formation. *Blood*, 2009, vol. 113, no. 17, pp. 3969-3977. <https://doi.org/10.1182/blood-2008-10-185421>
 18. Heegaard P.M., Dedieu L., Johnson N., Le Potier M.F., Mockey M., Mutinelli F., Vahlenkamp T., Vascellari M., Sørensen N.S. Adjuvants and delivery systems in veterinary vaccinology: current state and future developments. *Archives of Virology*, 2011, vol. 156, no. 2, pp. 183-202. <https://doi.org/10.1007/s00705-010-0863-1>
 19. Wilson-Welder J.H., Torres M.P., Kipper M.J., Mallapragada S.K., Wannemuehler M.J., Narasimhan B. Vaccine adjuvants: current challenges and future approaches. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2009, vol. 98, no. 4, pp. 1278-1316. <https://doi.org/10.1002/jps.21523>
 20. Vogel F.R. Improving vaccine performance with adjuvants. *Clinical Infectious Diseases*, 2000, vol. 30 Suppl 3, no., pp. S266-S270. <https://doi.org/10.1086/313883>
 21. McNeela E.A., Mills K.H. Manipulating the immune system: humoral versus cell-mediated immunity. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2001, vol. 51, no. 1-3, pp. 43-54. [https://doi.org/10.1016/s0169-409x\(01\)00169-7](https://doi.org/10.1016/s0169-409x(01)00169-7)
 22. Krieg A.M. CpG motifs in bacterial DNA and their immune effects. *Annual Review of Immunology*, 2002, vol. 20, no., pp. 709-760. <https://doi.org/10.1146/annurev.immunol.20.100301.064842>
 23. Verthelyi D., Ishii K.J., Gursel M., Takeshita F., Klinman D.M. Human peripheral blood cells differentially recognize and respond to two distinct CPG motifs. *The Journal of Immunology*, 2001, vol. 166, no. 4, pp. 2372-2377. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.166.4.2372>
 24. Rolland-Turner M., Farre G., Muller D., Rouet N., Boue F. Immunological tools for the assessment of both humoral and cellular immune responses in Foxes (*Vulpes vulpes*) using ovalbumin and cholera toxin B as an antigenic model. *Vaccine*, 2004, vol. 22, no. 31-32, pp. 4163-4172. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2004.06.050>
 25. Gershwin L.J., Behrens N.E., McEligot H.A., Carvallo-Chaigneau F.R., Crum L.T., Gunnarson B.M., Corbeil L.B. A recombinant subunit vaccine for bovine RSV and *Histophilus somni* protects calves against dual pathogen challenge. *Vaccine*, 2017, vol. 35, no. 15, pp. 1954-1963. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2017.01.059>
 26. Charerntantanakul W., Pongjaroenkit S. Co-administration of saponin quail A and PRRSV-1 modified-live virus vaccine up-regulates gene expression of type I interferon-regulated gene, type I and II interferon, and inflammatory cytokines and reduces viremia in response to PRRSV-2 challenge. *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 2018, vol. 205, no., pp. 24-34. <https://doi.org/10.1016/j.vetimm.2018.10.005>
 27. Huis In 't Veld L.G., Cornelissen L.A., van den Bogaard L., Ansems M., Ho N.I., Adema G.J. Saponin-based adjuvant uptake and induction of antigen cross-presentation by CD11b+ dendritic cells and macrophages. *NPI Vaccines*, 2025, vol. 10, no. 1, article number 15. <https://doi.org/10.1038/s41541-024-01056-y>
 28. Ho N.I., Huis In 't Veld L.G.M., Raaijmakers T.K., Adema G.J. Adjuvants Enhancing Cross-Presentation by Dendritic Cells: The Key to More Effective Vaccines? *Frontiers in Immunology*, 2018, vol. 9, article number 2874. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2018.02874>
 29. Chen K., Wang N., Zhang X., Wang M., Liu Y., Shi Y. Potentials of saponins-based adjuvants for nasal vaccines. *Frontiers in Immunology*, 2023, vol. 14, article number 1153042. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1153042>
 30. Lorent J.H., Quetin-Leclercq J., Minget-Leclercq M.P. The amphiphilic nature of saponins and their effects on artificial and biological membranes and potential consequences for red blood and cancer cells. *Organic and Biomolecular Chemistry*, 2014, vol. 12, no. 44, pp. 8803-8822. <https://doi.org/10.1039/c4ob01652a>
 31. Lacaille-Dubois M.A. Updated insights into the mechanism of action and clinical profile of the immunoadjuvant QS-21: A review. *Phytomedicine*, 2019, vol. 60, article number 152905. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2019.152905>
 32. Petrovsky N. Clinical development of SpikoGen®, an Advax-CpG55.2 adjuvanted recombinant spike protein vaccine. *Human Vaccines and Immunotherapeutics*, 2024, vol. 20, no. 1, article number 2363016. <https://doi.org/10.1080/21645515.2024.2363016>
 33. Lindblad E.B. Aluminium adjuvants – in retrospect and prospect. *Vaccine*, 2004, vol. 22, no. 27-28, pp. 3658-3668. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2004.03.032>
 34. Reed S.G., Tomai M., Gale M.J., Jr. New horizons in adjuvants for vaccine development. *Current Opinion in Immunology*, 2020, vol. 65, no., pp. 97-101. <https://doi.org/10.1016/j.coi.2020.08.008>

35. Gupta R.K., Siber G.R. Comparison of adjuvant activities of aluminium phosphate, calcium phosphate and stearyl tyrosine for tetanus toxoid. *Biologicals*, 1994, vol. 22, no. 1, pp. 53-63. <https://doi.org/10.1006/biol.1994.1008>
36. Aucouturier J., Dupuis L., Ganne V. Adjuvants designed for veterinary and human vaccines. *Vaccine*, 2001, vol. 19, no. 17-19, pp. 2666-2672. [https://doi.org/10.1016/s0264-410x\(00\)00498-9](https://doi.org/10.1016/s0264-410x(00)00498-9)
37. Çokçalışkan C., Türkoğlu T., Sareyyüpoğlu B., Uzunlu E., Babak A., Özbilge B.B., Gülyaz V. QS-21 enhances the early antibody response to oil adjuvant foot-and-mouth disease vaccine in cattle. *Clinical and Experimental Vaccine Research*, 2016, vol. 5, no. 2, pp. 138-147. <https://doi.org/10.7774/cevr.2016.5.2.138>
38. Pulendran B., Arunachalam P.S., O'Hagan D.T. Emerging concepts in the science of vaccine adjuvants. *Nature Reviews Drug Discovery*, 2021, vol. 20, no. 6, pp. 454-475. <https://doi.org/10.1038/s41573-021-00163-y>
39. Gupta R.K., Rost B.E., Relyveld E., Siber G.R. *Adjuvant properties of aluminum and calcium compounds*, in Vaccine Design. Pharmaceutical Biotechnology, ed. M. F. In: Powell, Newman, M.J. (eds), Springer, Boston, MA., 1995, vol. 6, pp. 229-248.
40. Lan J., Feng D., He X., Zhang Q., Zhang R. Basic Properties and Development Status of Aluminum Adjuvants Used for Vaccines. *Vaccines*, 2024, vol. 12, no. 10, pp. 1187. <https://doi.org/10.3390/vaccines12101187>
41. Tritto E., Mosca F., De Gregorio E. Mechanism of action of licensed vaccine adjuvants. *Vaccine*, 2009, vol. 27, no. 25-26, pp. 3331-3334. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2009.01.084>
42. Xing J., Zhao X., Li X., Fang R., Sun M., Zhang Y., Song N. The recent advances in vaccine adjuvants. *Frontiers in Immunology*, 2025, vol. 16, article number 1557415. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1557415>
43. Janeway C.A., Travers P., Walport M., Shlomchik M.J. *Immunobiology*, Garland Science. New York, NY, USA, 2001. 600 p.
44. Choi J.H., You S.H., Ko M.K., Jo H.E., Shin S.H., Jo H., Lee M.J., Kim S.M., Kim B., Lee J.S., Park J.H. Improved immune responses and safety of foot-and-mouth disease vaccine containing immunostimulating components in pigs. *Journal of Veterinary Science*, 2020, vol. 21, no. 5, article number e74. <https://doi.org/10.4142/jvs.2020.21.e74>
45. Cloete M., Dungu B., Van Staden L.I., Ismail-Cassim N., Vosloo W. Evaluation of different adjuvants for foot-and-mouth disease vaccine containing all the SAT serotypes. *Onderstepoort Journal of Veterinary Research*, 2008, vol. 75, no. 1, pp. 17-31. <https://doi.org/10.4102/ojvr.v75i1.84>
46. Sandbulte M.R., Platt R., Roth J.A., Henningson J.N., Gibson K.A., Rajão D.S., Loving C.L., Vincent A.L. Divergent immune responses and disease outcomes in piglets immunized with inactivated and attenuated H3N2 swine influenza vaccines in the presence of maternally-derived antibodies. *Virology*, 2014, vol. 464-465, no. 1, pp. 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.virol.2014.06.027>
47. Ling X., Dong Z., He J., Chen D., He D., Guo R., He Q., Li M. Advances in Polymer-Based Self-Adjuvanted Nanovaccines. *Small*, 2025, vol. 21, no. 16, article number e2409021. <https://doi.org/10.1002/smll.202409021>
48. Cassaidy B.J., Moser B.A., Solanki A., Chen Q., Shen J., Gotsis K., Lockhart Z., Rutledge N., Rosenberger M.G., Dong Y., Davis D., Esser-Kahn A.P. Immune Potentiation of PLGA Controlled-Release Vaccines for Improved Immunological Outcomes. *ACS Omega*, 2024, vol. 9, no. 10, pp. 11608-11614. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06552>
49. Comberlato A., Paloja K., Bastings M.M.C. Nucleic acids presenting polymer nanomaterials as vaccine adjuvants. *Journal of Materials Chemistry B*, 2019, vol. 7, no. 41, pp. 6321-6346. <https://doi.org/10.1039/c9tb01222b>
50. Stanley A.C., Buxton D., Innes E.A., Huntley J.F. Intranasal immunisation with *Toxoplasma gondii* tachyzoite antigen encapsulated into PLG microspheres induces humoral and cell-mediated immunity in sheep. *Vaccine*, 2004, vol. 22, no. 29-30, pp. 3929-3941. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2004.04.022>
51. Roth G.A., Picece V., Ou B.S., Luo W., Pulendran B., Appel E.A. Designing spatial and temporal control of vaccine responses. *Nature Reviews Materials*, 2022, vol. 7, no. 3, pp. 174-195. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00372-2>
52. Luo Q., Ahmed W., Dai Y., Mohsin A., Hang H., Zhuang Y., Guo M. Evaluation of a Virus-like Nanoparticle Porcine Circovirus Type-2 (PCV2) Capsid Protein Fused with the Pig Immunoglobulin Fc Fragment as a Novel Vaccine Candidate against PCV2 in Mice. *Vaccines*, 2021, vol. 9, no. 10, article number 1128. <https://doi.org/10.3390/vaccines9101128>
53. Facciola A., Visalli G., Laganà A., Di Pietro A. An Overview of Vaccine Adjuvants: Current Evidence and Future Perspectives. *Vaccines*, 2022, vol. 10, no. 5, article number 819. <https://doi.org/10.3390/vaccines10050819>
54. Jeon D., Hill E., McNeel D.G. Toll-like receptor agonists as cancer vaccine adjuvants. *Human Vaccines and Immunotherapeutics*, 2024, vol. 20, no. 1, article number 2297453. <https://doi.org/10.1080/21645515.2023.2297453>
55. Hop H.T., Simborio H.L., Reyes A.W.B., Arayan L.T., Min W., Lee H.J., Kim D.H., Chang H.H., Kim S. Immunogenicity and protective effect of recombinant Brucella abortus Ndk (rNdk) against a virulent strain B. abortus 544 infection in BALB/c mice. *FEMS Microbiology Letters*, 2015, vol. 362, no. 4, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnv003>
56. Nooraei S., Sarkar Lotfabadi A., Akbarzadehmoallemkolaei M., Rezaei N. Immunogenicity of Different Types of Adjuvants and Nano-Adjuvants in Veterinary Vaccines: A Comprehensive Review. *Vaccines*, 2023, vol. 11, no. 2, pp. 453. <https://doi.org/10.3390/vaccines11020453>
57. Quandt D., Rothe K., Baerwald C., Rossol M. GPRC6A mediates Alum-induced Nlrp3 inflammasome activation but limits Th2 type antibody responses. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, article number 16719. <https://doi.org/10.1038/srep16719>
58. Seubert A., Calabro S., Santini L., Galli B., Genovese A., Valentini S., Aprea S., Colaprico A., D'Oro U., Giuliani M.M., Pallaoro M., Pizza M., O'Hagan D.T., Wack A., Rappuoli R., De Gregorio E. Adjuvant activity of the oil-in-water emulsion MF59 is independent of Nlrp3 inflammasome but requires the adaptor protein MyD88. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, vol. 108, no. 27, pp. 11169-11174. <https://doi.org/10.1073/pnas.1107941108>
59. Fossum C., Hjertner B., Ahlberg V., Charerntantanakul W., McIntosh K., Fuxler L., Balagunaseelan N., Wallgren P., Lövgren Bengtsson K. Early inflammatory response to the saponin adjuvant Matrix-M in the pig. *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 2014, vol. 158, no. 1-2, pp. 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.vetimm.2013.07.007>
60. Filipczak N., Yalamarty S.S.K., Li X., Pathirika T.V., Pinapati R., Vanjara B., Torchilin V. Neutrophil extracellular traps: Formation, pathological roles, and nanoparticle-based therapeutic targeting strategies. *Journal of Controlled Release*, 2025, vol. 387, article number 114220. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2025.114220>
61. Gantner B.N., Simmons R.M., Canavera S.J., Akira S., Underhill D.M. Collaborative induction of inflammatory responses by dectin-1 and Toll-like receptor 2. *Journal of Experimental Medicine*, 2003, vol. 197, no. 9, pp. 1107-1117. <https://doi.org/10.1084/jem.20021787>
62. Verthelyi D., Zeuner R.A. Differential signaling by CpG DNA in DCs and B cells: not just TLR9. *Trends in Immunology*, 2003, vol. 24, no. 10, pp. 519-522. [https://doi.org/10.1016/s1471-4906\(03\)00243-6](https://doi.org/10.1016/s1471-4906(03)00243-6)
63. Krieg A.M., Yi A.K., Matson S., Waldschmidt T.J., Bishop G.A., Teasdale R., Koretzky G.A., Klinman D.M. CpG motifs in bacterial DNA trigger direct B-cell activation. *Nature*, 1995, vol. 374, no. 6522, pp. 546-549. <https://doi.org/10.1038/374546a0>
64. Davis H.L., Weeratna R., Waldschmidt T.J., Tygrett L., Schorr J., Krieg A.M. CpG DNA is a potent enhancer of specific immunity in mice immunized with recombinant hepatitis B surface antigen. *The Journal of Immunology*, 1998, vol. 160, no. 2, pp. 870-876. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.160.2.870>
65. Didierlaurent A.M., Morel S., Lockman L., Giannini S.L., Bisteau M., Carlsen H., Kielland A., Vosters O., Vanderheyde N., Schiavetti F., Larocque D., Van Mechelen M., Garçon N. AS04, an aluminum salt- and TLR4 agonist-based adjuvant system, induces a transient localized innate immune response leading to enhanced adaptive

- immunity. *The Journal of Immunology*, 2009, vol. 183, no. 10, pp. 6186-6197. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.0901474>
66. Blanco-Pérez F., Goretzki A., Wolfheimer S., Schülke S. The vaccine adjuvant MPLA activates glycolytic metabolism in mouse mDC by a JNK-dependent activation of mTOR-signaling. *Molecular Immunology*, 2019, vol. 106, no., pp. 159-169. <https://doi.org/10.1016/j.molimm.2018.12.029>
67. Ryan N.M., Hess J.A., Nakhale M., Ferguson A.A., Stump W., Belko S., Monane R., Pugliese R.S., Petrovsky N., Makepeace B.L., Gray S.A., Carter D., Lustigman S., Abraham D. Vaccination against *Onchocerca volvulus* induces IgG-mediated protective immunity dependent on neutrophils and complement. *NPI Vaccines*, 2025, vol. 10, no. 1, article number 221. <https://doi.org/10.1038/s41541-025-01267-x>
68. Akin I., Akdas S., Ceylan M.N., Altiner S., Aribal Ayral P., Yazihan N. Evaluation of the safety and efficacy of Advax(TM) as an adjuvant: A systematic review and meta-analysis. *Advances in Medical Sciences*, 2022, vol. 67, no. 1, pp. 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.advms.2021.09.002>
69. Bruchard M., Rebé C., Derangère V., Togbé D., Ryffel B., Boidot R., Humblin E., Hamman A., Chalmin F., Berger H., Chevriaux A., Limagne E., Apetoh L., Végran F., Ghiringhelli F. The receptor NLRP3 is a transcriptional regulator of TH2 differentiation. *Nature Immunology*, 2015, vol. 16, no. 8, pp. 859-870. <https://doi.org/10.1038/ni.3202>
70. Lee W., Kingstad-Bakke B., Paulson B., Larsen A., Overmyer K., Marinaik C.B., Dulli K., Toy R., Vogel G., Mueller K.P., Tweed K., Walsh A.J., Russell J., Saha K., Reyes L., Skala M.C., Sauer J.D., Shayakhmetov D.M., Coon J., Roy K., Suresh M. Carbomer-based adjuvant elicits CD8 T-cell immunity by inducing a distinct metabolic state in cross-presenting dendritic cells. *PLOS Pathogens*, 2021, vol. 17, no. 1, article number e1009168. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1009168>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Ольга П. Хрипко, Дмитрий И. Коновалов, Александра В. Глущенко, Михаил А. Шестопалов и Александр Ю. Алексеев проанализировали данные, 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

Olga P. Khripko, Dmitry I. Kononov, Alexandra V. Glushchenko, Michael A. Shestopalov and Alexander Yu. Alekseev analysed the data and wrote 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

Ольга П. Хрипко / Olga P. Khripko <http://orcid.org/0000-0002-5717-1770>
 Дмитрий И. Коновалов / Dmitry I. Kononov <http://orcid.org/0000-0002-8945-9891>
 Александра В. Глущенко / Alexandra V. Glushchenko <https://orcid.org/0000-0002-5784-0073>
 Михаил А. Шестопалов / Michael A. Shestopalov <https://orcid.org/0000-0001-9833-6060>
 Александр Ю. Алексеев / Alexander Yu. Alekseev <https://orcid.org/0000-0003-0015-9305>

Оригинальная статья / Original article

УДК 630*182:631.6:338.43

DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-13



Комплексная оценка потенциала агролесоводства на землях лесного и сельскохозяйственного назначения (на примере Центральной лесостепи)

Светлана С. Морковина, Наталия В. Яковенко, Игорь В. Комов,
Николай Н. Макаренко, Елизавета А. Нацентов

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; ул. Тимирязева, д.8, г. Воронеж, Россия 394087.

Тел. +79191889232

Email n.v.yakovenko71@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4203-0040>

Формат цитирования

Морковина С.С., Яковенко Н.В., Комов И.В., Макаренко Н.Н., Нацентов Е.А. Комплексная оценка потенциала агролесоводства на землях лесного и сельскохозяйственного назначения (на примере Центральной лесостепи) // Юг России: экология, развитие. 2026. Т.21, N 2. С. 146-161. DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-13

Получена 23 января 2026 г.

Прошла рецензирование 31 марта 2026 г.

Принята 25 апреля 2026 г.

Резюме

Цель: провести комплексную количественную оценку потенциала агролесоводства на землях лесного и сельскохозяйственного назначения в Центральной лесостепи с учётом структурного дисбаланса землепользования и определить экономическую эффективность влияния защитных лесных насаждений на урожайность сельскохозяйственных культур.

Исследование выполнено на примере пяти субъектов Центральной лесостепи (Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая, Тамбовская области). Использованы данные государственной статистики, государственного лесного реестра и реестра защитных лесных насаждений Воронежской области. Применены методы сравнительно-географического, статистического и корреляционного анализа, а также триангуляция трёх методических подходов (противоэрозионного, микроклиматического, биоценотического) для обоснования потенциала агролесоводства.

Установлено, что земельный фонд региона характеризуется гипертрофированной аграризацией (доля сельхозугодий 79,3 %, распаханность 76,5 %) при критически низкой лесистости (8,9 %). Совокупный дефицит лесного покрова для достижения минимального экологического норматива (15 %) составляет 1,03 млн га. Потенциал агролесоводства на сельскохозяйственных землях определён в объёме 646–905 тыс. га, на землях лесного фонда – 159,4 тыс. га. Выделены три типологические группы регионов. Анализ состояния защитных лесных насаждений Воронежской области показал, что 89,5 % фонда находится в удовлетворительном состоянии. Экономический эффект от влияния лесных полос на урожайность основных культур составляет от 4,9 до 736,1 млн руб. в год.

Полученные количественные оценки создают научную основу для разработки региональных программ адаптивно-ландшафтного землепользования и формирования лесоклиматических проектов, направленных на увеличение углерододепонирующего потенциала территории.

Ключевые слова

Агролесоводство, лесоклиматические проекты, защитные лесные насаждения, структурный дисбаланс землепользования, дефицит лесного покрова, Центральная лесостепь.

Comprehensive Assessment of the Potential for Agroforestry on Forest and Agricultural Lands (Using the Central Forest Steppe of Russia as an Example)

Svetlana S. Morkovina, Nataliya V. Yakovenko, Igor V. Komov,
Nikolay N. Makarenko and Elizaveta A. Natsentova

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 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., Komov I.V.,
Makarenko N.N., Natsentova E.A. Comprehensive
Assessment of the Potential for Agroforestry on
Forest and Agricultural Lands (Using the Central
Forest Steppe of Russia as an Example). *South of
Russia: ecology, development*. 2026; 21(2):146-161.
(In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-13

Received 23 January 2026

Revised 31 March 2026

Accepted 25 April 2026

Abstract

The aim of the research was to comprehensively quantify the potential of agroforestry on forest and agricultural lands in the Central Forest Steppe, taking into account the structural imbalance of land use, and to determine the economic efficiency of the impact of protective forest belts on crop yields.

The research was conducted in five regions of the Central Forest Steppe (Belgorod, Voronezh, Kursk, Lipetsk, and Tambov Regions). Data from state statistics, the State Forest Register and the Register of Protective Forest Belts of the Voronezh Region were used. Comparative-geographical, statistical and correlation analysis methods were used, as well as triangulation of three methodological approaches (anti-erosion, microclimatic, biocenotic) to substantiate the potential of agroforestry.

It has been found that the region's land fund is characterised by hypertrophied agrarization (share of agricultural lands 79.3 %, plowed land 76.5 %), with critically low forest coverage (8.9 %). The total forest cover deficit for achieving the minimum environmental standard (15 %) is 1.03 million hectares. The potential of agroforestry on agricultural lands has been determined in the amount of 646–905 thousand hectares, on forest fund lands – 159.4 thousand hectares. Three typological groups of regions have been identified. Analysis of the condition of protective forest belts in the Voronezh Region showed that 89.5 % of the fund is in satisfactory condition. The economic effect from the impact of forest belts on the yield of main crops is from 4.9 to 736.1 million rubles per year.

The quantitative estimates obtained create a scientific basis for developing regional adaptive landscape land use programmes and forming forest-climatic projects aimed at increasing the area's carbon-depositing potential.

Key Words

Agroforestry, forest-climatic projects, protective forest belts, structural imbalance of land use, forest cover deficit, Central Forest Steppe.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно последним оценочным докладом Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), антропогенное воздействие уже привело к повышению глобальной температуры на 1,1 °C относительно доиндустриального уровня, что сопровождается беспрецедентными изменениями в климатической системе [1]. В смягчении этих изменений ключевая роль отводится лесным экосистемам: они поглощают значительную долю антропогенных выбросов CO₂, выступая критическим звеном глобального углеродного цикла [2]. В то же время деградация лесного покрова и нерациональное землепользование, напротив, становятся источниками дополнительной эмиссии парниковых газов, что делает необходимым разработку и реализацию эффективных мер по сохранению и восстановлению лесов [3].

Одним из наиболее перспективных направлений на пути к углеродной нейтральности и адаптации аграрного сектора к климатическим изменениям считаются природные климатические решения, включающие агролесоводство и восстановление деградированных земель [4]. Как отмечает Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО), проекты, сочетающие секвестрацию углерода с улучшением условий жизни местного населения, демонстрируют высокую устойчивость и социально-экономическую эффективность [5]. При этом Ellis с соавторами [6] формулируют пять основополагающих принципов таких решений — природную основу, устойчивость, климатическую дополнительную, измеримость и социальную справедливость, — что позволяет избежать типичных ошибок при их реализации.

Многочисленными исследованиями подтверждено, что агролесоводческие системы способствуют сохранению здоровья почв, повышению биологического разнообразия и устойчивости фермерских хозяйств к экстремальным погодным явлениям, включая засухи и обильные осадки [7]. Результаты долгосрочных экспериментов в Европе показывают, что аллейное агролесоводство стабилизирует урожайность в условиях изменчивости водного баланса. В частности, на примере семи вегетационных сезонов в Германии Koch и соавторы [8] продемонстрировали, что древесные ряды обеспечивают устойчивую продуктивность сельскохозяйственных культур при флуктуациях водообеспеченности.

При экономической оценке подобных систем принципиальное значение приобретает временной горизонт анализа. Как указывает O'Mahony [9], использование недостаточно продолжительных периодов рассмотрения способно приводить к недооценке экологических выгод, искажению результатов и, как следствие, к принятию неоптимальных инвестиционных решений.

В России и сопредельных государствах накоплен значительный эмпирический материал по количественной оценке эффективности агролесомелиоративных мероприятий. В исследовании Korneeva и Belyaev [10], выполненном на юге Русской равнины, установлено, что предотвращенный ущерб от дефляции и гибели посевов благодаря защитным лесным насаждениям составляет от 317 до 1239 евро на гектар

в год, причём эта величина существенно варьирует в зависимости от природной зоны и специализации хозяйства. Наряду с прямыми оценками ущерба, развиваются и инструментальные подходы: Kheir с соавторами [11] разрабатывают комплексные системы поддержки принятия решений для агролесоводства, интегрирующие агроэкологические, экономические и климатические показатели. Почвенные аспекты находятся в центре внимания Rolo и коллег [12], которые с позиций почвоведения обосновывают высокий адаптационный потенциал агролесоводства к изменениям климата, подчёркивая регулируемую роль древесной растительности в водном и температурном режимах.

Ресурсосберегающий потенциал агролесоводства подтверждается, в частности, результатами Suhag с соавторами [13], которые на примере аллейных систем с *Leucaena leucosephala* показали возможность сокращения применения минеральных азотных удобрений на 25 % без снижения продуктивности культуры.

Отечественная научная традиция в области агролесомелиорации насчитывает не одно десятилетие. Обобщение опыта крупномасштабных проектов в России, США, Китае и странах Африки представлено в работе Кулика с соавторами [14], где также обоснованы необходимые объёмы создания защитных насаждений для агроэкологической оптимизации землепользования. Методологический инструментарий комплексной оценки сельскохозяйственных земель Центрально-Чернозёмного региона, учитывающий пространственную неоднородность почвенного покрова и агроэкологические риски, предложен Чендевым и соавторами [15]. Теоретическое развитие это направление получило в исследованиях Иволина [16], развивающего концепции регенеративного агролесоводства и акцентирующего синергетические эффекты от интеграции древесной и травянистой растительности.

Значительный массив эмпирических данных свидетельствует о важной роли лесных полос в почвообразовании. В одной из работ [17] на примере юга Среднерусской возвышенности рассмотрены лесополосы и доказательно приведены факты, подтверждающие роль лесополос как в формировании процесса почвообразования агроландшафтов, так и концентрации органического углерода. Другая группа исследователей [18] на примере Северного Казахстана показала позитивное воздействие полезащитных лесополос на основные показатели плодородия чернозёмов, в частности содержание гумуса и доступные формы азота и фосфора. Глобальная оценка запасов органического углерода в моллисолях (чернозёмных почвах) [19], показала, что наивысшие значения наблюдаются в Восточной Европе, включая Украину, юг России и Азии, что подтверждает огромный потенциал этих регионов для реализации проектов по углеродному депонированию. Ученые Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова в монографии [20] разработали целый ряд рекомендаций для организации лесоклиматических проектов в России, в которых сформулировали подходы к сокращению выбросов и усилению поглощения парниковых газов. Также значимыми являются исследования, в которых проводится оценка агрофизических свойств почв и продуктивностью

сельскохозяйственных культур. Так, например, учеными обнаружена высокая корреляционная связь между структурным состоянием чернозёмов и урожайностью озимой пшеницы [21]. Взаимосвязи между эффектом защитных лесных насаждений и рельефом территории и полученными эффектами, а также агрофизическими и биохимическими свойствами почвы Приволжской возвышенности были доказаны группой авторов, которые указали на необходимость учета пространственных факторов при разработке агролесомелиоративных систем.

Однако, несмотря на значительное количество исследований по агролесоводству, до конца неизученным остается его потенциал на землях лесного и сельскохозяйственного назначения, и, в частности, в условиях структурного дисбаланса землепользования Центральной лесостепи. Кроме того, отсутствуют работы, посвященные количественной оценке экологической емкости и экономической выгоды от создания защитных лесных полос с учетом региональных особенностей.

Цель работы — комплексная оценка потенциала агролесоводства на землях лесного и сельскохозяйственного назначения в Центральной лесостепи с учётом структурного дисбаланса землепользования. Для её достижения потребовалось решить следующие задачи:

- 1) проанализировать структуру земельного фонда исследуемых регионов и выявить ключевые диспропорции землепользования;
- 2) количественно оценить дефицит лесного покрова для достижения экологически обоснованных нормативов лесистости;
- 3) определить потенциал агролесоводства на землях сельскохозяйственного назначения на основе конвергенции противоэрозионного, микроклиматического и биоценологического подходов;
- 4) выявить резервы для реализации агролесоводства на землях лесного фонда;
- 5) провести типологизацию регионов по степени структурного дисбаланса агроландшафтов;
- 6) дать оценку современного состояния защитных лесных насаждений и их экономической эффективности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты и источники данных

Исследование выполнено на территории пяти субъектов Центральной лесостепи: Белгородской, Воронежской, Курской, Липецкой и Тамбовской областей. Для детального изучения фонда защитных лесных насаждений (ЗЛН) в качестве модельного полигона выбрана Воронежская область как регион с наибольшей площадью агроландшафтов и наиболее полной базой данных по лесомелиоративным объектам.

Исходными материалами послужили:

- данные Государственного (национального) доклада о состоянии и использовании земель в Российской Федерации (2025 г.) — для анализа структуры земельного фонда [1];
- сведения государственного лесного реестра (на 01.01.2025) — для оценки земель лесного фонда, пригодных для агролесоводства [2];
- реестр защитных лесных насаждений Воронежской области (18 694 объекта) — для анализа

морфометрических характеристик, породного состава и состояния [3];

- статистические сборники Росстата, Росавиации, РЖД — для расчёта частных показателей (в контексте общей методологии) [4];
- открытые источники цен реализации и себестоимости сельскохозяйственных культур (2024 г.) — для экономической оценки [5].

Анализ структурного дисбаланса землепользования

Для количественной оценки диспропорций в землепользовании рассчитывались следующие показатели по каждому региону i :

1. Доля сельскохозяйственных угодий в общей площади территории:

$$\text{Доля с/х угодий}_i = \frac{S_{\text{сх},i}}{S_{\text{общ},i}} \times 100\%, \quad (1)$$

где $S_{\text{сх},i}$ — площадь сельскохозяйственных угодий, тыс. га; $S_{\text{общ},i}$ — общая площадь региона, тыс. га.

2. Уровень распаханности (доля пашни в площади сельхозугодий):

$$\text{Распаханность}_i = \frac{S_{\text{паш},i}}{S_{\text{сх},i}} \times 100\%, \quad (2)$$

где $S_{\text{паш},i}$ — площадь пашни, тыс. га.

3. Фактическая лесистость:

$$L_{\text{ф},i} = \frac{S_{\text{лес},i}}{S_{\text{общ},i}} \times 100\%, \quad (3)$$

где $S_{\text{лес},i}$ — площадь земель лесного фонда, тыс. га.

Для оценки пространственной концентрации земель лесного фонда использовался индекс Херфиндала-Хиршмана (HHI) и коэффициент вариации (CV). Корреляционный анализ (коэффициент Пирсона, r) применялся для выявления связи между лесистостью и долей сельхозугодий, а также между лесистостью и распаханностью [6; 7].

Расчёт дефицита лесного покрова

Дефицит лесного покрова для каждого субъекта определялся как разность между нормативной (целевой) лесистостью и фактической, умноженная на площадь территории. Расчёт выполнялся для двух сценариев: минимальный экологический норматив $L_{\text{н}, \text{min}} = 15\%$ и оптимальный $L_{\text{н}, \text{opt}} = 25\%$, обоснованные для лесостепной зоны [8; 9].

Для минимального норматива:

$$D_i^{(\text{min})} = \frac{L_{\text{н}, \text{min}} - L_{\text{ф},i}}{100} \times S_{\text{общ},i}, \quad (4)$$

Для оптимального норматива:

$$D_i^{(\text{opt})} = \frac{L_{\text{н}, \text{opt}} - L_{\text{ф},i}}{100} \times S_{\text{общ},i}, \quad (5)$$

где D_i — дефицит лесного покрова в i -м регионе, тыс. га; $L_{\text{ф},i}$ — фактическая лесистость, %; $S_{\text{общ},i}$ — общая площадь региона, тыс. га.

Определение потенциала агролесоводства на землях сельскохозяйственного назначения

Потенциал агролесоводства ($P_{\text{агр},i}$) рассчитывался как доля от площади основных сельскохозяйственных

угодий (пашня, сенокосы, пастбища). Коэффициент k (доля угодий, подлежащая трансформации в агролесоводческие системы) обоснован с помощью триангуляции трёх независимых методических подходов [8–11].

1. Противозерозионный расчёт. На основе модифицированной модели USLE (Universal Soil Loss Equation) для условий лесостепи установлено, что для снижения фактора растительного покрова (C) с 0,5 до 0,3 (допустимый уровень эрозионных потерь) требуется создание защитных лесных насаждений на 5,5–6,5 % площади водосборов [10; 11]. Региональные параметры эродированности почв приняты по [12].

2. Микроклиматическое моделирование. Для обеспечения снижения скорости ветра на 35–40 % при стандартных параметрах (высота насаждений $H = 18$ м, расстояние между полосами $S = 500$ м) необходимая линейная плотность сети составляет 38,9 м/га, что в пересчёте на площадь, занимаемую древесно-кустарниковой растительностью с учётом зоны корневого влияния, соответствует 6,0–6,5 % обслуживаемой территории пашни [8; 13].

3. Биоценотический критерий. Согласно теории островной биогеографии и концепции экологических сетей, для поддержания минимально жизнеспособных популяций ключевых видов-индикаторов (опылители, энтомофаги) и обеспечения экосистемных услуг необходимо сохранение не менее 7 % площади агроландшафта в виде связанных природных элементов [10; 11].

Конвергенция трёх подходов позволила принять диапазон $k = 0,05–0,07$ (5–7 %) от площади сельхозугодий. Таким образом, потенциал агролесоводства на сельскохозяйственных землях определялся по формуле:

$$P_{\text{агр},i} = k \cdot S_{\text{сх},i}, \quad (6)$$

где $S_{\text{сх},i}$ – площадь пашни, сенокосов и пастбищ в i -м регионе, тыс. га.

Оценка потенциала агролесоводства на землях лесного фонда

На землях лесного фонда выявлены три категории участков, пригодных для ведения агролесоводства в соответствии с Приказом Минприроды России от 02.07.2020 № 408 [14]:

- нелесные земли, пригодные для сельскохозяйственного использования (пашни, сенокосы, пастбища);
- фонд лесовосстановления (вырубки, гари, прогалины, пустыри);
- земли сельскохозяйственного назначения, переведённые в лесной фонд.

Площади этих категорий определены по данным государственного лесного реестра на 01.01.2025 [2].

Анализ состояния защитных лесных насаждений (на примере Воронежской области)

Фонд ЗЛН Воронежской области (18 694 объекта) проанализирован по следующим параметрам.

Морфометрические показатели для каждого муниципального района:

- количество лесополос (N);
- общая площадь (S , га);

- средняя площадь одной лесополосы:

$$S_{\text{ср}} = \frac{S}{N}. \quad (7)$$

- плотность сети (количество лесополос на 1000 га сельскохозяйственных угодий):

$$\rho = \frac{N}{S_{\text{сх}}} \times 1000, \quad (8)$$

где $S_{\text{сх}}$ – площадь сельхозугодий района, га.

Пространственная концентрация оценивалась с помощью индекса Херфиндала-Хиршмана (HNI) и коэффициента вариации (CV) [3; 15]:

$$HNI = \sum_{j=1}^n \left(\frac{S_j}{S_{\text{сум}}} \right)^2, \quad (9)$$

где n – число районов; S_j – площадь ЗЛН в j -м районе; $S_{\text{сум}}$ – общая площадь ЗЛН области.

Породный состав анализировался по встречаемости древесных пород (доля от общего числа упоминаний в реестре). Выделены доминирующие таксоны и функциональные группы.

Состояние насаждений классифицировано по трём категориям: удовлетворительное, плохое (требует реформирования), неопределённое. Для группировки муниципальных районов использован уровень стабильности (YC) – доля насаждений в удовлетворительном состоянии (%). Выделены три группы:

- стабильные ($YC \geq 95\%$);
- напряжённые ($85\% \leq YC < 95\%$);
- критические ($YC < 85\%$).

Формы собственности определены по данным реестра: государственная, неразграниченная, частная, муниципальная. Для каждой формы рассчитаны показатели сохранности (доля удовлетворительных насаждений).

Экономическая оценка влияния лесных полос на урожайность

Расчёт экономического эффекта выполнен для семи основных сельскохозяйственных культур (пшеница, кукуруза на зерно, ячмень, овёс, горох, подсолнечник, сахарная свёкла) с использованием следующих формул и допущений [4; 5; 16; 17].

- 1. Защищённая площадь пашни** определялась через коэффициент защитного действия α (принят 40 га пашни на 1 га лесополос) и поправочный коэффициент $\beta = 0,9$ (учитывает конструкцию и состояние полос):

$$S_{\text{защ}} = \alpha \cdot \beta \cdot S_{\text{ЗЛН}}, \quad (10)$$

где $S_{\text{ЗЛН}}$ – общая площадь лесных полос, га (38 980,6 га).

- 2. Расчётная площадь под культурой** распределялась пропорционально доле культуры в общей посевной площади:

$$S_{\text{к},i} = \frac{P_{\text{пос},i}}{P_{\text{общ}}} \cdot S_{\text{защ}}, \quad (11)$$

где $P_{\text{пос},i}$ – посевная площадь i -й культуры, тыс. га; $P_{\text{общ}}$ – общая посевная площадь региона, тыс. га.

3. **Прибавка урожайности** принималась как 10 % от средней региональной урожайности:

$$\Delta U_i = 0,1 \cdot U_{\text{ср},i}, \quad (12)$$

где $U_{\text{ср},i}$ – средняя урожайность i -й культуры, т/га.

4. **Дополнительный сбор** (ΔV_i) рассчитывался по формуле:

$$\Delta V_i = \Delta U_i \cdot S_{\text{к},i}. \quad (13)$$

5. **Экономический эффект** (ΔE_i) определялся как разность между выручкой от дополнительного сбора и переменными затратами:

$$\Delta E_i = \Delta V_i \cdot (P_{\text{ц},i} - C_i), \quad (14)$$

где $P_{\text{ц},i}$ – цена реализации i -й культуры, руб./т; C_i – себестоимость производства, руб./т.

Для оценки чувствительности результатов варьировался коэффициент защитного действия α в диапазоне 20–50 га/га.

Статистическая обработка

Статистическая обработка данных выполнена с использованием пакетов Microsoft Excel и Statistica 12. Применялись методы описательной статистики (среднее арифметическое, стандартное отклонение, коэффициент вариации), корреляционный анализ (коэффициент Пирсона), кластеризация (метод k-средних), расчёт индексов концентрации. Для оценки достоверности различий между группами использовался t-критерий Стьюдента при уровне значимости $p < 0,05$.

Построение картографических материалов выполнено в среде QGIS версии 3.28 (с использованием встроенных инструментов геообработки) и в среде Python с библиотеками geopandas, matplotlib, contextily для создания картограмм и тематических карт. Для построения тепловых карт и диаграмм использованы библиотеки seaborn и matplotlib.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с поставленными задачами в данном разделе представлены количественные результаты комплексной оценки потенциала агролесоводства в Центральной лесостепи. Исследование выполнено по единой методологической схеме, включающей анализ структуры земельного фонда, расчёт дефицита лесного покрова, определение потенциала на землях сельскохозяйственного и лесного назначения, типологизацию регионов по степени структурного дисбаланса, оценку современного состояния защитных лесных насаждений (на примере Воронежской области) и экономическую эффективность их влияния на урожайность.

Проведённый анализ структуры земельного фонда пяти субъектов Центральной лесостепи (Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая, Тамбовская области) выявил доминирование сельскохозяйственных угодий во всех регионах. Средневзвешенная доля сельскохозяйственных угодий составила 79,3 %, варьируя от 78,0 % в Воронежской области до 81,2 % в Курской и Липецкой областях. Статистически значимый разрыв между максимальным и минимальным значением (5,0 процентных пункта) при медиане 78,4 % подтверждает универсальность аграрной специализации макрорегиона при наличии

региональных особенностей. Наибольшая вариабельность наблюдается в распределении земель населённых пунктов. Курская область демонстрирует аномально высокий показатель (10,1 %), превосходящий значение Тамбовской области (3,8 %) в 2,7 раза.

Наиболее ярко выражена устойчиво обратная корреляция между площадью территории и долей УЗ. Коэффициент r , равный -0,71, свидетельствует о том, что сосредоточение и распределение поселенческой инфраструктуры приходится на малоземельные субъекты. В разделе земель лесного фонда выявлена статистически значимая дифференциация. Так, максимальной лесистостью выделяется Тамбовская область – 10,9 %, минимальной – Липецкая – 7,4 %. Имеет место разрыв в 3,5 %, который обусловлен федеральными программами лесовосстановления. Сильная обратная зависимость также обнаружена между долей лесных угодий и ДСХ ($r = -0,81$). В общей сложности, средневзвешенная лесистость составляет 8,9 %. Это более чем в два раза ниже научно-обоснованного оптимума для лесостепной зоны (15–25 %). Значительная дифференциация прослеживается и в структуре земельного запаса. Доля Курской области (0,5 %) превышает аналогичный показатель Липецкой области (0,04 %) в 12,5 раза, что свидетельствует о высокой степени хозяйственной освоённости последней. Белгородская, Воронежская и Тамбовская области (0,2 %, 0,2 % и 0,08 % соответственно) образуют статистически однородную группу по данному параметру (рис. 1).

В соответствии с этим, можно утверждать, что земельный фонд Центральной лесостепи характеризуется системным структурным дисбалансом, который заключается в гипертрофированной аграризации (79,3 % сельскохозяйственных угодий), высокой распаханности (в среднем 76,5 % пашни от площади сельскохозяйственных угодий) и критической редукцией лесного покрова (8,9 % лесистости) при минимальных резервах неиспользуемых земель. Этими характеристиками выступают объективной основой для определения экологических рисков и расчёта потенциала экологической реставрации.

Анализ уровня распаханности показал его высокие значения во всех исследуемых регионах. Средневзвешенный показатель составил 76,5 %. Максимальный уровень распаханности наблюдается в Курской области (85,6 %), что на 9,1 % выше среднего показателя (рис. 2, 3).

Минимальное значение отмечено в Воронежской области (72,9 %), однако и оно остается крайне высоким. Размах вариации составляет 12,7 %, коэффициент вариации – 5,8 %. Данные показатели говорят о сравнительно однородной структуре землепользования, в которой, однако, наблюдаются локальные экстремумы. Немаловажным является тот факт, что фактические значения распаханности в 1,3–1,7 раза превышают научно-обоснованный экологически допустимый оптимум для лесостепной зоны (50–60 %). Высокая доля пашни обуславливает предпосылки для развития деградационных процессов, которые приводят к ухудшению водной и ветровой эрозии, а также снижению содержания органического вещества в почвах, нарушению гидрорежима территории, повышению плотности почвы и сокращению биоразнообразия. Среди регионов Центральной

лесостепи особенно выделяется Курская область, в которой распаханность составляет 85,6 %. Этот показатель является одним из самых высоких не только для областей Центрального Черноземья, но и для всей России. В связи с этим агрогенная нагрузка требует незамедлительных адаптивных мероприятий по экологической оптимизации агроландшафтов. Что касается лесистости регионов, то фактическая лесистость варьируется от 7,4 % в Липецкой области до 10,9 % в Тамбовской области. Средневзвешенное значение составляет 8,9 %, что более чем в два раза ниже научно обоснованного минимума для лесостепной зоны (15–25 %). Установлена сильная обратная корреляция между долей лесных земель и

сельскохозяйственных угодий ($r=-0,81$), что подтверждает конкурентный характер землепользования. Расчет дефицита лесного покрова по формулам (4) и (5) показал, что для достижения минимального экологического норматива (15 % лесистости) совокупный дефицит по пяти регионам составляет 1026,2 тыс. га, а для оптимального норматива (25 %) – 2704,8 тыс. га (таблица 1, рис. 4). Наибольший абсолютный дефицит наблюдается в Воронежской области (349,8–872,0 тыс. га), тогда как наибольший относительный дефицит (разрыв между нормативным и фактическим значением) определяется для Курской области (6,8 процентных пункта при нормативе 15 %).

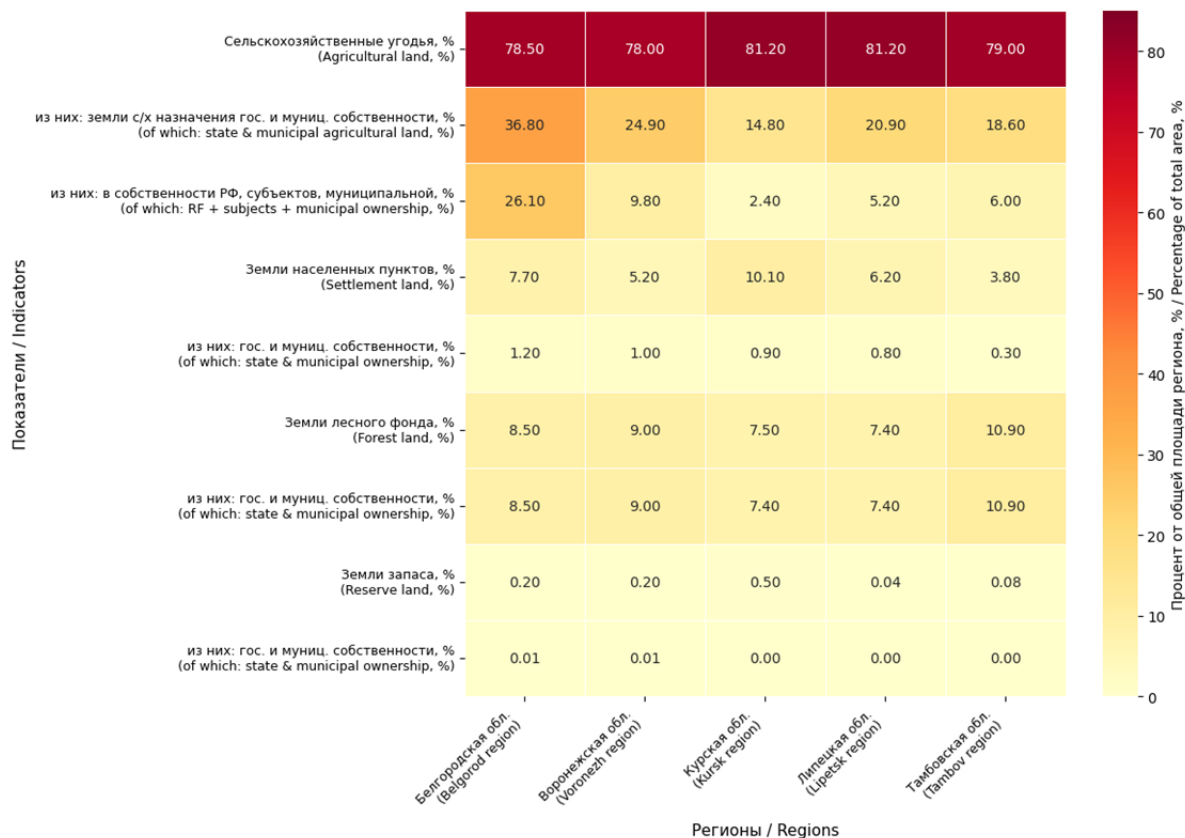


Рисунок 1. Структура земельного фонда Центральной лесостепи, %

Figure 1. Structure of the land fund in the Central Forest-Steppe, %

Суммарная площадь основных сельскохозяйственных угодий, включающих пашню, сенокосы и пастбища, в пяти исследуемых регионах составляет 12 922,9 тыс. га. На основе конвергенции трёх независимых методических подходов – противоэрозионного, микроклиматического и биоценотического – обоснована необходимая доля защитных лесных насаждений в структуре агроландшафта, которая составляет 5–7 % от площади сельскохозяйственных угодий. Расчёт по формуле (6) с использованием минимального ($k = 0,05$) и оптимального ($k = 0,07$) значений коэффициента позволил определить потенциал агролесоводства: при $k = 0,05$ – 646,1 тыс. га, при $k = 0,07$ – 904,6 тыс. га. Наибольший абсолютный потенциал характерен для Воронежской области (198,8–278,4 тыс. га), наименьший – для Липецкой области (95,9–134,2 тыс. га) (табл. 2, рис. 5).

В составе земель лесного фонда на основе данных государственного лесного реестра идентифицированы три категории участков, пригодных для ведения агролесоводства: пригодные нелесные земли (пашни, сенокосы, пастбища) площадью 15,8 тыс. га, фонд лесовосстановления (вырубки, гари, прогалины) – 17,6 тыс. га, а также земли сельскохозяйственного назначения, переведённые в лесной фонд, – 126,0 тыс. га. Суммарный потенциал агролесоводства на землях лесного фонда составляет 159,4 тыс. га. Наибольшими резервами характеризуются Воронежская (75,2 тыс. га) и Орловская (72,7 тыс. га) области, что обусловлено значительными объёмами сельскохозяйственных земель, ранее переведённых в лесной фонд (табл. 3).

Пространственное распределение указанных резервов представлено на рисунке 7.

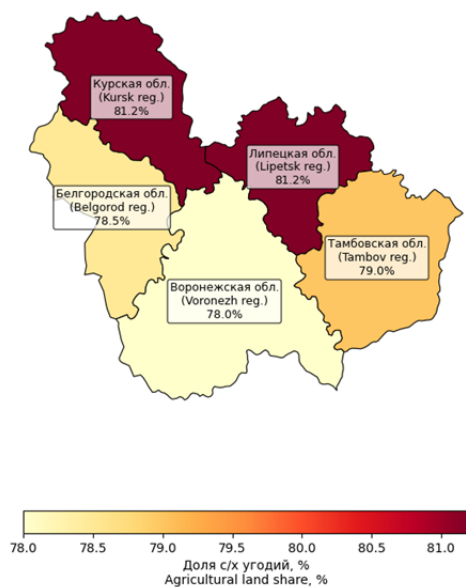


Рисунок 2. Доля сельскохозяйственных угодий в Центральной лесостепи, %
Figure 2. Share of agricultural land in the Central Forest-Steppe, %

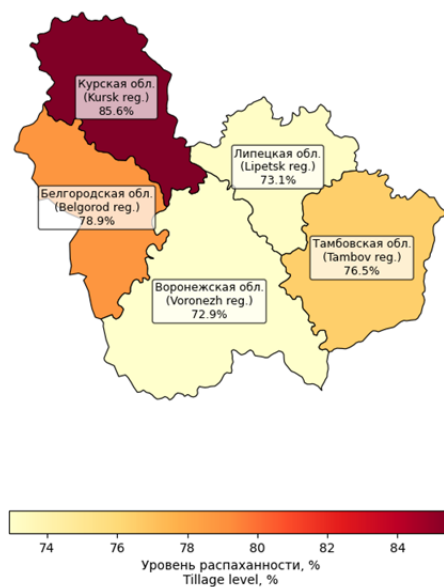


Рисунок 3. Уровень распаханности в Центральной лесостепи, %
Figure 3. Ploughing level in the Central Forest-Steppe, %

Таблица 1. Дефицит лесного покрова по регионам Центральной лесостепи

Table 1. Forest cover deficit in the regions of the Central Forest-Steppe

Субъект РФ Subject of the Russian Federation	Общая площадь, тыс. га Total Area, Thousand ha	Фактическая лесистость, % Actual Forest Cover, %	Дефицит при нормативе 15 %, тыс. га Deficit at 15 % Standard, Thousand ha	Дефицит при нормативе 25 %, тыс. га Deficit at 25 % Standard, Thousand ha
Белгородская область Belgorod region	2 713,4	8,8	168,2	439,6
Воронежская область Voronezh region	5 221,6	8,3	349,8	872,0
Курская область Kursk region	2 999,7	8,2	204,0	503,9
Липецкая область Lipetsk region	2 404,7	8,8	149,1	389,6
Тамбовская область Tambov region	3 446,2	10,5	155,1	499,7
Итого / Total	16 785,6	8,9*	1 026,2	2 704,8

Примечание / Note: * – средневзвешенное значение / weighted average value

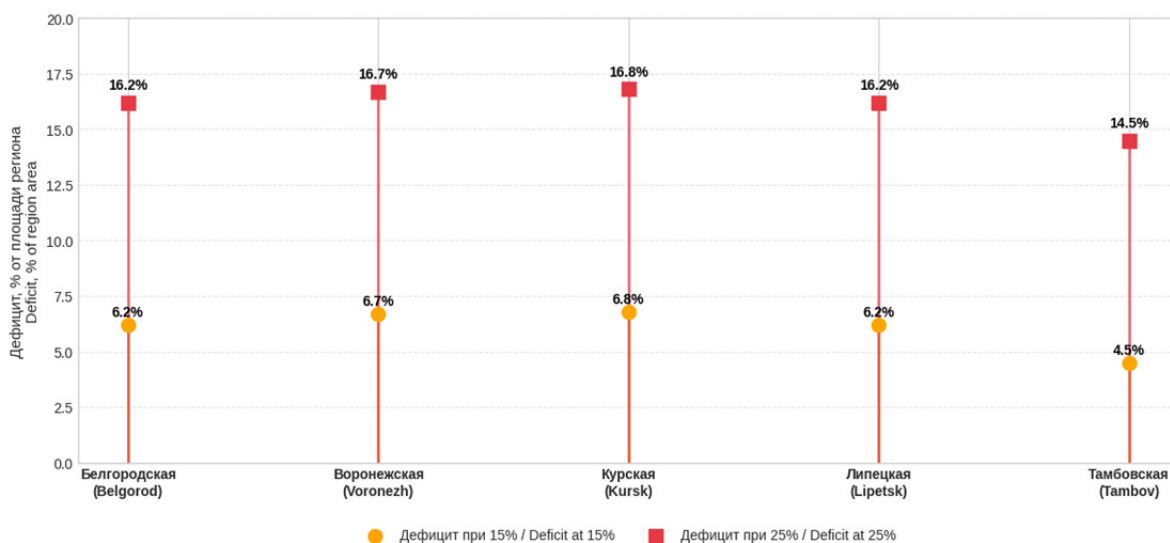


Рисунок 4. Дефицит лесного покрова, %
Figure 4. Forest cover deficit, %

Таблица 2. Потенциал агролесоводства на сельскохозяйственных землях**Table 2.** Potential of agroforestry on agricultural lands

Регион Region	Площадь с/х угодий, тыс. га Agricultural Land Area, Thousand ha	Потенциал (k=0,05), тыс. га Potential (k=0.05), Thousand ha	Потенциал (k=0,07), тыс. га Potential (k=0.07), Thousand ha
Белгородская область Belgorod region	2 097,3	104,9	146,8
Воронежская область Voronezh region	3 976,8	198,8	278,4
Курская область Kursk region	2 407,2	120,4	168,5
Липецкая область Lipetsk region	1 917,4	95,9	134,2
Тамбовская область Tambov region	2 681,0	134,1	187,7
Итого / Total	13079,7	654,1	915,6

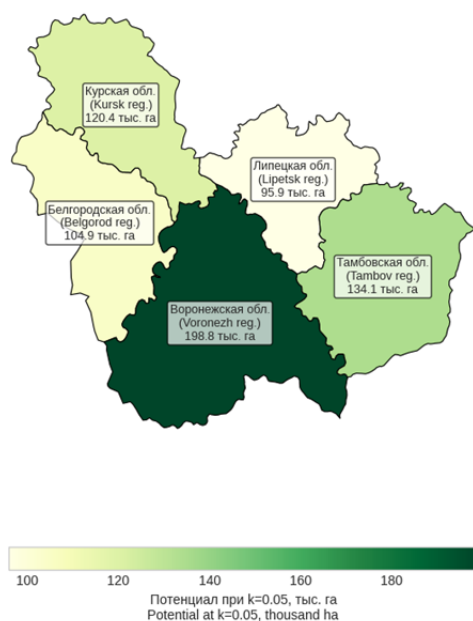


Рисунок 5. Потенциал агролесоводства на сельскохозяйственных землях (k=0,05, тыс. га)
Figure 5. Potential of agroforestry on agricultural lands (k = 0.05), thousand ha

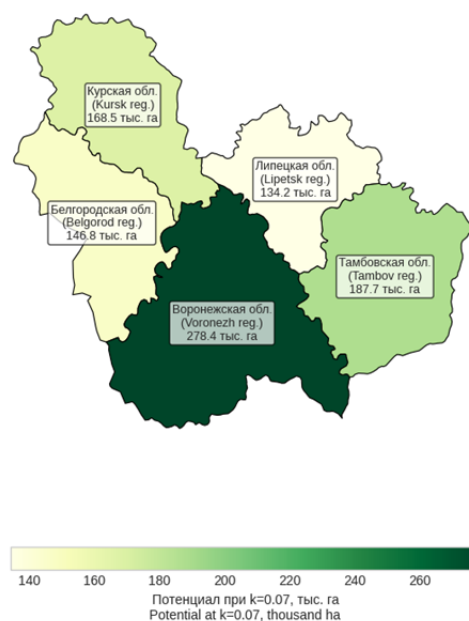


Рисунок 6. Потенциал агролесоводства на сельскохозяйственных землях (k=0,07, тыс. га)
Figure 6. Potential of agroforestry on agricultural lands (k = 0.07), thousand ha

На основе проведённого анализа с учетом уровня распаханности и фактической лесистости территории можно выделить три типа регионов в Центральной лесостепи:

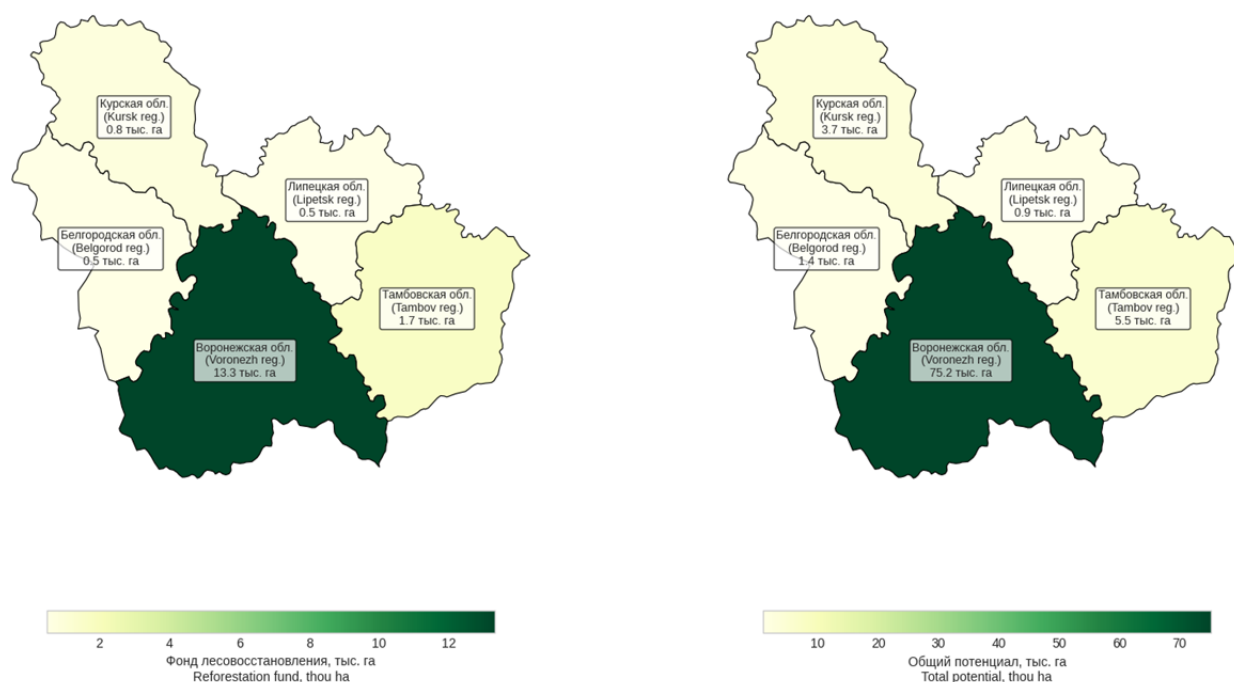
1. Зона критического дисбаланса – Курская область. Для этой зоны характерна экстремально высокая распаханность (85,6 %) и минимальная лесистость (8,2 %). Имеющийся потенциал агролесоводства сможет закрыть дефицит лесного покрова не более 50–75 %. Уровень экологического риска – критический, поэтому необходимы радикальные меры по созданию новых защитных лесополос и перевода эрозионно-опасной пашни под многолетние насаждения.
2. Вторая зона – Зона выраженного риска. В нее вошли Белгородская, Воронежская и Липецкая области. Уровень распаханности составляет 73–79 %, лесистость – низкая (8,3–8,8 %). Однако потенциал агролесоводства может компенсировать от 60 до 90 %

недостаточного уровня лесистости. Уровень экологического риска – высокий, но в отличие от первой группы он ещё поддаётся управлению.

3. Третья зона – Зона структурной контрастности. Входит один субъект Центральной лесостепи – Тамбовская область, которая на фоне соседствующих регионов выделяется относительно высоким уровнем лесистости – 10,9 %. Распаханность составляет 76,5 %. Благодаря этому потенциал агролесоводства оценивается в 136–191 тыс. га, что позволяет практически на 100 % восполнить локальный дефицит лесной площади и выйти на минимальный экологический норматив в 15 %. Экологически риск – умеренно высокий. Адаптационный потенциал региона формирует реальную основу для перехода от конфликтного сосуществования к взаимовыгодному балансу между аграрным производством и природными экосистемами.

Таблица 3. Потенциал агролесоводства на землях лесного фонда**Table 3.** Potential of agroforestry on forest fund lands

Регион Region	Фонд лесовосстановления, тыс. га Reforestation Fund, Thousand ha	Пригодные нелесные земли, тыс. га Suitable Non-Forest Lands, Thousand ha	Переведённые с/х земли, тыс. га Converted Agricultural Lands, Thousand ha	Всего, тыс. га Total, Thousand ha
Белгородская область Belgorod region	0,5	0,9	0,0	1,4
Воронежская область Voronezh region	13,3	8,3	53,6	75,2
Курская область Kursk region	0,8	2,9	0,0	3,7
Липецкая область Lipetsk region	0,5	0,4	0,0	0,9
Орловская область Oryol region	0,8	0,6	71,3	72,7
Тамбовская область Tambov region	1,7	2,7	1,1	5,5
Итого / Total	17,6	15,8	126	159,4

**Рисунок 7.** Потенциал агролесоводства на землях лесного фонда, тыс. га**Figure 7.** Potential of Agroforestry on Forest Fund lands, Thousand ha

Для более детального анализа состояния защитных лесных насаждений и оценки их экономической эффективности в качестве модельного региона выбрана Воронежская область.

Во-первых, Воронежская область характеризуется наибольшей площадью сельхозугодий субъектов ЦЧР (3976,8 тыс. га) и этот факт обеспечивает репрезентативность получаемых результатов для всей лесостепной зоны. Во-вторых, здесь зафиксирован один из самых высоких абсолютных показателей потенциала агролесоводства (198,8–278,4 тыс. га), что делает регион ключевым с точки зрения планирования масштабных лесомелиоративных мероприятий. В-

третьих, для Воронежской области имеется наиболее полная и детализированная база данных по защитным лесным насаждениям (реестр ЗЛН, включающий 18 694 объекта), что позволяет провести углублённый анализ их морфометрических характеристик, состояния и пространственной структуры. Таким образом, Воронежская область выступает в качестве репрезентативного полигона, на примере которого можно выявить закономерности, характерные для всей Центральной лесостепи, и получить количественные оценки, необходимые для обоснования экономической эффективности агролесоводства.

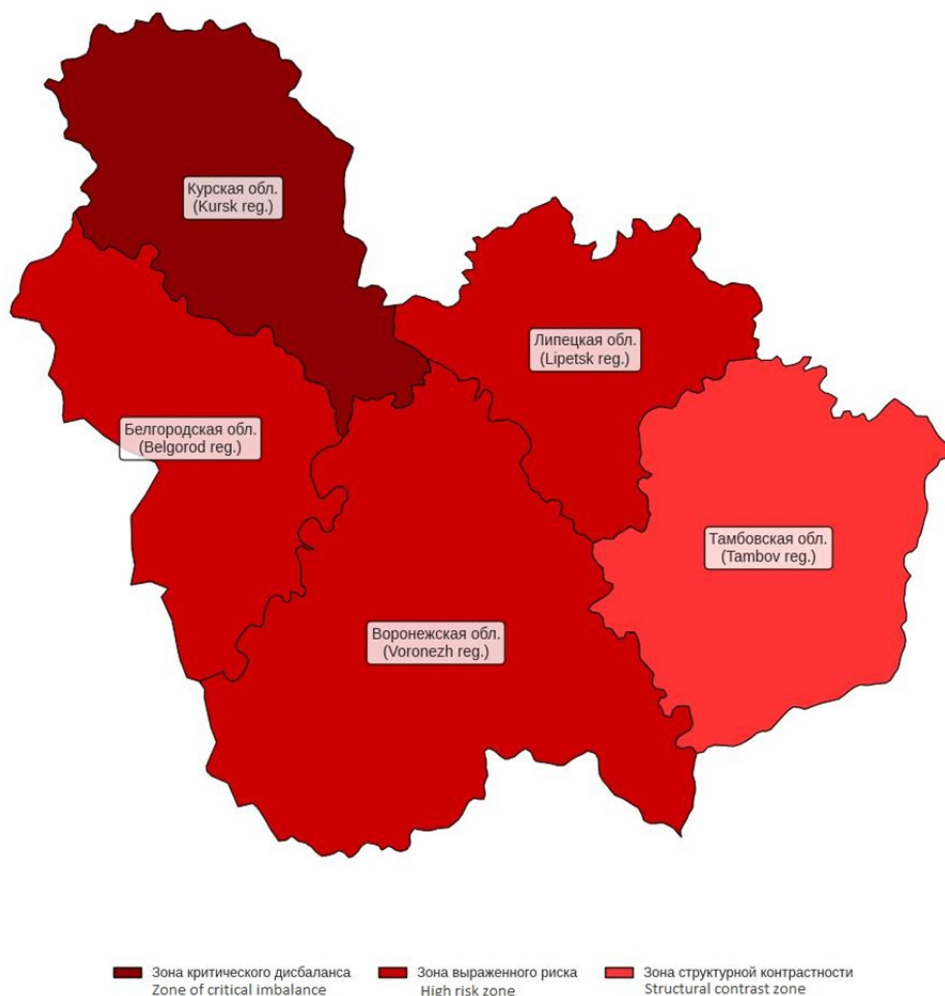


Рисунок 8. Типология регионов Центральной лесостепи по степени структурного дисбаланса агроландшафтов
Figure 8. Typology of the Central Forest-Steppe regions by the degree of structural imbalance of agro-landscapes

Фонд защитных лесных насаждений Воронежской области насчитывает 18 694 объекта общей площадью 38 980,6 га. Анализ пространственного распределения выявил экстремальную дифференциацию: более трети совокупной площади (36,3 %) сконцентрировано в пяти муниципальных районах, при этом индекс Херфиндаля-Хиршмана ($HNI = 0,092$) подтверждает умеренно высокий уровень территориальной концентрации. По состоянию насаждений 89,5 % фонда (34 968,37 га) находится в удовлетворительном состоянии, 10,0 % (3 524,29 га) требует переформирования, остальные 0,5 % имеют неопределённый статус. На основе показателя уровня стабильности (УС), определяемого как доля насаждений в удовлетворительном состоянии, проведена группировка муниципальных районов. К стабильным отнесены 25 районов, где $УС \geq 95\%$; напряжёнными признаны 4 района с $85\% \leq УС < 95\%$; критическое состояние ($УС < 85\%$) зафиксировано в трёх районах, причём в Подгоренском районе доля удовлетворительных насаждений составила 0 %.

Для наглядной иллюстрации пространственной неоднородности состояния ЗЛН построена картограмма Воронежской области, на которой муниципальные районы раскрашены в соответствии с выделенными группами стабильности (рис. 9).

Проведённый анализ фонда защитных лесных насаждений Воронежской области позволил не только охарактеризовать пространственную дифференциацию

и текущее состояние защитных лесов, но и количественно оценить площади насаждений, утративших мелиоративные функции. Такие участки, требующие первоочередной реконструкции, занимают 3524,29 га. Установлено, что более трети общей площади защитных лесов (36,3 %) сосредоточено в пяти муниципальных районах; значение индекса Херфиндаля — Хиршмана ($HNI = 0,092$) свидетельствует об умеренно высоком уровне территориальной концентрации. В результате группировки районов по показателю стабильности («УС») выделены 25 стабильных районов («УС» $\geq 95\%$), 4 напряжённых района ($85\% \leq УС < 95\%$) и 3 критические территории («УС» $< 85\%$). К последней группе относится, в частности, Подгоренский район, где зафиксирована полная деградация фонда защитных насаждений. Полученные количественные характеристики состояния ЗЛН — их площадь, сохранность и пространственное распределение — создают необходимую основу для перехода к экономической оценке влияния лесных полос на продуктивность сельскохозяйственных культур. Имея в распоряжении данные о фактической площади защитных насаждений (38 980,6 га) и их качественном состоянии, представляется возможным рассчитать потенциальный прирост урожайности основных сельскохозяйственных культур в зоне мелиоративного влияния лесополос, а также определить экономический эффект, выраженный в стоимостных показателях.

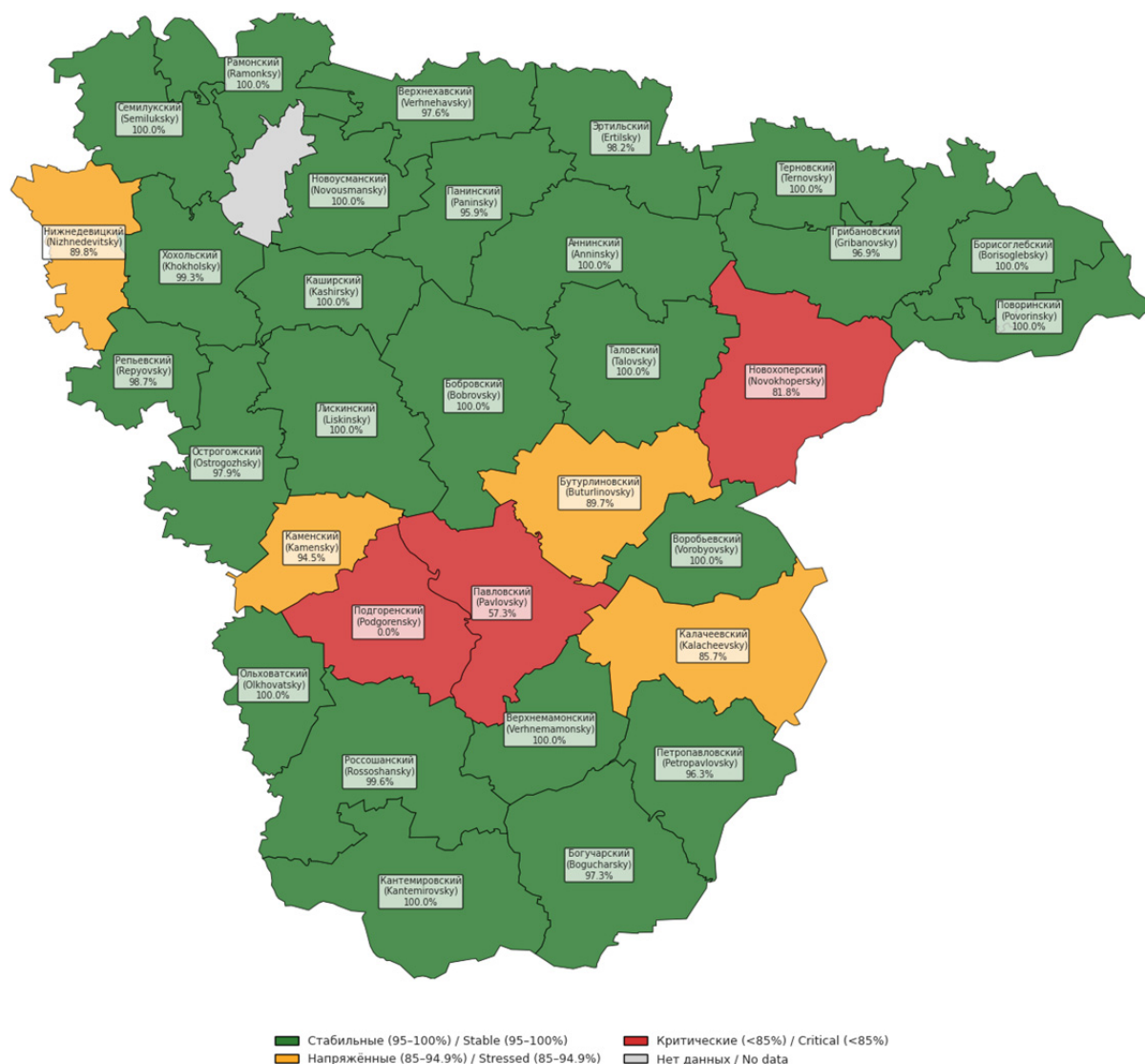


Рисунок 9. Уровень стабильности защитных лесных насаждений по районам Воронежской области, %
Figure 9. Stability level of protective forest stands in the districts of Voronezh region, %

Выявленные в предыдущих разделах структурный дисбаланс землепользования, значительный дефицит лесного покрова и неудовлетворительное состояние значительной части защитных лесных насаждений требуют не только экологического, но и экономического обоснования мероприятий по восстановлению и созданию новых лесополос. Ключевым аргументом в пользу инвестирования в агролесомелиорацию является положительное влияние лесных полос на урожайность сельскохозяйственных культур, которое выражается в стабилизации микроклиматических условий, снижении эрозионных процессов, улучшении водного режима почв и, как следствие, в увеличении продуктивности агроценозов [2; 5; 16].

Для количественной оценки экономического эффекта от воздействия защитных лесных насаждений на урожайность сельскохозяйственных культур в настоящем исследовании использован расчётный метод, основанный на следующих допущениях [4; 5; 16]:

- общая площадь защитных лесных насаждений Воронежской области составляет 38 980,6 га;
- коэффициент защитного действия (α) принят равным 40 га защищаемой пашни на 1 га лесополос, что

соответствует средним значениям для лесостепной зоны;

- поправочный коэффициент ($\beta = 0,9$) учитывает конструктивные особенности и современное состояние насаждений;
- прибавка урожайности под влиянием лесных полос принята в размере 10 % от средней региональной урожайности культуры, что подтверждается многолетними полевыми наблюдениями [16; 20];
- экономический эффект рассчитан как разность между выручкой от дополнительного сбора продукции и переменными затратами на её производство.

Расчёты выполнены для семи основных сельскохозяйственных культур, формирующих структуру посевных площадей региона: пшеница озимая и яровая, кукуруза на зерно, ячмень, овёс, горох, подсолнечник, сахарная свёкла. Результаты расчётов представлены в таблице 4.

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы. Наибольший экономический эффект достигается для высокомаржинальных культур – сахарной свёклы (736,1 млн руб.), подсолнечника (703,6 млн руб.) и пшеницы (419,0 млн руб.). При этом дополнительный сбор сахарной свёклы (272,7 тыс. т) в

2,6 раза превышает аналогичный показатель для пшеницы (104,8 тыс. т), что объясняется высокой исходной урожайностью культуры и значительными посевными площадями. Наименьший эффект характе-

рен для овса (4,9 млн руб.) и гороха (54,9 млн руб.), что связано с относительно небольшой долей этих культур в структуре посевных площадей региона (рис. 10).

Таблица 4. Экономический эффект от влияния лесных полос на урожайность сельскохозяйственных культур ($\alpha = 40$ га/га)

Table 4. Economic effect of the influence of forest strips on crop yields ($\alpha = 40$ ha/ha)

Культура Crop	Посевная площадь, тыс. га Sown Area, Thousand ha	Средняя урожайность, т/га Average Yield, t/ha	Дополнительный сбор, тыс. т Additional Yield, Thousand t	Экономический эффект, млн руб. Economic Effect, Million rub.
Пшеница / Wheat	623,5	2,83	104,8	419,0
Кукуруза на зерно Grain corn	212,0	4,49	55,7	144,9
Ячмень / Barley	310,0	2,45	40,9	237,3
Овёс / Oats	22,4	2,05	2,5	4,9
Горох / Peas	39,2	1,45	3,1	54,9
Подсолнечник Sunflower	535,7	2,22	64,0	703,6
Сахарная свёкла Sugar beet	129,8	38,90	272,7	736,1

Для оценки устойчивости полученных результатов проведён анализ чувствительности экономического эффекта к изменению коэффициента защитного действия α (таблица 5). Варьирование α в диапазоне от 20 до 50 га обуславливает пропорциональное изменение защищённой площади пашни, и приводит к

дополнительному сбору продукции. Например, экономический эффект для пшеницы может составить от 209,5 млн руб. ($\alpha = 20$) до 523,8 млн руб. ($\alpha = 50$). Это подтверждает наличие линейной зависимости между эффектом защитного действия лесных полос и экономическим результатом на выходе.

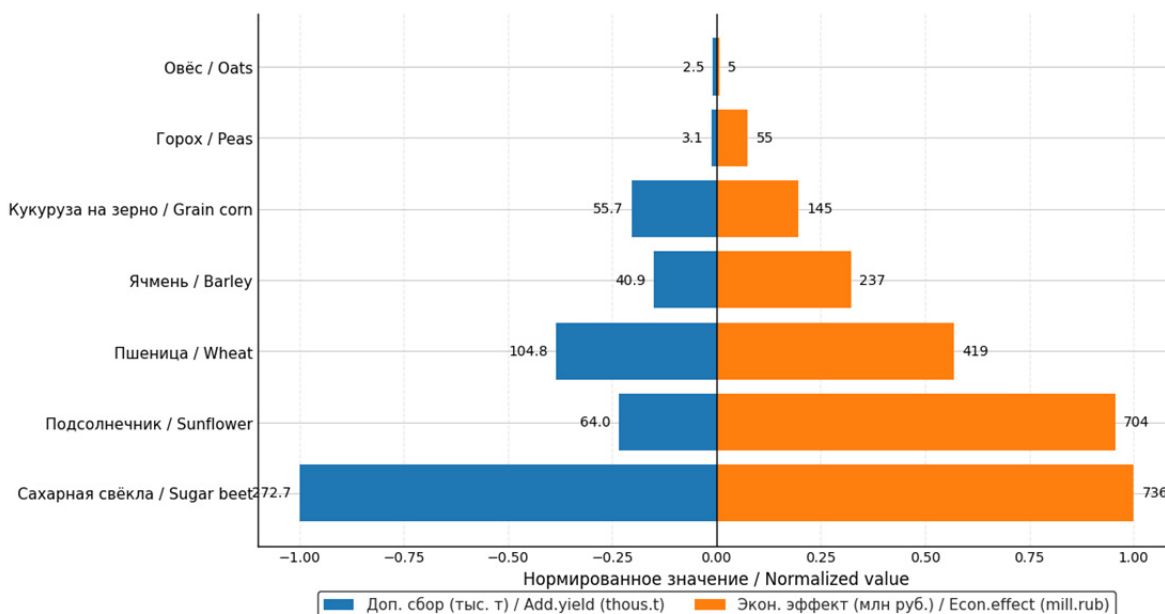


Рисунок 10. Показатели экономического эффекта и дополнительного сбора продукции

Figure 10. Indicators of economic impact and additional product collection

Таблица 5. Анализ чувствительности прибыльности к вариативности коэффициента защитного действия

Table 5. Analysis of profitability sensitivity to the variability of the protective effect coefficient

α , га/га α , ha/ha	Защищённая площадь, тыс. га Protected Area, Thousand ha	Дополнительный сбор, тыс. т Additional Yield, Thousand t	Экономический эффект, млн руб. Economic Effect, Million rub.
20	779,6	52,4	209,5
30	1 169,4	78,6	314,3
40	1 559,2	104,8	419,0
50	1 949,0	131,0	523,8

Таким образом, результаты количественной оценки экономической эффективности агролесоводства доказывают значительный потенциал защитных лесных насаждений и определяют его как фактор повышения продуктивности сельского хозяйства. Однако отметим, что расчёты показывают только прямой эффект от прибавки урожайности, но не учитывают другие выгоды, такие как: предотвращение потерь почвенного плодородия, снижение затрат на удобрения и средства защиты растений, стабилизацию производства в засушливые годы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования наглядно показывают количественно-обоснованные оценки структурного дисбаланса в землепользовании, потенциала агролесоводства, текущее состояние защитных лесных насаждений и экономическую эффективность их влияния на урожайность сельскохозяйственных культур в Центральной лесостепи.

1. Земельный фонд в Центральной лесостепи (Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая, Тамбовская области) характеризуется гипертрофированной аграрной освоенностью. Доля сельскохозяйственных угодий составляет в среднем 79,3 %, распаханность – 76,5 %. Данный показатель в 1,3–1,7 раза превышает экологически допустимый порог. Фактическая лесистость составляет 8,9 %, что более чем в два раза ниже научно-обоснованного оптимума для лесостепной зоны (15–25 %). Конкурентный характер землепользования подтверждается выявленной сильной обратной корреляционной связью между долей лесных земель и сельскохозяйственных угодий ($r = -0,81$).

2. Расчётный дефицит лесного покрова для достижения минимального экологического норматива (15 % лесистости) составляет 1 026,2 тыс. га, для оптимального (25 %) – 2 704,8 тыс. га. Наибольший абсолютный дефицит характерен для Воронежской области, наибольший относительный – для Курской области.

3. На основе конвергенции трёх независимых методических подходов (противоэрозионного, микроклиматического, биоценотического) обоснована необходимая доля защитных лесных насаждений в структуре агроландшафта – 5–7 % от площади сельскохозяйственных угодий. Суммарный потенциал агролесоводства на сельскохозяйственных землях оценивается в 646–905 тыс. га. Наибольшие резервы сосредоточены в Воронежской области (198,8–278,4 тыс. га).

4. В составе земель лесного фонда выявлены три категории участков, пригодных для ведения агролесоводства: пригодные нелесные земли (15,8 тыс. га), фонд лесовосстановления (17,6 тыс. га), земли сельскохозяйственного назначения, переведённые в лесной фонд (126,0 тыс. га). Общий потенциал составляет 159,4 тыс. га, причём Воронежская и Орловская области обладают наибольшими резервами (75,2 и 72,7 тыс. га соответственно).

5. На основе сопряжённого анализа распаханности и лесистости выделены три типологические группы: зона критического дисбаланса (Курская область), зона выраженного дисбаланса (Белгородская, Воронежская, Липецкая области) и зона структурной контрастности (Тамбовская область). Установлено, что

агролесоводство способно покрыть 50–75 % дефицита в зоне критического дисбаланса, 60–90 % – в зоне выраженного дисбаланса и полностью (95–135 %) – в зоне структурной контрастности.

6. Фонд ЗЛН Воронежской области насчитывает 18 694 объекта общей площадью 38 980,6 га. Выявлена экстремальная пространственная дифференциация: более трети площади (36,3 %) сконцентрировано в пяти муниципальных районах. Установлено, что 89,5 % насаждений находятся в удовлетворительном состоянии, 10,0 % требуют реформирования. Группировка районов по уровню стабильности (УС) выявила 25 стабильных ($УС \geq 95\%$), 4 напряжённых ($85\% \leq УС < 95\%$) и 3 критические территории ($УС < 85\%$), включая Подгоренский район с полной деградацией фонда.

7. Оценка экономической эффективности влияния лесополос на продуктивность семи основных сельскохозяйственных культур Воронежской области показала, что при коэффициенте защитного действия $\alpha = 40$ га/га дополнительный сбор продукции варьируется от 2,5 тыс. т (овёс) до 272,7 тыс. т (сахарная свёкла). Соответствующий экономический эффект составляет от 4,9 млн руб. до 736,1 млн руб. По результатам анализа чувствительности установлен линейный характер зависимости эффекта от масштаба защитного действия лесополос.

В качестве приоритетных направлений дальнейших исследований выступают, прежде всего, изучение синергетических эффектов, возникающих при интеграции агролесомелиорации с иными адаптационными практиками, а также формирование экономических механизмов, которые приводят к созданию и долгосрочному содержанию защитных лесных насаждений на сельскохозяйственных землях, находящихся, преимущественно, в частной собственности.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FZUR-2024-0001, № 124020100131-5).

ACKNOWLEDGMENT

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. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A. et al. (eds.). Cambridge : Cambridge University Press, 2021. 2391 p.
2. IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Pörtner H.-O., Roberts D.C., Tignor M. et al. (eds.). Cambridge : Cambridge University Press, 2022. 3056 p.
3. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, Lee H., Romero J. (eds.). Geneva : IPCC, 2023. 184 p.
4. Cardinael R., Cadisch G., Gosme M., Oelbermann M., van Noordwijk M. Climate change mitigation and adaptation in

- agriculture: Why agroforestry should be part of the solution // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2021. V. 319. Article id: 107555. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107555>
5. FAO. *The State of the World's Forests 2024: Forest sector innovations towards a more sustainable future*. Rome : FAO, 2024. 132 p.
6. Ellis P.W., Page A.M., Wood S. et al. The principles of natural climate solutions // *Nature Communications*. 2024. V. 15. Article number: 547. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44425-2>
7. Dobhal S., Kumar R., Bhardwaj A.K., Chavan S.B., Uthappa A.R., Kumar M., Singh A., Jinger D., Rawat P., Handa A.K., Ramawat N. Global assessment of production benefits and risk reduction in agroforestry during extreme weather events under climate change scenarios // *Frontiers in Forests and Global Change*. 2024. V. 7. Article id: 1379450. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1379741>
8. Koch O., Moore J., Hörl J., Cormann M., Gayler S., Lewandowski I., Marhan S., Munz S., Pflugfelder M., Piepho H.-P., Schneider J., von Cossel M., Weinand T., Winkler B., Schweiger A.H. Sheltered by trees: long-term yield dynamics in temperate alley cropping agroforestry with changing water availability // *Agronomy for Sustainable Development*. 2025. V. 45. N 3. Article number: 27. <https://doi.org/10.1007/s13593-025-01022-5>
9. O'Mahony T. Cost Benefit Analysis and the environment: The time horizon is of the essence // *Environmental Impact Assessment Review*. 2021. V. 89. Article id: 106587. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106587>
10. Korneeva E.A., Belyaev A.I. Assessment of the Impact of Forest Reclamation Measures for the Adaptation of Agriculture to Climate Change in the South of the Russian Plain // *Forests*. 2023. V. 14. N 8. Article id: 1593. <https://doi.org/10.3390/f14081593>
11. Kheir A.M.S., Gosme M., Bakhtiary N., Kephe P., Assou J., Langhof M., Strassmeyer J., Feike T. Towards a comprehensive decision support system for agroforestry systems // *Environmental Research Letters*. 2025. V. 20. N 12. Article id: 124016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ae1cd5>
12. Rolo V., Rivest D., Maillard É., Moreno G. Agroforestry potential for adaptation to climate change: A soil based perspective // *Soil Use and Management*. 2023. V. 39. P. 1006–1032. <https://doi.org/10.1111/sum.12932>
13. Suhag M., Ahmed T., Das A.K., Rahman M.A., Rahman M.M., Miah M.G. Leucaena-Based Alley Cropping System: An Approach for Reclaiming Degraded Land, Reducing the Use of Inorganic Nitrogen Fertilizer, and Improving Crop Productivity // *Nitrogen*. 2025. V. 6. N 2. Article number: 25. <https://doi.org/10.3390/nitrogen6020025>
14. Кулик К.Н., Беляев А.И., Пугачёва А.М., Зыкова А.А. Глобальные проекты агролесомелиорации и их реализация // *Вестник Российской академии наук*. 2024. Т. 94. N 1. С. 55–65. <https://doi.org/10.31857/S0869587324010071>
15. Чендев Ю.Г., Геннадиев А.Н., Лукин С.В., Жидкин А.П. Методология комплексной оценки сельскохозяйственных земель Центрально-Чернозёмного региона (на примере Белгородской области) // *Почвоведение*. 2020. N 7. С. 871–879.
16. Ивонин В.М. Регенеративная агролесомелиорация // *Региональные геосистемы*. 2024. Т. 48. N 1. С. 30–44. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2024-48-1-30-44>
17. Чендев Ю.Г., Геннадиев А.Н., Смирнова М.А., Лебедева М.Г. Лесные полосы как фактор почвообразования в агроландшафтах юга Среднерусской возвышенности // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2024. Т. 79. N 4. С. 94–108. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.8>
18. Васильченко Н.И., Звягин Г.А., Петрова А.А. Влияние ползащитных лесополос на основные показатели плодородия черноземов южных Северного Казахстана // *Вестник РГАТУ*. 2020. N 1 (45). С. 9–16. <https://doi.org/10.1134/S1064229324600972>
19. Labaz B., Hartemink A.E., Zhang Y., Stevenson A., Kabala C. Organic carbon in Mollisols of the world – A review // *Geoderma*. 2024. V. 447. Article id: 116937. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116937>
20. Морковина С.С., Матвеев С.М., Яковенко Н.В. и др. Научно-методические основы сокращения выбросов и увеличения поглощения парниковых газов лесами при осуществлении лесохозяйственных мероприятий и проектной деятельности (лесоклиматических проектов) в субъектах Российской Федерации : монография. Воронеж : ВГЛУ, 2023. 229 с.
21. Василько В.П., Ничипуренко Е.Н., Федорова Т.Д. Продуктивность озимой пшеницы в зависимости от агрофизических свойств чернозёма выщелоченного в условиях Западного Предкавказья // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2022. N 8 (214). С. 5–10.
22. Проездов П.Н., Маштаков Д.А., Есков Д.В., Автономов А.Н., Розанов А.В. Закономерности воздействия защитных лесных насаждений и рельефа на агрофизические и биохимические свойства почв на Приволжской возвышенности // *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*. 2023. N 2. С. 57–67. <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2023.2.57>

REFERENCES

1. IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A. et al. (eds.). Cambridge, Cambridge University Press, 2021, 2391 p.
2. IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pörtner H.-O., Roberts D.C., Tignor M. et al. (eds.). Cambridge, Cambridge University Press, 2022, 3056 p.
3. IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, Lee H., Romero J. (eds.). Geneva, IPCC, 2023, 184 p.
4. Cardinael R., Cadisch G., Gosme M., Oelbermann M., van Noordwijk M. Climate change mitigation and adaptation in agriculture: Why agroforestry should be part of the solution. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2021, vol. 319, article id: 107555. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107555>
5. FAO. *The State of the World's Forests 2024: Forest sector innovations towards a more sustainable future*. Rome, FAO, 2024, 132 p.
6. Ellis P.W., Page A.M., Wood S., Fargione J., Masuda Y.J., Carrasco Denney V., Moore C., Kroeger T., Griscom B., Cortez R., Leavitt S., Cook-Patton S.C. The principles of natural climate solutions. *Nature Communications*. 2024, vol. 15, article number: 547. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44425-2>
7. Dobhal S., Kumar R., Bhardwaj A.K., Chavan S.B., Uthappa A.R., Kumar M., Singh A., Jinger D., Rawat P., Handa A.K., Ramawat N. Global assessment of production benefits and risk reduction in agroforestry during extreme weather events under climate change scenarios. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2024, vol. 7, article id: 1379450. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1379741>
8. Koch O., Moore J., Hörl J., Cormann M., Gayler S., Lewandowski I., Marhan S., Munz S., Pflugfelder M., Piepho H.-P., Schneider J., von Cossel M., Weinand T., Winkler B., Schweiger A.H. Sheltered by trees: long-term yield dynamics in temperate alley cropping agroforestry with changing water availability. *Agronomy for Sustainable Development*, 2025, vol. 45, no. 3, article number: 27. <https://doi.org/10.1007/s13593-025-01022-5>
9. O'Mahony T. Cost Benefit Analysis and the environment: The time horizon is of the essence. *Environmental Impact Assessment Review*, 2021, vol. 89, article id: 106587. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106587>
10. Korneeva E.A., Belyaev A.I. Assessment of the Impact of Forest Reclamation Measures for the Adaptation of Agriculture to Climate Change in the South of the Russian Plain. *Forests*, 2023, vol. 14, no. 8, article id: 1593. <https://doi.org/10.3390/f14081593>
11. Kheir A.M.S., Gosme M., Bakhtiary N., Kephe P., Assou J., Langhof M., Strassmeyer J., Feike T. Towards a comprehensive decision support system for agroforestry systems. *Environmental Research Letters*, 2025, vol. 20, no. 12, article id: 124016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ae1cd5>
12. Rolo V., Rivest D., Maillard É., Moreno G. Agroforestry potential for adaptation to climate change: A soil based perspective. *Soil Use and Management*, 2023, vol. 39, pp. 1006–1032. <https://doi.org/10.1111/sum.12932>

13. Suhag M., Ahamed T., Das A.K., Rahman M.A., Rahman M.M., Miah M.G. Leucaena-Based Alley Cropping System: An Approach for Reclaiming Degraded Land, Reducing the Use of Inorganic Nitrogen Fertilizer, and Improving Crop Productivity. *Nitrogen*, 2025, vol. 6, no. 2, article number: 25. <https://doi.org/10.3390/nitrogen6020025>
14. Kulik K.N., Pugacheva A.M. Agroecological optimization of land use based on protective afforestation. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*, 2021, vol. 91, no. 5, pp. 451–459. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0869587324010071>
15. Chende Yu.G., Gennadiev A.N., Lukin S.V., Zhidkin A.P. Methodology for comprehensive assessment of agricultural lands in the Central Chernozem region (on the example of Belgorod region). *Pochvovedenie*. 2020, no. 7, pp. 871–879. (In Russian)
16. Ivonin V.M. Regenerative agroforestry. *Regional Geosystems*, 2024, vol. 48, no. 1, pp. 30–44. (In Russian) <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2024-48-1-30-44>
17. Chende Yu.G., Gennadiev A.N., Smirnova M.A., Lebedeva M.G. Forest strips as a factor of soil formation in agrolandscapes of the south of the Central Russian Upland. *Lomonosov Geography Journal*, 2024, vol. 79, no. 4, pp. 94–108. (In Russian) <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.8>
18. Vasilchenko N.I., Zvyagin G.A., Petrova A.A. Influence of shelterbelts on the main fertility indicators of southern chernozems of Northern Kazakhstan. *Eurasian Soil Science*, 2024, vol. 57, no. 7, pp. 1093–1101. (In Russian) <https://doi.org/10.1134/S1064229324600972>
19. Labaz B., Hartemink A.E., Zhang Y., Stevenson A., Kabala C. Organic carbon in Mollisols of the world – A review. *Geoderma*, 2024, vol. 447, article id: 116937. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116937>
20. Morkovina S.S., Matveev S.M., Yakovenko N.V. et al. *Nauchno-metodicheskie osnovy sokrashcheniya vybrosov i uvelicheniya pogloshcheniya parnikovykh gazov lesami pri osushchestvlenii lesokhozyaystvennykh meropriyatii i proektnoi deyatel'nosti (lesoklimaticheskikh projektov) v sub"ektakh Rossiiskoi Federatsii* [Scientific and methodological bases for reducing emissions and increasing greenhouse gas absorption by forests in the implementation of forestry activities and project activities (forest climate projects) in the subjects of the Russian Federation]. Voronezh, VGLTU Publ., 2023, 229 p. (In Russian)
21. Vasilko V.P., Nichipurenko E.N., Fedorova T.D. Productivity of winter wheat depending on the agrophysical properties of leached chernozem in the Western Ciscaucasia. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022, no. 8 (214), pp. 5–10. (In Russian)
22. Proezdov P.N., Mashtakov D.A., Eskov D.V., Avtonomov A.N., Rozanov A.V. Patterns of the influence of protective forest plantations and relief on the agrophysical and biochemical properties of soils on the Volga Upland. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva*, 2023, no. 2, pp. 57–67. (In Russian) <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2023.2.57>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Светлана С. Морковина разработала концепцию и дизайн исследования, осуществляла научное руководство, написала первую версию статьи, сформулировала цель и задачи, обобщила результаты. Наталия В. Яковенко дала экономическую оценку потенциала агролесоводства, рассчитала экономический эффект, проанализировала чувствительность, интерпретировала экономические показатели. Игорь В. Комов обработал статистические данные, проанализировал земельный фонд и дефицит лесистости, провел типологизацию регионов, подготовил таблицы и текстовые описания результатов. Николай Н. Макаренко собрал и проанализировал данные о защитных лесных насаждениях, построил картографический материал и визуализации, подготовил графические элементы. Елизавета А. Нацентов проанализировала литературные источники, обосновала методологию, верифицировала данные, отредактировала итоговый вариант текста рукописи. 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 conducted development of the research concept and design, scientific supervision, writing the first version of the article, formulation of the aim and objectives and synthesis of the results. Nataliya V. Yakovenko conducted an economic assessment of agroforestry potential, calculation of economic effect, sensitivity analysis, interpretation of economic indicators. Igor V. Komov undertook statistical data processing, analysis of land fund and forest cover deficit, regional typology, preparation of tables and textual description of the results. Nikolay N. Makarenko undertook collection and analysis of data on protective forest plantations, creation of cartographic materials and visualizations and preparation of graphical elements. Elizaveta A. Natsentova undertook analysis of literature sources, methodological justification, data verification and final text editing. 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>
 Игорь В. Комов / Igor V. Komov <https://orcid.org/0000-0003-4943-518X>
 Николай Н. Макаренко / Nikolay N. Makarenko <https://orcid.org/0000-0002-5386-668X>
 Елизавета А. Нацентов / Elizaveta A. Natsentova <https://orcid.org/0009-0005-7500-0915>

Оригинальная статья / Original article

УДК: 636.2.09

DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-14



Прогнозирование рахита у молодняка крупного рогатого скота с помощью интеллектуальной системы бесконтактной оценки экстерьерных показателей взрослых животных

Татьяна В. Мамонтова, Сергей С. Юрочка, Федор Е. Владимиров,

Савр О. Базаев, Артем Р. Хакимов

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия

Контактное лицо

Татьяна В. Мамонтова, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, лаборатория «Цифровой мониторинг сельскохозяйственных животных», ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр» ВИМ; 109428 Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5.

Тел. +79283189633

Email mamontova.2024@inbox.ruORCID <http://orcid.org/0000-0001-8799-3268>

Формат цитирования

Мамонтова Т.В., Юрочка С.С., Владимиров Ф.Е., Базаев С.О., Хакимов А.Р. Прогнозирование рахита у молодняка крупного рогатого скота с помощью интеллектуальной системы бесконтактной оценки экстерьерных показателей взрослых животных // Юг России: экология, развитие. 2026. Т.21, N 2. С. 162-173. DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-14

Получена 15 января 2026 г.

Прошла рецензирование 29 марта 2026 г.

Принята 21 апреля 2026 г.

Резюме

Провести поиск зависимостей между биохимическими показателями крови стельных коров и развитием рахита у новорожденных телят для оценки возможности построения прогноза и профилактики данного заболевания.

Исследование проведено на 32 стельных коровах зебувидного типа черно-пестрой породы и их потомстве (n=30). У коров за 50 и 14 дней отела и у телят в возрасте 0, 1, 3 и 6 месяцев исследовали показатели кальций-фосфорного обмена и уровень витамина D.

Концентрация витамина D у коров оказалась критически низкой (13.43–13.47 нг/мл при норме 28–35 нг/мл), а соотношение Са:Р не соответствовало норме (1.36:1 и 1.2:1 при норме 1.5–2:1). У телят при рождении уровень витамина D был на 80 % ниже нормы, а у 80 % молодняка в первый месяц жизни были выявлены признаки рахита. Выявлена сильная положительная корреляция между уровнем витамина D у коров за 50 и 14 дней до отела и его уровнем у телят при рождении ($r = +0.751$ и $r = +0.709$ соответственно). Обнаружена устойчивая средняя отрицательная корреляция между уровнем кальция у коров и активностью щелочной фосфатазы у телят. Однако коэффициент детерминации (R^2) для большинства связей был низким (11–39 %), что указывает на слабое влияние изучаемых параметров.

Установлено, что показатели кальций-фосфорного обмена у стельных коров не обладают высокой прогностической ценностью для достоверного прогнозирования риска развития рахита у потомства. На основании результатов признано нецелесообразным использовать эти параметры для прогноза рахита в системе бесконтактной оценки животных.

Ключевые слова

Рахит, крупный рогатый скот, молодняк, витамин D, кальций-фосфорный обмен, щелочная фосфатаза.

Prediction of rickets in young cattle using an intelligent system for contactless assessment of the external parameters of adult animals

Tatyana V. Mamontova, Sergey S. Yurochka, Fedor E. Vladimirov,
Savr O. Bazaev and Artem R. Khakimov

Federal Research Centre Agro Engineering, All Russian Institute of Mechanisation, Moscow, Russia

Principal contact

Tatyana V. Mamontova, Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Laboratory 9.5 for Digital Livestock Monitoring, Federal Research Center Agro Engineering, All Russian Institute of Mechanization; 5 1st Institut'sky Proezd, Moscow, Russia 109428.

Tel. +79283189633

Email mamontova.2024@inbox.ru

ORCID <http://orcid.org/0000-0001-8799-3268>

How to cite this article

Mamontova T.V., Yurochka S.S., Vladimirov F.E., Bazaev S.O., Khakimov A.R. Prediction of rickets in young cattle using an intelligent system for contactless assessment of the external parameters of adult animals. *South of Russia: ecology, development*. 2026; 21(2):162-173. (In Russ.)
DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-14

Received 15 January 2026

Revised 29 March 2026

Accepted 21 April 2026

Abstract

The purpose of this study was to find the relationship between biochemical parameters of blood of pregnant cows and the development of rickets in newborn calves in order to assess the possibility of prognosis and prevention of this disease.

The study was conducted on 32 pregnant zebu-type Black-and-White cows and their offspring (n=30). Calcium-phosphorus metabolism indicators and vitamin D levels were evaluated in the cows at 50 and 14 days pre-calving, and in calves at 0, 1, 3, and 6 months of age.

The concentration of vitamin D in cows turned out to be critically low (13.43–13.47 ng/ml at a rate of 28–35 ng/ml), and the ratio of Ca: The P did not correspond to the norm (1.36:1 and 1.2:1 with a norm of 1.5–2:1). The calves had vitamin D levels 80 % below normal at birth, and 80 % of the young showed signs of rickets in the first month of life. A strong positive correlation was found between the level of vitamin D in cows 50 and 14 days before calving and its level in calves at birth ($r = +0.751$ and $r = +0.709$, respectively). A stable average negative correlation was found between the level of calcium in cows and the activity of alkaline phosphatase in calves. However, the coefficient of determination (R^2) for most bonds was low (11–39 %), which indicates a weak influence of the studied parameters.

It was found that the indicators of calcium-phosphorus metabolism in pregnant cows do not have a high prognostic value for reliable prediction of the risk of rickets in offspring. Based on the results, it was considered inappropriate to use these parameters for the prediction of rickets in a contactless animal assessment system.

Key Words

Rickets, cattle, young animals, vitamin D, calcium-phosphorus metabolism, alkaline phosphatase.

ВВЕДЕНИЕ

Рахит – хроническое заболевание, которое многие связывают с дефицитом витамина D, особенно в первые годы жизни. В следствие чего нарушается минеральный обмен, приводящий к нарушению минерализации костной ткани и функции жизненно важных систем [1; 2].

Рахит относится к числу распространенных заболеваний. Скрытую форму D-витаминной недостаточности выявляют у 60–100 %, а клиническую выраженную – у 30–35 % растущего молодняка крупного рогатого скота [3].

Несмотря на многочисленные исследования в данной области, проблема рахита крупного рогатого скота остается актуальной в настоящее время. Причиной этого может являться переход отрасли к круглогодичному стойловому содержанию животных, использование в разведении преимущественно пород зарубежной селекции, а также несбалансированный рацион кормления, который в свою очередь может быть связан с изменением климата и экологической обстановки [4]. Проблема рахита крупного рогатого скота также может быть связана с географической точкой разведения животных, так, например, в регионах, расположенных в северных и умеренных широтах, проблема рахита будет стоять более остро, чем в регионах южных широт. Это связано в целом с недостаточным солнечным облучением и как следствие снижением выработки эндогенного витамина D. Данный процесс будет отягощаться и низким содержанием витамина D в кормах растительного происхождения, выращенные в таких регионах [5; 6].

Особенно остро стоит проблема ранней диагностики рахита у молодняка. Витамин D имеет решающее значение для правильного роста и развития телят [7]. Рецептор витамина D присутствует в большинстве тканей организма и участвует во множестве физиологических процессов, помимо минерального гомеостаза и развития скелета, таких как иммунные сигналы, антиоксидантные системы и клеточная дифференциация [8]. Следовательно, очень важно правильно содержать и кормить телят, чтобы обеспечить достаточное количество витамина D для поддержания многочисленных физиологических функций гормона витамина D, 1,25-дигидроксивитамина D₃ [1,25(OH)2D₃].

Помимо нарушения сбалансированного питания причиной рахита у новорожденных телят, как правило, служат нарушения обмена веществ, а в частности – нарушение витаминно-минерального обмена у коров в период стельности [1; 3; 9]. В связи с этим можно предположить о наличии зависимости гематологических и биохимических показателей крови стельных коров с развитием рахита у новорожденных телят.

Таким образом, целью исследования является поиск зависимостей гематологических и биохимических показателей крови стельных коров с развитием рахита у новорожденных телят для построения прогноза и своевременной профилактики данного заболевания. Что соответствует основной цели проекта – исследовать селекционные, морфофизиологические и экстерьерные параметры цифровой технологией для проведения анализа и прогнозирования генетического потенциала крупного рогатого скота.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились с 2023 по 2025 гг. на опытной станции «Снегири» Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина Российской академии наук, расположенной в Московской области, город Истра, село Рождествено. Поголовье дойных коров составляет 195 голов. Породный состав представлен скотом зебувидного типа чёрно-пестрой породы.

Средняя продуктивность по стаду за 305 дней лактации составляет 2729 кг молока, 4,86 % массовая доля жира и 3,05 % массовая доля белка.

Для выполнения научных исследований было отобрано 32 стельные коровы по принципу пар-аналогов, где при формировании группы учитывались следующие показатели: порода, пол, возраст, живая масса, молочная продуктивность, период стельности. Перед формированием из беременных животных группы для получения от них здорового потомства были проведены ветеринарные осмотры и соответствующие обработки. Все животные находились в одинаковых условиях: привязном содержании, свободном поении из индивидуальных автоматических поилок, кормлении два раза в день кормами собственного производства по утвержденным рационам.

В результате отела февраль–март 2024 г. было получено 16 бычков, 14 телочек. Корова с инвентарным номером 2056 абортировала в декабре 2023 года. Корова с инвентарным номером 399 родила в мае 2024 года мертворожденного теленка.

Для контроля физиологического состояния животных проводились биохимические исследования крови. Исследования проводились по сформированной опытной группе животных-материей и их родившихся телят. Кровь отбиралась у стельных коров за 50 и 14 дней до отела. У родившихся телят от отобранных матерей кровь отбиралась на 3–5, 30, 90 и 180 день жизни.

У подопытных телят диагноз заболевания ставили по выявленным изменениям в опорно-двигательном аппарате и отклонениям в параметрах минерального и белкового обмена, подтвержденного с помощью биохимического анализа крови.

Живую массу телят определяли путем индивидуального взвешивания на электронных весах в различные возрастные периоды с точностью до 0,1 кг, вычисляли абсолютный и среднесуточный приросты.

Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием компьютерного приложения Microsoft Office Excel посредством методов стандартной вариационной статистики.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рост и развитие молодняка – тесно взаимосвязанные процессы. Под ростом принято понимать процесс количественных изменений: увеличение массы клеток организма, его тканей и органов, линейных и объемных размеров, а под развитием – процесс количественных и качественных изменений. На рост и развитие молодняка оказывает влияние ряд факторов: наследственность породы и отдельной особи, условия кормления и содержания. Именно наследственностью обусловлены деятельность желез внутренней секреции, нервной системы, а также закономерности индивидуального развития организма, что определяет характер роста животных [10].

Немаловажную роль на показатель роста молодняка оказывает влияние интенсивность роста в эмбриональный и постэмбриональный период развития. Поэтому за меру интенсивности роста принимают вес при рождении и при отъеме или в определенном возрасте до окончания роста [11].

Живая масса является одним из важнейших факторов, обуславливающих рост и развитие, а также мясную продуктивность животного. На живую массу

при рождении, и частично при отъеме, большое значение оказывает материнский организм. Отцовская наследственность начинает проявляться в более позднем возрасте.

Материалы, характеризующие динамику изменения живой массы подопытного молодняка от рождения до годовалого возраста представлены в таблице 1.

Таблица 1. Возрастная динамика живой массы молодняка, кг

Table 1. Age dynamics of live weight of young animals, kg

Возраст, мес. Age, months	Группа / Group			
	бычки (n=16) male (n=16)		телочки (n=14) female (n=14)	
	$X \pm m$	C_v	$X \pm m$	C_v
При рождении At birth	31,23±2,86	9,16	24,99±2,36	9,44
1	49,89±3,63	7,28	44,39±3,47	7,82
3	88,62±3,75	4,24	76,79±4,20	5,48
6	169,56±3,47	2,05	145,26±4,96	3,42
12	323,52±9,26	2,86	238,14±4,84	2,03

Анализ динамики живой массы молодняка по периодам выращивания показывает, что как в период новорожденности, так и в возрастном аспекте наблюдался четко выраженный половой диморфизм по данному показателю.

Новорожденные бычки превосходили телочек по величине живой массы на 24,9 %. К концу молочного периода различия между группами стали более существенными.

Скорость (абсолютный прирост) и интенсивность (относительный прирост) животных в постэмбриональный период неодинаковы и замедляются по мере развития организма [12].

Ритмичность роста животных связана с неравномерностью его в отдельные периоды развития и подтверждена работами ряда авторов [13; 14]. Согласно теории системогенеза в организме животного, как в эмбриональный, так и в постэмбриональный периоды избирательно ускоренно созревают ткани и органы, которые входят в функциональные системы первоочередной важности для данного этапа жизни, что сказывается на общих тенденциях развития.

Для более объективной оценки роста и развития потомства, нами были вычислены абсолютные, среднесуточные и относительные, приросты живой массы (табл. 2).

Таблица 2. Интенсивность роста молодняка

Table 2. Growth rate of young animals

Возраст, мес. Age, months	Группа / Group					
	бычки (n=16) male (n=16)			телочки (n=14) female (n=14)		
	абс. прирост, кг absolute increase, kg	сред. прирост, г average daily gain, g	относ. прирост, % relative growth, %	абс. прирост, кг absolute increase, kg	сред. прирост, г average daily gain, g	относ. прирост, % relative growth, %
От рождения до 1 мес. From birth to 1 month	18,7	622,08	59,88	19,4	646,66	77,63
1 – 3 мес. From 1 to 3 months	38,7	645,52	77,57	32,4	540,00	72,99
3 – 6 мес. From 3 to 6 months	80,9	899,23	91,29	68,4	760,79	89,07
6 – 12 мес. From 6 to 12 months	154,0	855,38	90,82	92,9	515,99	63,95
От рождения до 12 месяцев From birth to 12 month	292,3	811,92	90,35	213,2	592,08	89,53

Из таблицы и графика (на рисунке 1) видно, что обе группы имели достаточно высокие приросты живой массы. Максимальный рост среднесуточного прироста наблюдался в период от 3 до 6 месяцев и составил 899,23 г у бычков и 760,79 г у телочек.

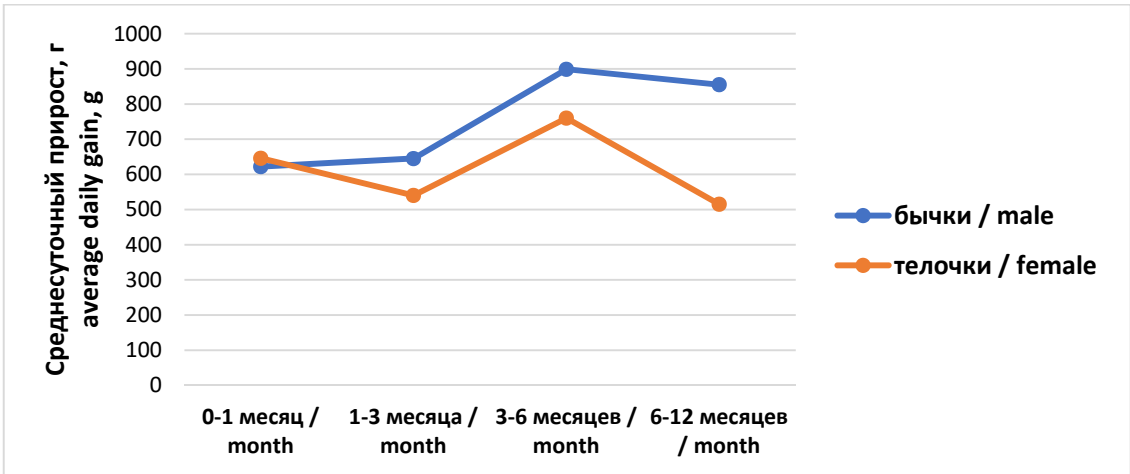


Рисунок 1. Динамика среднесуточного прироста живой массы молодняка, г
Figure 1. Dynamics of average daily live weight gain of young animals, g

Обобщая приведенные средние данные, следует отметить, что результаты наблюдения за ростом и развитием животных свидетельствуют о высокой интенсивности увеличения живой массы, а также соответствуют физиологической норме для данного вида и возраста животного. Это свидетельствует о нормальном осуществлении обмена веществ в организме.

Как было отмечено ранее, на рост, развитие и физиологическое состояние молодняка оказывает материнский организм. В связи с этим нами были проведены исследования белковых (общий белок, альбумин, мочевины), углеводных (глюкоза), ферментных (щелочная фосфатаза, аланинаминотрансфераза, аспаратаминотрансфераза), минеральных (кальций, фосфор, железо) и витаминных (витамин D) показателей у стельных сухостойных коров за 50 и 14 дней до отела. Соответственно такие же показатели изучались у телят при рождении, в 1, 3 и 6 месяцев.

Доказано, что причиной рахита у новорожденных телят служит резкое нарушение витаминно-минерального обмена у коров в период плодотворения [1; 8], в связи с этим нами проведен анализ динамики изменений минерального и витаминного метаболизма у стельных сухостойных коров и их потомства (табл. 3, 4).

Таблица 3. Динамика изменений кальций-фосфорного метаболизма у стельных сухостойных коров (n=30)
Table 3. Dynamics of changes in calcium-phosphorus metabolism in pregnant dry cows (n=30)

Показатели Indicators	Результаты Results	Нормативные значения* Normative Values*	Нормативные значения** Normative Values**
за 50 дней до отела / 50 days before calving			
Кальций, ммоль/л Calcium, mmol/L	2,39±0,09	2,5-3,2	2,1-3,1
Фосфор, ммоль/л Phosphorus, mmol/L	1,76±0,13	1,8-2,2	1,48-2,90
Соотношение кальция к фосфору Calcium to phosphorus ratio	1,36:1	-	1,5-2:1
Витамин D, нг/мл Vitamin D, ng/ml	13,43±3,15	28,0-35,0	30-50
за 14 дней до отела / 14 days before calving			
Кальций, ммоль/л Calcium, mmol/L	2,25±0,09	2,5-3,2	2,1-3,1
Фосфор, ммоль/л Phosphorus, mmol/L	1,88±0,4	1,8-2,2	1,48-2,90
Соотношение кальция к фосфору Calcium to phosphorus ratio	1,20:1	-	1,5-2:1
Витамин D, нг/мл Vitamin D, ng/ml	13,47±3,59	28,0-35,0	30-50

Примечание: * – данные[1]; ** – данные ООО «Вет Юнион» (2024)
Note: * – data from [1]; ** – data from Vet Union LLC (2024)

Кальций-фосфорный анализ родительского поголовья выявил, что показания всех его составляющих находятся в пределах нормы. Однако следует отметить, что соотношение кальция к фосфору не соответствует референсным значениям, так за 50 дней до отела соотношение составило 1,36:1, за 14 дней до отела 1,2:1 соответственно.

Концентрация витамина D в сыворотке или плазме крови ниже 20 нг/мл считается недостаточной для нормального минерального гомеостаза и развития костей. Однако учёные пришли к выводу, что уровень

витамина D в сыворотке выше 30 нг/мл необходим для оптимального иммунитета и общего здоровья [1; 15].

Концентрация витамина D в сыворотке крови родительского поголовья оказалась ниже нижнего порога нормативного значения на 44 % за 50 и 14 дней до отела. Возможно, это связано с периодом осеменения и плодonoшения животных (осень-зима), когда наблюдается максимально низкая инсоляция. Также это может быть связано с привязным содержанием животных в этот период.

На рисунке 2 представлена динамика измеряемых показателей у родительского поголовья.

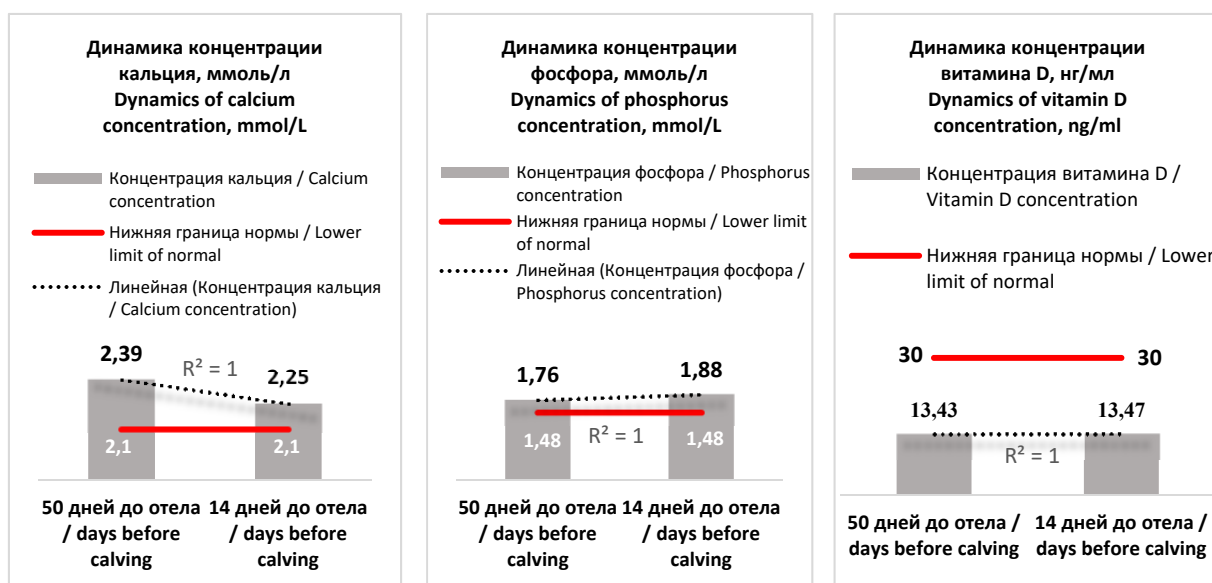


Рисунок 2. Динамика показателей у родительского поголовья (n=30)

Figure 2. Dynamics of indicators in parent stock (n=30)

Таким образом, можно сделать вывод, что исследуемые коровы достаточно плохо обеспечены витамином D, в связи с чем наблюдается низкая концентрация витамина D в крови, что может стать предрасполагающим фактором для развития нарушений фосфорно-кальциевого обмена у потомства.

Обследование телят в первый месяц жизни показало, что у 80 % животных имелись малоспецифичные признаки рахита, что было подтверждено результатами лабораторных исследований. Так, гипофосфатемия выявлена у 15 (пятнадцати) телят при рождении и у 12 (двенадцати) телят в возрасте 1 месяц, гипокальциемия – у 11 (одиннадцати) телят при рождении и у 10 (десяти) телят в возрасте 1 месяц, при этом средние показатели по группе находились в пределах нормы. Повышенная активность щелочной фосфатазы – у 24 (двадцати четырех) телят при рождении и в 1 месяц. У 2 (двух) телят в возрасте 1 месяца были отмечены визуальные признаки рахита: увеличение запястных суставов, изменение шерстного покрова и кожи. При этом концентрация витамина D при рождении была на 80,43 % ниже порогового значения. В возрасте 1 месяц разница уже составила 18 %. Динамика представлена на рисунке 3.

Исходя из выше сказанного можно предположить, что дефицит витамина D у телят мог быть вызван в первую очередь низкими запасами данного витамина в организме коров-матерей и подкреплён внешними факторами, такими как недостаточность витамина D в кормах, низкая

солнечная инсоляция, связанная с условиями содержания и влиянием сезона рождения телят.

Для установления зависимости между показателями крови и рахитом телят и в последствии прогнозирования рахита у молодняка крупного рогатого скота с помощью интеллектуальной системы бесконтактной оценки экстерьерных показателей взрослых животных нами был произведен расчет корреляции между кальций-фосфорными показателями матерей и потомства (табл. 5).

Известно, что коэффициент корреляции лежит в пределах от -1 до 1 . Чем ближе полученный коэффициент корреляции к -1 или 1 , тем сильнее связь между исследуемыми величинами. При оценке силы связи коэффициентов корреляции используется шкала Чеддока.

На основании проведённых исследований установлено, что у молодняка при рождении выявлены высокие положительные коэффициенты корреляций между показателем витамина D у коров-матерей за 50 дней до отела и содержанием витамина D у потомства $r = +0,751$, в этих же пределах установлена связь между показателем витамина D у коров-матерей за 14 дней до отела и содержанием витамина D у потомства $r = +0,709$.

Положительная связь низких значений выявлена между концентрацией фосфора коров за 14 дней до отела и щелочной фосфатазой телят $r = +0,326$. Также с щелочной фосфатазой телят

выявлена отрицательная связь $r = -0,485$ с содержанием кальция у коров-матерей за 50 дней до отела.

При сравнении коэффициентов корреляции у коров-матерей и потомства в возрасте 1 месяца, мы подтверждаем в своих исследованиях наличие положительной связи между концентрацией кальция в крови коров и концентрацией кальция и фосфора у молодняка $r = +0,292$; $r = +0,478$, соответственно. При этом этот же показатель крови коров имеет среднюю

отрицательную корреляцию с показателем щелочной фосфатазы телят $r = -0,623$. При измерении связей у молодняка в возрасте 1 месяца мы отмечаем, что животные имеют отрицательную связь и ее очень низкие значения между кальций-фосфорными показателями коров-матерей и концентрацией витамина D у телят, тогда как при рождении наблюдалась высокая положительная корреляция.

Таблица 4. Динамика изменений кальций-фосфорного метаболизма у молодняка (n=30)
Table 4. Dynamics of changes in calcium-phosphorus metabolism in young animals (n=30)

Показатели Indicators	Результаты Results	Нормативные значения* Normative Values*	Нормативные значения** Normative Values**
3-5 дней от рождения 3-5 days from birth			
Кальций, ммоль/л Calcium, mmol/L	2,28±0,44	2,5-3,2	2,1-3,1
Фосфор, ммоль/л Phosphorus, mmol/L	1,87±0,52	1,8-2,2	1,48-2,90
Соотношение кальция к фосфору Calcium to phosphorus ratio	1,22:1	-	1,5-2:1
Витамин D, нг/мл Vitamin D, ng/ml	5,87±2,24	28,0-35,0	30-50
Фосфатаза щелочная, ед/л Alkaline phosphatase, U/L	185,4±54,4	100-300	17-153
30 дней от рождения 30 days from birth			
Кальций, ммоль/л Calcium, mmol/L	2,26±0,29	2,5-3,2	2,1-3,1
Фосфор, ммоль/л Phosphorus, mmol/L	2,17±0,71	1,8-2,2	1,48-2,90
Соотношение кальция к фосфору Calcium to phosphorus ratio	1,04:1	-	1,5-2:1
Витамин D, нг/мл Vitamin D, ng/ml	24,6±11,33	28,0-35,0	30-50
Фосфатаза щелочная, ед/л Alkaline phosphatase, U/L	206,33±63,47	100-300	17-153
90 дней от рождения 90 days from birth			
Кальций, ммоль/л Calcium, mmol/L	2,57±0,31	2,5-3,2	2,1-3,1
Фосфор, ммоль/л Phosphorus, mmol/L	2,48±0,33	1,8-2,2	1,48-2,90
Соотношение кальция к фосфору Calcium to phosphorus ratio	1,04:1	-	1,5-2:1
Витамин D, нг/мл Vitamin D, ng/ml	32,47±8,92	28,0-35,0	30-50
Фосфатаза щелочная, ед/л Alkaline phosphatase, U/L	200,17±57,33	100-300	17-153
180 дней от рождения 180 days from birth			
Кальций, ммоль/л Calcium, mmol/L	2,89±0,43	2,5-3,2	2,1-3,1
Фосфор, ммоль/л Phosphorus, mmol/L	1,89±0,33	1,8-2,2	1,48-2,90
Соотношение кальция к фосфору Calcium to phosphorus ratio	1,53:1	-	1,5-2:1
Витамин D, нг/мл Vitamin D, ng/ml	38,4±7,16	28,0-35,0	30-50
Фосфатаза щелочная, ед/л Alkaline phosphatase, U/L	143,33±54,40	100-300	17-153

Примечание: * – данные [1]; ** – данные ООО «Вет Юнион» (2024)
Note: * – data from [1]; ** – data from Vet Union LLC (2024)

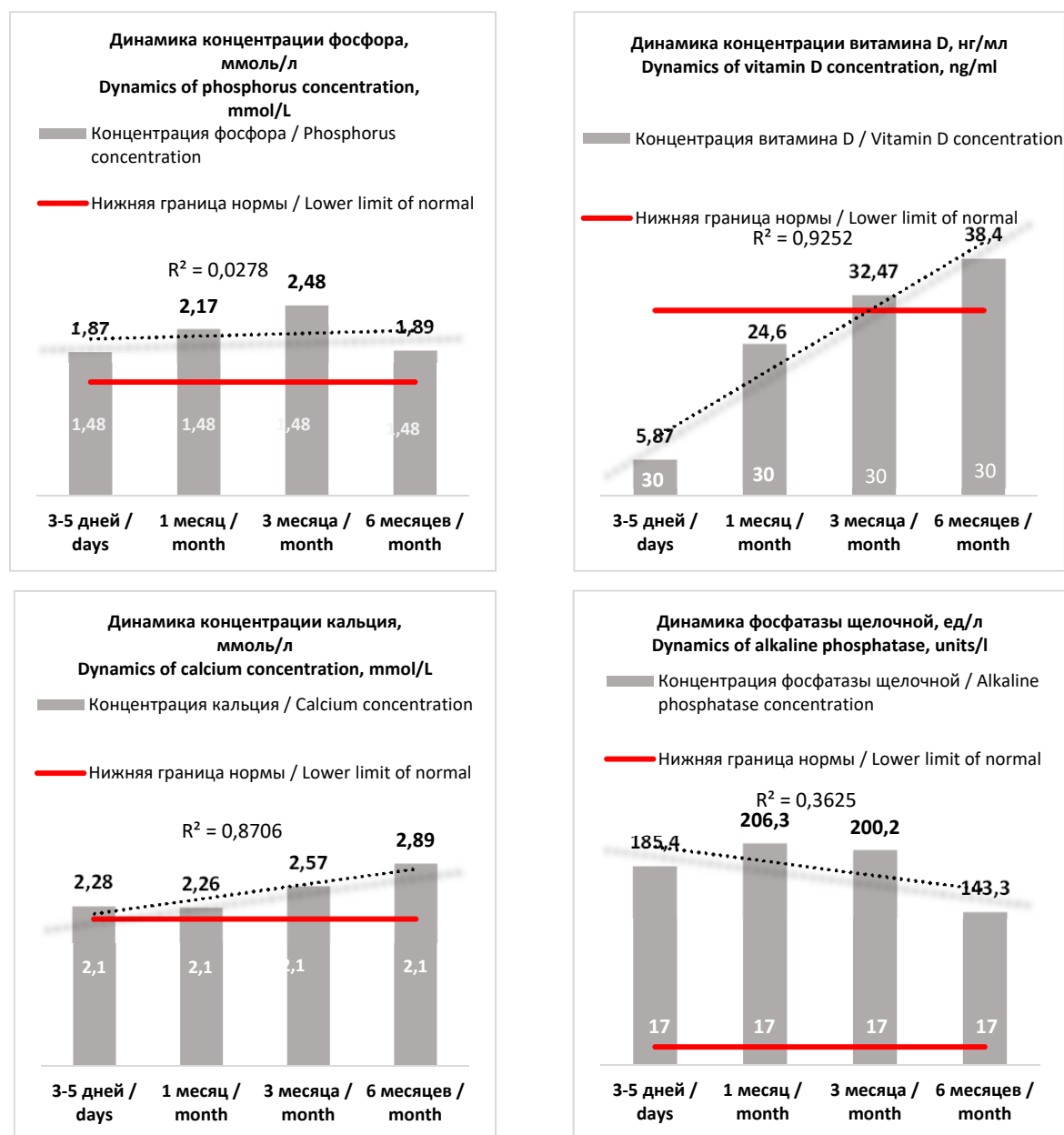


Рисунок 3. Динамика изменений кальций-фосфорного метаболизма у молодняка (n=30)

Figure 3. Dynamics of changes in calcium-phosphorus metabolism in young animals (n=30)

Таблица 5. Коэффициенты корреляции между кальций-фосфорными показателями матерей и потомства, n=30

Table 5. Correlation coefficients between calcium-phosphorus indicators of mothers and offspring, n=30

Показатели крови коров-матерей Blood Parameters of Mother Cows	Показатели крови потомства Blood parameters of offspring			
	Кальций, ммоль/л Calcium, mmol/L	Фосфор, ммоль/л Phosphorus, mmol/L	Витамин D, нг/мл Vitamin D, ng/ml	Фосфатаза щелочная, ед/л Alkaline phosphatase, U/L
при рождении / at birth				
показатели за 50 дней до отела / indicators 50 days before calving				
Кальций, ммоль/л Calcium, mmol/L	0,231	0,391	-0,005	-0,485
Фосфор, ммоль/л Phosphorus, mmol/L	-0,061	-0,132	0,045	-0,109
Витамин D, нг/мл Vitamin D, ng/ml	0,260	-0,008	0,751	-0,174
показатели за 14 дней до отела / indicators 14 days before calving				
Кальций, ммоль/л Calcium, mmol/L	0,009	0,039	-0,316	0,107

Фосфор, ммоль/л Phosphorus, mmol/L	-0,219	-0,199	0,188	0,326
Витамин D, нг/мл Vitamin D, ng/ml	0,162	-0,083	0,709	-0,076
1 месяц / 1 month				
<i>показатели за 50 дней до отела / indicators 50 days before calving</i>				
Кальций, ммоль/л Calcium, mmol/L	0,292	0,478	0,008	-0,623
Фосфор, ммоль/л Phosphorus, mmol/L	-0,303	-0,171	-0,007	-0,131
Витамин D, нг/мл Vitamin D, ng/ml	0,076	0,105	0,033	-0,294
<i>показатели за 14 дней до отела / indicators 14 days before calving</i>				
Кальций, ммоль/л Calcium, mmol/L	0,006	-0,0008	-0,151	0,072
Фосфор, ммоль/л Phosphorus, mmol/L	-0,287	-0,133	-0,031	0,253
Витамин D, нг/мл Vitamin D, ng/ml	0,055	0,010	0,094	-0,199
3 месяца / 3 months				
<i>показатели за 50 дней до отела / indicators 50 days before calving</i>				
Кальций, ммоль/л Calcium, mmol/L	-0,043	0,149	-0,169	-0,586
Фосфор, ммоль/л Phosphorus, mmol/L	0,050	-0,047	-0,172	-0,055
Витамин D, нг/мл Vitamin D, ng/ml	0,102	0,007	0,064	-0,348
<i>показатели за 14 дней до отела / indicators 14 days before calving</i>				
Кальций, ммоль/л Calcium, mmol/L	-0,013	0,145	-0,267	0,110
Фосфор, ммоль/л Phosphorus, mmol/L	0,134	0,099	0,036	0,221
Витамин D, нг/мл Vitamin D, ng/ml	-0,007	-0,110	0,197	-0,247
6 месяцев / 6 month				
<i>показатели за 50 дней до отела / indicators 50 days before calving</i>				
Кальций, ммоль/л Calcium, mmol/L	-0,215	-0,129	-0,252	-0,377
Фосфор, ммоль/л Phosphorus, mmol/L	-0,246	0,172	-0,344	0,273
Витамин D, нг/мл Vitamin D, ng/ml	0,147	0,109	0,036	-0,016
<i>показатели за 14 дней до отела / indicators 14 days before calving</i>				
Кальций, ммоль/л Calcium, mmol/L	0,047	0,058	0,001	-0,028
Фосфор, ммоль/л Phosphorus, mmol/L	-0,204	0,172	0,079	0,323
Витамин D, нг/мл Vitamin D, ng/ml	0,034	-0,099	0,042	0,026

– слабая корреляция / weak correlation
 – средняя корреляция / average correlation
 – сильная корреляция / strong correlation

При сравнении коэффициентов корреляции у коров-матерей и потомства в возрасте 3 месяца, мы наблюдаем только отрицательную связь между показателем щелочной фосфатазы телят и концентрацией кальция и витамина D у коров за 50 дней до отела $r = -0,586$; $r = -0,348$, соответственно. В возрасте 6 месяцев отрицательная корреляция между щелочной фосфатазой телят и концентрацией кальция в крови коров за 50 дней до отела сохраняется, однако связь с витамином D коров-матерей стремится к нулю.

Таким образом, можно сделать вывод, что из всех исследуемых нами показателей кальций-фосфорного обмена коров-матерей только показатель концентрации кальция в крови коров за 50 дней до отела имеет среднюю отрицательную связь с концентрацией щелочной фосфатазы во все возрастные периоды телят. При этом с увеличением возраста телят увеличивался коэффициент корреляции. Для понимания степени тесноты взаимосвязи между признаками нами был рассчитан коэффициент детерминации $R (r^2)$ по данным показателям. При

рождении он составил $R = 24\%$, в возрасте 1 месяц $R = 39\%$, в возрасте 3 месяца $R = 34\%$, в возрасте 6 месяцев $R = 14\%$, соответственно, что говорит о достаточно низкой вариабельности одной переменной со второй.

Далее нами были рассчитаны коэффициенты корреляции между показателем концентрации щелочной фосфатазы телят в разные возрастные периоды с показателями кальций-фосфорного обмена телят и живой массой (таблица 7, 8).

Таблица 7. Коэффициенты корреляции между концентрацией щелочной фосфатазы и показателями кальций-фосфорного обмена телят, $n=30$

Table 7. Correlation coefficients between the concentration of alkaline phosphatase and calcium-phosphorus metabolism parameters in calves, $n=30$

Показатель Indicator	Показатели крови потомства Blood Parameters of Offspring		
	Кальций, ммоль/л Calcium, mmol/L	Фосфор, ммоль/л Phosphorus, mmol/L	Витамин D, нг/мл Vitamin D, ng/ml
при рождении / at birth			
Фосфатаза щелочная, ед/л Alkaline phosphatase, U/L	-0,341	-0,530	-0,204
1 месяц / 1 month			
Фосфатаза щелочная, ед/л Alkaline phosphatase, U/L	-0,337	-0,508	0,059
3 месяца / 3 month			
Фосфатаза щелочная, ед/л Alkaline phosphatase, U/L	-0,086	0,034	0,301
6 месяцев / 6 month			
Фосфатаза щелочная, ед/л Alkaline phosphatase, U/L	-0,604	-0,179	0,107

– слабая корреляция / weak correlation
 – средняя корреляция / average correlation
 – сильная корреляция / strong correlation

Установлена отрицательная связь между показателем щелочной фосфатазы и концентрацией кальция и фосфора у телят при рождении $r = -0,341$ ($R = 12\%$); $r = -0,530$ ($R = 28\%$), соответственно. В возрасте 1 месяц отрицательная корреляционная связь между данными показателями сохранилась. Для оценки параметров уравнения регрессии нами была изучена зависимость Y от X , на этапе спецификации была выбрана парная

экспоненциальная регрессия, оценены её параметры методом наименьших квадратов по формуле: $y = 1.614 * e^{0.03x}$. В результате установлено, что параметры модели статистически не значимы. Рассчитанный коэффициент детерминации R^2 , также подтверждает низкую вариабельность одной переменной со второй.

Таблица 8. Коэффициенты корреляции между живой массой и показателями кальций-фосфорного обмена телят, $n=30$

Table 8. Correlation coefficients between live weight and calcium-phosphorus metabolism indicators of calves, $n=30$

Показатель Indicator	Показатели крови потомства Blood parameters of offspring			
	Кальций, ммоль/л Calcium, mmol/L	Фосфор, ммоль/л Phosphorus, mmol/L	Витамин D, нг/мл Vitamin D, ng/ml	Фосфатаза щелочная, ед/л Alkaline phosphatase, U/L
при рождении / at birth				
Живая масса, кг Live weight, kg	0,165	0,223	0,166	0,223
1 месяц / 1 month				
Живая масса, кг Live weight, kg	0,253	0,149	0,093	0,123
3 месяца / 3 months				
Живая масса, кг Live weight, kg	-0,038	-0,282	0,197	0,053
6 месяцев / 6 months				
Живая масса, кг Live weight, kg	0,405	0,333	0,361	-0,335

– слабая корреляция / weak correlation
 – средняя корреляция / average correlation
 – сильная корреляция / strong correlation

При оценке корреляционной зависимости показателей кальций-фосфорного обмена с живой массой телят выявлена слабая корреляция только в возрасте 6 месяцев: кальций $r = 0,405$ ($R = 16\%$), фосфор $r = 0,333$ ($R = 11\%$), витамин D $r = 0,361$ ($R = 13\%$), фосфатаза щелочная $r = -0,335$ ($R = 11\%$), соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате поиска зависимостей между биохимическими показателями крови стельных коров и развитием рахита у новорожденных телят можно сделать вывод, что, не смотря на наличие корреляционных связей между показателями кальций-фосфорного обмена коров-матерей и их потомства нет статистически достоверных данных, подтверждающих высокую вариабельность и влияние одних признаков на другие. Дополнительные сложности в построении прогноза и проведение верифицированных исследований доставляет интерпретация результатов анализов телят, в связи с отсутствием утвержденных единых нормативных показателей кальций-фосфорного обмена и витамина D. По данным ряда авторов минеральные константы крови приходят к значениям взрослых животных только к полугодовалому возрасту [16]. В связи с этим, нет оснований для внедрения дополнительного функционала в систему бесконтактной оценки животных, с помощью которой можно было бы заниматься построением прогноза развития рахита у молодняка.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-10041, <https://rscf.ru/project/23-76-10041/>

ACKNOWLEDGMENT

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation N 23-76-10041, <https://rscf.ru/project/23-76-10041/>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зуев Н.П., Лопатин В.Т., Скогорева А.М., Попова О.В., Крутов И.О., Шутиков В.А., Тучков Н.С. Оценка эффективности лечебных мероприятий при рахите у телят при интенсивных технологиях выращивания // Эффективное животноводство. 2024. N 5 (195). С. 86–87.
2. Pilz S., Kienreich K., Tomaschitz A., Lerchbaum E., Meinitzer A., März W., Zittermann A., Dekker J.M. Vitamin D and cardiovascular disease: update and outlook // *Scand J Clin Lab Invest Suppl.* 2012. V. 72. P. 83–91. <https://doi.org/10.3109/00365513.2012.681972>
3. Маслова Т.В. Витамин D при лечении рахита у телят // Аграрный вестник Урала. 2008. N 11. С. 55–56.
4. Holick M.F. Vitamin D: extraskeletal health // *Rheum Dis Clin North Am.* 2012. V. 38(1). P. 141–160. <https://doi.org/10.1016/j.rdc.2012.03.013>
5. Hossein-nezhad A., Holick M.F. Optimize dietary intake of vitamin D: an epigenetic perspective // *Curr Opin Clin Nutr Metab Care.* 2012. V. 15(6). P. 567–579. <https://doi.org/10.1097/MCO.0b013e3283594978>
6. Plum L.A., DeLuca H.F. The functional metabolism and molecular biology of vitamin D action // *Clinic Rev Bone Miner Metab.* 2009. V. 7(1). P. 20–41. <https://doi.org/10.1007/s12018-009-9040-z>
7. Bechdel S.I., Hillston N.W., Guerrant N.B. The vitamin D requirement (U.S.P. units) for growth and well-being of calves from birth to six months of age // *Journal of Dairy Science.* 1937. V. 20. P. 434.

8. Norman A.W. From vitamin D to hormone D: Fundamentals of the vitamin D endocrine system essential for good health // *Am. J. Clin. Nutr.* 2008. V. 88. P. 491S–499S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/88.2.491S>
9. Борисевич Б.В. Эндогенная остеомалация у выбракованных коров // *Ветеринария.* 1995. N 8. С. 17–20.
10. Тареев А.Г. Скотоводство. Технология производства молока и говядины. Саратов: Саратовский сельскохозяйственный институт им. Н.И. Вавилова, 2004. 426 с.
11. Иогансон И., Рендель Я. Генетика и разведение домашних животных. Москва: Колос, 1970. 351 с.
12. Макрушин П.В. Стресс и продуктивность сельскохозяйственных животных. Саратов: Саратовский сельскохозяйственный институт им. Н.И. Вавилова, 1985. 48 с.
13. Кулешов П.Н. Теоретические работы по племенному животноводству. Москва: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1947. 223 с.
14. Чирвинский Н.П. Избранные сочинения. Изменение сельскохозяйственных животных под влиянием обильного и скудного питания в молодом возрасте. Москва: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1949. Т. 1. С. 125–142.
15. Nelson C.D., Reinhardt T.A., Lippolis J.D., Sacco R.E., Nonnecke B.J. Vitamin D signaling in the bovine immune system: a model for understanding human vitamin D requirements // *Nutrients.* 2012. V. 4 (3). P. 181–196. <https://doi.org/10.3390/nu4030181>
16. Трушкин В.А., Никишина И.В., Ковалев С.П., Воинова А.А., Полевая А.П. Динамика некоторых биохимических показателей крови телят, больных субклиническим рахитом // Вопросы нормативно-правового регулирования в ветеринарии. 2018. N 1. С. 70–72.

REFERENCES

1. Zuev N.P., Lopatin V.T., Skogoreva A.M., Popova O.V., Krutov I.O., Shutikov V.A., Tuchkov N.S. Evaluation of the effectiveness of therapeutic measures for rickets in calves under intensive growing technologies. *Effektivnoye zhivotnovodstvo [Effective animal husbandry]*. 2024, no. 5 (195), pp. 86–87. (In Russian)
2. Pilz S., Kienreich K., Tomaschitz A., Lerchbaum E., Meinitzer A., März W., Zittermann A., Dekker J.M. Vitamin D and cardiovascular disease: update and outlook. *Scand J Clin Lab Invest Suppl.* 2012, vol. 72, pp. 83–91. <https://doi.org/10.3109/00365513.2012.681972>
3. Maslova T.V. Vitamin D in the treatment of rickets in calves. *Agrarnyy vestnik Urala [Agrarian Bulletin of the Urals]*. 2008, no. 11, pp. 55–56. (In Russian)
4. Holick M.F. Vitamin D: extraskeletal health. *Rheum Dis Clin North Am.* 2012, vol. 38(1), pp. 141–160. <https://doi.org/10.1016/j.rdc.2012.03.013>
5. Hossein-nezhad A., Holick M.F. Optimize dietary intake of vitamin D: an epigenetic perspective. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care.* 2012, vol. 15(6), pp. 567–579. <https://doi.org/10.1097/MCO.0b013e3283594978>
6. Plum L.A., DeLuca H.F. The functional metabolism and molecular biology of vitamin D action. *Clinic Rev Bone Miner Metab.* 2009, vol. 7(1), pp. 20–41. <https://doi.org/10.1007/s12018-009-9040-z>
7. Bechdel S.I., Hillston N.W., Guerrant N.B. The vitamin D requirement (U.S.P. units) for growth and well-being of calves from birth to six months of age. *Journal of Dairy Science.* 1937, vol. 20, pp. 434.
8. Norman A.W. From vitamin D to hormone D: Fundamentals of the vitamin D endocrine system essential for good health. *Am. J. Clin. Nutr.* 2008, vol. 88, pp. 491S–499S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/88.2.491S>
9. Borisevich B.V. Endogenous osteomalacia in culled cows. *Veterinariya [Veterinary Science]*. 1995, no. 8, pp. 17–20. (In Russian)
10. Tareev A.G. *Skotovodstvo. Tekhnologiya proizvodstva moloka i govjadiny [Cattle Breeding. Technology of Milk and Beef Production]*. Saratov, Saratov Agricultural Institute named after N.I. Vavilov, 2004, 426 p. (In Russian)

11. Ioganson I., Rendel Ya. *Genetika i razvedeniye domashnikh zhivotnykh* [Genetics and breeding of domestic animals]. Moscow, Kolos Publ., 1970, 351 p. (In Russian)
12. Makrushin P.V. *Stress i produktivnost' sel'skokhozyaystvennykh zhivotnykh* [Stress and productivity of farm animals]. Saratov, Saratov Agricultural Institute named after N.I. Vavilov, 1985, 48 p. (In Russian)
13. Kuleshov P.N. *Teoreticheskiye raboty po plemennomu zhivotnovodstvu* [Theoretical works on livestock breeding]. Moscow, State Publishing House of Agricultural Literature, 1947, 223 p. (In Russian)
14. Chirvinsky N.P. *Izbrannyye sochineniya. Izmeneniye sel'skokhozyaystvennykh zhivotnykh pod vliyaniyem obil'nogo i skudnogo pitaniya v molodom vozraste* [Selected Works. Changes in Farm Animals under the Influence of Abundant and Poor Feeding at a Young Age]. Moscow, State Publishing House of Agricultural Literature, 1949, vol. 1, pp. 125–142. (In Russian)
15. Nelson C.D., Reinhardt T.A., Lippolis J.D., Sacco R.E., Nonnecke B.J. Vitamin D signaling in the bovine immune system: a model for understanding human vitamin D requirements. *Nutrients*, 2012, vol. 4 (3). pp. 181–196. <https://doi.org/10.3390/nu4030181>
16. Trushkin V.A., Nikishina I.V., Kovalev S.P., Voinova A.A., Polevaya A.P. Dynamics of some biochemical parameters of blood of calves with subclinical rickets. *Voprosy normativno-pravovogo regulirovaniya v veterinarii* [Issues of legal regulation in veterinary medicine]. 2018, no. 1, pp. 70–72. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Татьяна В. Мамонтова осуществила отбор проб крови у экспериментальных животных для исследования, формулирование концепции исследования, анализ полученных данных. Сергей С. Юрочка провел литературный анализ, обработку результатов исследования и формирование общих выводов. Федор Е. Владимиров и Савр О. Базаев принимали участие в обсуждении материалов и обработке результатов исследования. Артем Р. Хакимов выполнил критический анализ и доработку текста. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи, и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Tatyana V. Mamontova collected blood samples from experimental animals for the study, formulated the study concept and analysed the data. Sergey S. Yurochka conducted the literature review, processed the study results and drew the overall conclusions. Fedor E. Vladimirov and Savr O. Bazayev participated in the discussion of the materials and processing of the study results. Artem R. Khakimov performed critical analysis and revision of the text. All authors are equally participated in the 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

Татьяна В. Мамонтова / Tatyana V. Mamontova <http://orcid.org/0000-0001-8799-3268>
 Сергей С. Юрочка / Sergey S. Yurochka <http://orcid.org/0000-0002-2511-7526>
 Федор Е. Владимиров / Fedor E. Vladimirov <http://orcid.org/0000-0003-2480-5754>
 Савр О. Базаев / Savr O. Bazayev <http://orcid.org/0000-0002-3028-5081>
 Артем Р. Хакимов / Artem R. Khakimov <http://orcid.org/0000-0002-4332-9274>

Оригинальная статья / Original article

УДК 67.02; 346.548

DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-15



Управление экологическими рисками как элемент системы экономической безопасности современной компании

Назирхан Г. Гаджиев¹, Сергей А. Коноваленко², Михаил Н. Трофимов²,
Рашия Х. Бекмурзаева³, Григор Т. Манукян⁴

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

²Рязанский филиал Московского университета МВД России им. В.Я. Кикотя, Рязань, Россия

³Чеченский государственный университет имени А. А. Кадырова, Грозный, Россия

⁴Армянский государственный экономический университет, Ереван, Республика Армения

Контактное лицо

Михаил Н. Трофимов, кандидат экономических наук, доцент кафедры экономической безопасности, Рязанского филиала Московского университета МВД России имени В.Я. Кикотя; 390046 Россия, г. Рязань, ул. 1-я Красная, 18А. Тел. +79308722287

Email fanat1k.fanat1k.fanat1k@yandex.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7194-0468>

Формат цитирования

Гаджиев Н.Г., Коноваленко С.А., Трофимов М.Н., Бекмурзаева Р.Х., Манукян Г.Т. Управление экологическими рисками как элемент системы экономической безопасности современной компании // Юг России: экология, развитие. 2026. Т.21, N 2. С. 174-186. DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-15

Получена 20 февраля 2026 г.

Прошла рецензирование 14 апреля 2026 г.

Принята 25 апреля 2026 г.

Резюме

В статье обоснована интеграция управления экологическими рисками в систему экономической безопасности организации как основного фактора устойчивого развития в условиях глобальной экологической трансформации.

Целью исследования является разработка теоретико-методических основ и практических рекомендаций по интеграции системы управления экологическими рисками в систему экономической безопасности для обеспечения ее долгосрочной финансовой и конкурентной устойчивости.

Системный подход, сравнительный анализ стандартов ESG и риск-менеджмента, кейс-метод, экспертные оценки, сценарное моделирование.

Авторами сформирована и верифицирована трёхблочная модель интеграции (организационно-управленческий, процессно-методический и информационно-аналитический модули), направленная на качественные экологические угрозы в количественные финансовые риски. Сценарный анализ показал, что проактивный подход обеспечивает конкурентные преимущества, тогда как реактивный приводит к дополнительным издержкам и потере финансовой устойчивости.

В настоящее время экологические риски стратегически значимы, их поверхностный анализ создаёт пробелы в защите бизнеса. Предложенная авторами модель повышает финансовую устойчивость и деловую репутацию, а дальнейшие исследования направлены на разработку методик денежной оценки экологических рисков.

Ключевые слова

Экономическая безопасность, управление рисками, экологические риски, подходы, методы, модель.

Environmental risk management as an element of the economic security system of a modern company

Nazirkhan G. Gadzhiev¹, Sergey A. Konovalenko², Mikhail N. Trofimov²,
Rashiya Kh. Bekmurzaeva³ and Grigor T. Manukyan⁴

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia

²V. Ya. Kikot Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Ryazan Branch, Ryazan, Russia

³A. A. Kadyrov Chechen State University, Grozny, Russia

⁴Armenian State University of Economics, Yerevan, Republic of Armenia

Principal contact

Mikhail N. Trofimov, PhD in Economics, Senior Lecturer, Department of Economic Security, Ryazan Branch, V. ya. Kikot Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia; 18A 1-ya Krasnaya St, Ryazan, Russia 390046.

Tel. +79308722287

Email fanat1k.fanat1k.fanat1k@yandex.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7194-0468>

How to cite this article

Gadzhiev N.G., Konovalenko S.A., Trofimov M.N., Bekmurzaeva R.Kh., Manukyan G.T. Environmental risk management as an element of the economic security system of a modern company. *South of Russia: ecology, development*. 2026; 21(2):174-186. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-15

Received 20 February 2026

Revised 14 April 2026

Accepted 25 April 2026

Abstract

The article substantiates the integration of environmental risk management into the economic security system of an organisation as a key factor in sustainable development in the context of global environmental transformation.

The aim of the study was to develop theoretical and methodological foundations and practical recommendations for integrating environmental risk management systems into the economic security system to ensure its long-term financial and competitive sustainability.

Systems approach, comparative analysis of ESG and risk management standards, case study method, expert assessments and scenario modelling.

The authors developed and verified a three-block integration model (organisational and management modules, process and methodological modules and information and analytical modules) aimed at transforming qualitative environmental threats into quantitative financial risks. Scenario analysis showed that a proactive approach provides competitive advantages, while a reactive approach leads to additional costs and a loss of financial stability.

Environmental risks are currently strategically significant and their superficial analysis creates gaps in business protection. The authors' proposed model improves financial stability and business reputation and further research is aimed at developing methods for monetary valuation of environmental risks.

Key Words

Economic security, risk management, environmental risks, approaches, methods, model.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях глобализации и стремительного нарастания экологических вызовов, включая изменение климата, деградацию природных капиталов и ужесточение международного регулирования, традиционные модели управления бизнесом сталкиваются с принципиально новой системой угроз. Эти угрозы, имеют ярко выраженную экологическую природу, трансформируются в прямые финансовые потери, операционные сбои, репутационные риски и утрату конкурентных позиций. Следовательно, они перестают быть предметом исключительно корпоративной социальной ответственности, а входят в ядро стратегических и операционных рисков, напрямую определяющих жизнеспособность компании.

Ключевой управленческой задачей современности становится адекватное восприятие новой реальности в системе экономической безопасности предприятия, которая исторически фокусировалась на финансовых, кадровых, информационных и рыночных аспектах. Однако сегодня очевиден формирующийся институциональный разрыв: экологические риски зачастую остаются на периферии систем риск-менеджмента, не интегрированы в общую архитектуру безопасности и оцениваются качественно, без перевода в понятные для пользователей финансовые показатели. Это создает «слепые зоны», делающие компанию уязвимой перед лицом как внезапных физических катастроф (наводнения, пожары), так и стратегических трансформационных потрясений (введение углеродного налога, смена потребительских предпочтений, отток «зеленого» капитала).

Актуальность данного исследования обусловлена острой необходимостью преодоления указанного разрыва. Разработка теоретических основ и практических механизмов интеграции управления экологическими рисками (УЭР) в систему экономической безопасности (СЭБ) является не академическим вопросом, а императивом для обеспечения долгосрочной, устойчивой и конкурентоспособной организации. Несмотря на растущий объем публикаций в смежных областях – ESG-отчетности, «зеленых» финансов, климатического риск-менеджмента – проблема системной стыковки именно управленческих контуров экологической и экономической безопасности в рамках единой корпоративной модели изучена недостаточно.

Концепция экономической безопасности компании (ЭБК) прошла значительную эволюцию, отражая изменение бизнес-среды и парадигм управления:

1. Традиционный подход (до 1990-х гг.) характеризуется тем, что ЭБК сводилась преимущественно к охране материальных активов и финансов. Акцент делался на обеспечение физической безопасности объектов, защите от краж, предотвращении мошенничества и обеспечении платежной дисциплины. Это была реактивная, "защитная" функция, сосредоточенная на внутренних угрозах.

2. Расширенный подход (1990-е – 2000-е гг.), так ЭБК находилась под влиянием глобализации, роста конкуренции и цифровизации понятие расширилось. В фокус вошли:

- информационная безопасность (защита данных, коммерческой тайны);
- кадровая безопасность (лояльность персонала, противодействие промышленному шпионажу);
- рыночная безопасность (сохранение доли рынка, защита от недобросовестной конкуренции).

ЭБК стала пониматься как система, обеспечивающая стабильность функционирования и достижение стратегических целей [1].

3. Стратегический и интегрированный подход (с 2010-х гг. по настоящее время): ЭБК трансформируется в комплексную систему управления рисками, направленную на обеспечение долгосрочной финансовой устойчивости организации. Ключевые элементы данного подхода включают:

- проактивность, то есть предвидение и смягчение угроз до их реализации, при этом интеграция в стратегию развития организации становится неотъемлемой частью стратегического планирования;
- нацеленность на нематериальные активы (защита репутации, бренда, интеллектуальной собственности и т.д.).

4. Экономическая безопасность через призму экологических рисков: новая парадигма. Сущность направления заключается в том, что экологические риски рассматриваются не как отдельная категория, а как сквозной системообразующий фактор, трансформирующий всю архитектуру экономической безопасности организации. Данное направление формируется под влиянием глобального энергетического перехода и циклической экономики [2].

Данный подход базируется на следующих ключевых принципах:

1. Проактивность и стратегическое предвидение. СЭБ фокусируется не на ликвидации последствий, а на упреждающем моделировании климатических сценариев (например, по методологии TCFD) и оценке их влияния на бизнес-модель. Цель — выявить риски списания активов (stranded assets) и вовремя перераспределить капитал.

2. Финансирование экологических рисков. Все экологические угрозы переводятся в финансовую плоскость с необходимостью проведения анализа потенциального ущерба от будущего углеродного налога или изменения стоимости организации в рамках репутационных потерь. Это позволит влиять на инвестиционные решения, принимаемые финансовыми менеджерами и обеспечит системную оценку результативности деятельности.

3. Интеграция в цепочку ценообразования. Оценке подвергается не только собственное производство, но и экологические риски всех поставщиков (Score 3 выбросы). Устойчивость цепочки поставок становится элементом ЭБ.

4. Безопасность как драйвер стоимости. Внедрение принципов циклической экономики (ресурсоэффективность, переработка) и низкоуглеродных технологий рассматривается не как затраты, а как направление инвестиционной деятельности в рамках обеспечения долгосрочной конкурентоспособности организации. «Зеленая» трансформация становится инструментом защиты от рыночных и регуляторных угроз.

5. Роль подразделений экономической безопасности. Ранее выполняемые функции в первую очередь охранного характера эволюционируют в аналитический центр, который:

- оценивает, какие экологические тренды (новые законы, климатические сдвиги) создают угрозы и возможности на рынках.

- обеспечивают «экологическую дипломатию» — взаимодействие с контролирующими органами, инвесторами и некоммерческими организациями для формирования благоприятной среды.

- контролируют выполнение «зеленых» KPI менеджментом как части системы обеспечения экономической устойчивости.

Таким образом, в XXI веке не может быть надежной экономической безопасности без экологической устойчивости. Компании, не включившие экологический риск-менеджмент в ядро своей системы обеспечения безопасности, оказываются уязвимыми для системных кризисов нового типа, способных подорвать их существование. Безопасность достигается не через защиту статус-кво, а через стратегическую адаптацию и опережающую трансформацию.

В современном стратегическом подходе экологическая составляющая в системе экономической безопасности компании перешла из периферийной в критически важную по следующим причинам:

1. наличие прямого финансового воздействия, например, ущерб от наводнений, пожаров, засух ведет к прямым потерям активов, остановке производства, росту страховых выплат;

2. действие трансформационных рисков, так, например, введение углеродных налогов (например, СВМ в ЕС), ужесточение нормативов, отказ банков от финансирования "грязных" проектов создают новые статьи расходов и ограничивают доступ к капиталу;

3. угроза операционной непрерывности деятельности, например дефицит водных ресурсов, деградация почв, зависимость от уязвимых цепочек поставок сырья напрямую ставят под вопрос саму возможность ведения бизнеса в определенных регионах или отраслях;

4. репутационный риск и потеря «социальной лицензии», так экологические инциденты (разливы, выбросы) или обвинения в "гринвошинге" мгновенно разрушают доверие потребителей и инвесторов. Восстановление репутации требует колоссальных затрат и не всегда возможно;

5. экология выступает ключевым фактором стратегической конкурентоспособности, так соответствие экологическим стандартам становится обязательным условием для выхода на международные рынки, а институциональные инвесторы все чаще используют ESG-критерии [3].

Таким образом, экологическая составляющая перестала быть факультативным элементом корпоративной социальной ответственности. Сегодня — это стратегический компонент экономической безопасности, напрямую влияющий на финансовые результаты деятельности организации, устойчивость бизнес-модели и долгосрочное выживание компании в условиях глобального экологического перехода. Игнорирование экологических рисков создает системную уязвимость во всех традиционных элементах безопасности.

Анализ влияния экологических рисков на элементы экономической безопасности компании

Экологические риски перестали быть узкоспециализированной проблемой экологов и трансформировались в комплексную угрозу для всех элементов экономической безопасности компании. Их влияние проявляется не только в виде прямых убытков, но и через каналы регуляторного давления, репутационных потерь, сбоев в цепочках поставок и изменения стоимости капитала.

Для анализа влияния экологических рисков на элементы экономической безопасности компании используется общепринятая классификация, предложенная целевой группой по раскрытию финансовой информации, связанной с климатом (TCFD):

1. Физические риски которые подразделяются на острые и хронические риски. Острые включают ущерб от конкретных катастрофических событий (наводнения, ураганы, лесные пожары). Хронические определяются потерями от долгосрочных изменений климата (повышение уровня моря, рост средних температур, засухи) [4].

2. Трансформационные (переходные) риски возникают в процессе перехода к низкоуглеродной и устойчивой экономике.

3. Регуляторные и политические риски ориентированы на введение новых налогов (углеродный сбор), ужесточение нормативов выбросов, ограничительные меры.

4. Технологические в основном отражают необходимость инвестиций в «зеленые» технологии, моральное устаревание текущих активов.

5. Рыночные подразумевают изменение спроса (отказ потребителей от «неэкологических» товаров), колебания цен на сырье и энергоносители.

6. Репутационные включают общественное давление, обвинения в "гринвошинге", активизм инвесторов.

В таблице 1 наглядно представлены каналы воздействия различных типов экологических рисков на ключевые компоненты системы экономической безопасности.

Проведенный анализ наглядно демонстрирует, что экологические риски оказывают тотальное и системное воздействие на все без исключения элементы экономической безопасности компании. Ни один традиционный компонент защитного контура — финансовый, операционный, кадровый, технологический или репутационный — не остается в изоляции от новой генерации угроз. Более того, влияние носит каскадный характер: физический инцидент (например, остановка производства из-за дефицита воды) немедленно запускает цепную реакцию, провоцируя финансовые потери, срыв контрактов и удар по репутации. Это подтверждает тезис о том, что в современной парадигме экологическая устойчивость является не факультативным условием, а обязательным фундаментом для любой надежной системы экономической безопасности.

Критически важным выводом является доминирующая роль трансформационных рисков над физическими в долгосрочной перспективе. Если прямые убытки от стихийных бедствий носят, как правило, локализованный и разовый характер, то риски перехода к низкоуглеродной экономике (регуляторные, технологические, рыночные) способны фундамен-

тально подорвать бизнес-модель компании. Ужесточение законодательства, стремительное моральное устаревание активов и кардинальная смена потребительских предпочтений создают стратегические

угрозы, на которые невозможно оперативно реагировать без их заблаговременного встраивания в систему стратегического планирования и риск-менеджмента [5].

Таблица 1. Влияние экологических рисков на элементы экономической безопасности компании

Table 1. The impact of environmental risks on the company's economic security elements

Элемент экономической безопасности Element of economic security	Физические риски (Острые и Хронические) Physical Risks (Acute and Chronic)	Трансформационные риски (Регуляторные, Технологические, Рыночные, Репутационные) Transformational Risks (Regulatory, Technological, Market, Reputational)	Основные каналы воздействия Main Channels of Influence
1. Финансовая безопасность Financial security	Прямые убытки от повреждения активов; рост страховых премий; затраты на восстановление Direct losses from asset damage; increased insurance premiums and restoration costs	Резкий рост операционных затрат (налоги, штрафы, покупка квот); необходимость незапланированных капитальных вложений в модернизацию; снижение выручки из-за потери рынков; рост стоимости заемного капитала или отказ в кредитовании A sharp increase in operating costs (taxes, fines, and quota purchases); the need for unplanned capital investments in modernization; a decrease in revenue due to the loss of markets and an increase in the cost of borrowed capital or a refusal to provide loans	Снижение прибыльности, ликвидности, кредитного рейтинга. Увеличение долговой нагрузки Decreased profitability, liquidity and credit rating. Increased debt burden
2. Операционная (производственная) безопасность Operational (production) safety	Остановка производства из-за повреждения инфраструктуры или недоступности критических ресурсов (вода); сбои в логистике и цепочках поставок Production shutdowns due to infrastructure damage or lack of critical resources (water); logistical and supply chain disruptions.	Необходимость преждевременного вывода из эксплуатации активов ("застывшие активы"); зависимость от поставщиков "зеленых" технологий; перестройка бизнес-процессов под новые стандарты The need to prematurely decommission assets ("stuck assets"); dependence on green technology suppliers and restructuring business processes to meet new standards	Нарушение непрерывности производства, рост себестоимости, потеря контроля над цепочкой создания стоимости Disruption of production continuity, increased costs and loss of control over the value chain
3. Кадровая безопасность Personnel security	Угроза здоровью персонала; невозможность работы на объектах в зонах повышенного риска Threat to staff health; inability to work at facilities in high-risk areas	Отток квалифицированных кадров в более "зеленые" компании; сложности с привлечением талантов; рост социальной напряженности в регионах присутствия Outflow of qualified personnel to more "green" companies; difficulties in attracting talent and increased social tension in the regions where they operate.	Потеря ключевых компетенций, рост затрат на персонал, снижение производительности труда Loss of key competencies, increased staff costs and reduced labour productivity
4. Информационная и интеллектуальная безопасность Information and intellectual security	Повреждение серверных и инфраструктуры данных; риски при переносе данных в ходе эвакуации Damage to server and data infrastructure; risks associated with data transfer during evacuation	Риски утечки стратегических планов по декарбонизации; промышленный шпионаж за "зелеными" технологиями; кибератаки на ESG-отчетность Risks of strategic decarbonisation plans being leaked; industrial espionage on green technologies; and cyberattacks on ESG reporting	Потеря конкурентных преимуществ, репутационный ущерб от утечек, правовые риски Loss of competitive advantages, reputational damage from leaks, and legal risks

5. Рыночная и репутационная безопасность Market and reputational security	Потеря клиентов из-за срывов поставок; локальный репутационный ущерб от инцидента Loss of customers due to supply disruptions; local reputational damage from the incident	Глобальная потеря доли рынка из-за изменения потребительских предпочтений; снижение капитализации бренда; исключение из "зеленых" инвестиционных портфелей и индексов; судебные иски Global loss of market share due to changing consumer preferences; decrease in brand capitalization; exclusion from green investment portfolios and indices and lawsuits	Эрозия рыночной позиции, снижение лояльности клиентов и инвесторов, потеря "социальной лицензии на деятельность" Erosion of market position, decrease in customer and investor loyalty, and loss of "social license to operate"
6. Технико-технологическая безопасность Technical and technological safety	Физический износ оборудования из-за экстремальных условий (жара, влажность) Physical wear and tear of equipment due to extreme conditions (heat, humidity)	Стремительное моральное устаревание технологий; зависимость от импорта "зеленых" решений; риски внедрения неэффективных технологий Rapid obsolescence of technologies; dependence on imported green solutions and risks associated with the implementation of inefficient technologies	Потеря технологической независимости и конкурентоспособности, рост затрат на НИОКР Loss of technological independence and competitiveness, and increased R&D costs

Экологические риски выступают сегодня в роли стратегического стресс-теста для всей системы экономической безопасности компании, выявляя ее слабые места и требуя глубокой трансформации подходов к обеспечению устойчивости и конкурентоспособности.

Разработка и внедрение Модели интеграции управления экологическими рисками (УЭР) в систему экономической безопасности (СЭБ) компании является не просто рекомендацией, а стратегической необходимостью в рамках обеспечения долгосрочной устойчивости бизнеса. Данная модель создает формализованный, системный и проактивный механизм, который позволяет трансформировать экологические угрозы из разрозненных и часто игнорируемых «слепых зон» в понятные, измеримые и управляемые объекты внутри общего контура защиты компании. Модель необходима для преодоления критического институционального разрыва между экологическими специалистами, говорящими на языке экологических нормативов, и службой экономической безопасности, оценивающей риски в категориях финансовых потерь, репутационного ущерба и

операционных сбоев. Без такой интеграции компания обречена на постоянное оперативное латание дыр после реализации рисков, теряя конкурентные позиции, капитал и доверие стейкхолдеров в эпоху, когда экологическая повестка стала одним из главных драйверов изменения глобальных рынков и регуляторной среды [6].

Модель интеграции управления экологическими рисками в систему экономической безопасности компании основана на принципах проактивности, системности и стратегической интеграции. Она представляет собой не замену существующих систем, а их эволюцию через внедрение сквозных процессов и перераспределение ответственности. Модель состоит из трех взаимосвязанных блоков: организационно-управленческий, процессно-методический и информационно-аналитический.

Содержание организационно-управленческого блока представлено в табл. 2, его цель создать организационную структуру, обеспечивающую стратегическое руководство, координацию и подотчетность в области интеграции экологических рисков в ЭБ.

Таблица 2. Роли и ответственность в интегрированной системе

Table 2. Roles and responsibilities in an integrated system

Организационный уровень / Функция Organisational Level / Function	Роль в управлении экологическими рисками Role in Environmental Risk Management	Ключевые задачи в контуре ЭБ Key Tasks in the EB Circuit
Совет директоров / Комитет по устойчивому развитию и рискам Board of Directors / Sustainability and Risk Committee	Стратегическое руководство. Утверждение политики, толерантности к рискам, контроль эффективности Strategic management. Approval of policies, risk tolerance and performance control	Включение экологических рисков в стратегию компании и карту ключевых рисков ЭБ. Увязка KPI топ-менеджмента с показателями экологической устойчивости Incorporating environmental risks into the company's strategy and the EB's key risk map. Linking top management's KPIs to environmental sustainability indicators
Топ-менеджмент (CEO, CFO) Top management (CEO, CFO)	Несение ответственности. Реализация стратегии, выделение ресурсов Taking responsibility. Implementing a	Обеспечение финансирования мероприятий по снижению экологических рисков. Интеграция данных по ЭР в систему управленческой отчетности и принятия решений

	strategy and allocating resources.	Ensuring funding for environmental risk reduction measures. Integrating environmental data into the management reporting and decision-making system.
Руководитель службы экономической безопасности Head of the Economic Security Service	Координация и интеграция. Связующее звено между классической ЭБ и экологической повесткой Coordination and integration. The link between classical EB and the environmental agenda	Разработка и внедрение методик оценки экологических угроз для активов, финансов и репутации. Мониторинг внешней регуляторной среды (климатическая политика) Development and implementation of methods for assessing environmental threats to assets, finances, and reputation. Monitoring the external regulatory environment (climate policy)
Служба экологической безопасности / Менеджер по ESG Environmental Safety Service / ESG Manager	Предметный эксперт. Идентификация, первичная оценка, мониторинг профильных рисков Subject matter expert. Identification, initial assessment, and monitoring of specialized risks	Предоставление актуальных данных (выбросы, отходы, потребление ресурсов) для их конвертации в финансовые и операционные показатели риска для ЭБ Providing up-to-date data (emissions, waste, and resource consumption) for conversion into financial and operational risk indicators for the EBRD
Линейные руководители подразделений Line managers of divisions	Внедрение и контроль на местах On-site implementation and control	Реализация конкретных мероприятий по снижению рисков в своих бизнес-единицах. Оперативное реагирование на инциденты Implementing specific risk reduction measures in their business units. Prompt response to incidents

Согласно данным таблицы 2 существует реальная необходимость четкого перераспределения и консолидации ответственности между всеми уровнями управления производством в организации. Модель устраняет ключевой дисфункциональный разрыв, когда экологические риски были ответственностью узких специалистов, не вовлеченных в процесс обеспечения экономической безопасности. Назначение руководителя службы ЭБ ключевым координатором обеспечивает перевод «языка экологии» на «язык безопасности и финансов», что критически важно для

принятия обоснованных решений. Внедрение данной структуры превращает управление экологическими рисками из вспомогательной функции в стратегически управляемый процесс, подконтрольный высшим органам управления компанией.

Процессно-методический блок описывает сквозной циклический процесс (PDCA) идентификации, оценки, обработки и мониторинга экологических рисков в рамках системы ЭБ. Этапы данного процесса представлены в таблице 3.

Таблица 3. Этапы интеграции в процесс управления рисками ЭБ
Table 3. Stages of integration into the EBRD risk management process

Этап процесса (по ISO 31000) Process Stage (According to ISO 31000)	Содержание применительно к экологическим рискам Content Related to Environmental Risks	Инструменты и методы (на входе для ЭБ) Tools and Methods (at Entrance for EB)
1. Идентификация рисков Identification of risks	Системный поиск источников физических и трансформационных экологических угроз для активов, процессов и репутации компании Systematic search for sources of physical and transformational environmental threats to the company's assets, processes and reputation	1. Картирование цепочек создания стоимости и критически важных активов. 2. Анализ сценариев (TCFD): «жесткий» vs «мягкий» переход к низкоуглеродной экономике 3. PESTLE-анализ 1. Mapping of value chains and critical assets. 2. Scenario analysis (TCFD): "hard" vs "soft" transition to a low-carbon economy. 3. PESTLE analysis
2. Анализ и оценка рисков Risk analysis and assessment	Определение вероятности и финансовых последствий реализации риска. Ранжирование по степени угрозы для ЭБ Determining the likelihood and financial consequences of a risk's implementation. Ranking by the degree of threat to the EBRD	1. Финансирование рисков: моделирование затрат от углеродного налога (CBAM), штрафов, потери выручки. 2. Стресс-тестирование активов на климатические шоки. 3. Построение матрицы влияния экологических рисков на экономическую безопасность 1. Risk financing: modeling the costs of carbon tax (CBAM), fines and revenue losses. 2. Stress testing assets for climate shocks. 3. Building a matrix of the impact of environmental risks on economic security

3. Обработка (снижение) рисков Risk management (reduction)	Разработка и выбор стратегии реагирования: принятие, снижение, передача (страхование), избегание Development and selection of a response strategy: acceptance, reduction, transfer (insurance), avoidance	1. Интеграция мер в План обеспечения экономической безопасности (например, диверсификация цепочек поставок из-за водного стресса). 2. Разработка инвестиционной программы в «зеленые» технологии как способ снижения регуляторного и репутационного риска 1. Integration of measures into the Economic Security Plan (for example, diversification of supply chains due to water stress). 2. Development of an investment program in green technologies as a way to reduce regulatory and reputational risk
4. Мониторинг, учет и коммуникация Monitoring, accounting and communication	Постоянное отслеживание изменений в профиле рисков, эффективности мер и внешней среды Continuous monitoring of changes in the risk profile, the effectiveness of measures and the external environment	1. Внедрение Ключевых показателей риска (KRI) для ЭБ: динамика ESG-рейтингов, рост экологических штрафов, концентрация выбросов в уязвимых регионах. 2. Регулярная отчетность перед Советом директоров о состоянии экологических угроз в разрезе ЭБ 1. Implementation of Key Risk Indicators (KRI) for EB: dynamics of ESG ratings, growth of environmental fines, and concentration of emissions in vulnerable regions. 2. Regular reporting to the Board of Directors on the state of environmental threats by EB

Представленный процессный цикл в табл. 3 формализует процедуру работы с экологическими рисками, делая ее измеримой, повторяемой и встроенной в общую систему риск-менеджмента компании. Ключевым элементом является этап финансиализации, который преодолевает главное препятствие для понимания экологических угроз службой ЭБ — их кажущуюся «нефинансовую» природу. Перевод последствий в денежный эквивалент и привязка к конкретным активам позволяют объективно

ранжировать эти риски наряду с традиционными угрозами. Таким образом, модель обеспечивает переход от качественных описаний к количественно обоснованным управленческим решениям в области экономической безопасности.

Информационно-аналитический блок табл. 4 обеспечивает интеграцию данных для поддержки принятия решений через создание единой системы показателей и отчетности.

Таблица 4. Система показателей для интегрированного мониторинга

Table 4. System of indicators for integrated monitoring

Категория показателя Indicator Category	Показатель (KRI / KPI) Indicator (KRI / KPI)	Цель мониторинга для ЭБ Purpose of Monitoring for EB	Источник данных Data Source
Регуляторные риски Regulatory risks	1. Прогнозируемые затраты на углеродные платежи. 2. Количество существенных изменений в эко-законодательстве за квартал 1. Predicted costs for carbon payments. 2. Number of significant changes in eco-legislation per quarter	Оценка будущей финансовой нагрузки и операционной устойчивости Assessment of future financial burden and operational sustainability	Юридический департамент, аналитические отчеты, биржи углеродных квот Legal Department, analytical reports, carbon exchange
Физические риски Physical risks	1. Стоимость активов в зонах высокого риска (наводнения, пожары). 2. Индекс водного стресса в регионах деятельности 1. Value of assets in high-risk areas (floods, fires). 2. Water stress index in regions of activity	Оценка потенциальных прямых убытков и угроз непрерывности производства Assessment of potential direct losses and threats to production continuity	Геоинформационные системы (GIS), данные гидрометцентров, страховая оценка Geoinformation systems (GIS), hydrometeorological centre data, insurance assessment
Репутационные риски Regulatory risks	1. Динамика ESG-рейтинга (MSCI, Sustainalytics). 2. Тональность медиапространства по экологической тематике 1. Dynamics of the ESG rating (MSCI, Sustainalytics). 2. Tone of media space on environmental issues	Раннее предупреждение о кризисе доверия и угрозе рыночной позиции Early warning of a crisis of trust and a threat to market position	Служба PR, платформы медиа-анализа, рейтинговые агентства PR service, media analysis platforms, and rating agencies

Операционные/ Технологические риски Operating rooms/Technological risks	1. Доля затрат на НИОКР «зеленых» технологий. 2. Процент «застывших» активов в портфеле 1. Share of R&D costs for green technologies. 2. Percentage of "stuck" assets in the portfolio	Контроль технологической отсталости и будущей конкурентоспособности Control of technological backwardness and future competitiveness	Данные R&D департамента, отчеты стратегического планирования, инвентаризация ОС R&D department data, strategic planning reports, and OS inventory
---	---	---	---

Разработанная система показателей формирует единый информационный контур для управления экологическими рисками в рамках экономической безопасности и позволяет осуществить трансформацию разрозненных экологических данных в стратегически значимые управленческие индикаторы, понятные для службы ЭБ и высшего руководства. Такой подход позволяет осуществлять непрерывный мониторинг и превентивное реагирование. Из вышеописанного, информационный блок замыкает цикл управления, обеспечивая его цикличность и адаптивность.

Представленная модель обеспечивает не формальное, а реальное включение экологических рисков в мейнстрим корпоративного управления, создает организационные, процессные и информационные условия для того, чтобы служба экономической безопасности могла выполнять свою ключевую функцию — защиту стоимости компании — в условиях глобального экологического перехода.

В заключении проведем сравнительный анализ внедрения модели интеграции управления экологическими рисками в систему экономической безопасности компании табл. 5.

Таблица 5. Оценка эффективности интеграции модели на примере конкретных компаний

Table 5. Evaluation of the model integration efficiency based on specific companies

Параметр сравнения / Ключевой индикатор Comparison Parameter / Key Indicator	Компания А (ОАО «Инновационные решения») – внедрила интегрированную модель (2020–2024 гг.) Company A (Innovative Solutions OJSC) has implemented an integrated model (2020–2024)	Компания Б (ОАО «Традиционные технологии») – сохранила традиционный подход (2020–2024 гг.) Company B (Traditional Technologies OJSC) has maintained its traditional approach (2020–2024)
1. Финансовая безопасность (Воздействие регуляторного риска) Financial Security (Impact of Regulatory Risk)	1. Прогнозируемые затраты на углеродный налог CBAM (2025): 1,5 млн евро (заложены в бюджет с 2021 г., создан финансовый резерв). 2. Доп. затраты на модернизацию: 15 млн руб. в год (инвестиционная программа 2022–2026 гг.). 3. Стоимость «зеленого» кредита: ставка на 0,75 % ниже рыночной 1. Predicted costs for the CBAM carbon tax (2025): 1.5 million euros (included in the budget since 2021; a financial reserve has been created). 2. Additional costs for modernization: 15 million rubles per year (investment programme for 2022–2026). 3. Cost of a green loan: a rate that is 0.75 % lower than the market rate	1. Внезапные затраты на углеродный налог CBAM (2025): 8 млн евро (не были предусмотрены, ведут к убыткам). 2. Срочная модернизация под угрозой штрафа: требуется 50 млн руб. одновременно в 2024 г. 3. Отказ в рефинансировании кредита от ESG-ориентированного банка в 2023 г. 1. Sudden costs for the CBAM carbon tax (2025): 8 million euros (not foreseen, leading to losses). 2. Urgent modernisation under the threat of a fine: 50 million rubles are required in a single payment in 2024. 3. Refusal to refinance a loan from an ESG-oriented bank in 2023.
2. Операционная безопасность (Воздействие физического риска – засуха) Operational Safety (Physical Risk Exposure – Drought)	1. Потери от простоя в 2022 г. (водный дефицит): 0 руб. (внедрена система замкнутого водооборота в 2021 г. за 7 млн руб.). 2. Показатель водной эффективности: 2,5 м³ на ед. продукции (снижение на 40 % к 2019 г.) 1. Losses from downtime in 2022 (water shortage): 0 RUB (closed water cycle system was implemented in 2021 for 7 million RUB). 2. Water efficiency indicator: 2.5 m³ per unit of production (a 40 % decrease compared to 2019)	1. Потери от простоя в 2022 г. (водный дефицит): 45 млн руб. недополученной прибыли. 2. Показатель водной эффективности: 4,1 м³ на ед. продукции 1. Losses from downtime in 2022 (water shortage): 45 million rubles of lost profit. 2. Water efficiency indicator: 4.1 m³ per unit of production
3. Репутационная и рыночная безопасность Reputational and market security	1. ESG-рейтинг MSCI: повысился с «CCC» (2020) до «В» (2024). 2. Капитализация: рост на 15 % за 3 года при стагнации рынка (по мнению аналитиков, за счет ESG-премии). 3. Доля в «зеленых» госзаказах: 25 % от портфеля	1. ESG-рейтинг MSCI: «CCC» (2020) → понижение до «В» в 2023 г. из-за экологического инцидента. 2. Капитализация: снижение на 10 % относительно отрасли. 3. Исключение из ключевого индекса устойчивого развития

	1.MSCI ESG rating: increased from "CCC" (2020) to "B" (2024). 2.Capitalization: 15 % growth over 3 years with market stagnation (according to analysts, due to the ESG premium). 3.Share in green government orders: 25 % of the portfolio	1. MSCI ESG rating: "CCC" (2020) downgraded to "B" in 2023 due to an environmental incident. 2 Capitalisation: 10 % decrease relative to the industry. 3.Exclusion from the key sustainable development index
4. Ключевой показатель интеграции Key indicator of integration	Время реакции на новый регуляторный риск (внедрение TCFD): 6 месяцев (от идентификации до плана действий) Response time to a new regulatory risk (TCFD implementation): 6 months (from identification to action plan)	Время реакции на новый регуляторный риск (внедрение TCFD): более 18 месяцев (процесс не завершен) Response time to a new regulatory risk (TCFD implementation): more than 18 months (process not completed)
Итоговый финансовый результат (2020–2024, кумулятивно) Total financial result (2020–2024, cumulatively)	Чистая экономия / предотвращенные убытки: около 90 млн руб. (резервы под налоги, отсутствие простоев, доступ к дешевому капиталу, новые контракты) Net savings / avoided losses: about 90 million rubles (tax reserves, no downtime, access to cheap capital, new contracts)	Чистые убытки / дополнительные затраты: около 135 млн руб. (штрафы, срочная модернизация, потерянная прибыль, повышенные процентные расходы) Net losses / additional costs: about 135 million rubles (fines, urgent modernization, lost profits, increased interest expenses)

Сравнительный анализ однозначно демонстрирует, что интеграция управления экологическими рисками в систему экономической безопасности является не затратным проектом, а стратегической инвестицией в финансовую устойчивость и стоимость бизнеса. Компания А, благодаря проактивной модели, смогла трансформировать экологические угрозы в управляемые статьи расходов и даже в источник конкурентных преимуществ (дешевый капитал, новые рынки). Ее затраты были плановыми, распределенными во времени и окупаемыми. В то же время Компания Б, игнорирующая необходимость интеграции, столкнулась с каскадом непредвиденных финансовых потерь, которые пришлось покрывать в срочном, дорогостоящем порядке, что оказало существенное негативное влияние на ее рыночную позицию и устойчивость [7].

Ключевое различие заключается в характере затрат: у Компании А – это контролируемые инвестиции, а у Компании Б – неконтролируемые убытки. Модель интеграции позволила Компании А сместить фокус с ликвидации последствий на предупреждение угроз, что является сутью эффективной экономической безопасности. Данные таблицы 5 подтверждают, что в современных условиях отсутствие такой модели является само по себе одним из крупнейших стратегических рисков, ведущим к прямым финансовым потерям, утрате доверия инвесторов и эрозии рыночной стоимости.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методологическую основу исследования в научной статье составляет системный подход, позволивший рассмотреть управление экологическими рисками (УЭР) и систему экономической безопасности (ЭБ) как взаимосвязанные и взаимовлияющие подсистемы единой организационной структуры компании. Для решения поставленных задач применялся комплекс общенаучных и специальных методов.

Теоретико-методологический анализ проводился на основе изучения научных публикаций, монографий и обзоров были систематизированы эволюция концепций экономической безопасности и управления экологическими рисками, определен

понятийный аппарат и выявлен научный пробел, обосновывающий актуальность интеграции данных областей.

Case-study (кейс-стадии) применялись для эмпирического подтверждения теоретических выводов проведен качественный анализ конкретных ситуаций, а именно изучение опыта компаний, успешно внедрившей элементы интеграции (например, создание совмещенных комитетов по рискам и устойчивости, разработку сценарных моделей в рамках TCFD).

Экспертная оценка используется для валидации разработанной модели и системы показателей, в частности были структурированы и обобщены мнения специалистов-практиков в области экономической безопасности, риск-менеджмента и экологии, полученные из профильных публикаций, материалов конференций.

Моделирование включало синтез полученных данных путем разработки авторской трехблочной структурно-функциональной модели интеграции УЭР в систему ЭБ, включающая организационный, процессный и информационно-аналитический модули.

В рамках проверки практической применимости модели использован метод сценарного планирования для оценки финансовых последствий экологических рисков (трансформационных и физических). На условных цифровых примерах смоделированы бюджетные последствия введения углеродного налога и затрат на адаптацию к физическим климатическим изменениям для двух типов компаний (с интегрированной системой и без нее).

Материалы исследования включали:

1. Международные (Парижское соглашение, директива ЕС о таксономии, CBAM) и национальные (стратегия низкоуглеродного развития РФ, отраслевые нормативы) документы.

2. Аналитические материалы, в том числе обзоры и рейтинги международных агентств (MSCI, Sustainalytics, CDP), исследовательские отчеты консалтинговых компаний (McKinsey, PwC, KPMG) по вопросам климатических рисков и устойчивого развития.

3. Научные источники включали статьи в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах, ВАК, Scopus и Web of Science, а также монографии и материалы научных конференций по тематике экономической безопасности, риск-менеджмента и корпоративной устойчивости.

Применение данного комплекса методов обеспечило сопоставление теоретических положений с практикой, позволило разработать не только теоретическую модель, но и апробировать ее логику на конкретных примерах, гарантируя обоснованность и практическую значимость полученных результатов и выводов.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование позволило получить ряд теоретических и практических результатов, подтверждающих ключевую гипотезу о необходимости и возможности системной интеграции управления экологическими рисками в контур экономической безопасности компании.

1. Систематизация влияния экологических угроз и подтверждение их стратегического характера. Результатом детального анализа стало структурирование каналов воздействия экологических рисков на все элементы экономической безопасности (табл. 1). Полученная матрица наглядно демонстрирует каскадный и тотальный характер этого влияния: от прямых финансовых потерь до эрозии репутации и потери ключевых компетенций. Наиболее значимым выводом является установление доминирующей роли трансформационных рисков (регуляторных, технологических, рыночных) над физическими в долгосрочной перспективе. Это подтверждает, что главная угроза исходит не столько от стихийных бедствий, сколько от фундаментального изменения правил ведения бизнеса в условиях низкоуглеродного перехода [8]. Данный результат обосновывает невозможность обеспечения ЭБ через реактивные меры и требует перехода к проактивной стратегии, где экологическая устойчивость становится обязательным фундаментом безопасности.

2. Разработка и апробация трехблочной интеграционной модели. Основным практическим результатом исследования является разработка комплексной модели, состоящей из организационно-управленческого, процессно-методического и информационно-аналитического блоков.

Организационный блок (табл. 2) устанавливает четкое перераспределение ответственности, ликвидируя институциональный разрыв между экологами и службой ЭБ. Ключевая роль отводится руководителю службы ЭБ как интегратору, что обеспечивает перевод экологических угроз на язык финансовых и операционных рисков.

Процессный блок (табл. 3) формализует сквозной цикл управления (PDCA), центральным элементом которого является финансиализация рисков – перевод качественных экологических угроз в количественные денежные показатели. Это позволяет объективно ранжировать их наряду с традиционными угрозами и обосновывать управленческие решения.

Информационный блок (табл. 4) предлагает систему ключевых показателей (KRI/KPI), которая трансформирует разрозненные экологические данные (тонны выбросов) в стратегические индикаторы для

службы ЭБ (прогноз затрат на углеродный налог, стоимость активов в зонах риска). Это создает единый информационный контур для превентивного мониторинга и принятия решений.

3. Количественная оценка эффективности интеграции на основе сравнительного анализа. Сценарное моделирование и сравнительный анализ на условных, но реалистичных цифровых примерах (табл. 5) дали убедительное эмпирическое подтверждение экономической целесообразности предложенной модели. Результаты показывают, что для компании, внедрившей интеграцию (Компания А), экологические риски трансформируются в контролируемые инвестиции и источник конкурентных преимуществ (дешевый капитал, доступ к новым рынкам). Кумулятивный положительный финансовый эффект за 5 лет составил около 90 млн руб. за счет предотвращенных убытков и созданных возможностей. В то же время компания с традиционным подходом (Компания Б) понесла прямые убытки примерно 135 млн руб. из-за непредвиденных штрафов, срочной модернизации и потери рыночной позиции. Ключевое различие заключается во времени реакции на новые риски: 6 месяцев против 18, что в современных условиях является критическим фактором выживания.

Обсуждение результатов подтверждает, что предложенная модель не является теоретической конструкцией, а представляет собой практический инструмент трансформации системы экономической безопасности компании. Она позволяет перейти от защиты «статус-кво» к стратегической адаптации, где служба экономической безопасности выполняет функцию аналитического центра, оценивающего, как экологические тренды формируют новые угрозы и возможности. Полученные результаты согласуются с мировыми трендами в области корпоративного управления (TCFD, ESG) и доказывают, что в современной парадигме надежная экономическая безопасность невозможна без экологической устойчивости [9]. Ограничением проведенного моделирования является его обобщенный характер, однако оно четко выявляет причинно-следственные связи и логику формирования финансовых результатов, что служит основанием для дальнейших углубленных отраслевых исследований и внедрения модели в практику конкретных компаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило центральную гипотезу о том, что в условиях глобальной экологической трансформации управление экологическими рисками перестает быть факультативной функцией и становится стратегическим ядром системы экономической безопасности компании. Анализ продемонстрировал тотальное и каскадное воздействие экологических угроз – от физических до трансформационных – на все без исключения элементы экономической безопасности: финансовую, операционную, кадровую, репутационную и технологическую безопасность. Наиболее значимую долгосрочную опасность представляют именно трансформационные риски, связанные с переходом к низкоуглеродной экономике, способные фундаментально подорвать устаревшие бизнес-модели. Таким образом, игнорирование экологической составляющей создает в СЭБ критические «слепые

зоны», делая компанию уязвимой перед системными кризисами нового типа [10].

В качестве практического ответа на выявленные вызовы в работе разработана и апробирована комплексная трехблочная модель интеграции управления экологическими рисками в СЭБ. Модель, включающая организационный, процессный и информационно-аналитический блоки, обеспечивает преодоление ключевого институционального разрыва между экологическими специалистами и службой экономической безопасности. Ее внедрение позволяет трансформировать качественные экологические угрозы в количественные финансовые показатели через механизм финансиализации, встроить их в общий цикл риск-менеджмента и наладить систему превентивного мониторинга на основе релевантных KRI [11]. Сравнительный анализ на цифровых примерах наглядно показал, что интеграция ведет не к росту затрат, а к формированию стратегических конкурентных преимуществ: сокращению непредвиденных убытков, снижению стоимости капитала, повышению устойчивости цепочек поставок и укреплению рыночной репутации.

Итогом исследования является вывод о том, что в XXI веке экологическая безопасность тождественна экономической. Предложенная модель задает новый стандарт для работы службы экономической безопасности, эволюционирующей из охранительного органа в стратегический аналитический центр, ответственный за адаптацию бизнеса к меняющимся внешним условиям. Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку отраслевых методик количественной оценки экологических рисков и анализ специфики интеграции для компаний малого и среднего бизнеса. Внедрение подобных подходов является не вопросом добровольной корпоративной ответственности, а императивом обеспечения долгосрочной финансовой устойчивости и конкурентоспособности в эпоху неизбежного «зеленого» перехода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Паздникова Н.П., Шипицына С.Е., Кузнецова Э.Р. Концепция экологической безопасности городских промышленных агломераций: практика мониторинга и оценки рисков // Безопасность труда в промышленности. 2025. N 6. С. 27–34. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2025-6-27-34>
2. Гамидуллаев С.Н. Экологическая безопасность и оценка риска // Экономика. Управление. Финансы. 2024. N 4(38). С. 44–50.
3. Гаджиев Н.Г., Коноваленко С.А., Трофимов М.Н., Рабаданов Р.М. Методологические аспекты бухгалтерского учета расходов на экологическую безопасность и восстановление окружающей среды. // Юг России: экология, развитие. 2022. Т. 17. N 1. С. 162–173. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2022-1-162-173>
4. Батаева Б.С., Бобкова А.А. Интеграция климатических рисков в стратегии устойчивого развития корпораций: анализ на примере компаний сектора аквакультуры // Мир новой экономики. 2025. Т. 19. N 3. С. 106–115. <https://doi.org/10.26794/2220-6469-2025-19-3-106-115>
5. Авдеева И.Л., Хорольская Т.Е., Мусаева Х.М. Корпоративная экологическая политика современных промышленных бизнес-структур // Естественно-гуманитарные исследования. 2025. N 5(61). С. 619–623.
6. Шиканов М.А., Шиканова А.Н. Повышение экономической эффективности управления производственными рисками компании как основа новой промышленной политики государства // Экономическая безопасность России: проблемы и перспективы:

Материалы XIII Международной научно-практической конференции, Нижний Новгород, 4 июня, 2025. С. 564–567.

7. Гаджиев Н.Г., Коноваленко С.А., Трофимов М.Н., Рожкова Н.В., Сайпуллаев А.М. Современный зеленый курс России: проблемы и перспективы реализации // Юг России: экология, развитие. 2022. Т. 17. N 3. С. 197–207. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2022-3-197-207>
8. Гаджиев Н.Г., Лазарева Н.В., Коноваленко С.А., Трофимов М.Н., Юсуфов Н.А. Публичная нефинансовая отчетность: отражение экологических аспектов развития и деятельности хозяйствующих субъектов // Юг России: экология, развитие. 2024. Т. 19. N 3. С. 204–218. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2024-3-204>
9. Шур К.А., Киселева Я.А. Внутренний аудит как гарант эффективной реализации ESG-политики организации // Вестник евразийской науки. 2025. Т. 17. N 3. С. 1–13
10. Ermakov S., Volkova L., Kapustina I. Ecosystems Measurement: Risk Assessment Methods and Ecological Safety Principles // Transportation Research Procedia. 2021. V. 54. P. 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.046>
11. Штебнер С.В. Оценка экологических рисков // Бюллетень науки и практики. 2022. Т. 8. N 11. С. 419–422. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/84/52>

REFERENCES

1. Pazdnikova N.P., Shipitsyna S.E., Kuznetsova E.R. The Concept of Environmental Safety of Urban Industrial Agglomerations: Monitoring Practices and Risk Assessment. *Occupational safety in industry*, 2025, vol. 6, pp. 27–34. (In Russian) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2025-6-27-34>
2. Gamidullaev S.N. Environmental safety and risk assessment. *Ekonomika. Upravlenie. Finansy* [Economics. Management. Finance.]. 2024, vol. 4(38), pp. 44–50. (In Russian)
3. Gadzhiev N.G., Konovalenko S.A., Trofimov M.N., Rabadanov R.M. Methodological aspects of accounting of expenditures on environmental safety and environmental restoration. *South of Russia: ecology, development*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 162–173. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2022-1-162-173>
4. Bataeva B.S., Bobkova A.A. Integration of Climate Risks into Corporate Sustainability Strategies: A Case Study of Companies in the Aquaculture Sector. *The world of the New Economy*, 2025, no. 19, vol. 3, pp. 106–115. (In Russian) <https://doi.org/10.26794/2220-6469-2025-19-3-106-115>
5. Avdeeva I.L., Khorol'skaya T.E., Musaeva Kh.M. Corporate Environmental Policy of Modern Industrial Business Structures. *Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya* [Natural Sciences and humanities research]. 2025, vol. 5(61), pp. 619–623. (In Russian)
6. Shikanov M.A., Shikanova A.N. Improving the Economic Efficiency of Company's Production Risk Management as the Basis for a New State Industrial Policy. *Ekonomicheskaya bezopasnost' Rossii: problemy i perspektivy. Materialy XIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Nizhnii Novgorod, 04 iyunya 2025* [Economic Security of Russia: Problems and Prospects: Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference, Nizhny Novgorod, 4 June 2025]. Nizhny Novgorod, 2025, pp. 564–567. (In Russian)
7. Gadzhiev N.G., Konovalenko S.A., Trofimov M.N., Rozhkova N.V., Saipullaev A.M. The modern green course of Russia: problems and prospects of implementation. *South of Russia: ecology, development*, 2022, vol. 17, no. 3, pp. 197–207. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2022-3-197-207>
8. Gadzhiev N.G., Lazareva N.V., Konovalenko S.A., Trofimov M.N., Yusufov N.A. Public non-financial reporting: Reflection of environmental aspects of development and activities of economic entities. *South of Russia: ecology, development*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 204–218. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2024-3-204>
9. Shur K.A., Kiseleva Ya.A. Internal audit as a guarantor of effective implementation of the organization's ESG policy. *Vestnik evraziiskoi nauki* [Bulletin of Eurasian Science]. 2025, no. 17, vol. S3. (In Russian)
10. Ermakov S., Volkova L., Kapustina I. Ecosystems Measurement: Risk Assessment Methods and Ecological Safety Principles. *Transportation Research Procedia*, 2021, vol. 54, pp. 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.046>
11. Shtebner S.V. Environmental risk assessment. *Bulletin of Science and Practice*, 2022, vol. 8, no. 11, pp. 419–422. (In Russian) <https://doi.org/10.33619/2414-2948/84/52>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Назирхан Г. Гаджиев разработал общую концепции и методологии исследования на стыке экономической безопасности и устойчивого развития. Сформулировал ключевую гипотезу о необходимости интеграции управления экологическими рисками (УЭР) в систему экономической безопасности (ЭБ). Провел анализ эволюции концепции экономической безопасности компании. Обобщил результаты исследования. Сергей А. Коноваленко систематизировал и классифицировал экологические риски (в соответствии с международными подходами (TCFD). Провел детальный анализ влияния экологических рисков на все элементы экономической безопасности, разработал процессно-методический блок интеграционной модели, сделал акцент на этапах идентификации, оценки (финансиализации) и обработки рисков. Сформулировал выводы и предложения в научной статье. Михаил Н. Трофимов провел сравнительный анализ сценарного моделирования для количественной оценки эффективности интеграционной модели. Разработал информационно-аналитический блок матрицы, включая систему ключевых показателей риска (KRI) и эффективности (KPI) для мониторинга. Подготовил сравнительную таблицу с цифровыми примерами финансовых результатов для компаний с разным подходом к интеграции. Рашия Х. Бекмурзаева исследовала влияние физических и трансформационных экологических рисков на операционную и кадровую безопасность компании. Разработала разделы, посвященные анализу каскадного воздействия экологических угроз на цепочки создания стоимости. Участвовала в валидации разработанной системы KRI/KPI (табл. 4) в части репутационных и рыночных индикаторов. Григор Т. Манукян адаптировал международные подходы к управлению климатическими рисками (TCFD, стандарты ESG) для целей экономической безопасности компаний в странах ЕАЭС. Провел сравнительный анализ методологий количественной оценки экологических рисков. Участвовал в подготовке библиографического списка и формализации выводов исследования в части влияния экологической повестки на доступ к капиталу.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Nazirkhan G. Gadzhiev developed a general concept and research methodology at the intersection of economic security and sustainable development. He formulated a key hypothesis about the need to integrate environmental risk management (ERM) into the economic security (ES) system. He analysed the evolution of the company's economic security concept and summarised the research results. Sergey A. Konovalenko systematised and classified environmental risks (in accordance with international approaches (TCFD). He conducted a detailed analysis of the impact of environmental risks on all elements of economic security, developed a process and methodological block of the integration model and focused on the stages of risk identification, assessment (financing) and management. He formulated conclusions and suggestions in a scientific article. Mikhail N. Trofimov conducted a comparative analysis of scenario modeling to quantify the effectiveness of the integration model. He developed an information and analytical matrix, including a system of key risk indicators (KRI) and key performance indicators (KPI) for monitoring. He prepared a comparative table with digital examples of financial results for companies with different approaches to integration. Rashiya Kh. Bekmurzaeva studied the impact of physical and transformational environmental risks on the company's operational and personnel security. She developed sections devoted to the analysis of the cascading impact of environmental threats on value chains. She participated in the validation of the developed KRI/KPI system (Table 4) regarding reputational and market indicators. Grigor T. Manukyan adapted international approaches to climate risk management (TCFD, ESG standards) for the economic security purposes of companies in the EAEU countries. He conducted a comparative analysis of methodologies for the quantitative assessment of environmental risks. He participated in the preparation of the bibliography and the formalisation of the study's conclusions regarding the impact of the environmental agenda on access to capital. All authors participated equally in the writing of the article 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>
Сергей А. Коноваленко / Sergey A. Konovalenko <https://orcid.org/0000-0001-9696-942X>
Михаил Н. Трофимов / Mikhail N. Trofimov <https://orcid.org/0000-0002-7194-0468>
Рашия Х. Бекмурзаева / Rashiya Kh. Bekmurzaeva <https://orcid.org/0000-0001-5936-7235>
Григор Т. Манукян / Grigor T. Manukyan <https://orcid.org/0009-0001-6107-8165>



Антропоэкосистема как смысловая единица образования для устойчивого развития

Елена Н. Дзятковская¹, Максим С. Лытов²

¹Институт содержания и методов обучения имени В.С. Леднева, Москва, Россия

²Российский государственный художественно-промышленный университет имени С.Г. Строганова, Москва, Россия

Контактное лицо

Елена Н. Дзятковская, доктор биологических наук, профессор, лаборатория дидактики общего и профессионального образования, Федеральный государственный бюджетное научное учреждение «Институт содержания и методов обучения имени В.С. Леднева»; 105062 Россия, г. Москва, ул. Жуковского, 16. Тел +79777043443
Email dziatkov@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3947-7490>

Формат цитирования

Дзятковская Е.Н., Лытов М.С. Антропоэкосистема как смысловая единица образования для устойчивого развития // Юг России: экология, развитие. 2026. Т.21, N 2. С. 187-192.
DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-16

Получена 22 июля 2025 г.

Прошла рецензирование 10 декабря 2025 г.

Принята 25 апреля 2026 г.

Резюме

Цель. Обосновать выбор нового объекта изучения в образовании для устойчивого развития на этапе общего и профессионального образования, который бы отражал особенности национального менталитета россиян, был лично значимым в повседневной жизни молодого человека и узнаваемым в любом учебном предмете. Статья описывает разработанную для системы общего и профессионального образования сквозную межпредметную линию содержания экологического образования для устойчивого развития, которая реализуется через все учебные предметы и внеучебную деятельность. В ее основе – укрупненная дидактическая единица – антропоэкосистема организации жизни человека в единстве ее природного и социального начала, отражающая культурно-экологическую родословную родного края, сложившуюся с появлением родовой структуры общества. Антропоэкосистема «Природа-Род-Родина» сочетает в себе духовное и материальное начало, актуализирует этнокультурные «гены» памяти отношения к окружающей среде разных поколений, несет в себе архетипические коды биосферосовместимого поведения. Разработаны педагогические способы встраивания укрупненной дидактической единицы «Природа-Род-Родина» в предметное содержание. Ими выступают методы педагогической аксиоматизации, метафоризации и визуализации средствами инфографики и ИКТ. Авторы доказывают целесообразность выбора в качестве укрупненной дидактической единицы образования для устойчивого развития антропоэкосистему «Природа-Род-Родина», которая опирается на культурные концепты русского языка, традиционные национальные ценности россиян, узнаваемые визуальные образы.

Ключевые слова

Устойчивое развитие, воспитание, антропоэкосистема, традиционные национальные ценности, образование для устойчивого развития.

Anthropoecosystem as a semantic unit of education for sustainable development

Elena N. Dzyatkovskaya¹ and Maxim S. Lytov²

¹V.S. Lednev Institute of Content and Methods of Education, Moscow, Russia

²S.G. Stroganov Russian State University of Design and Applied Arts, Moscow, Russia

Principal contact

Elena N. Dzyatkovskaya, Doctor of Biological Sciences, Professor, Laboratory of Didactics of General and Vocational Education, V.S. Lednev Institute of Content and Teaching Methods; 16 Zhukovsky St, Moscow, Russia 105062.

Tel. +79777043443

Email dziatkov@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3947-7490>

How to cite this article

Dzyatkovskaya E.N., Lytov M.S. Anthropoecosystem as a semantic unit of education for sustainable development. *South of Russia: ecology, development*. 2026; 21(2):187-192. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-16

Received 22 July 2025

Revised 10 December 2025

Accepted 25 April 2026

Abstract

To substantiate the choice of a new object of study in education for sustainable development at the stage of general and professional education, which would reflect the peculiarities of the national mentality of Russians, be personally significant in the daily life of a young people and recognisable in any academic subject.

The article describes a cross-curricular content line of environmental education for sustainable development developed for the general and professional education system, which is implemented through all subjects and extracurricular activities. At its basis – the enlarged didactic unit – an anthropoecological system of organization of human life reflecting the unity of its natural and social origin, the basis of cultural and ecological ancestry of the nation's people, established since the emergence of the ancestral structure of society. The anthropogenic ecosystem "Nature-Family-Homeland" combines in itself spiritual and material origin, actualises ethno-cultural «genes» of memory relations to the environment of different generations and carries in itself archetypal codes of biosphere compatible behavior. Pedagogical ways of embedding the "Nature-Family-Homeland" augmented didactic unit into the subject content have been developed. These are methods of pedagogical axiomatization, metaphorisation and visualization using of infographics and ICT.

The authors assert the expediency of choosing the "Nature-Family-Homeland" anthropoecosystem based on the cultural concepts of the Russian language, the traditional national values of Russians and recognisable visual images.

Key Words

Sustainable development, education, anthropoecosystem, traditional national values, education for sustainable development.

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивое развитие — глобальная стратегия развития цивилизации, в основе которой — понимание границы допустимой активности человека, которую он не имеет права переступить ни при каких обстоятельствах.

Научно-теоретические основы устойчивого развития были заложены в трудах В.И. Вернадского [1], Н.Н. Моисеева [2] и зафиксированы в принятом на Всемирной конференции ООН по окружающей среде и развитию в 1992 г. пакете документов, получивших название концепции устойчивого развития.

Образование для устойчивого развития (ОУР) выступает педагогическим средством реализации этой концепции. Идеология ОУР была провозглашена на Стокгольмской конференции ООН по проблемам окружающей среды (1972) и обрела четкие редакционные формулировки в материалах Тбилисской декларации Межправительственной конференции по образованию в области окружающей среды (Тбилиси, 1977). Впоследствии эти идеи были конкретизированы в ряде международных документов: «Наше общее будущее», подготовленном Международной комиссией по окружающей среде и развитию Организации Объединённых Наций в 1987 году и развиты в ходе Декады ООН по ОУР (2005–2014), в материалах Декады ООН по ОУР (2005–2024), в Глобальной программе действий по ОУР и ее Дорожных картах (2014 г.; 2021 г.).

Термин «образование для устойчивого развития» стал распространяться как новая форма «проникающего» обучения, охватывающего практически все предметные области: естественнонаучные, социально-гуманитарные и информационно-технические.

Академик Н. Н. Моисеев в разработанную им теорию универсального эволюционизма, ставшую основой современной научной картины мира, включил систему «Учитель» — как напутствие образованию 21 века по сохранению, формированию и развитию коллективных знаний, нравственности и памяти людей о том, что они являются частью Природы [2].

В работах ряда отечественных авторов идеи ОУР получили воплощение в конкретных учебных программах, учебниках и методических рекомендациях [3; 4; 5].

Однако в государственные стандарты (и федеральные учебники) идеи образования для устойчивого развития (включая его терминологию) стали проникать лишь несколько лет назад. Они остаются слабо связанными с учебным содержанием и малопонятными не только для обучающихся, но и для большинства педагогов, в том числе, в силу неоднозначности русскоязычного перевода словосочетания «устойчивое развитие» [6].

Тема ОУР, после всплеска интереса к ней в 90-х годах, сегодня остается экзотической и для системы повышения квалификации педагогов. Новое мировоззрение остается мало понятным из-за элементарной нехватки информации о сущности устойчивого развития, ее абстрактности. Сложившаяся ситуация грозит увеличением разрыва между ожиданиями государства в области решения стратегических задач социально-экономического развития страны и готовностью выпускников школ стать участниками этого процесса [7].

Сохраняется мировоззренческий дефицит молодого поколения, как следствие недостатка в содержании школьного образования обобщающих, сквозных, межпредметных ценностно-мировоззренческих линий образования. Эволюция содержания школьного образования идет по пути «все больше о меньшем» [8].

Сохраняется и несогласованность ценностно-мировоззренческих установок в отношении человек-природа между педагогами-предметниками и даже между авторами учебников. Ценностный выбор «антропоцентризм» или «экоцентризм» остается вне учебных дискурсов. В условиях создаваемого в стране единого образовательного пространства методика сотрудничества педагогов-предметников в области ОУР остается неразработанной. Результат — когнитивные и нравственные диссонансы обучающихся, несформированность у выпускников иерархии ценностей [7].

Терминология ОУР не находит своего места в русскоязычных популярных педагогических словарях, а встречающиеся в интернете переводы зарубежных материалов по устойчивому развитию не адаптированы к употреблению в отечественной школе. Зачастую они являются дословными переводами англоязычных текстов. Излишне напоминать, что фокусирование ОУР на терминологии, не адаптированной как к языку учебных предметов, так и к базовым архетипическим культурным концептам россиян, консервирует тревожную ситуацию с подготовкой молодежи к решению стратегических задач устойчивого развития.

Среди педагогов широко распространено мнение о тождественности ОУР экологическому образованию, которое понимается как участие в природоохранных акциях и уборке территорий от мусора. По результатам опросов даже школьные учителя обществознания не слышали ничего о природоподобных технологиях, а устойчивое развитие они нередко понимают, как политическую метафору [9].

Между тем, в содержании общего и профессионального образования предусмотрена информация об устойчивом развитии цивилизации, которая носит интегрированный междисциплинарный характер. Однако попытки педагогов-предметников добавить ее в уже сложившуюся структуру предметного содержания снижают качество предметного обучения, поскольку сталкиваются с «дидактическими тупиками» несовместимости предметного и укрупненного содержания. Это заставляет педагога, интуитивно защищающего целостность «своего» предмета, выводить интегрированное содержание ОУР за его пределы во внеурочную работу, что тормозит достижение единого воспитательного пространства и снижает возможность «опредмечивания» идей устойчивого развития. Традиционные национальные ценности, несущие в себе архетипы средосберегающего поведения, также осваиваются разрозненно, их экологические значения для устойчивого развития страны, местных сообществ, семьи не раскрываются. Таким образом, методика встраивания элементов интегрированного содержания ОУР в предметное без снижения его качества остаётся неразработанной. Настоящая статья посвящена обсуждению перспектив «обходных» путей дидактических проблем образования для устойчивого развития.

ОБСУЖДЕНИЕ

Разработку сквозной межпредметной содержательной линии образования для устойчивого развития мы начинали с разработки ее междисциплинарного содержания, направленного на достижение интегрированных, ценностно-мировоззренческих результатов. Такое содержание должно формировать целостную картину мира и использовать визуальные образы, формирующие ценности средо-сберегающего взаимодействия человека с его социоприродным окружением, в единстве его духовной и практической стороны [10].

Центральным объектом такого междисциплинарного содержания была выбрана человеко-размерная «антропоэкосистема» – экологическая система, исторически сложившаяся с появлением родовой структуры человечества, способ организации жизни человека в его единстве с окружающей его природой, людьми, культурой, духовной родословной родного края, страны [11]. С одной стороны, антропоэкосистема, как укрупненная дидактическая единица, актуализирует складывающиеся в сознании человека, в его родовой памяти, культурные концепты, архетипические коды поведения, опирающиеся на индивидуальный и коллективный опыт, национальные культурные ценности отношения к своему окружению [12]. С другой стороны, это единица организации материальной жизни каждого человека на определенной территории во всей совокупности ее экологических внутренних и внешних связей и отношений с природно-территориальным окружением местного сообщества, региона, страны. Она включает объективно формирующийся у каждого человека опыт жизнедеятельности на определенной территории проживания, экологические связи с окружающей его природной средой, родными людьми, культурой.

На основе базовых культурных концептов русского языка была спроектирована модельная антропоэкосистема, которая получила название «Природа-Род-Родина». В ней кроются этнокультурные «гены» памяти отношений к окружающей среде разных поколений (прошлое-настоящее-будущее), уникальный способ организации жизни этноса, который несет в себе древние коды поведения и адаптации к жизни в определенных условиях окружающей природной среды, архетипические культурные концепты русского языка [13].

Род – это не только родственные (в т.ч. генетические), социальные, территориальные отношения. Это духовные связи, внутреннее единство, собирательная идентичность русского человека, которая существует вне времени и одинаково актуальна во все времена. Это наши предки и потомки (люди нашего роду-племени), наша родня, наша порода, родовые связи из прошлого в настоящее и будущее.

Природа – это то естество, в котором человек появился (зародился) и которое обеспечивает длительное и устойчивое существование его рода (При Роде). Природа – это земля, вода, растения и животные, которые за сотни миллионов лет на поверхности каменистой планеты ЗЕМЛЯ своей жизнедеятельностью создавали тонкую пленку жизни, в которой устойчиво поддерживаются необходимые для жизни экологические условия. Ученые называли её БИСФЕРОЙ. Чуть больше сорока тысяч лет назад в ней появился современный человек. Биосфера – убежище рода

человека. В ней есть всё, что составляет основу материальной жизни и мира духовного творчества человека. Она является естественной средой и основой всей нашей жизни, ее материальным началом на планете Земля. У природы есть свои законы: она существует сама по себе, не терпит «пустоты», поражает своим разнообразием и экономией, располагает человека к творчеству. Природа определяет нравы Рода и даже внешний облик родных людей. «Я не очеловечиваю природу, а нахожу в ней общие черты с человеком, понятные в силу родства человека с природой», – писал Михаил Пришвин [14]. Не случайно, природа у разных народов ассоциируется с богиней (Берегиней), с мамой, с судьбой и великой тайной, скрытой от нас мудростью. Вся культура человечества опирается на чувства, рождаемые общением с природой, осмысление ее загадок, природа творит чудеса, лечит, успокаивает и ... наказывает, если человек нарушает ее гармонию. В традициях россиян природа – самоценность, мост для перехода человека от материального в духовное.

Ключевым в русской языковой картине мира является и концепт Родина. Родина – это не только общность рождения (по земле, вере, времени, родной природе, родным людям). Родина – это священная тайна каждого человека, так же, как и его рождение... Мы любим не ее славу, не ее силу... Мы любим ее саму – родную, древнюю, исконную... Родина живет в нас. Это сила родства с ее соотечественниками, со своей землей в широком смысле – с землей духовной, в которой соединились историческая память и наше общее будущее ... «Образ Родины создается из видимого и невидимого, материального и духовного, из глубин истории и высот святости», – писал В.Г. Распутин [15]. Родина защищает, она зовёт, поддерживает.

Будучи включенной в содержание образовательного процесса, антропоэкосистема «Природа-Род-Родина» может создавать условия для погружения школьника в реальный мир природы, мир людей, мир вещей, мир культуры; в прошлое, настоящее и будущее; в их разных масштабах – от ближайшего окружения человека до страны; наполняет новым содержанием традиционные национальные ценности – нравственные ориентиры, которые передаются от поколения к поколению и лежат в основе общероссийской гражданской идентичности, духовного здоровья каждого человека, духовной целостности социоприродной экосистемы «Природа-Род-Родина». Это патриотизм, гражданственность, высокие нравственные идеалы, гуманизм, милосердие и справедливость – жизненно необходимые личностные качества человека, культурный императив его выживания, обязательные условия существования социоприродной системы «Природа-Род-Родина».

Историческая память и преемственность поколений, единство народов России, служение Отечеству и ответственность за его судьбу – это, с одной стороны, истоки, корни социоприродной системы «Природа-Род-Родина», с другой стороны – это ее будущее.

Разные школьные учебные предметы могут рассматривать те или иные стороны таких отношений, наполняя их своим предметным содержанием и конкретным, значимым для жизни каждого человека смыслом.

Междисциплинарная предметная линия Природа-Род-Родина потенциально может быть направлена на формирование ценностно-мировоззренческого отношения обучающегося к природе, России, ее народам и их культуре, к семье и своим родным на основе традиций предков и понимания стратегических задач развития страны и ее национальной безопасности.

Однако, без педагогического механизма встраивания в каждый учебный предмет такое содержание работать не будет.

На примере антропоэкосистемы «Природа-Род-Родина» нами была разработана методика встраивания укрупненных дидактических единиц в предметное содержание. В основе методики – методы педагогической аксиоматизации, дидактической метафоризации [16] и визуализации средствами инфографики и ИКТ [16].

Были использованы ранее разработанные и апробированные дидактические метафоры:

- «экомир» (образ устойчивого развития, коэволюции природы и общества),
- экологическая «линза» (образ «трехмерного» мышления – взаимосвязь природных-социальных-экономических факторов окружающей среды),
- экологическая «зоркость» (способность выявлять экологические проблемы и их причины),
- «зеленые» аксиомы – принципы природосообразного поведения в окружающей среде, вытекающие из представлений об экологическом императиве. Они сформулированы с учетом экспериментально выявленных, значимых для детей того или иного возраста, архетипических культурных концептов русского языка.

Доступность, понимание «зеленых» аксиом детьми разного возраста обеспечивается с помощью их визуализации [10].

Вербальный и визуальный язык метафор и аксиом с использованием ИКТ помогает учащимся выявлять в учебном материале разных учебных предметов:

- научные знания о взаимодействии человека с окружающей средой и возникающих проблемах;
- ценности природосообразного образа жизни;
- принципы поведения, необходимые для предупреждения и/или решения экологических проблем, возникающих в экосистемах.

Конечно, процесс переосмысления картины мира протекает медленно. Но тем острее стоит вопрос о неотложности такой работы, размышлений, упорного труда, консолидации усилий науки, образования и просвещения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы предлагают и обосновывают человеко-размерную межпредметную модель содержания образования для устойчивого развития в российской школе, которая реализуется на основе сквозной линии образования «Природа-Род-Родина», лично и архетипически значимой для обучающихся, их семей, педагогов, опирается на традиционные многонациональные ценности россиян и обеспечивает содержательное обобщение фрагментарных экологических знаний учебных предметов на основе ценностно-мировоззренческих установок устойчивого развития.

Разработанная модель позволяет:

- переходить от абстрактных глобальных проблем к реалиям ближайшего окружения ребенка, понимать характер проблем в области устойчивого биосферосообразного развития на близких и доступных примерах действительности;
- проявлять творческий подход, необходимый для поиска новых, более эффективных решений, связанных с биосферосообразным образом жизни – и в бытовых делах, и в будущей профессии;
- лучше понимать суть тех факторов, которые являются причиной природосообразного образа жизни; вырабатывать уверенность в себе, зная, как действовать и на какие принципы (а не правила) следует опираться в жизненных ситуациях для предупреждения и/или решения возникающих в окружающей среде экологических противоречий, защищаясь от опасных, ложных экологических установок;
- задействовать этнокультурные программы экологически безопасного поведения, включать архетипические коды мышления, опираясь на мудрость природы, науки и истории.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. Москва: Айрис-Пресс, 2012. 576.
2. Моисеев Н.Н. Судьба цивилизации. Путь разума. Москва: Яз. рус. культуры, 2000. 223.
3. Абдурахманов Г.М., Монахова Г.А., Мурзаканова Л.З., Абдурахманова А.Г., Багомаев А.А., Алиева З.А. Концептуальные основы, реалии и перспективы развития образования для устойчивого развития в России // Юг России: экология, развитие. 2010. Т. 5. N 2. С. 224–250. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2010-2-224-250>
4. Дзятковская Е.Н., Захлебный А.Н. Есть ли у образования для устойчивого развития свой предмет познания? // Вестник Бурятского государственного университета. 2016. N 4. С. 3–11.
5. Устойчивое развитие: приоритеты в области образования (опыт регионов России) / под ред. В.М. Захарова, А.В. Семенова, И.А. Соколова. Москва: Московский университет им. С.Ю. Витте, 2022. 248 с.
6. Dzyatkovskaya E.N., Dlimbetova G.K., Zakhlebny A.N., Ivanova E.V., Mamchenko A.A., Abenova S.U. Sustainable development goals and priorities for educational environmental space transformation // The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences epsbs. 2019. V. 69. P. 293–304. DOI: 10.15405/epsbs(2357-1330).2019.9.2
7. Дзятковская Е.Н. Экологическое и эквайронментальное образование: этапы дивергенции и конвергенции // Астраханский вестник экологического образования. 2023. Т. 76. N 4. С. 124–140. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2023-4-124-140>
8. Dzyatkovskaya E.N., Mamchenko A.A. Stages of the information society and the prospects for coordination information education and education for sustainable development // SHS Web of Conferences. 2016. Article number: 01021. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20162901021>
9. Dzyatkovskaya E.N., Dlimbetova G.K., Zakhlebny A.N., Ivanova E.V., Mamchenko A.A., Abenova S.U. Sustainable development goals and priorities for educational environmental space transformation // The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences epsbs. 2019. P. 293–304.
10. Лытов М.С. Изобразительное искусство в образовании для устойчивого развития // Ученые записки Забайкальского государственного университета. 2024. N 1. С. 53–60. <https://doi.org/10.21209/2658-7114-2024-19-1-53-60>
11. Дзятковская Е.Н. Культурологическая направленность сквозной межпредметной линии содержания образования «Природа-Род-Родина» // Экопозэс: экогуманитарные теории

и практика. 2025. N 2. С. 6–9. DOI: 10.24412/2713-1831-2025-2-6-9

12. Дзятковская Е.Н., Захлебный А.Н. Миссия экологического образования – 2030 // Педагогика. 2020. Т. 84. N 6. С. 68–76.

13. Дзятковская Е.Н. Педагогический язык образования в интересах устойчивого развития: к постановке проблемы // Педагогический журнал. 2019. Т. 9. N 5-2. С. 673–681. <https://doi.org/10.34670/AR.2020.45.5.183>

14. Пришвин М.М. Дневники 1905-1947 гг. Санкт-Петербург: Росток, 2010. 608 с.

15. Распутин В.Г. У нас остается Россия: Очерки, эссе, статьи, выступления, беседы / Сост. Т.И. Маршковой, предисл. В.Я. Курбатова / Отв. ред. О.А. Платонов. М.: Институт русской цивилизации, 2015. 1200 с.

16. Дзятковская Е.Н. Образование для устойчивого развития. Междисциплинарность. «Зеленые» аксиомы. Культурные концепты. Москва: Экология и образование. 2015. 340 с.

REFERENCES

1. Vernadskii V.I. *Biosfera i Noosfera* [Biosphere and Noosphere]. Moscow, Airis-Press Publ., 2012, 576 p. (In Russian)

2. Moiseev N.N. *Sud'ba tsivilizatsii. Put' razuma* [The Fate of Civilization. The Path of Reason]. Moscow, Yaz. rus. kul'tury Publ., 2000, 223 p. (In Russian)

3. Abdurahmanov G.M., Monahova G.A., Murzakanova L.Z., Abdurahmanova A.G., Bagomaev A.A., Alieva Z.A. Conception basis, realities and perspectives of the education for stable development in Russian Federation. *South of Russia: ecology, development*, 2010, vol. 5, no. 2, pp. 224–250. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2010-2-224-250>

4. Dzyatkovskaya E.N., Zakhlebny A.N. Does education for sustainable development have its own subject matter? *Vestnik buryatskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Buryat State University]. 2016, no. 4, pp. 3–11. (In Russian)

5. Zakharov V.M., Semenov A.V., Sokolov I.A., eds. *Ustoichivoe razvitie: priority v oblasti obrazovaniya (opyt regionov Rossii)* [Sustainable Development: Priorities in Education (Experience of Russian Regions)]. Moscow, Moscow University named after S. Yu. Witte Publ., 2022, 248 p. (In Russian)

6. Dzyatkovskaya E.N., Dlimbetova G.K., Zakhlebny A.N., Ivanova E.V., Mamchenko A.A., Abenova S.U. [Sustainable development goals and priorities for educational environmental space transformation]. *The European Proceedings of Social & Behavioural*

Sciences epsbs, 2019, vol. 69, pp. 293–304. DOI: 10.15405/epsbs(2357-1330).2019.9.2

7. Dzyatkovskaya E.N. Environmental and Sustainability Education: Stages of Divergence and Convergence. *Astrakhanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*, 2023, vol. 76, no. 4, pp. 124–140. (In Russian) <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2023-4-124-140>

8. Dzyatkovskaya E.N., Mamchenko A.A. Stages of the information society and the prospects for coordination information education and education for sustainable development. *SHS Web of Conferences*, 2016, article number: 01021. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20162901021>

9. Dzyatkovskaya E.N., Dlimbetova G.K., Zakhlebny A.N., Ivanova E.V., Mamchenko A.A., Abenova S.U. Sustainable development goals and priorities for educational environmental space transformation. *The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences epsbs*, 2019, pp. 293–304.

10. Lytov M.S. Visual Arts in Education for Sustainable Development. *Uchenye zapiski Zabaikal'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2024, no. 1, pp. 53–60. (In Russian) <https://doi.org/10.21209/2658-7114-2024-19-1-53-60>

11. Dzyatkovskaya E.N. Cultural focus of the cross-subject line of education "nature-family-homeland". *Ecopolesis: Eco-Humanities Theory and Practice*, 2025, no. 2, pp. 6–9. DOI: 10.24412/2713-1831-2025-2-6-9

12. Dzyatkovskaya E.N., Zakhlebny A.N. The mission of environmental education – 2030. *Pedagogika* [Pedagogy]. 2020, vol. 84, no. 6, pp. 68–76. (In Russian)

13. Dzyatkovskaya E.N. The Pedagogical Language of Education for Sustainable Development: Towards a Problem Statement. *Pedagogical Journal*, 2019, vol. 9, no. 5-2, pp. 673–681. (In Russian) <https://doi.org/10.34670/AR.2020.45.5.183>

14. Prishvin M.M. *Dnevnik 1905-1947 gg.* [Diaries, 1905-1947]. St. Petersburg, Rostok Publ., 2010, 608 p. (In Russian)

15. Rasputin V.G. *U nas ostaetsya Rossiya: Ocherki, esse, stat'i, vystupleniya, besedy* [We are left with Russia: Essays, articles, speeches, conversations]. Moscow, Institute of Russian Civilization Publ., 2015, 1200 p. (In Russian)

16. Dzyatkovskaya E.N. *Obrazovanie dlya ustojchivogo razvitiya. Mezhdisciplinarnost'. «Zelenye» aksiomy. Kul'turnye koncepty* [Education for Sustainable Development. Interdisciplinarity. "Green" Axioms. Cultural Concepts]. Moscow, Ecology and Education Publ., 2015, 340 p. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Елена Н. Дзятковская разработала укрупненную дидактическую единицу сквозной межпредметной линии школьного образования для устойчивого развития. Максим С. Лытов обосновал актуальность визуализации образования для устойчивого развития, описал его педагогические возможности, трудности и пути их решения. Оба автора 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

Elena N. Dzyatkovskaya has developed an enlarged didactic unit of the end-to-end interdisciplinary line of school education for sustainable development. Maxim S. Lytov substantiated the relevance of visualising education for sustainable development, described its pedagogical capabilities and difficulties and ways to solve them. Both 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

Елена Н. Дзятковская / Elena N. Dzyatkovskaya <https://orcid.org/0000-0003-3947-7490>
Максим С. Лытов / Maxim S. Lytov <https://orcid.org/0009-0005-0290-9634>

Оригинальная статья / Original article

УДК 378.016:502:677

DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-17



Трансформация образования с учётом экологического тренда на примере одной дисциплины: модернизация процесса подготовки специалистов текстильной промышленности

Марина В. Антонова, Алина Р. Ибатуллина, Ирина В. Красина

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия

Контактное лицо

Алина Р. Ибатуллина, кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии химических и натуральных волокон и изделий, Казанский национальный исследовательский технологический университет; 420015 Россия, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68.

Тел. +79655898573

Email gaynutdinovaa@bk.ruORCID <https://orcid.org/0009-0003-2785-7629>**Формат цитирования**

Антонова М.В., Ибатуллина А.Р., Красина И.В. Трансформация образования с учётом экологического тренда на примере одной дисциплины: модернизация процесса подготовки специалистов текстильной промышленности // Юг России: экология, развитие. 2026. Т.21, N 2. С. 193-199. DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-17

Получена 20 января 2026 г.

Прошла рецензирование 17 марта 2026 г.

Принята 25 апреля 2026 г.

Резюме

Цель работы – представить концепцию редизайна магистерского курса, как пример трансформации образовательного процесса для подготовки специалистов текстильной отрасли. Обновлена учебная дисциплина «Вторичное использование отходов изделий текстильной и легкой промышленности» для студентов направления 29.04.02 «Технологии и проектирование текстильных изделий». Разработанные модули призваны повысить конкурентоспособность российской текстильной промышленности через экологизацию образования.

Обзор практик в области переформатирования традиционных образовательных программ подготовки специалистов текстильной промышленности, с учетом требований мировой общественности о переходе к модели циркулярной экономики. Усиление практической подготовки учащихся с помощью оснащения образовательных лабораторий современным инструментарием. В исследовании использованы методы анализа современных российских тенденций и мирового опыта образовательных организаций в области устойчивого развития текстильной отрасли. Педагогический редизайн дисциплины.

Статья посвящена модернизации образовательных программ для студентов текстильных специальностей. Рассматриваются современные подходы к переформированию образовательных программ и дисциплин. Разработаны и введены в учебный процесс магистров направления 29.04.02 новые образовательные материалы, отвечающие концепции устойчивого развития. Разработка и внедрение новых учебных модулей дисциплины, и апробация обновленной рабочей программы направлены на усиление практической подготовки будущих специалистов отрасли.

Данная работа подчеркивает необходимость кардинальных реформ в системе профессионального образования в области текстильной промышленности, а описанный в ней проект является возможным истоком мер, направленных на обеспечение соответствия текстильной промышленности требованиям устойчивого развития и их кадрового обеспечения.

Ключевые слова

Трансформация образования, циркулярная экономика, устойчивое развитие, текстильные технологии, редизайн курса дисциплины.

The transformation of education, taking into account the environmental trend, using the example of one discipline: modernisation of the training process for specialists in the textile industry

Marina V. Antonova, Alina R. Ibatullina and Irina V. Krasina

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

Principal contact

Alina R. Ibatullina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology of Chemical and Natural Fibers and Products, Kazan National Research Technological University; 68 Karl Marx St, Kazan, Russia 420015.

Tel. +79655898573

Email gaynutdinovaa@bk.ru

ORCID <https://orcid.org/0009-0003-2785-7629>

How to cite this article

Antonova M.V., Ibatullina A.R., Krasina I.V. The transformation of education, taking into account the environmental trend, using the example of one discipline: modernisation of the training process for specialists in the textile industry. *South of Russia: ecology, development*. 2026; 21(2):193-199. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-17

Received 20 January 2026

Revised 17 March 2026

Accepted 25 April 2026

Abstract

The purpose of the paper is to present the concept of the redesign of a master's course as an example of the transformation of the educational process for the training of specialists in the textile industry. The academic discipline "Recycling of waste from textile and light industry products" has been updated for students of Direction 29.04.02, "Technologies and design of textile products". The modules developed are designed to increase the competitiveness of the Russian textile industry through the greening of education.

An overview of practices in the field of reformatting traditional educational programs for training textile industry specialists, taking into account the demands of the global community in the transition to a circular economy model. Strengthening the practical training of students by equipping educational laboratories with modern tools. The research uses methods of analysing modern Russian trends and the global experience of educational organisations in the field of sustainable development of the textile industry. Pedagogical redesign of the discipline.

The article is devoted to the modernisation of educational programmes for students of textile specialties. Modern approaches to the reformulation of educational programmes and disciplines are considered. New educational materials that meet the concept of sustainable development have been developed and introduced into the educational process of the master's degree Direction 29.04.02. The development and implementation of new academic modules of the discipline and the testing of the updated work programme are aimed at strengthening the practical training of future industry specialists.

This work highlights the need for fundamental reforms in the system of vocational education in the textile industry and the project described is a possible source of measures aimed at ensuring that the textile industry meets the requirements of sustainable development and staffing formulation.

Key Words

Transformation of education, circular economy, sustainable development, textile technologies, redesign of discipline course.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы отходов текстильной и легкой промышленности для Российской Федерации обусловлена значительными экологическими и экономическими издержками линейной модели производства и потребления. Легкая промышленность является одной из крупнейших отраслей народного хозяйства РФ, в которой занято свыше 300 тыс. человек. Ежегодно в стране образуется порядка 2 млн тонн текстильных отходов, большая часть которых размещается на полигонах, приводя к долгосрочному загрязнению окружающей среды и безвозвратной потере ценных вторичных ресурсов. В России по данным Росстата только в 2024 году при производстве текстильных изделий образовалось 2,742 тысяч тонн отходов [1]. В условиях глобального перехода к циркулярной (замкнутой) экономике и ужесточения экологических требований, фокусировка отечественной легкой промышленности на принципах устойчивого развития становится архиважным условием национальной конкурентоспособности.

Ключевым барьером на этом пути является острый дефицит квалифицированных кадров, обладающих компетенциями в области управления ресурсами, рециклинга, экодизайна и внедрения циркулярных бизнес-моделей. Важно свести эти ключевые моменты в одну параллель, обеспечивая компетентность выпускаемых кадров в вопросах циркулярной экономики и рециклинга всех материальных ресурсов, попадающих в цепочку производства текстиля на любой ее стадии. Существующая система высшего образования в сфере текстильных технологий и дизайна в значительной степени сохраняет традиционную парадигму, характеризующуюся высокой степенью материальных потерь и ресурсоемкостью в целом. Она, к сожалению, не успевает модернизироваться в соответствии со стремительно меняющимися запросами рынка и экологической повесткой.

Целью данной работы является редизайн учебной дисциплины «Вторичное использование отходов изделий текстильной и легкой промышленности» для студентов направления 29.04.02 «Технологии и проектирование текстильных изделий» для повышения глобальной конкурентоспособности российской текстильной промышленности и смежных с ней отраслей экономики в повестке устойчивого развития.

Для достижения цели в рамках работы реализовано несколько задач:

1. Анализ современных тенденций в области устойчивого развития образования для подготовки специалистов текстильной промышленности.
2. Разработка и внедрение новых учебных модулей и материалов дисциплины с учетом проведенного анализа, принципов устойчивого развития и циркулярной экономики.
3. Внедрение интерактивных форм обучения и дополнительных методов контроля для повышения мотивации студентов и усиления тематики устойчивого развития текстильной отрасли в дисциплине.
4. Оснащение лаборатории новым оборудованием для проведения работ и детального рассмотрения возможностей рециклинга отходов текстильной и легкой промышленности.

5. Создание электронного курса модернизируемой дисциплины для увеличения доступности предлагаемого материала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании использованы методы анализа современных тенденций и мирового опыта образовательных организаций в области устойчивого развития текстильной отрасли, освещение практик в области переформатирования традиционных образовательных программ подготовки специалистов текстильной промышленности, технологов и конструкторов швейных изделий с учетом требований мировой общественности о переходе к модели циркулярной экономики. Усиление практической подготовки учащихся. Оснащение образовательных лабораторий современным оборудованием и инструментарием. Педагогический редизайн дисциплины.

Для формирования обучающего материала и создания новых учебных модулей был проведен анализ современных экологических трендов в текстильной промышленности. Особое внимание в разработанных материалах уделено трендам перехода на биоразлагаемые и перерабатываемые материалы, внедрения технологий замкнутого цикла (рециклинг, апсайклинг), снижения водопотребления и химической нагрузки в производстве.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ общероссийского рынка труда демонстрирует формирующийся, но четко артикулированный спрос на новых специалистов: эко-аудиторов, технологов по глубокой переработке вторсырья, менеджеров по устойчивому развитию и циркулярным цепям поставок, экспертов по экологической сертификации и стандартизации. Критически необходимыми компетенциями становятся: владение методами анализа жизненного цикла и оценки углеродного следа, знание инновационных технологий механического и химического рециклинга, понимание законодательства в сфере расширенной ответственности производителя (РОП), навыки проектирования изделий с учетом их последующей утилизации или рециклинга (design for recycling).

Переработка текстильных отходов в России носит фрагментарный характер и характеризуется преобладанием низкотехнологичных операций (производство обтирочных материалов и наполнителей). Внедрение таких наукоемких технологий как химическая деполимеризация и рециклинг композитов сдерживается, в том числе, кадровым голодом и не разработанностью технологий. Перспективы отрасли связаны с формированием межотраслевых кластеров (химия, строительство, АПК) и созданием комплексной системы сбора и сортировки текстильных отходов.

Обзор действующих образовательных программ в области технологий изделий легкой промышленности, конструирования и дизайна в российских вузах выявляет их заметное отставание от современных мировых трендов. Вопросы обращения с отходами, анализа жизненного цикла продукции, принципов циркулярной экономики и экодизайна, если и представлены, то носят факультативный или ознакомительный характер. В то же время в ведущих европейских и азиатских университетах эти дисциплины

формируют ядро новых магистерских программ (например, «Circular Fashion», «Sustainable Textile Engineering»), интегрируя инженерные, экологические, экономические и социальные аспекты. Однако в российских вузах наблюдается начальный, но уже формирующийся тренд на интеграцию принципов устойчивого развития в традиционные образовательные программы. Акцент делается преимущественно на отдельных дисциплинах, научных исследованиях и проектной деятельности. Полноценных магистерских программ, аналогичных западным «Circular Fashion» или «Sustainable Textile», на данный момент не представлено.

Так, в Санкт-Петербургском государственном университете промышленных технологий и дизайна (СПбГУПТД) представлены отдельные дисциплины в магистратуре на направлениях «Конструирование изделий легкой промышленности» (18.04.01) и «Технология изделий легкой промышленности» (29.04.01). Читаются курсы, напрямую посвященные устойчивому развитию: «Рециклинг текстильных материалов», «Устойчивое развитие в легкой промышленности», «Экологический дизайн». Присутствует также научно-исследовательская работа в области химического и механического рециклинга текстильных отходов, создания композиционных материалов на их основе. Это напрямую влияет на темы магистерских и кандидатских диссертаций. Студенты участвуют в создании коллекций с применением принципов апсайклинга, эко-материалов, что является частью учебного процесса и презентуется на показах. Таким образом, реализуется проектная деятельность студентов. СПбГУПТД демонстрирует наиболее системный подход среди российских вузов. Проблематика устойчивости закреплена в учебных планах как обязательные дисциплины, а не факультативы. Существует связь между технологическими и дизайнерскими кафедрами в этой области.

В Московском государственном университете дизайна и технологии (МГУДТ) также присутствуют экоориентированные дисциплины в рамках основных программ. На направлениях «Дизайн» (54.03.01/54.04.01) и «Технология изделий легкой промышленности» (29.03.01/29.04.01) студенты осваивают «Экологические проблемы индустрии моды», «Основы устойчивого развития», «Инновационные материалы». В структуре университета действуют площадки, занимающиеся исследованиями и просвещением в сфере циркулярной экономики и устойчивой моды, часто в партнерстве с брендами. Проводятся такие практико-ориентированные мероприятия как участие и организация конкурсов, воркшопов и недель моды, где ключевыми темами являются рециклинг и ответственное потребление. МГУДТ делает акцент на столичном рынке и диалоге с индустрией. Сильная сторона подхода – это интеграция устойчивого развития в контекст моды, бизнеса и маркетинга, а также в дизайн-проектирование.

Ивановский государственный политехнический университет (ИвГПУ) демонстрирует такие программы и формы интеграции принципов устойчивого развития в образовательный процесс как классические технологические программы «Технология изделий легкой промышленности» и «Химическая технология» с уклоном к новым «зеленым» технологиям. В рамках

этих программ изучаются вопросы ресурсосбережения, переработки отходов производства, очистки сточных вод. Университет является серьезным представителем научно-исследовательского кластера в регионе с развитой текстильной промышленностью. Здесь проводятся прикладные исследования по механическому рециклингу текстильных отходов, созданию нетканых материалов из вторсырья, разработке малоотходных технологий.

Глубокое погружение в технологические аспекты, сильная связь с реальным сектором экономики (текстильные комбинаты) является сильной стороной опыта интеграции принципов устойчивого развития в образование, которую демонстрирует ИвГПУ. В то же время, устойчивость здесь рассматривается через призму экологизации существующих производственных процессов, а не через системную циркулярную экономику или дизайн.

В Донском государственном техническом университете (ДГТУ, г. Ростов-на-Дону) на базе Инжинирингового центра «Моделирование и дизайн швейных изделий» разрабатываются проекты, связанные с CAD/CAM системами, что косвенно способствует устойчивости за счет минимизации отходов раскроя (оптимизация раскладки элементов кроя). Студенты кафедры «Конструирование, технология и дизайн» в рамках проектного обучения занимаются продуктами из вторичного сырья, часто в коллаборации с местными предприятиями. Фокус на цифровых технологиях, как инструменте устойчивого производства, является преимуществом ДГТУ в части экологизации образования инженеров и технологов текстильной и легкой промышленности. Региональная специфика также (Юг России) определяет интерес к проблеме отходов и попыткам их практического применения.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ) имеет программу подготовки магистров «Технологии и материалы низкоуглеродной и циркулярной экономики» по направлению 08.04.01 «Строительство». Программа не является узкоспециализированной по части текстильной промышленности, но готовит специалистов по переработке всех видов материалов (полимеры, текстиль, древесина, бетон) для строительной и смежных отраслей в логике циркулярной экономики. Для текстильщиков это возможность получить системные знания о циркулярных моделях в прикладном контексте, что можно назвать успешным примером кросс-отраслевого подхода.

Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) в рамках Института дизайна и Института химических технологий и промышленной экологии, внедряет дисциплины, связанные с экологическим дизайном, инновационными и смарт-материалами, проводит творческие конкурсы и выставки, где студенты представляют работы из переработанных материалов. Особенностью подхода является комбинация художественно-дизайнерского и технологического образования, что позволяет рассматривать устойчивость с разных сторон.

В Казанском национальном исследовательском технологическом университете (КНИТУ) на кафедре Технологии химических и натуральных волокон и изделий (ТХНВИ) реализуется образовательная

программа «Ресурсосберегающие технологии и цифровой дизайн текстильных материалов» по направлению 29.03.02 Технологии и проектирование текстильных изделий. В рамках программы читаются такие дисциплины как «Оборудование для регенерации текстильных отходов», «Использование отходов текстильной промышленности», «Эко- технологии в производстве текстиля и одежды» и др. Активно применяются методы практико-ориентированного обучения. Проектное обучение и вовлечение студентов в научные исследования реализуются, кроме всего прочего, в рамках выполнения выпускных квалификационных работ магистров и бакалавров. Так, на кафедре ведутся разработки по следующим тематикам: получение и исследование свойств композитов на основе вторичных волокнистых материалов; получение композиционных материалов, наполненных костью конопли и др. [2].

Также на кафедре ТХНВИ ежегодно проводится олимпиада для школьников, студентов СПО и вузов «Зеленый курс текстильной и легкой промышленности: технологии, стандарты, регулирование», посвященная поиску нестандартных решений в области переработки текстильных отходов.

Рассмотрев подходы внедрения концепции устойчивости в образование при подготовке специалистов текстильной и легкой промышленности можно сделать следующие выводы. В большинстве вузов тема устойчивости реализуется через 1–2 специальные дисциплины, введенные в вариативную или обязательную части магистерских или бакалаврских программ. Основной фокус при этом приходится на рециклинг отходов производства. При этом недостатком программ также является дефицит практических цифровых инструментов. Крайне редко в учебный процесс включены специализированные программы для оценки жизненного цикла изделий (LCA), углеродного следа или цифровых паспортов текстильных изделий. Многие вузы имеют серьезные научные исследования в области переработки, но эти знания медленно переводятся в обновленное образовательное содержание для массовой подготовки студентов [3–5].

Образование для целей устойчивого развития определяется Генеральной Ассамблеей ООН как неотъемлемый элемент цели о качественном образовании и как важнейшее условие достижения всех остальных Целей устойчивого развития [6].

Для подготовки учащихся к роли активных проводников изменений в области устойчивого развития необходима глубокая трансформация самой системы образования. Чтобы выпускники обладали необходимыми знаниями, компетенциями и решимостью действовать, принципы устойчивого развития должны быть интегрированы на всех уровнях: в содержание учебных программ, в методы преподавания, в процессы управления учебным заведением и в его повседневную практику. Такой целостный подход создает образовательную среду, в которой учебный процесс неотделим от реального опыта, а ценности, провозглашаемые в аудитории, находят прямое отражение в жизни образовательной организации.

Перспективным направлением является создание полноценных магистерских программ, построенных по междисциплинарному принципу и

объединяющих модули по экодизайну, инновационным и рециклированным материалам, технологиям переработки, экономике замкнутого цикла и цифровым инструментам устойчивости. Моделью для такого редизайна может стать синтез сильных сторон программ СПбГУПТД (технологии рециклинга), МГУДТ (дизайн и бизнес-контекст) и кросс-отраслевого подхода НИУ МГСУ.

Первым шагом к созданию таких программ является пересмотр и редизайн отдельных дисциплин.

На кафедре Технология химических и натуральных волокон и изделий Казанского национального исследовательского технологического университета курс «Вторичное использование отходов изделий текстильной и легкой промышленности» является частью основной программы подготовки магистров по направлению 29.04.02 Технологии и проектирование текстильных изделий. Курс посвящен изучению видов отходов текстильной отрасли, способов вторичного их использования, а также способам регенерации и переработки; включает в себя лекционные и практические занятия. До редизайна курса на лекционных занятиях обсуждались такие темы как классификация производственных отходов текстильной отрасли, технологические процессы переработки отходов производства, кратко затрагивались основы концепции устойчивого развития. Курс имел дефицит практической подготовки, который был обусловлен отсутствием лабораторных работ, что существенно ограничивало формирование исследовательских компетенций и развитие креативного мышления обучающихся.

Анализируя данные опроса (обратную связь) предприятий партнеров о необходимых компетенциях выпускаемых специалистов [7], принято решение о необходимости переработки содержательной части курса и перераспределении аудиторной нагрузки в сторону увеличения доли практических занятий.

Обновленный курс состоит из трех модулей, каждый из которых включает лекции и практические занятия. Первый модуль делает акцент на проведении занятий в интерактивной форме и развитии критического мышления у студентов с помощью проектного обучения и других методов. Второй и третий модули дополнены лабораторными работами. Произведена актуализация содержания лекционного материала современным тенденциям и разработкам в области вторичного использования текстильных отходов. В обновленном курсе акцент смещается на концепцию устойчивого развития и принципы переработки текстильных отходов. В рамках теоретических и практических занятий формируется системное понимание устойчивого развития, его принципов и применения в текстильной отрасли. Содержательная новизна курса включает изучение инновационных мировых практик по переработке отходов легкой промышленности.

Методологическая новизна проекта по редизайну курса заключается в наполнении лекций интерактивным содержанием, проведении практических занятий с использованием ИКТ, внедрении творческо-поисковых технологий и проектно-проблемного обучения. В рамках интерактивных лекций введены дискуссии на различные темы, например, как применить циркулярную экономику в

повседневной жизни, как улучшить проекты с учетом целей устойчивого развития и др.

В рамках редизайна также переработаны темы и принципы проведения практических занятий, внедрены кейс проекты, театр форум, перевернутые классы, метод Джигсо. Для специалиста в области текстильных изделий в целях получения своевременной информации об изменениях в нормативной документации, важно уметь работать в специализированных справочных системах. Поэтому, в рамках практических работ введены занятия по работе в профессиональной справочной системе «Техэксперт», предоставляющей нормативно-техническую и нормативно-правовую информацию.

Для формирования исследовательских компетенций в курс «Вторичное использование отходов изделий текстильной и легкой промышленности» введены лабораторные работы, которые будут способствовать развитию практического мышления и раскрытию творческого потенциала студентов. Для усиления практической части курса было приобретено оборудование для разволокнения текстильных отходов, и разработаны методические рекомендации для проведения лабораторных работ.

Претерпела изменения и система оценивания (табл. 1).

Таблица 1. Изменение системы оценивания результатов освоения курса

Table 1. Changing the assessment system for course development results

Компоненты оценки до модернизации дисциплины Assessment components before discipline modernisation	Компоненты оценки после модернизации дисциплины Assessment components after discipline modernisation
Практические занятия Practical exercises	Практические занятия Practical exercises
Реферат Report	Эссе по проблематике устойчивого развития Essays on sustainable development
Контрольная работа Control Task	Проектные работы Project work
	Лабораторные исследования Laboratory studies

Также преобразование дисциплины «Вторичное использование отходов изделий текстильной и легкой промышленности» отвечает современным реалиям и направлено на решение наиболее острых проблем переработки текстильных отходов, с которыми сталкиваются промышленные субъекты. Для предприятий текстильной отрасли, и легкой промышленности в целом, эти вопросы актуальны и остро поставлены еще и вследствие введенного в 2025 году экологического сбора.

Помимо повышения профессиональных компетенций, дисциплина направлена на развитие у студентов социокультурных навыков и формирование ценностных ориентиров, благодаря акцентам на экономическом и экологическом аспектах.

Внедрение обновленного курса «Вторичное использование отходов изделий текстильной и легкой промышленности» направлено на достижение следующих социальных эффектов:

- развитие информационной, социальной и коммуникативной компетентностей обучающихся;
- повышение уровня удовлетворённости обучающихся качеством образования;
- привлечение внимания к проблеме утилизации и переработки текстильных отходов;
- развитие ответственного отношения к пользованию материальными ресурсами.

Результатами внедрения модернизированной дисциплины является также разработка электронного варианта курса для увеличения доступности обучения и преподавания. Предусмотрено получение обратной связи о качестве подачи материала, содержательной части дисциплины, удобстве пользования материалами студентами.

В статье представлена концепция модернизации магистерского образования в текстильной отрасли, обосновывающая переход к практико-ориентированной модели обучения. На основе редизайна профильной

дисциплины разработаны новые модули, направленные на усиление подготовки и выпуск высококвалифицированных кадров, способных обеспечить соответствие индустрии требованиям циркулярной экономики. Редизайн курса «Вторичное использование отходов изделий текстильной и легкой промышленности» с упором на практическую подготовку и современное оборудование является эффективным инструментом перехода к циркулярной модели в отрасли. Внедрение новых образовательных модулей и материалов для магистров направления 29.04.02 позволяет преодолеть разрыв между академическими знаниями и требованиями предприятий и повестки общества об устойчивом развитии, формируя компетенции инженеров нового поколения для повышения конкурентоспособности текстильной промышленности РФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа подчеркивает необходимость кардинальных реформ в системе профессионального образования в области текстильной промышленности, а описанный в ней проект является возможным истоком мер, направленных на обеспечение соответствия текстильной промышленности требованиям современной циркулярной экономики и устойчивого развития и их кадрового обеспечения.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Проект реализуется при поддержке Фонда Потанина.

ACKNOWLEDGMENT

The project is being implemented with the support of the Potanin Foundation.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://www.rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 29.03.2026)

2. Парсанов А.С., Антонова М.В., Красина И.В. Применение конопли в производстве композитных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. N 6 (396). С. 292–297. https://doi.org/10.47367/0021-3497_2021_6_292
3. Кокшаров С.А., Алеева С.В., Лепилова О.В., Матрохин А.Ю. Задачи и эффективность биомодифицирования отходов льнопереработки для производства кормовых добавок // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. N 2 (392). С. 54–60. https://doi.org/10.47367/0021-3497_2021_2_54
4. Олейникова О.Н., Редина Ю.Н. Профессиональное образование и обучение в условиях экономики замкнутого цикла // Профессиональное образование и рынок труда. 2022. Т. 10. N 3. С. 70–83.
5. Караева А.П., Чашин М.Р., Магарил Е.Р. Внедрение принципов устойчивого развития в университетах как фактор повышения эколого-экономической безопасности // Journal of Applied Economic Research. 2021. V. 20. N 4. P. 701–725.
6. Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН 72/222 (2017 г.). URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380898> (дата обращения: 29.03.2026)
7. Ибатуллина А.Р., Красина И.В., Антонова М.В., Бронская В.В., Кабыш М.С. Экологизация мышления студентов как фактор развития текстильной отрасли // Юг России: экология, развитие. 2025. Т. 20. N 2. С. 203–210. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2025-2-17>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Марина В. Антонова и Алина Р. Ибатуллина разрабатывали концепцию, собирали статистические данные, провели аналитику и написали рукопись. Ирина В. Красина осуществляла корректуру 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.

REFERENCES

1. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki* [Federal State Statistics Service]. Available at: <https://www.rosstat.gov.ru/> (accessed 29.03.2026)
2. Parsanov A.S., Antonova M.V., Krasina I.V. The Use of Hemp in the Production of Composite Materials. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 2021, no. 6 (396), pp. 292–297. (In Russian) https://doi.org/10.47367/0021-3497_2021_6_292
3. Koksharov S.A., Aleeva S.V., Lepilova O.V., Matrokhin A.Yu. Tasks and Efficiency of Biomodification of Flax Processing Waste for the Production of Feed Additives. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2021. N 2 (392). pp. 54–60. (In Russian) https://doi.org/10.47367/0021-3497_2021_2_54
4. Oleynikova O.N., Redina Yu.N. Vocational Education and Training in a Closed-Loop Economy. Professional'noe obrazovanie i ry'nok truda [Vocational Education and the Labor Market]. 2022, vol. 10, no. 3, pp. 70–83. (In Russian)
5. Karaeva A.P., Chashchin M.R., Magaril E.R. Implementation of Sustainable Development Principles in Universities as a Factor in Improving Environmental and Economic Security. *Journal of Applied Economic Research*, 2021, vol. 20, no. 4, pp. 701–725.
6. UN General Assembly Resolution 72/222 (2017). URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380898> (accessed 29.03.2026)
7. Ibatullina A.R., Krasina I.V., Antonova M.V., Bronskaya V.V., Kabysh M.S. Greening of students' thinking as a factor in development of the textile industry. *South of Russia: ecology, development*, 2025, vol. 20, no. 2, pp. 203–210. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2025-2-17>

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Marina V. Antonova and Alina R. Ibatullina developed the concept, collected statistical data, conducted analysis and wrote the manuscript. Irina V. Krasina proofread 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

Марина В. Антонова / Marina V. Antonova <https://orcid.org/0000-0002-7313-7804>

Алина Р. Ибатуллина / Alina R. Ibatullina <https://orcid.org/0009-0003-2785-7629>

Ирина В. Красина / Irina V. Krasina <https://orcid.org/0000-0001-9448-121X>

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 15.07.2026 г.
Объем 200 стр. Тираж 100. Заказ № 22
Формат 70х90%. Печать офсетная.
Бумага офсетная № 1.
Тиражировано в типографии издательства ДГУ
по адресу: г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 59е