

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



Том 19 № 2 2024

ISSN 1992-1098

e-ISSN 2413-0958

ЮГ РОССИИ: ЭКОЛОГИЯ, РАЗВИТИЕ

Vol.19 no. 2 2024

SOUTH OF RUSSIA: ECOLOGY, DEVELOPMENT

Журнал «Юг России: экология, развитие» входит в Перечень Высшей аттестационной комиссии (ВАК) 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

Асадулаев Загирбег Магомедович, Горный ботанический сад, Дагестанский федеральный исследовательский центр Российской академии наук (Махачкала, Россия)

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

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

Рабазанов Нухкади Ибрагимович, Прикаспийский институт биологических ресурсов, Дагестанский федеральный исследовательский центр Российской академии наук (Махачкала, Россия)

Научный редактор

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

Ответственные секретари

Гасангаджиева Азиза Гусейновна, Институт экологии и устойчивого развития, Дагестанский государственный университет (Махачкала, Россия)

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

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

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

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

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

Nukhkadi I. Rabazanov, Caspian Institute of Biological Resources, Dagestan Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences (Makhachkala, Russia)

Scientific Editor

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

Editorial Executive Secretaries

Aziza G. Gasangadzhieva, 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)

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)

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)

Бондарцева М.А., Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук (Санкт-Петербург, Россия)

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

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

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

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

Джамбулатов З.М., Дагестанский государственный аграрный университет им. М.М. Джамбулатова (Махачкала, Россия)

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

Замотайлов А.С., Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, 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)

Клюшин П.В., Государственный университет по землеустройству (Москва, Россия)

Лобковский Л.И., Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (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)

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

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

Переведенцева Л.Г., Пермский государственный национальный исследовательский университет (Пермь, 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)

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)

Margarita A. Bondartseva, Komarov Botanical Institute, Russian Academy of Sciences (St. Petersburg, Russia)

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

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

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

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

Zaidin M. Dzhamdulatov, M.M. Dzhambulatov Dagestan State Agrarian University (Makhachkala, Russia)

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

Aleksandr S. Zamotailov, Kuban State Agrarian University (Krasnodar, 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)

Pavel V. Klyushin, State University of Land Use Planning (Moscow, Russia)

Leopold I. Lobkovskiy, Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences (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)

Lydia G. Perevedentseva, Perm State University (Perm, Russia)

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

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

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

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

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

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

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

ВИРУСОЛОГИЯ*Рябиченко Т.И., Обухова О.О., Воевода М.И.*

Коррекция микробиологического дисбаланса у детей, перенесших мультисистемный воспалительный синдром, ассоциированный с SARS-CoV-2, в постреабилитационный период.....6-16

ЗООЛОГИЯ*Табакаева Т.В., Галкина И.В., Табакаев А.В., Щелканов М.Ю.*

Антропозоонозные паразитозы собак и кошек в городской экосистеме Владивостока.....17-24

Коробицын И.Г., Тютеньков О.Ю., Панин А.С., Мурзаханов Е.Б., Баздырев А.В.

Многолетние наблюдения за весенней миграцией водоплавающих птиц на юго-востоке лесной зоны Западной Сибири.....25-32

*Барсегян Р.Э., Петросян Р.А., Акопян К.В., Варданян М.В., Никогосян М.А.,**Барсегян Н.Э., Жакмакян Р.Р.А., Тадевосян Н.Н., Дудукчян Э.М., Магомедова М.З.,**Магомедова П.Д., Арутюнова Л.Дж.*

О фауне паразитов желудочно-кишечного тракта мелкого рогатого скота в горной зоне Армении.....33-39

ЭНТОМОЛОГИЯ*Ларченко А.И., Горобейко У.В., Маковецкая Е.В., Кирьянов П.С.*

Видовой состав, распространение, хост-специфичность, морфологические и генетические особенности мух кровососок рукокрылых (Diptera, Nycteribiidae) в Беларуси.....40-56

ЭКОЛОГИЯ*Бейбалаева А.К., Чалабов Ш.И., Кличханов Н.К.*

Зимняя спячка млекопитающих как стратегия адаптации к неблагоприятным факторам среды.....57-68

Конькова А.В., Файзулина Д.Р., Ширина Ю.М., Богатов И.А.

Генотоксические эффекты в клетках крови осетровых рыб (Acipenseridae) в условиях садкового хозяйства дельты Волги.....69-81

Паюта А.А., Гульдина Д.А., Флёрова Е.А., Лобус Н.В., Евдокимов Е.Г.

Химический состав мышечной ткани рыб, выращенных в условиях аквакультуры Южного Вьетнама.....82-91

НАУКИ О ЗЕМЛЕ*Колпакова Д.Е., Миленьева И.С., Асякина Л.К., Фотина Н.В., Просеков А.Ю.*

Особенности минералогического состава техногенных почв угольных отвалов Кузбасса.....92-103

РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ*Ахмедова Л.Ш., Солтанмурадова З.И., Дандамаева Р.Г., Идзиев Г.И.*

Анализ современного состояния и тенденции развития туристической сферы в регионах Северного Кавказа.....104-116

Hossieni S.S., Gholami Y., Dolvand H., Ataev Z.V.

An investigation into the effect of Coronavirus-2019 (SARS-CoV-2) on active transportation as an opportunity to develop a sustainable tourist destination in the post-pandemic era with an emphasis on the local community (Case study: Dorood City, Lorestan Province, Iran).....117-130

ГЕОЭКОЛОГИЯ*Цыганкова А.Р., Гуляев С.А., Адаменко Л.С., Шестопалов М.А.*

Методы анализа и мониторинга тяжелых металлов в окружающей среде.....131-146

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.....147-159

Братков В.В., Бекмурзаева Р.Х., Бекмурзаева Л.Р.

Возможности ГИС-технологий для оценки и мониторинга климатических условий Макажойской котловины (Чеченская Республика).....160-169

Сивохиц Ж.Т., Павлейчик В.М., Чибилёв А.А., Падалко Ю.А., Козлова М.А., Попова О.Б.

Гидроэкологические ограничения использования водных ресурсов трансграничных рек Урала и Тобола в пределах степной зоны.....170-180

Занозин В.В., Бармин А.Н., Занозин В.В., Ямашкин С.А., Корень В.А., Занозина Е.В.

Гексагональная геопространственная модель ландшафтного разнообразия северного подрайона дельты реки Волга.....181-196

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ.....197

VIROLOGY*Ryabichenko T.I., Obukhova O.O., Voevoda M.I.*

Correction of microecological imbalance in children who have suffered from multisystem inflammatory syndrome associated with SARS-CoV-2 in the post-rehabilitation period.....6-16

ZOOLOGY*Tabakaeva T.V., Galkina I.V., Tabakaev A.V., Shchelkanov M.Yu.*

Anthropozoonotic parasitoses of dogs and cats in the urban ecosystem of Vladivostok, Russia.....17-24

Korobitsyn I.G., Tyutenkov O.Yu., Panin A.S., Murzakhanov E.B., Bazdyrev A.V.

Long-term observation of waterfowl migration in the south-east of the forest zone of Western Siberia, Russia.....25-32

*Barseghyan R.E., Petrosyan R.A., Akopyan K.V., Vardanyan M.V., Nikoghosyan M.A.,**Barseghyan N.E., Jakmakian R.R.A., Tadevosyan N.N., Dudukchyan Z.M., Magomedova M.Z.,**Magomedova P.D., Harutyunova L.J.*

On the fauna of parasites of the gastrointestinal tract of small ruminants in the mountainous zone of Armenia.....33-39

ENTOMOLOGY*Larchanka A.I., Gorobeyko U.V., Makovetskaya E.V., Kiryanov P.S.*

Species composition, distribution, host-specificity, morphological and genetic characteristics

of bat flies (Diptera, Nycteribiidae) in Belarus.....40-56

ECOLOGY*Beibalaeva A.K., Chalabov Sh.I., Klichkhanov N.K.*

Mammal hibernation as a strategy for adaptation to unfavorable environmental conditions.....57-68

Konkova A.V., Faizulina D.R., Shirina Yu.M., Bogatov I.A.

Genotoxic effects in blood cells of sturges (Acipenseridae) grown in conditions of cage farming

of the Volga delta, Russia.....69-81

Payuta A.A., Guldina D.A., Flerova E.A., Lobus N.V., Evdokimov E.G.

Chemical composition of muscle tissue of fish reared in the aquaculture of South Vietnam.....82-91

EARTH SCIENCES*Kolpakova D.E., Milentjeva I.S., Asyakina L.K., Fotina N.V., Prosekov A.Yu.*

Features of the mineralogical composition of technogenic soils of coal dumps in Kuzbass,

Kemerovo Region, Russia.....92-103

RECREATIONAL GEOGRAPHY*Akhmedova L.Sh., Soltanmuradova Z.I., Dandamaeva R.G., Idziev G.I.*

Analysis of current state and development trends of the tourism sector

in the regions of the North Caucasus, Russia.....104-116

Hossieni S.S., Gholami Y., Dolvand H., Ataev Z.V.

An investigation into the effect of Coronavirus-2019 (SARS-CoV-2) on active transportation

as an opportunity to develop a sustainable tourist destination in the post-pandemic era

with an emphasis on the local community (Case study: Dorood City, Lorestan Province, Iran).....117-130

GEOECOLOGY*Tsygankova A.R., Gulyaev S.A., Adamenko L.S., Shestopalov M.A.*

Methods for analysis and monitoring of heavy metals in the environment.....131-146

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 modeling.....147-159

Bratkov V.V., Bekmurzaeva R.H., Bekmurzaeva L.R.

The possibilities of GIS technologies for assessing and monitoring the climatic conditions

of the Makazhoy Depression (Chechen Republic, Russia).....160-169

Sivohip Zh.T., Pavleichik V.M., Chibilev A.A., Padalko Yu.A., Kozlova M.A., Popova O.B.

Hydroecological limitations of the use of water resources of transboundary rivers of the steppe zone

(through the example of the Ural and Tobol Rivers, Russia).....170-180

Zanozin V.V., Barmin A.N., Zanozin V.V., Yamashkin S.A., Koren V.A., Zanozina E.V.

Hexagonal geospatial model of landscape diversity in the northern sub-area

of the Volga River Delta landscape, Russia.....181-196

CONTACT INFORMATION.....197

Оригинальная статья / Original article
УДК616-092.19; 578.76; 159.9.072.43
DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-1



Коррекция микроэкологического дисбаланса у детей, перенесших мультисистемный воспалительный синдром, ассоциированный с SARS-CoV-2, в постреабилитационный период

Татьяна И. Рябиченко, Ольга О. Обухова, Михаил И. Воевода

Федеральный исследовательский центр фундаментальной и трансляционной медицины (ФИЦ ФТМ), Новосибирск, Россия

Контактное лицо

Ольга О. Обухова, доктор медицинских наук, главный научный сотрудник, лаборатория иммунологии, Федеральный исследовательский центр фундаментальной и трансляционной медицины (ФИЦ ФТМ); 630117 Россия, г. Новосибирск, ул. Тимакова, 2.
Тел. +79139403293
Email trio188@yandex.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9834-1799>

Формат цитирования

Рябиченко Т.И., Обухова О.О., Воевода М.И. Коррекция микроэкологического дисбаланса у детей, перенесших мультисистемный воспалительный синдром, ассоциированный с SARS-CoV-2, в постреабилитационный период // Юг России: экология, развитие. 2024. Т.19, N 2. С. 6-16. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-1

Получена 2 февраля 2024 г.
Прошла рецензирование 14 марта 2024 г.
Принята 26 апреля 2024 г.

Резюме

Цель – провести исследование качества жизни детей, перенесших мультисистемный воспалительный синдром (MIS-C), ассоциированный с SARS-CoV-2, в постреабилитационный период на фоне коррекции микроэкологического дисбаланса.

В исследовании приняли участие 49 детей в возрасте от 2 до 12 лет, которые перенесли MIS-C, ассоциированный с SARS-CoV-2, и получали лечение в условиях стационара (ДГКБ№3 г. Новосибирска), а затем прошли курс реабилитации в амбулаторных условиях. Длительность реабилитации составила 7–8 недель. Всем детям в течение 30 дней назначался курс дополнительной реабилитации с целью коррекции микроэкологического дисбаланса, который включал: БАД «Биовестин» в жидкой форме, содержащий бифидобактерии штамма *Bifidobacterium longum* MC-42; официальный препарат «Кудесан» (действующее начало Коэнзим Q10); официальный препарат «Янтарная кислота». Проведена оценка физического, социального, учебного, эмоционального и психологического функционирования, а также качества жизни, как интегрирующего показателя, до и после комплексного курса реабилитации с использованием родительской формы опросника Reds OL Generic Core Scales (русская версия).

У детей, перенесших MIS-C, ассоциированный с SARS-CoV-2, после курса реабилитации сохранялись признаки дисфункции различных органов и систем, что может являться результатом дисбаланса микробной экосистемы и требует обязательной коррекции.

Введение в реабилитационный курс пробиотического продукта и препаратов, влияющих на метаболические процессы, привело к снижению воспалительных реакций, а также нормализации метаболических процессов и повышению оксигенации, что позволило улучшить состояние детей и качество их жизни.

Ключевые слова

Дети, микроэкология, мультисистемный воспалительный синдром, SARS-CoV-2, опросник Reds OL Generic Core Scales, качество жизни.

Correction of microecological imbalance in children who have suffered from multisystem inflammatory syndrome associated with SARS-CoV-2 in the post-rehabilitation period

Tatyana I. Ryabichenko, Olga O. Obukhova and Mikhail I. Voevoda

Federal Research Center for Fundamental and Translational Medicine (FRC FTM), Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Principal contact

Olga O. Obukhova, Doctor of Medical Sciences, Chief Researcher, Laboratory of Immunology, Federal Research Center for Fundamental and Translational Medicine (FRC FTM), Siberian Branch, Russian Academy of Sciences; 2 Timakova St, Novosibirsk, Russia 630117.
Tel. +79139403293
Email trio188@yandex.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9834-1799>

How to cite this article

Ryabichenko T.I., Obukhova O.O., Voevoda M.I. Correction of microecological imbalance in children who have suffered from multisystem inflammatory syndrome associated with SARS-CoV-2 in the post-rehabilitation period. *South of Russia: ecology, development*. 2024; 19(2):6-16. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-1

Received 2 February 2024
Revised 14 March 2024
Accepted 26 April 2024

Abstract

To conduct a study of the quality of life of children who have suffered from multisystem inflammatory syndrome (MIS-C) associated with SARS-CoV-2 in the post-rehabilitation period against the background of correction of microecological imbalance.

The study involved 49 children aged 2 to 12 years who underwent MIS-C associated with SARS-CoV-2 and received treatment in a hospital (DGKB No. 3 in Novosibirsk), and then underwent rehabilitation on an outpatient basis. The duration of rehabilitation was 7–8 weeks. All children were prescribed a course of additional rehabilitation for 30 days in order to correct microecological imbalance, which included: Biovestin, a dietary supplement in liquid form, containing bifidobacteria of the *Bifidobacterium longum* MC-42 strain; the official drug, Kudesan, (active ingredient Coenzyme Q10); and the official drug, Succinic Acid. The assessment of physical, social, educational, emotional and psychological functioning, as well as quality of life as an integrating indicator before and after a comprehensive rehabilitation course using the parental form of the Reds OL Generic Core Scales questionnaire (Russian version) was carried out.

After the rehabilitation course, children who underwent MIS-C associated with SARS-CoV-2 showed signs of dysfunction of various organs and systems, which may be the result of an imbalance in the microbial ecosystem and requires mandatory correction. The introduction of a probiotic product and drugs affecting metabolic processes into the rehabilitation course led to a decrease in inflammatory reactions, as well as normalisation of metabolic processes and increased oxygenation, which improved the condition of the children and their quality of life.

Key Words

Children, microaecology, multisystem inflammatory syndrome, SARS-CoV-2, Reds OL Generic Core Scales questionnaire, quality of life.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема новой коронавирусной инфекции, обусловленной SARS-CoV-2, несмотря на окончание пандемии, сохраняет актуальность [1]. До периода пандемии инфекции, этиологическим фактором которых были известные коронавирусы, протекали как обычные острые респираторные заболевания. При этом течение заболевания, как правило, было легким или среднетяжелым, летальных исходов не наблюдалось [2; 3]. Известно, что в начале пандемии дети болели легко, либо в очагах инфекции не болели вовсе. Однако в течение развития пандемии у детей стали отмечаться как тяжелое течение новой коронавирусной инфекции, а также крайне тяжелые состояния, клинически схожие с болезнью Кавасаки. Такие данные были получены в Китае, США, Франции, Италии, Испании, Южной Африке, России. В результате тяжелый воспалительный синдром, связанный с SARS-CoV-2, стал трактоваться как Кавасаки – подобный синдром, педиатрический мультисистемный воспалительный синдром, педиатрический воспалительный мультисистемный синдром (PIMS), временно связанный с SARS-CoV-2 (PIMS-TS), педиатрический гипертрофический синдром или детский гипертрофический шок, а также мультисистемный воспалительный синдром у детей [4].

На сегодняшний день общепринятым является термин «мультисистемный воспалительный синдром у детей, ассоциированный с SARS-CoV-2 (*Multisystem Inflammatory Syndrome in Children* – MIS-C). Это заболевание у детей, связанное с SARS-CoV-2, развивается через 2–6 недель после перенесенной новой коронавирусной инфекции, при этом инфекционный процесс может быть и бессимптомным [5]. Для MIS-C, ассоциированного с SARS-CoV-2, характерным является выраженное лихорадочное состояние, полиорганная недостаточность, а также повышенное содержание маркеров воспаления в сыворотке крови [6–9].

Отмечено, что у детей с COVID-19 частота вовлечения в инфекционный процесс желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) выше, чем у взрослых пациентов. Высказано предположение, что SARS-CoV-2 может поражать ЖКТ, проникая в энтероциты путем взаимодействия с их активированными рецепторами, а также на фоне индуцированного им локального воспаления, которое способствует повышению проницаемости слизистых оболочек и изменению состава микробиоты кишечника. Иммунные и метаболические нарушения организма могут ослаблять защитные барьеры, приводя к микробиологическому дисбалансу, и, наоборот, микробиологический дисбаланс изменяет структуру и иммунную функцию флоры, приводя к различным заболеваниям человека. Тесные взаимодействия между нарушением микробиоты и болезнями детей обеспечивает теоретическое обоснование для их лечения использованием метода регулирования микрофлоры [10]. Известно, что микробиота желудочно-кишечного тракта как напрямую, так и опосредованно взаимодействует со всеми органами и системами человека, являясь одним из основных интегрирующих механизмов поддержания гомеостаза организма [11]. В то же время, полиорганность поражения при MIS-C вовлекает в патологический процесс практически все органы и системы детского организма. Однако, патогенетические механизмы развития MIS-C, ассоциированного с SARS-CoV-2, остаются неясными. Также остаются

актуальными вопросы об отдаленных клинико-иммунологических последствиях этого тяжелого патологического процесса.

В связи с этим целью исследования явилось изучение качества жизни детей, перенесших мультисистемный воспалительный синдром, ассоциированный с SARS-CoV-2, в постреабилитационный период на фоне коррекции микробиологического дисбаланса.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании приняли участие дети (n=49), которые перенесли MIS-C, ассоциированный с SARS-CoV-2, и получали лечение в условиях стационара (ДГКБ №3 г. Новосибирска), а затем прошли курс реабилитации в амбулаторных условиях. Длительность реабилитации составила 7–8 недель [12]. Верификация диагноза проводилась врачами специализированного инфекционного отделения ДГКБ №3.

Был проведен ретроспективный анализ историй болезней детей с целью уточнения диагноза и получения необходимых клинических и лабораторных данных. Исследование было проведено в соответствии с принципами Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека», а также законами РФ. У всех законных представителей пациентов (родители) было получено добровольное информированное согласие на забор биологических жидкостей, а также использование данных исследования в научных целях.

Критерием включения в группу было соответствие диагноза диагностическим критериям MIS-C, ассоциированного с SARS-CoV-2, принятыми ВОЗ [13] на этапе стационарного лечения. Также критерием включения было окончание амбулаторного реабилитационного курса, проведенного в течение 7–8 недель после выписки из стационара. Критерием исключения являлось несоответствие диагностическим критериям MIS-C, ассоциированного с SARS-CoV-2, принятыми ВОЗ [13], а также наличие острых и обострения хронических вирусных или бактериальных процессов на момент обследования.

В группу вошли дети от 2 до 12 лет. Средний возраст в группе составил $7,78 \pm 0,63$ года. Число мальчиков – 62 %, девочек – 38 %. Всем детям, поступавшим в ДГКБ №3 с подозрением на MIS-C, ассоциированный с SARS-CoV-2, проводилось тестирование на выделение рибонуклеиновой кислоты (РНК) SARS-CoV-2 в соответствии с рекомендациями Министерства здравоохранения Российской Федерации [12]. В качестве исследуемого материала использовались соскобы из носоглотки и ротоглотки. Вирус идентифицировали методом РТ-ПЦР (ПЦР с детекцией результатов в режиме реального времени) с помощью «Набора реагентов для выявления РНК коронавирусов SARS-CoV-2 и подобных SARS-CoV методом обратной транскрипции и полимеразной цепной реакции в режиме реального времени (SARS-CoV-2/ SARS-CoV)» (ООО НПО «ДНК-Технология», Россия). Также исследовали содержание специфических IgM и IgG-антител к антигенам SARS-CoV-2 в сыворотке крови. Определение антител классов IgM и IgG в сыворотке крови осуществляли с помощью наборов реагентов «SARS-CoV-2-IgM-ИФА-БЕСТ» и «SARS-CoV-2-IgG-ИФА-

БЕСТ» («АО Вектор-Бест», Россия) по инструкции производителя.

Для оценки качества жизни использовалась родительская форма опросника *Reds OL Generic Core Scales* (русская версия). Элементы пяти шкал (физическое функционирование, социальное, учебное, эмоциональное и психологическое функционирование – жизнь в детском саду и школе) сгруппированы вместе по фактической анкете. Значения шкал оценивались в баллах. Для создания шкалы среднее вычислялось как сумма элементов по количеству ответов на вопросы. Набранные баллы суммировались, затем проводилось деление на количество элементов в шкале М. Данные приведены в таблицах, сформированных по возрастным категориям детей, перенесших MIS-C, ассоциированный с SARS CoV-2.

Полученные цифровые данные были подвергнуты статистическому анализу и представлены в виде таблиц. Статистическую обработку полученных результатов осуществляли с использованием лицензионного пакета прикладных программ «STATISTICA» v.10.0 (Stat Soft, США).

Для анализа повторных наблюдений (до – после применения комплексного способа терапии использовался парный двусторонний критерий Уилкоксона (*Wilcoxon Matched Pairs Test*), с помощью которого были получены данные по изменениям показателей функционирования как в объединённой выборке по всей группе детей, перенесших вирусную инфекцию, так и по возрастным категориям.

По результатам первичного обследования была предложена схема дополнительной комплексной терапии:

- В качестве пробиотического продукта детям назначался приём БАД «Биовестин» в жидкой форме, содержащий бифидобактерии штамма *Bifidobacterium longum* MC-42. БАД «Биовестин» назначали пациентам *per os* в дозе, достаточной и приемлемой для использования в детской лечебной практике.

- В качестве дополнительной метаболической поддержки в способ комплексной терапии введён официальный препарат Кудесан (действующее начало Коэнзим Q10) в дозе, соответствующей возрасту.

- Дополнительно, как универсальный внутриклеточный метаболит, в комплекс терапевтических мероприятий включен официальный препарат (пищевая добавка) «Янтарная кислота» 100 мг в таблетированной форме в возрастной дозировке.

Дополнительный курс реабилитации применялся в течение 30 суток. Негативных реакций и побочных эффектов процессе курса не отмечено.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При анализе историй болезней детей с MIS-C, ассоциированным с SARSCoV-2, выявлено, что подтверждение наличия коронавируса методом ПЦР-диагностики при поступлении в стационар имело место только у 12,14 % детей. У 87,86 % детей РНК вируса в отделяемом ротоглотки и носоглотки не обнаружено. В то же время, у всех обследованных детей с MIS-C в сыворотке крови обнаружены IgG-антитела, специфичные к антигенам SARS-CoV-2. Это, безусловно, подтверждает коронавирусную этиологию заболевания.

При обследовании детей через 7–8 недель после перенесенного мультисистемного воспали-

тельного синдрома, связанного с SARSCoV2, в амбулаторных условиях, их состояние расценивалось как удовлетворительное. Однако по данным проведенного анкетирования, дополнительного осмотра, сбора анамнеза и УЗИ-исследования органов брюшной полости у всех обследованных детей обнаружены симптомы, которые не отмечались до болезни и которые характерны не только для астенического состояния после перенесенной вирусной инфекции, но вызывают определенную настороженность в плане развития аутореактивных, метаболических и выраженных интоксикационных процессов. Следует отметить, что чаще всего имела место комбинация трех и более симптомов. Так, у 95,9 % детей отмечались боли в суставах разной интенсивности при физической нагрузке, которые до болезни не проявлялись. Практически у такого же числа детей (95,7 %) имело место ухудшение памяти, что проявлялось трудностями запоминания и воспроизведения информации. Выявленные нарушения памяти, возможно, связаны с сосудистыми изменениями. С такой же частотой (95,9 %) в обследованной группе отмечались нарушения стула (как в виде запоров, так и в виде послабления). Кроме того, у 77,5 % детей имело место значительное снижение толерантности к физической нагрузке. По результатам УЗИ гепатомегалия и спленомегалия зарегистрированы у 71,4 % пациентов. Выявленные симптомы могут свидетельствовать о наличии аутореактивного компонента воспалительных реакций, сохраняющихся у детей после перенесенного MIS-C, ассоциированного с SARS-CoV-2 в пострехабилитационном периоде.

То есть отмечено, что, несмотря на прошедший достаточно длительный период после выписки из стационара со значительным улучшением состояния, а также проведенную программу реабилитации, у всех обследованных детей имели место симптомы, свидетельствующие о сохранении воспалительных реакций. Причем задействованы в процессе практически все органы и системы.

Известно, что микробиота вносит значительный вклад в энергетический гомеостаз, обмен веществ, функциональное и морфологическое состояние кишечного эпителия, иммунологическую реактивность организма, включая эффективное реагирование на различные инфекционные агенты. Многие исследования показали, что бактерии здоровой микробиоты, обладающие способностью модулировать кишечный и системный иммунные ответы, могут быть использованы для профилактики как бактериальных, так и вирусных респираторных и кишечных инфекций [14; 15]. Известно, что наиболее легкой формой приема и усвоения лекарственных средств детьми младшего возраста является жидкая форма препарата. С учётом этих рекомендаций мы использовали в предложенной схеме реабилитации бифидобактерии штамма *Bifidobacterium longum* MC-42 в форме пробиотической биологически активной добавки (БАД) к пище «Биовестин».

БАД «Биовестин» – продукт пробиотического питания микробного происхождения. Получен путем культивирования основных симбионтов человека – бифидобактерий. Бактерии культивируются в биореакторах в специальной среде на основе коровьего молока. «Биовестин» разработан и производится

Новосибирской научно-производственной фирмой ООО «Био-Веста» (резидент Биотехнопарка, пос. Кольцово, НСО). Производство ведется с 1995 года. Доминирующий вид продукции – концентраты бифидобактерий в формате БАД. Продукт «Биовестин» назначается в качестве дополнительного источника бифидобактерий, физиологичных для человека и благотворно влияющих на организм. Оздоровительный эффект БАД «Биовестин» определяют содержащиеся в нем в живой активной форме бифидобактерии *Bifidobacterium longum* MC-42. Этот штамм бифидобактерий отличается высокой скоростью роста, кислотообразующей способностью и высокой антагонистической активностью к целому ряду условно-патогенных и патогенных микроорганизмов, таких как *Staph. aureus* 209 p (золотистый стафилококк), *Sh. flexneri* 170, *Sh. flexneri* 337, *Sh. sonnei* 174 b, *Proteus vulgaris* F-30, *Proteus mirabilis* F-196, *E.coli* O-147 [16]. Рекомендуемые суточные дозы пробиотической добавки для детей с функциональными нарушениями желудочно-кишечного тракта средней степени тяжести для пациентов младшего возраста (от 2 до 6 лет) выбирают от 4 мл до 6 мл в сутки, для пациентов старшего возраста (от 7 до 14 лет) – от 10 мл до 12 мл в сутки; при тяжелых функциональных нарушениях желудочно-кишечного тракта для пациентов младшего возраста (от 2 до 6 лет) выбирают от 10 мл до 12 мл в сутки, для пациентов старшего возраста (от 7 до 14 лет) выбирают от 20 мл до 24 мл в сутки.

При проведении исследований общего состояния детей, перенесших вирусную инфекцию, у части детей было выявлено нарушение моторики ЖКТ в виде патологического гастроэзофагеального рефлюкса в сочетании с хроническими запорами, что может расцениваться и как признаки энергетических нарушений и митохондриальной дисфункции. Известная клиническая практика подтверждает положительный эффект Коэнзима Q10 (убихинон, официальный препарат «Кудесан») на энергетический обмен при нарушениях моторики ЖКТ, его хорошую переносимость пациентам, в том числе детям, отсутствие побочных эффектов при лечении. Руководствуясь этим, мы назначили «Кудесан» (Коэнзим Q10; убихинон) детям, перенесшим MIS-C, ассоциированным с SARS-CoV-2, у которых были отмечены функциональные нарушения желудочно-кишечного тракта и других органов и систем [17]. Жирорастворимый витаминopodobный хинон, являющийся одним из основных компонентов дыхательной цепи митохондрий и обеспечивающий энергетический обмен клеток, также выполняет функции антиоксиданта и стабилизатора клеточных мембран. Это позволяет не только снизить токсическое и повреждающее действие свободных радикалов, но и поддержать энергетический потенциал целостного организма. Подтверждено, что «Кудесан» способствует восстановлению физической работоспособности, повышает адаптационные возможности организма к повышенным нагрузкам, стрессорным воздействиям и гипоксии [18]. Препарат для детей представляет собой 3% раствор для приема внутрь, дозируемый каплями в зависимости от возраста. «Кудесан» принимается 1 раз в сутки во время еды, в первой половине дня, предварительно растворив в небольшом количестве жидкости. Детям в возрасте 1–3 года назначают 4–10 капель (Эквивалентное содержание Коэнзима

Q10 – 6–15 мг), в возрасте 3–7 лет – 10–16 капель (Эквивалентное содержание Коэнзима Q10 – 15–24 мг), в возрасте 7–12 лет и старше – 16–20 капель (Эквивалентное содержание Коэнзима Q10 – 24–30 мг)

В достаточно большом количестве исследований показано, что применение янтарной кислоты вызывает более интенсивное усвоение кислорода живыми клетками. Окисление янтарной кислоты является необходимой ступенью в процессе усвоения клетками двухатомного кислорода и обеспечения клеточного дыхания, транспорта микроэлементов, синтеза белка, производства новых клеток иммунной и нервной системы. В связи с этим использование средств на основе янтарной кислоты в клинической практике в комплексном лечении заболеваний сердечно-сосудистой, нервной, дыхательной, иммунной и эндокринной систем является патогенетически обоснованным и эффективным как при монотерапии, так и в сочетании с другими препаратами, потенцируя их действия. Основным механизмом действия янтарной кислоты определяется прежде всего ее антиоксидантными свойствами, способностью стабилизировать биомембраны клеток, модулировать работу рецепторных комплексов, усиливать связывание эндогенных веществ, улучшать синаптическую передачу. Благодаря своему механизму действия янтарная кислота обладает широким спектром фармакологических эффектов и оказывает влияние на ключевые базисные звенья патогенеза различных заболеваний, связанных с процессами свободнорадикального окисления [19–21]. В связи с этим, в терапевтический комплекс включён фармакопейный препарат «Янтарная кислота» 100 мг в чистом виде без наполнителей курсовым лечением длительностью 30 суток в таблетированной форме в возрастной дозировке: 1 раз в сутки детям в возрасте 2–5 лет – 50–60 мг/сутки, 6–8 лет – 70–80 мг/сутки, 9–12 лет – 90–100 мг/сутки.

В своих исследованиях, касающихся понимания болезни и определения эффективности методов лечения пациентов детского возраста, мы уделяем особое внимание такому понятию как «качество жизни». Понятие «качество жизни» в медицине является широко используемым интегральным показателем, отражающим степень адаптации ребёнка к болезни, возможность выполнения им привычных функций, соответствующих его возрасту после проведённого лечения. Поэтому основной нашей задачей при проведении комплекса назначаемых терапевтических мероприятий было способствовать удовлетворённости ребёнка своим состоянием здоровья, его потребностям, желанию учиться и общаться со сверстниками, проявлять физические и интеллектуальные способности, эмоционально воспринимать окружающий мир, то есть, в целом, способствовать улучшению качества его жизни в настоящем и будущем. В значительной мере достижение этой цели зависит от выбора средств, не отягощающих общее состояние, в нашем случае – после перенесённого ребёнком тяжёлого вирусного заболевания, а максимально снизить остаточные симптомы после завершения проведённого курса лечения. Поэтому нами и выбраны средства содействия оптимальному выздоровлению, включающие пищевые и биологически активные добавки, и, в первую очередь, пробиотическая добавка «Биовестин», служащая для

защиты детского организма от болезнетворных микробов и установления биологического равновесия в кишечнике, а также препараты, содержащие коэнзим Q10 и янтарную кислоту, для нормализации метаболических процессов, обеспечения антиоксидантной защиты и снижения уровня гипоксии, в том числе за счет усвоения кислорода и активации межсинаптических взаимосвязей.

В таблицах представлены результаты проведённой раздельной оценки показателей функционирования различного вида (физическое, эмоциональное, социальное, учебное, психологическое) и качества жизни до начала комплексной терапии и после ее окончания.

Таблица 1. Изменение значений показателей функционирования и качества жизни в объединённой выборке (n=49)
Table 1. Changes in values of indicators of functioning and quality of life in the combined sample (n=49)

Типы функционирования Types of functioning	До проведения комплексной терапии Before complex therapy	После проведения комплексной терапии After complex therapy	Парный двусторонний критерий Уилкоксона (p) Wilcoxon Matched Pairs Test (p)
Физическое функционирование Physical functioning	62,5 [56,25; 75]	84,38 [75; 90,63]	<0,0001
Эмоциональное функционирование Emotional functioning	60 [50; 70]	75 [65; 85]	<0,0001
Социальное функционирование Social functioning	93,75 [85; 100]	100 [90; 100]	0,0003
Учебное функционирование Academic functioning	60 [50; 70]	80 [70; 90]	<0,0001
Психологическое функционирование Psychological functioning	70 [65; 78,33]	81,67 [76,67; 88,33]	<0,0001
КАЧЕСТВО ЖИЗНИ (общая оценка) QUALITY OF LIFE (overall rating)	69,57 [63,04; 73,91]	82,61 [77,17; 88,04]	<0,0001

В таблице 1 представлены результаты проведённой раздельной оценки показателей функционирования различного вида (физическое, эмоциональное, социальное, учебное, психологическое) и качества жизни до начала комплексной терапии и после ее окончания. Далее в таблицах 2, 3, 4 приводятся характеристики изменений качества жизни пациентов и различных видов функционирования по возрастным группам.

Количественные показатели функционирования и качества жизни оценивались в баллах и в таблицах представлены в виде медианы (Me). Также проведено ранжирование с целью определения квартильных значений QL – QU. Представленные в таблице значения

парного двустороннего критерия Уилкоксона демонстрируют высокую степень статистической достоверности различия значений всех исследованных показателей.

В динамике в общей группе (табл. 1) различались значения, как разных видов функционирования, так и качества жизни в целом с высокой степенью статистической значимости.

Как видно из таблицы 2 практически все типы функционирования и качество жизни детей младшей возрастной группы (от 2 до 4 лет) статистически значимо улучшились после проведения комплексной терапии. Исключение составляет социальное функционирование, достоверных изменений значений которого в динамике не выявлено.

Таблица 2. Изменение значений показателей функционирования и качества жизни детей в возрасте 2–4 года (n=9)
Table 2. Changes in values of indicators of functioning and quality of life of children aged 2–4 years (n=9)

Типы функционирования Types of functioning	До проведения комплексной терапии Before complex therapy	После проведения комплексной терапии After complex therapy	Парный двусторонний критерий Уилкоксона (p) Wilcoxon Matched Pairs Test (p)
Физическое функционирование Physical functioning	78,13 [62,5; 81,25]	90,63 [87,5; 93,75]	0,0077
Эмоциональное функционирование Emotional functioning	60 [50; 65]	80 [75; 85]	0,0117
Социальное функционирование Social functioning	100 [90; 100]	100 [90; 100]	1,0000
Учебное функционирование Academic functioning	66,67 [66,67; 75]	83,33 [83,33; 91,67]	0,0180
Психологическое функционирование Psychological functioning	76,92 [73,08; 78,85]	88,46 [84,62; 90,38]	0,0077
КАЧЕСТВО ЖИЗНИ (общая оценка) QUALITY OF LIFE (overall rating)	75 [72,62; 79,76]	88,10 [86,90; 90,48]	0,0077

Следует отметить, что в этой группе детей на вопросы анкеты отвечали родители и, видимо, именно с этим связано не отмеченная ими динамика взаимоотношений детей со сверстниками в неорганизованных группах или в организованном коллективе (социальное функционирование).

По данным таблицы 3 у детей 5–7 лет после проведения комплексной терапии отмечено статисти-

чески значимое улучшение всех типов функционирования, а также качества жизни детей по общей оценке.

В группе детей от 8 до 12 лет (табл. 4) также отмечено статистически значимое повышение показателей, как всех оцениваемых типов функционирования, так и качества жизни как интегрального показателя.

Таблица 3. Изменение значений показателей функционирования и качества жизни детей в возрасте 5–7 лет (n=17)
Table 3. Changes in values of indicators of functioning and quality of life of children aged 5–7 years (n=17)

Типы функционирования Types of functioning	До проведения комплексной терапии Before complex therapy	После проведения комплексной терапии After complex therapy	Парный двусторонний критерий Уилкоксона (p) Wilcoxon Matched Pairs Test (p)
Физическое функционирование Physical functioning	62,5 [56,25; 68,75]	81,25 [75; 87,5]	0,0003
Эмоциональное функционирование Emotional functioning	60 [40; 70]	70 [60; 90]	0,0022
Социальное функционирование Social functioning	90 [83,75; 100]	100 [90; 100]	0,0302
Учебное функционирование Academic functioning	60 [50; 70]	80 [70; 90]	0,0011
Психологическое функционирование Psychological functioning	66,67 [60; 70]	80 [73,33; 86,67]	0,0007
КАЧЕСТВО ЖИЗНИ (общая оценка) QUALITY OF LIFE (overall rating)	65,22 [58,70; 69,57]	82,61 [73,91; 86,96]	0,0003

Таблица 4. Изменение значений показателей функционирования и качества жизни детей в возрасте 8–12 лет (n=23)
Table 4. Changes in values of indicators of functioning and quality of life of children aged 8–12 years (n=23)

Типы функционирования Types of functioning	До проведения комплексной терапии Before complex therapy	После проведения комплексной терапии After complex therapy	Парный двусторонний критерий Уилкоксона (p) Wilcoxon Matched Pairs Test (p)
Физическое функционирование Physical functioning	62,5 [53,13; 75]	81,25 [75; 87,5]	<0,0001
Эмоциональное функционирование Emotional functioning	65 [50; 75]	75 [65; 80]	0,0003
Социальное функционирование Social functioning	80 [70; 90]	90 [80; 100]	0,0015
Учебное функционирование Academic functioning	60 [45; 70]	75 [65; 80]	0,0002
Психологическое функционирование Psychological functioning	70 [66,67; 80]	80 [76,67; 86,67]	<0,0001
КАЧЕСТВО ЖИЗНИ (общая оценка) QUALITY OF LIFE (overall rating)	69,57 [63,04; 77,17]	79,35 [77,17; 85,87]	<0,0001

Проведённый анализ изменения показателей функционирования по всем типам и качества жизни (по общей оценке) в разных возрастных группах после проведения комплексной терапии даёт возможность сделать заключение, что фактор возраста анкетируемых пациентов имеет существенное значение при проведении исследований, и это подтверждается различием качества ответов, получаемых от детей и от их родителей в ходе анкетирования. Кроме того, значительно повышается субъективность оценки динамики различных типов функционирования детей. В группе 5–7 лет, и, в особенности, 8–12 лет, на вопросы

анкеты отвечали сами дети, которые оценивали собственное состояние по различным типам функционирования.

Так, в средней, и особенно в старшей возрастной группе дети смогли объективно оценить возможности не только физического, учебного, но и эмоционального, социального и психологического функционирования. Это в конечном итоге в большей степени повлияло на повышение значений и общего качества жизни, что отражено в таблицах. Хотя уровень качества жизни до начала комплексной терапии и после её окончания имели место статистически значимые

различия во всех возрастных группах, но с повышением возраста значимость возрастает. Следовательно, фактор возраста, как для определения различных типов функционирования, так и показателей качества жизни в интегральной оценке следует учитывать при проведении комплексных исследований у обследуемых пациентов, в нашем случае в значительной степени у пациентов младшего детского возраста.

В таблице 5 представлены результаты выявления различных остаточных симптомов, как значимо усилившихся, так и появившихся именно после перенесенного MIS-C, ассоциированного с SARS-CoV-2, до проведения предложенного курса комплексной терапии и после его окончания по результатам повторного анкетирования.

Следует отметить достоверное снижение числа выявляемых патологических симптомов после окончания проведенного курса комплексной терапии. Наиболее значительным было уменьшение числа

различных патологических симптомов, характеризующих функциональное состояние желудочно-кишечного тракта – тошнота, снижение аппетита, нарушение стула, абдоминальные боли. Данное снижение выявления симптомов, значительно влияющих на состояние детей и качество их жизни, является подтверждением необходимости введения в комплексную терапию средств, позволяющих эффективно проводить коррекцию микробиологического дисбаланса микробиоты кишечника, развивающегося после тяжелого вирусного процесса.

В то же время у 16,3 % сохранялось нарушение сна, у 18,4 % – нарушение памяти. Практически столько же детей продолжали ощущать быструю утомляемость – то есть у них сохранялось снижение толерантности к физической и психической нагрузке, у 22,4 % сохранялись признаки гепатоспленомегалии по данным УЗИ-исследования.

Таблица 5. Данные по наличию остаточных клинических симптомов у детей, перенесших MIS-C, ассоциированный с SARS-CoV-2, до и после проведения комплексной терапии (n=49)

Table 5. Data on the presence of residual clinical symptoms in children who suffered MIS-C associated with SARS-CoV-2, before and after complex therapy (n=49)

Клинические Симптомы Clinical symptoms	До проведения комплексной терапии Before complex therapy	После проведения комплексной терапии After complex therapy	P – точный критерий Фишера (односторонний вариант) P – Fisher's exact test (one-sided)
Снижение аппетита Decreased appetite	46 (93,9%)	5 (10,2%)	<0,0001
Тошнота Sickness	25 (51,0 %)	3 (6,1%)	<0,0001
Нарушение стула Abnormal stool	47 (95,9%)	4 (8,2%)	<0,0001
Абдоминальные боли Abdominal pain	17 (34,7%)	1 (2%)	<0,0001
Сухость и боль в горле Dry and sore throat	35 (71,4%)	2 (4,1%)	<0,0001
Физическая слабость Physical weakness	37(77,5%)	8(16,3%)	<0,0001
Головная боль Headache	15(30,6%)	4(8,2%)	<0,0001
Резь и боль в глазах Cutting and pain in the eyes	44(89,8%)	6(12,2%)	<0,0001
Заложенность носа Nasal congestion	17(34,7%)	4(8,2%)	<0,0001
Нарушения сна Sleep disorders	33(67,3%)	8(16,3%)	<0,0001
Нарушение памяти Memory impairment	47(95,9%)	9(18,4%)	<0,0001
Быстрая утомляемость Fast fatiguability	37 (77,5 %)	9 (18,4%)	<0,0001
Раздражительность Irritability	24(48,9%)	8(16,3%)	<0,0001
Гепатоспленомегалия (по результатам УЗИ) Hepatosplenomegaly (based on ultrasound results)	35 (71,4%)	11 (22,4%)	<0,001
Боли в мышцах Muscle pain	17(34,7%)	8(16,3%)	<0,0001
Боли в суставах Joint pain	47(95,9%)	9(18,4%)	<0,0001

Сохранение этих симптомов может быть обусловлено остаточными воспалительными реакциями либо

развитием аутореактивных процессов, что требует проведения дальнейших исследований.

По результатам проведенного исследования получен патент на изобретение: Рябиченко Т.И., Обухова О.О., Скосырева Г.А., Карпович Г.С., Митрофанов И.М., Куимова И.В., Калмыкова А.И., Воевода М.И. Способ комплексной терапии пациентов детского возраста с вирусной инфекцией с использованием продуктов пробиотического питания [22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выявление факторов влияния перенесённой пациентами новой коронавирусной инфекции на их здоровье и качество жизни позволило сделать вывод о том, что даже после проведённого базового лечебного курса имеет место снижение качества жизни за счет физического, учебного, эмоционального, социального и психологического функционирования. При этом у детей, перенесших MIS-C, ассоциированный с SARS-CoV-2, после курса реабилитации сохранялись признаки дисфункции различных органов и систем, а также появились новые симптомы, не отмеченные ранее, что может являться результатом дисбаланса микробной экосистемы и требует обязательной коррекции. Следовательно, дети, перенесшие MIS-C, ассоциированный с SARS-CoV-2 нуждаются в более длительном наблюдении и проведении ряда комплексных мероприятий с использованием продуктов пробиотического питания и препаратов, влияющих на метаболизм и оксигенацию, что позволило улучшить состояние детей и качество их жизни.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Протеомный анализ», поддержанного финансированием Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2021-691).

ACKNOWLEDGMENT

The work was performed using the equipment of the Proteomy Analysis Center for Collective Use, supported by funding from the Russian Ministry of Education and Science (agreement No. 075-15-2021-691).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Auger N., Côté-Corriveau G., Kang H., Quach C., Lo E., Eun Lee G., Healy-Profítos J., Brousseau E., Luu T.M. Multisystem inflammatory syndrome in 1.2 million children: longitudinal cohort study of risk factors // *Pediatric Research*. 2024. N 95. P. 325–333. <https://doi.org/10.1038/s41390-023-02633-y>
- Ogimi C., Kim Y.J., Martin E.T., et al. What's new with the old coronaviruses? // *J. Pediatric Infect. Dis. Soc.* 2020. V. 9. N 2. P. 210–217. <https://doi.org/10.1093/jpids/piaa037>
- Рябиченко Т.И., Скосырева Г.А., Обухова О.О., Курская О.Г., Косьянова Т.Г., Горбенко О.М., Шваук А.П. Этиологическая структура острых респираторных вирусных инфекций у детей, госпитализированных в стационар в 2015–2018 // *Инфекционные болезни: новости, мнения, обучение*. 2021. Т. 10. N 2. С. 47–53. <https://doi.org/10.33029/2305-3496-2021-10-2-47-53>
- Lu X., Zhang L., Du H., Zhang J., Li Y.Y., Qu J., Zhang W., Wang Y., Bao S., Li Y., Wu C., Liu H., Liu D., Shao J., Peng X., Yang Y., Liu Z., Xiang Y., Zhang F., Silva R.M., Pinkerton K.E., Shen K., Xiao H., Xu S., Wong G.K. Chinese Pediatric Novel

- Coronavirus Study Team. SARS-CoV-2 Infection in Children // *N. Engl. J. Med.* 2020. V. 382. N 17. P. 1663–1665. <https://doi.org/10.1056/NEJMc2005073>
- Riphagen S., Gomez X., Gonzales-Martinez C., Wilkinson N., Theocharis P. Hyperinflammatory shock in children during COVID-19 pandemic // *Lancet*. 2020. V. 395. Iss. 10237. P. 1607–1608. [https://doi.org/10.106/S0140-6736\(20\)31094-1](https://doi.org/10.106/S0140-6736(20)31094-1)
- Хидирова Л.Д., Федорук В.А., Васильев К.О. Роль новой коронавирусной инфекции, вызванной вирусом SARS-CoV-2, в манифестации мультисистемного воспалительного синдрома // *Профилактическая медицина*. 2021. Т. 24. N 6. С. 110–115. <https://doi.org/10.17116/profmed202124061110>
- Hoste L, Van Paemel R., Haerynck F. Multisystem inflammatory syndrome in children related to COVID-19: a systematic review // *Eur J Pediatr*. 2021. N 180. P. 2019–2034. <https://doi.org/10.1007/s00431-021-03993-5>
- Schultz C.M., Burke L.A., Kent D.A. A Systematic Review and Meta-analysis of the Initial Literature Regarding COVID-19 Symptoms in Children in the United States // *J Pediatr Health Care*. 2023. V. S0891–5245. N 23. P. 00055–X. <https://doi.org/10.1016/j.pedhc.2023.02.006>
- Mubbasher A., Shailesh A., Axel M., et al. Multisystem inflammatory syndrome in children: A systematic review // *EClinicalMedicine*. 2020. N 26. P. 100527–100542. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2020.100527>
- Цибулевский А.Ю., Соколов А.В. Микрoэкология человека // *Успехи современного естествознания*. 2008. N 7. С. 22–26.
- Belkaid Y., Harrison O. Homeostatic Immunity and the Microbiota // *Immunity*. 2017. V. 46. N 4. P. 562–576. <https://doi.org/10.1016/j.immuni.2017.04.008>
- Методические рекомендации «Особенности клинических проявлений и лечения заболевания, вызванного новой коронавирусной инфекцией (COVID-19) у детей. Версия 2. URL: static0.minzdrav.gov.ru/system/attachments/attaches/000/050/914/original/03062020_дети_COVID-19_v2.pdf (дата обращения: 30.12.2023)
- World Health Organization. Multisystem inflammatory syndrome in children and adolescents with COVID-19. URL: <https://www.who.int/publications-detail/multisystem-inflammatory-syndrome-in-children-and-adolescents-with-covid-19> (дата обращения: 15.02.2024)
- Романчук Н.П. Здоровая микробиота и натуральное функциональное питание: гуморальный и клеточный иммунитет // *Бюллетень науки и практики*. 2020. Т. 6. N 9. С.127–166. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/58/14>
- Abdo Z., Le Cureux J., Dean G.A. Impact of oral probiotic Lactobacillus acidophilus vaccine strains on the immune response and gut microbiome of mice strains on the immune response and gut microbiome of mice // *PLoS One*. 2019. V. 14. N 12. e0225842-48. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225842>
- Рябиченко Т.И., Чаукина В.А., Скосырева Г.А., Обухова О.О., Калмыкова А.И., Тимофеева Е.П., Карцева Т.В. Оценка результатов использования продуктов пробиотического питания у детей, посещающих детские дошкольные учреждения // *Вопросы детской диетологии*. 2019. Т.17. N 4. С. 33–39. <https://doi.org/10.20953/1727-5784-2019.4>
- Каламбет Е.И., Османов И.М., Сухоруков В.С., Шабельникова Е.И., Хавкин А.И. Нарушения клеточного энергообмена и их коррекция при заболеваниях

органов пищеварения у детей // Вопросы практической педиатрии. 2012. Т. 7. N 2. С. 69–72.

18. Шаповал Н.С., Медведев О.С., Медведева Н.А., Моргун А.В., Бойцова Е.Б., Осипова Е.Д., Салмина А.Б. Влияние окислительной и восстановленной форм коэнзима Q10 (убихинона и убихинола) на клетки церебрального эндотелия в модели гематоэнцефалического барьера // Цитология. 2020. Т. 62. N 6. С. 428–436. <https://doi.org/10.31857/S0041377120060085>

19. Носаль Л.А., Симонова Н.В., Доровских В.А., Штарберг М.А. Применение реамберина для коррекции антиоксидантного статуса при эпилепсии у детей // Журнал неврологии и психиатрии им. Корсакова С.С. 2019. Т. 119. N 11–2. С. 74–79. <https://doi.org/10.17116/jnevro201911911274>

20. Бондаренко Д.А., Смирнов Д.В., Симонова Н.В., Доровских В.А., Штарберг М.А. Эффективность реамберина в коррекции процессов перекисного окисления липидов в плазме крови больных раком яичников // Онкология. Журнал им. Герцена П.А. 2018. N 6. С. 40–44. <https://doi.org/10.17116/onkolog2018706140>

21. Прозорный А.А., Кривошеин А.Е. Оценка эффективности применения омега-3 и омега-6 жирных кислот, антиоксидантов и витаминов группы В в комплексном лечении синдрома сухого глаза на фоне дисфункции мейбомиевых желез // Forcipe. 2021. Т. 4. N 51. С. 663–664.

22. Рябиченко Т.И., Обухова О.О., Скосырева Г.А., Карпович Г.С., Митрофанов И.М., Куимова И.В., Калмыкова А.И., Воевода М.И. Способ комплексной терапии пациентов детского возраста с вирусной инфекцией с использованием продуктов пробиотического питания. Патент на изобретение РФ. N 2793833. 2023.

REFERENCES

1. Auger N., Côté-Corriveau G., Kang H., Quach C., Lo E., Eun Lee G., Healy-Profitós J., Brousseau E., Luu T.M. Multisystem inflammatory syndrome in 1.2 million children: longitudinal cohort study of risk factors. *Pediatric Research*, 2024, no. 95, pp. 325–333. <https://doi.org/10.1038/s41390-023-02633-y>

2. Ogimi C., Kim Y.J., Martin E.T., et al. What's new with the old coronaviruses? *Journal of the Pediatric Infectious Diseases Society*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 210–217. <https://doi.org/10.1093/jpids/piaa037>

3. Ryabichenko T.I., Skosyeva G.A., Obukhova O.O., Kurskaya O.G., Kosyanova T.G., Gorbenko O.M., Shvayuk A.P. Etiological structure of acute respiratory viral infections in children hospitalized in hospital in 2015–2018. *Infectious diseases: news, opinions, training*, 2021, vol. 10, no. 2, pp. 47–53. (In Russian) <https://doi.org/10.33029/2305-3496-2021-10-2-47-53>

4. Lu X., Zhang L., Du H., Zhang J., Li Y.Y., Qu J., Zhang W., Wang Y., Bao S., Li Y., Wu C., Liu H., Liu D., Shao J., Peng X., Yang Y., Liu Z., Xiang Y., Zhang F., Silva R.M., Pinkerton K.E., Shen K., Xiao H., Xu S., Wong G.K. Chinese Pediatric Novel Coronavirus Study Team. SARS-CoV-2 Infection in Children. *The New England Journal of Medicine*, 2020, vol. 382, no. 17, pp. 1663–1665. <https://doi.org/10.1056/NEJMc2005073>

5. Riphagen S., Gomez X., Gonzales-Martinez C., Wilkinson N., Theocharis P. Hyperinflammatory shock in children during COVID-19 pandemic. *Lancet*, 2020, vol. 395, iss.

10237, pp. 1607–1608. [https://doi.org/10.106/S0140-6736\(20\)31094-1](https://doi.org/10.106/S0140-6736(20)31094-1)

6. Khidirova L.D., Fedoruk V.A., Vasilyev K.O. The role of the new coronavirus infection caused by the SARS-CoV-2 virus in the manifestation of multisystem inflammatory syndrome. *Preventive medicine*, 2021, vol. 24, no. 6, pp. 110–115. (In Russian) <https://doi.org/10.17116/profmed202124061110>

7. Hoste L, Van Paemel R., Haerynck F. Multisystem inflammatory syndrome in children related to COVID-19: a systematic review. *European Journal of Pediatrics*, 2021, no. 180, pp. 2019–2034. <https://doi.org/10.1007/s00431-021-03993-5>

8. Schultz C.M., Burke L.A., Kent D.A. Systematic Review and Meta-analysis of the Initial Literature Regarding COVID-19 Symptoms in Children in the United States. *Journal of Pediatric Health Care*, 2023, vol. S0891–5245, no. 23, pp. 00055–X. <https://doi.org/10.1016/j.pedhc.2023.02.006>

9. Mubbasheer A., Shailesh A., Axel M., et al. Multisystem inflammatory syndrome in children: A systematic review. *EClinicalMedicine*, 2020, no. 26, pp. 100527–100542. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2020.100527>

10. Tsiubulevskii A.Yu., Sokolov A.V. Human microecology. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya [Advances of modern natural science]*. 2008, no. 7, pp. 22–26 (In Russian)

11. Belkaid Y., Harrison O. Homeostatic Immunity and the Microbiota. *Immunity*, 2017, vol. 46, no. 4, pp. 562–576. <https://doi.org/10.1016/j.immuni.2017.04.008>

12. *Metodicheskie rekomendacii «Osobennosti klinicheskikh proyavlenii i lecheniya zabolovaniya, vyzvannogo novoi koronavirusnoi infekciei (COVID-19) u detei. Versiya 2 [Methodological recommendations “Features of clinical manifestations and treatment of the disease caused by the new coronavirus infection (COVID-19) in children. Version 2]. Available at: static0.minzdrav.gov.ru/system/attachments/attaches/000/050/914/original/03062020_children_COVID-19_v2.pdf (accessed 30.12. 2023)*

13. World Health Organization. Multisystem inflammatory syndrome in children and adolescents with COVID-19. Available at: <https://www.who.int/publications-detail/multisystem-inflammatory-syndrome-in-children-and-adolescents-with-covid-19> (accessed: 15.02.2024)

14. Romanchuk N.P. Healthy microbiota and natural functional nutrition: humoral and cellular immunity. *Bulletin of science and practice*, 2020, vol. 6, no. 9, pp. 127–166. (In Russian) <https://doi.org/10.33619/2414-2948/58/14>

15. Abdo Z., Le Cureux J., Dean G.A. Impact of oral probiotic *Lactobacillus acidophilus* vaccine strains on the immune response and gut microbiome of mice strains on the immune response and gut microbiome of mice *PLoS One*, 2019, vol. 14, no. 12, e0225842-48. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225842>

16. Ryabichenko T.I., Chaukina V.A., Skosyeva G.A., Obukhova O.O., Kalmykova A.I., Timofeeva E.P., Kartseva T.V. Evaluation of the results of using probiotic food products in children attending preschool institutions. *Issues of children's dietology*, 2019, vol. 17, no. 4, pp. 33–39. (In Russian) <https://doi.org/10.20953/1727.5784.2019.4>

17. Kalambet E.I., Osmanov I.M., Sukhorukov V.S., Shabelnikova E.I., Khavkin A.I. Disorders of cellular energy metabolism and their correction in diseases of the digestive system in children. *Voprosy prakticheskoi pediatrii [Issues*

- of practical pediatrics]. 2012, vol. 7, no. 2, pp. 69–72. (In Russian)
18. Shapoval N.S., Medvedev O.S., Medvedeva N.A., Morgun A.V., Boitsova E.B., Osipova E.D., Salmina A.B. The influence of oxidized and reduced forms of coenzyme q10 (ubiquinone and ubiquinol) on cerebral endothelial cells in the blood-brain barrier model. *Cytology*, 2020, vol. 62, no. 6, pp. 428–436. (In Russian)
<https://doi.org/10.31857/S0041377120060085>
19. Nosal' L.A., Simonova N.V., Dorovskikh V.A., Shtarberg M.A. Use of Reamberin for correction of antioxidant status in epilepsy in children. *Journal of Neurology and Psychiatry named after Korsakov S.S.*, 2019, vol. 119, no. 11–2, pp. 74–79. (In Russian)
<https://doi.org/10.17116/jnevro201911911274>
20. Bondarenko D.A., Smirnov D.V., Simonova N.V., Dorovskikh V.A., Shtarberg M.A. The effectiveness of reamberin in the correction of lipid peroxidation processes in the blood plasma of patients with ovarian cancer. *Oncology. Journal named after Herzen P.A.*, 2018, no. 6, pp. 40–44. (In Russian)
<https://doi.org/10.17116/onkolog2018706140>
21. Prozornyi A.A., Krivoshein A.E. Evaluation of the effectiveness of the use of omega-3 and omega-6 fatty acids, antioxidants and B vitamins in the complex treatment of dry eye syndrome due to dysfunction of the meibomian glands. *Forcipe*. 2021, vol. 4, no. S1, pp. 663–664. (In Russian)
22. Ryabichenko T.I., Obukhova O.O., Skosyreva G.A., Karpovich G.S., Mitrofanov I.M., Kuimova I.V., Kalmykova A.I., Voevoda M.I. *Sposob kompleksnoy terapii patsiyentov detskogo vozrasta s virusnoy infektsiyey s ispol'zovaniyem produktov probioticheskogo pitaniya* [A method of complex therapy for pediatric patients with viral infection using probiotic food products]. Patent RF, no. 2793833, 2023.

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Татьяна И. Рябиченко, Ольга О. Обухова и Михаил И. Воевода предложили концепцию и дизайн исследования. Ольга О. Обухова и Татьяна И. Рябиченко собрали и обработали материал, провели статистическую обработку. Михаил И. Воевода редактировал рукопись до подачи в редакцию. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Tatyana I. Ryabichenko, Olga O. Obukhova and Mikhail I. Voevoda conceived and designed the study. Olga O. Obukhova and Tatyana I. Ryabichenko collected and processed material, undertook statistical processing and wrote text. Mikhail I. Voevoda edited the manuscript before submission to the Editor. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Татьяна И. Рябиченко / Tatyana I. Ryabichenko <https://orcid.org/0000-0002-0990-0078>
Ольга О. Обухова / Olga O. Obukhova <https://orcid.org/0000-0002-9834-1799>
Михаил И. Воевода / Mikhail I. Voevoda <https://orcid.org/0000-0001-9425-413X>

Оригинальная статья / Original article

УДК 576.8

DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-2



Антропозоонозные паразитозы собак и кошек в городской экосистеме Владивостока

Татьяна В. Табакаева^{1,2}, Ирина В. Галкина², Антон В. Табакаев², Михаил Ю. Щелканов^{1,2,3}¹НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Г.П. Сомова Роспотребнадзора, Владивосток, Россия²Дальневосточный Федеральный Университет, Школа медицины и наук о жизни, Владивосток, Россия³Федеральный научный Центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия

Контактное лицо

Михаил Ю. Щелканов, доктор биологических наук, директор, НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Г.П. Сомова Роспотребнадзора; 690087 Россия, г. Владивосток, ул. Сельская, 1.
Тел. +79245297109

Email adorob@mail.ruORCID <https://orcid.org/0000-0001-8610-7623>

Формат цитирования

Табакаева Т.В., Галкина И.В., Табакаев А.В., Щелканов М.Ю. Антропозоонозные паразитозы собак и кошек в городской экосистеме Владивостока // Юг России: экология, развитие. 2024. Т.19, N 2. С. 17-24. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-2

Получена 22 марта 2024 г.

Прошла рецензирование 20 апреля 2024 г.

Принята 26 апреля 2024 г.

Резюме

Цель – исследовать роль домашних собак и кошек в городской экосистеме Владивостока как хозяев паразитов, представляющих опасность для человека. В работе были использованы биологические материалы от 782 собак и 189 кошек, которые были исследованы методами полного паразитологического вскрытия, микроскопирования и флотации образцов фекалий с использованием насыщенных растворов сульфата цинка и нитрата натрия.

Выявлено 14 таксонов паразитов: нематоды (Nematoda) *Ancylostoma caninum*, *Dirofilaria immitis*, *Toxascaris leonina*, *Toxocara canis*, *T. mystax*, *Uncinaria stenocephala*, *Taenia* sp., *T. hydatigena*; цестоды (Cestoda) *Diphyllobothrium latum*, *Dipylidium caninum*, *Hydatigera taeniaeformis*; дигенетические сосальщики (Trematoda) *Metagonimus* sp.; кокцидии (Coccidiasida) *Cystoisospora* sp., *C. felis*. В работе приведены значения экстенсивности заражения и статистической достоверности их различий для различных групп животных в зависимости от пола и возраста. Ядро паразитофауны составили нематоды. Предложены объяснения полученным результатам и описаны возможные источники заражения людей.

Несмотря на то, что паразитарно-фаунистические комплексы в экосистеме современного города гораздо менее разветвлены и представлены меньшим количеством видов по сравнению с дикой природой, сохраняется высокий риск заражения человека зоонозными паразитами в урбобиоценозах вследствие высокого уровня интенсивности популяционных взаимодействий. Этот тезис должен определять высокую настороженность надзорных органов по отношению к антропозоонозным паразитозам в городских условиях.

Ключевые слова

Экосистема, урбобиоценоз, кошки, собаки, эндопаразиты.

Anthropozoonotic parasitoses of dogs and cats in the urban ecosystem of Vladivostok, Russia

Tatyana V. Tabakaeva^{1,2}, Irina V. Galkina², Anton V. Tabakaev² and Mikhail Yu. Shchelkanov^{1,2,3}

¹G.P. Somov Institute of Epidemiology and Microbiology, Russian Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Vladivostok, Russia

²Far Eastern Federal University, School of Medicine and Life Science, Vladivostok, Russia

³Federal Scientific Centre of East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

Principal contact

Mikhail Shchelkanov, Doctor of Sciences (Biology), Director, G.P. Somov Institute of Epidemiology and Microbiology, Russian Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 1 Selskaya St, Vladivostok, Russia 690087.

Tel. +79245297109

Email adorob@mail.ru

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

How to cite this article

Tabakaeva T.V., Galkina I.V., Tabakaev A.V., Shchelkanov M.Yu. Anthropozoonotic parasitoses of dogs and cats in the urban ecosystem of Vladivostok, Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2024; 19(2):17-24. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-2

Received 22 March 2024

Revised 20 April 2024

Accepted 26 April 2024

Abstract

To investigate the role of domestic dogs and cats in the spread of parasitoses in the Vladivostok urban ecosystem. Biological materials from 782 dogs and 189 cats were used in the research, which were examined by methods of complete parasitological autopsy, microscopy and flotation of faecal samples using saturated solutions of zinc sulfate and sodium nitrate.

Fourteen parasite taxa have been identified: nematodes (Nematoda) *Ancylostoma caninum*, *Dirofilaria immitis*, *Toxascaris leonina*, *Toxocara canis*, *T. mystax*, *Uncinaria stenocephala*, *Taenia* sp., *T. hydatigena*; tapeworms (Cestoda) *Diphyllobothrium latum*, *Dipylidium caninum*, *Hydatigera taeniaeformis*; flukes (Trematoda) *Metagonimus* sp.; and parasitic alveolates (Cnoidasida) *Cystoisospora* sp., *C. felis*. The paper presents the values of the prevalence of infection and statistical reliability of their differences for different groups of animals, depending on gender and age. Nematodes were the core taxa of the parasitofauna identified. Explanations for the results obtained are offered and possible sources of human infection are described. Despite the fact that parasitic-faunal complexes in the ecosystem of a modern city are much less branched and represented by fewer species than in the wild, there remains a high risk of human infection with zoonotic parasites in urban biocenoses due to the high level of intensive population interactions. Therefore, there is a requirement of high alertness of supervisory authorities in relation to anthropozoonotic parasitoses in an urban environment.

Key Words

Ecosystem, urban biocenosis, cats, dogs, endoparasites.

ВВЕДЕНИЕ

Домашние собака (*Canis lupus familiaris*) и кошка (*Felis catus*) – одни из самых популярных синантропных животных в России, но во всем мире: численность собак в нашей стране насчитывает около 30 млн. особей, кошек – не менее 37,5 млн. По количеству кошек наша страна лидирует в Европе и занимает 5 место в мире после США, Бразилии, Китая и Японии. Имеет место стойкая тенденция увеличения популяции домашних животных: согласно статистическим данным, за последнее десятилетие численность собак выросла в 1,4 раза, кошек – в 1,2 раза [1]. В российских городах плотность собак может достигать уровня одного животного на 30 жителей и выше. В г. Владивостоке численность собак и кошек неизвестна, однако ежегодно в средствах массовой информации отмечается прирост числа бездомных животных на улицах города и, в особенности в местах предприятий общественного питания, где есть доступ к пищевым отходам.

И домашние, и безнадзорные животные могут являться источником распространения инфекций и инвазий, представляющих опасность для человека [2; 3], что определяет их медико-ветеринарное значение [4; 5]. По данным научной литературы, инвазивные заболевания занимают 4–5 место среди всех заболеваний домашних собак и кошек [6]. Целью нашей работы было изучение видового состава паразитов собак и кошек на территории города Владивостока, оценка эпидемиологической значимости и выявление их экологических особенностей.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Был проведен ретроспективный анализ коллекционного материала кафедры зоологии Дальневосточного государственного университета (в настоящее время – кафедры биоразнообразия и морских биоресурсов Дальневосточного федерального университета) по зараженности домашних собак и кошек на территории г. Владивостока за 4-х летний период исследования (1992–1995 гг.), оценка уровня экстенсивности инфицирования (ЭИ), анализ полового, возрастного и породного состава зараженных животных.

Прижизненная диагностика эндопаразитов у собак и кошек была проведена с помощью микроскопирования образцов фекалий и флотации с использованием растворов с высокой удельной плотностью – концентрированного нитрата натрия NaNO_3 и раствора сульфата цинка. Раствор нитрата натрия готовили по методу Калантарян [7; 8].

Посмертную диагностику паразитозов проводили методом полного паразитологического вскрытия по К.И. Скрябину [9]. Все органы (за исключением головного мозга) отделяли от трупа, помещали в кюветы и тщательно осматривали, исследование проводили как мокрым (многократным промыванием полостей органов физиологическим раствором), так и сухим (компрессия тканей между двумя стеклянными пластинками). Также собирали и исследовали кровь, мочу, плевральную жидкость, желчь и фекалии на наличие паразитов. Найденных цестод фиксировали в 70 %-ном спирте, нематод – в жидкости Барбагалло (3 %-ый раствор формалина в изотоническом растворе хлорида натрия). Видовую

принадлежность определяли на основании морфологических признаков, для определения цестод изготавливали препараты зрелых члеников, окрашенные железным гематоксилином Майера с последующей дифференцировкой в 1 %-ном р-ре солянокислого спирта [10].

Достоверность различий средних значений относительных данных оценивалась с помощью t-критерия Стьюдента (при уровне значимости альтернативной гипотезы $p < 0,05$) [11]. Статистическая обработка данных осуществлялась с помощью программного пакета Statistica 7.0 (StatSoft Inc.).

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Были исследованы 782 собаки 48 пород в возрасте от 1 месяца до 15 лет (372 суки и 416 кобелей; 370 особей имели возраст до 12 месяцев, 205 – от 1 до 3 лет, 207 – старше 3 лет) и 189 кошек в возрасте от 1 месяца до 18 лет (80 самок и 109 самцов; 64 особи имели возраст до 12 месяцев, 69 – от 1 до 3 лет и 56 – старше 3 лет) у которых было выявлено 14 таксонов паразитов, представленных в табл. 1, включая способных инвазировать человека: нематоды (*Nematoda*) *Ancylostoma caninum*, *Dirofilaria immitis*, *Toxascaris leonina*, *Toxocara canis*, *T. mystax*, *Uncinaria stenocephala*; цестоды (*Cestoda*) *Dipyllobothrium latum*, *Dipylidium caninum*, *Hydatigera taeniaeformis*, *Taenia* sp.; трематоды (*Trematoda*) *Metagonimus* sp..

В целом, ядро паразитофауны составили нематоды. По особенностям жизненного цикла обнаруженных нематод можно разделить на 2 группы: виды, развитие которых протекает без промежуточных хозяев (*A. caninum*, *T. canis*, *T. mystax*, *Ts. leonina*, *U. stenocephala*), и с участием промежуточных хозяев (*D. immitis*), в данном случае – кровососущих комаров (*Culicidae*). Человек может заразиться при попадании яиц гельминтов из почвы и газонной травы в пищеварительный тракт, а также при укусе зараженных диروفилариями комаров.

Зараженность собак гельминтами составила $216/782 \approx 27,6$ %. При этом, ЭИ сук и кобелей отличались статистически недостоверно: 26,1 % и 28,6 % соответственно ($p > 0,2$). Среди собак разных возрастных групп наибольшая ЭИ отмечена у собак в возрасте от 1 до 3 лет – 29,7 %; у щенков ЭИ составила 25,9 %, а у собак старше 3 лет – 23,9 % (все различия между этими значениями статистически недостоверны: $p > 0,1$). Большая часть зараженных животных была зарегистрирована в зимний (42,8 %) и летний (41,5 %) сезоны, весной зараженность снижалась (39,6 %), самый низкий процент зараженных собак отмечен в осенний период – 37,3 % (для всех пар значений $p > 0,2$). Таким образом, ЭИ для гельминтов у собак незначительно варьирует в зависимости от пола, возраста и времени года.

В условиях городских экосистем паразитарная нагрузка варьируется в зависимости от плотности популяции бездомных животных, которые являются главным источником распространения инвазий [12]. Домашние собаки могут заразиться при контакте с окружающей средой, содержащей пропативные стадии развития гельминтов и цисты простейших: основным резервуаром для сохранения, накопления и развития яиц гельминтов и цист простейших является почва.

Таблица 1. Фауна эндопаразитов кошек и собак, установленная в результате проведенных исследований
 Table 1. Endoparasite fauna of cats and dogs established in the result of the research conducted

Тип Phylum	Таксономия паразита Parasite Taxonomy			Заражённые животные, кол-во (%) Infected animals, number (%)		
	Класс Class	Отряд Order	Семейство Family	Вид Species	Собаки (n = 782) Dogs (n = 782)	Кошки (n = 189) Cats (n = 189)
Споровики Apicomplexa	Кокцидии Cnoidalasida	Эукокцидиориды Eucoccidiorida	Саркоцистиды Sarcocystidae	Кошачья изоспора	0	12
				<i>Cystoisospora felis</i>	(0)	(6,3)
				Изоспоры <i>Cystoisospora</i> sp.	153 (19,6)	0 (0)
Круглые черви Nematoda	Хромадории Chromadorea	Рабдитиды Rhabditida	Анкилостомиды Ancylostomatidae	Собаачьи кривоузубые глисты	10	0
				<i>Ancylostoma caninum</i>	(1,3)	(0)
				Воронкоротая унцинария <i>Uncinaria stenocephala</i>	51 (6,5)	4 (2,1)
				Собачий сердечный червь <i>Dirofilaria immitis</i>	1 (0,1)	0 (0)
				Бококрылая токсакара <i>Toxascaris leonina</i>	1 (0,1)	6 (3,2)
				Собачья токсокара <i>Toxocara canis</i>	58 (7,4)	0 (0)
				Кошачья токсокара <i>Toxocara mystax</i>	0 (0)	6 (3,2)
				Широкий лентец <i>Diphyllobothrium latum</i>	5 (0,6)	0 (0)
				Огуречный цепень <i>Dipylidium caninum</i>	74 (9,5)	14 (7,4)
				Тениеформная гидатигера <i>Hyalatigera taeniaeformis</i>	0 (0)	1 (0,5)
Плоские черви Platyhelminthes	Ленточные черви Cestoda	Цепни Cyclophyllidea	Тенииды Taeniidae	Тонкошейный пузырчатый червь <i>Taenia hydatigena</i>	0 (0)	1 (0,5)
				Тении <i>Taenia</i> sp.	16 (2,0)	0 (0)
				Тенииды Taeniidae	95 (12,1)	25 (13,2)
				Олисторхииды Opisthorchiidae	0 (0)	9 (4,8)
				Метагонимусы <i>Metagonimus</i> sp.	0 (0)	0 (0)

Городская среда характеризуется малой свободной поверхностью почвы и обедненности ее состава, однако именно на небольших участках свободной почвы территорий коммунальных домовладений, парков происходит накопление пропативных стадий развития яиц гельминтов. Так, на примере города Владивостока обсемененность территорий коммунальных домовладений составила 62 %, территорий парков – 64,7 % [13]. Кроме того, заражение может происходить через пищу (при употреблении сырого мяса, рыбы, поедании мелких грызунов и птиц), при копрофагии и вылизывании.

Цисты *Cystoisospora* spp. были найдены у 19,6 % собак. ЭИ собак обоих полов была практически одинаковой: у сук – 19,1 %, кобелей – 19,0 % (отличие недостоверно, $p > 0,4$). Возрастной состав зараженных изоспорами собак был следующим: большую часть животных составляли щенки (64,6 %); доля собак возраста 1–3 года составила 22,9 %, старше 3 лет – 12,6 % (возрастные показатели статистически достоверны: $p < 0,003$). Зараженные животные регистрировались практически равномерно во все сезоны, однако в весенний и зимний периоды процент зараженных животных был незначительно выше (22,9 % и 22,0 %, соответственно), чем в летний (18,0 %) и осенний (16,6 %) периоды (совокупный зимне-весенний показатель статистически достоверно превышал летне-осенний: $p < 0,03$).

Зараженность кошек эндопаразитами составила 28,0 % (гельминтами – 21,7 %, изоспорами – 6,3 %): ЭИ самок составила – 23,7 %, самцов – 31,2 % (отличие статистически недостоверно, $p > 0,1$). Среди кошек разных возрастных групп наибольшая ЭИ отмечена у котят обоих полов – 32,8 %; в возрасте 1–3 года – 24,6 %, старше 3 лет – 27,0 % (различия этих значений статистически недостоверны: $p > 0,15$). Большая часть зараженных животных была зарегистрирована в зимний (42,8 %) и летний (41,5 %) сезоны, весной число зараженных животных снижалось (39,6 %), самый низкий процент

зараженных кошек отмечен в осенний период – 37,3 % ($p > 0,1$). Пиковое значение ЭИ во все годы регистрировалось в июне (в среднем, 53,9 %, что достоверно превышает прочие сезонные показатели: $p < 0,02$).

Аналогично с собаками, кошки заражаются эндопаразитами, главным образом, путем контакта с зараженной пропативными стадиями развития гельминтов в объектах окружающей среды, пище и воде [14]. Большая часть видового разнообразия эндопаразитов домашних кошек представлена геогельминтами, главным резервуаром которых выступает почва. Предыдущие наши исследования показали значительный уровень контаминации почв пропативными стадиями яйцами гельминтов показали высокие уровни контаминации парков, коммунальных домовладений, а также песочник коммунальных домовладений г. Владивостока [13].

Яйца описторхий (*Opisthorchiidae*) были выявлены в фекалиях 4,8 % кошек, из которых 66,7 % составляли особи в возрасте 1–3 года, 11,1 % – котята, 22,2 % – животные старше 3 лет (это значение для возраста 1–3 года статистически достоверно отличалось от остальных возрастов: $p < 0,03$); на долю самцов приходилось 66,7 % инвазированных кошек, самок – 33,3 % ($p > 0,08$).

Половая и возрастная структура кошек, зараженных *U. stenocephala* (2,1 %), была следующей: 50,0 % составляли котята, и по 25 % – кошки возраста 1–3 года и кошки старше 3 лет (отличия статистически недостоверны: $p > 0,2$); соотношение самцов и самок среди зараженных кошек было равным.

Смешанные инвазии были обнаружены в 2 (1,0 %) случаях: *Ts. leonina* + *H. taeniaeformis* у кота в возрасте 12 лет (0,5 %); *T. cati* + *Cystoisospora* spp. у кошки 11 лет (0,5 %).

Для оценки эпидемического значения собак и кошек в распространении паразитарных заболеваний были исследованы образцы фекалий этих животных, собранных на придомовых территориях, парках и скверах г. Владивостока (табл. 2).

Таблица 2. Содержание яиц гельминтов и цист простейших в экскрементах собак и кошек на территории г. Владивостока

Table 2. Helminth egg contamination in fecal samples of dogs and cats in Vladivostok

Городской район City district	Количество исследованных образцов Number of samples investigated	Количество положительных проб (ЭИ, %) Number of positive samples (prevalence, %)	Тении <i>Taenia</i> sp.	Собаачьи кривозубые глисты <i>Ancylostoma caninum</i>	Собачья токсокара <i>Toxocara canis</i>	Кошачья токсокара <i>Toxocara mystax</i>	Воронкоротая унцинария <i>Uncinaria stenocephala</i>	Изоспоры <i>Cystoisospora</i> sp.
Фрунзенский Frunzensky	50	7 (14,0)	1 (2,0)	5 (10,0)	0 (0)	0 (0)	1 (2,0)	0 (0)
Ленинский Leninsky	50	4 (8,0)	0 (0)	3 (6,0)	1 (2)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Первомайский Pervomaisky	48	6 (12,5)	0 (0)	5 (10,4)	1 (2)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Советский Sovetsky	56	5 (8,9)	1 (1,8)	2 (3,6)	0 (0)	1 (1,8)	0 (0)	1 (1,8)
Первореченский Pervorechensky	52	6 (11,5)	0 (0)	4 (7,7)	1 (1,9)	1 (1,9)	0 (0)	0 (0)
Итого Total	256	28 (10,9)	2 (0,7)	19 (7,4)	3 (1,2)	2 (0,7)	1 (0,4)	1 (0,4)

Из 256 исследованных образцов фекалий 28 (10,9 %) содержали яйца гельминтов и цисты простейших. Зараженные фекалии были найдены на придомовых территориях в каждом из 5 районов города. Исследование гельминтозов собак показало, что щенки и молодые животные наиболее предрасположены к инвазиям большинства видами гельминтов, что согласуется с данными других авторов [15]. Это связано с «незрелой» иммунной системой, низкой резистентностью организма к различным инфекциям и инвазиям, стрессам. Кроме того, для *T. canis* характерен еще вертикальный путь передачи (через грудное молоко) и неонатальный путь заражения от матери к щенкам, что также увеличивает распространение токсокароза среди щенков [16; 17]. Наблюдалось повышение уровня зараженности собак большинством видов гельминтов в летне-осенний период года, что связано с тем, что теплые и влажные условия являются благоприятными для развития личинок *A. caninum*, *U. stenocephala* и *T. canis* [18; 19]. На долю кобелей приходилось большая часть животных, зараженных *A. caninum*, *Taenia* sp. и *U. stenocephala* (72,7 %; статистически достоверно: $p < 0,001$), что согласуется с данными других авторов [20]. Это, в первую очередь, объясняется превалярованием кобелей среди щенков, кроме того самцы млекопитающих более предрасположены к паразитарным инвазиям, чем самки, что объясняется высокой концентрацией гормона тестостерона, имеющего иммуносупрессивные свойства. Несмотря на наличие критических замечаний в адрес последнего положения [21; 22], результаты исследования демонстрирует данную зависимость для паразитозов у хищников (Carnivora) [20–22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Паразитарно-фаунистические комплексы в условиях городской экосистемы являются менее разветвленными по сравнению с дикой природой и представлены гораздо меньшим количеством видов. Кроме того, городские экосистемы, формируемые, главным образом, в результате человеческой деятельности, являются достаточно хорошо управляемыми при наличии научно-обоснованных подходов к этой сфере деятельности и грамотного администрирования. Это особенно важно в связи с тем, что в условиях города риск широкого распространения паразитов собак и кошек высок и постоянно находится в центре внимания соответствующих надзорных органов [3; 5; 7; 12–14; 23]. В частности, в условиях г. Владивостока наиболее распространенными являются зоонозные виды нематод (*T. canis*, *T. mystax*, *A. caninum*, *Ts. leonina*, *U. stenocephala*), цестод (*D. caninum*, *Taenia* sp.) и кокцидий (*Cystoisospora* sp.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Давтян Э.С. О необходимости мониторинга эпизоотической ситуации инфекционных заболеваний собак и кошек в условиях городской экосистемы // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. N 8(50). С. 36–39.
2. Гламаздин И.Г., Петрушина С.В. Токсокароз собак – проблема практической ветеринарии // Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями. 2006. N 7. С. 102–104.

3. Абдыбекова А.М., Исаков А.А. Гельминты бродячих собак города Алматы // Вопросы нормативно-правового регулирования в ветеринарии. 2009. N 4. С. 112–113.
4. Березина Е.С. Популяционная структура, особенности поведения и морфологии свободноживущих собак и кошек и значение этих животных в эпизоотических и эпидемических процессах при бешенстве, токсокарозе и токсоплазмозе: автореф. дис. ... докт. биол. наук. Омск, 2012. 39 с.
5. Трусова А.В., Коренскова Е.В., Зубов А.Б. Паразитофауна собак в Москве и Московской области // Российский паразитологический журнал. 2008. N 4. С. 16–18.
6. Idika I.K., Onuorah E.C., Obi C.F., Umeakwana P.U., Nwosu C.O., Onah D.N., Chiejina S.N. Prevalence of gastrointestinal helminth infections of dog in Enugu State, South Eastern Nigeria // Parasite Epidemiology and Control. 2017. V. 2. N 3. P. 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.parepi.2017.05.004>
7. Предтеченский В.Е., Боровская В.М., Марголина Л.Т. Руководство по лабораторным методам исследования. Москва: Медгиз, 1950. 804 с.
8. Moskvina T.V., Shchelkanov M.Yu., Begun M.A. Fecal flotation in the detection of canine Demodex mites // Veterinary Dermatology. 2018. V. 29. N 3. P. 263–264. <https://doi.org/10.1111/vde.12540>
9. Скрябин К.И. Метод полных гельминтологических вскрытий позвоночных, включая человека. Москва: МГУ, 1928. 45 с.
10. Чернышёва Н.Б., Кузнецова Е.В., Воронин В.Н., Стрелков Ю.А. Паразитологическое исследование рыб. Москва: ГосНИОРХ, 2009. 20 с.
11. Урбах В.Ю. Статистический анализ в биологических и медицинских исследованиях. Москва: Медицина, 1975. 296 с.
12. Домацкий В.Н. Распространение гельминтозов собак в Российской Федерации // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2021. N 6. С. 90–96.
13. Табакаева Т.В., Щелканов М.Ю., Галкина И.В. Обсеменённость почв социально значимых объектов города Владивостока яйцами геогельминтов // Экология человека. 2023. T. 30. N 7. С. 539–549. <https://doi.org/10.17816/humeco562740>
14. Лунева Н.А., Понамарев Н.М. Характеристика видового состава гельминтов кошек Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. N 12. С. 105–107.
15. Overgaauw P.A.L., van Zutphen L., Hoek D., Yaya F.O., Roelfsema J., Pinelli E., van Knapen F., Kortbeek L. M. Zoonotic parasites in fecal samples and fur from dogs and cats in the Netherlands // Veterinary parasitology. 2009. V. 163. N 1-2. P. 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2009.03.044>
16. Nijse R., Ploeger H.W., Wagenaar J.A., Mughini-Gras L. Toxocara canis in household dogs: prevalence, risk factors and owners' attitude towards deworming // Parasitology Research. 2015. V. 114. N 2. P. 561–569. <https://doi.org/10.1007/s00436-014-4218-9>
17. Ramirez-Barríos R.A., Barboza-Mena G., Muñoz J., Angulo-Cubillán F., Hernandez E., González F., Escalona F. Prevalence of intestinal parasites in dogs under veterinary care in Maracaibo, Venezuela // Veterinary parasitology. 2004. V. 121. N 1-2. P. 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2004.02.024>

18. Grandi G., Comin A., Ibrahim O., Schaper R., Forshell U., Lind E.O. Prevalence of helminth and coccidian parasites in Swedish outdoor cats and the first report of *Aelurostrongylus abstrusus* in Sweden: a coprological investigation // *Acta Veterinaria Scandinavica*. 2017. V. 59. N 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.1186/s13028-017-0287-y>
19. Fontanarrosa M.F., Vezzani D., Basabe J., Eiras D.F. An Epidemiological study of gastrointestinal parasites of dogs from southern greater Buenos Aires (Argentina): age, gender, breed, mixed infections, and seasonal and spatial patterns // *Veterinary Parasitology*. 2006. V. 13. P. 283–295. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2005.11.012>
20. Emamapour S.R., Emamapour, Borji H., Nagibi A. An epidemiological survey on intestinal helminths of stray dogs in Mashhad, North-east of Iran // *Journal of Parasitic Diseases*. 2005. V. 39. N 2. P. 266–271. <https://doi.org/10.1007/s12639-013-0319-0>
21. Morales-Montor J., Chavarria A., De Leon M.A., Del Castillo L.I., Escobedo E.G., Sanchez E.N., Vargas J.A., Hernandez-Flores M., Romo-Gonzalez T., Larralde C. Host gender in parasitic infections of mammals: an evaluation of the female host supremacy paradigm // *Journal of Parasitology*. 2004. V. 90. N 3. P. 531–546. <https://doi.org/10.1645/GE-113R3>
22. Krasnov B.R., Matthee S. Spatial variation in gender-biased parasitism: host-related, parasite-related and environment-related effects // *Parasitology*. 2010. V. 137. N 10. P. 1527–1536. <https://doi.org/10.1017/S0031182010000454>
23. Старостина О.Ю., Березина Е.С., Романова С.Н. Токсокароз: современное состояние проблемы в Российской Федерации. Сообщение 1: Риск заражения населения токсокарозом на территории России // *Эпидемиология и вакцинопрофилактика*. 2015. Т. 14. N 2. С. 13–18.
- REFERENCES**
1. Davtyan E.S. About the need to monitor the epidemic situation of infectious diseases dogs and cats in the urban ecosystem. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal* [International Scientific Research Journal]. 2016, no. 8(50), pp. 36–39. (In Russian)
2. Glamazdin I.G., Petrushina S.V. Toxocarosis of dogs – problem of practical veterinary medicine. *Teoriya i praktika bor'by s parazitarnymi boleznyami* [Theory and Practice of Combating Parasitic Diseases]. 2006, no. 7, pp. 102–104. (In Russian)
3. Abdybekova A.M., Iskakov A.A. Helminthes of vagrant dogs of Almaty city. *Voprosy normativno-pravovogo regulirovaniya v veterinarii* [Problems of Legal Regulation in Veterinary Medicine]. 2009, no. 4, pp. 112–113. (In Russian)
4. Berезина E.S. *Populyatsionnaya struktura, osobennosti povedeniya i morfologii svobodnozhivushchikh sobak i koshek i znachenie etikh zhivotnykh v epizooticheskikh i epidemicheskikh protsessakh pri beshenstve, toksokaroze i toksoplazmoze: avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk* [Population structure, behavioral and morphological features of free-living dogs and cats and the importance of these animals in epizootic and epidemic processes in rabies, toxocarosis and toxoplasmosis. Abstract of PhD thesis]. Omsk, 2012, 39 p. (In Russian)
5. Trusova A.V., Korenskova E.V., Zubov A.B. Parasitofauna from dogs in Moscow and Moscow region. *Rossiiskii parazitologicheskii zhurnal* [Russian journal of parasitology]. 2008, no. 4, pp. 16–18. (In Russian)
6. Idika I.K., Onuorah E.C., Obi C.F., Umeakuana P.U., Nwosu C.O., Onah D.N., Chiejina S.N. Prevalence of gastrointestinal helminth infections of dog in Enugu State, South Eastern Nigeria. *Parasite Epidemiology and Control*, 2017, vol. 2, no. 3, pp. 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.parepi.2017.05.004>
7. Predtechenskii V.E., Borovskaya V.M., Margolina L.T. *Rukovodstvo po laboratornym metodam issledovaniya* [Guidelines for laboratory research methods]. Moscow, Medical State Publ., 1950, 804 p. (In Russian)
8. Moskvina T.V., Shchelkanov M.Yu., Begun M.A. Fecal flotation in the detection of canine *Demodex* mites. *Veterinary Dermatology*, 2018, vol. 29, no. 3, pp. 263–264. <https://doi.org/10.1111/vde.12540>
9. Skryabin K.I. *Metod polnykh gel'mintologicheskikh vskrytii pozvonochnykh, vklyuchaya cheloveka* [Method of complete helminthological autopsies of vertebrates, including humans]. Moscow, Moscow State University Publ., 1928, 45 p. (In Russian)
10. Chernyshyova N.B., Kuznetsova E.V., Voronin V.N., Strelkov Yu.A. *Parazitologicheskoe issledovanie ryb* [Parasitological examination of fish]. Moscow, State Fishing Institute Publ., 2009, 20 p. (In Russian)
11. Urbakh V.Yu. *Statisticheskii analiz v biologicheskikh i meditsinskikh issledovaniyakh* [Statistical analysis in biological and medical research]. Moscow, Medicina Publ., 1975, 296 p. (In Russian)
12. Domatskii V.N. Spread of canine helminthiasis in Russian Federation. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Krasnoyarsk State University]. 2021, no. 6, pp. 90–96. (In Russian)
13. Tabakaeva T.V., Shchelkanov M.Yu., Galkina I.V. Contamination of soils by geohelminths ova in key social areas of Vladivostok. *Human ecology*, 2023, vol. 30, no. 7, pp. 539–549. (In Russian) <https://doi.org/10.17816/humeco562740>
14. Luneva N.A., Ponamaryov N.M. The description of species composition of feline helminths in the Altay region. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Altai State University]. 2014, no. 12, pp. 105–107. (In Russian)
15. Overgaaauw P.A.L., van Zutphen L., Hoek D., Yaya F.O., Roelfsema J., Pinelli E., van Knapen F., Kortbeek L. M. Zoonotic parasites in fecal samples and fur from dogs and cats in the Netherlands. *Veterinary parasitology*, 2009, vol. 163, no. 1-2, pp. 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2009.03.044>
16. Nijse R., Ploeger H.W., Wagenaar J.A., Mughini-Gras L. *Toxocara canis* in household dogs: prevalence, risk factors and owners' attitude towards deworming. *Parasitology Research*, 2015, vol. 114, no. 2, pp. 561–569. <https://doi.org/10.1007/s00436-014-4218-9>
17. Ramirez-Barrios R.A., Barboza-Mena G., Muñoz J., Angulo-Cubillán F., Hernandez E., González F., Escalona F. Prevalence of intestinal parasites in dogs under veterinary care in Maracaibo, Venezuela. *Veterinary parasitology*, 2004, vol. 121, no. 1-2, pp. 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2004.02.024>
18. Grandi G., Comin A., Ibrahim O., Schaper R., Forshell U., Lind E.O. Prevalence of helminth and coccidian parasites in Swedish outdoor cats and the first report of *Aelurostrongylus abstrusus* in Sweden: a coprological investigation. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 2017, vol. 59, no. 1, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1186/s13028-017-0287-y>
19. Fontanarrosa M.F., Vezzani D., Basabe J., Eiras D.F. An

Epidemiological study of gastrointestinal parasites of dogs from southern greater Buenos Aires (Argentina): age, gender, breed, mixed infections, and seasonal and spatial patterns. *Veterinary Parasitology*, 2006, vol. 13, pp. 283–295. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2005.11.012>

20. Emamapour S.R., Emamapour, Borji H., Nagibi A. An epidemiological survey on intestinal helminths of stray dogs in Mashhad, North-east of Iran. *Journal of Parasitic Diseases*, 2005, vol. 39, no. 2, pp. 266–271. <https://doi.org/10.1007/s12639-013-0319-0>

21. Morales-Montor J., Chavarria A., De Leon M.A., Del Castillo L.I., Escobedo E.G., Sanchez E.N., Vargas J.A., Hernandez-Flores M., Romo-Gonzalez T., Larralde C. Host gender in parasitic infections of mammals: an evaluation of the female host supremacy paradigm. *Journal of*

Parasitology, 2004, vol. 90, no. 3, pp. 531–546. <https://doi.org/10.1645/GE-113R3>

22. Krasnov B.R., Matthee S. Spatial variation in gender-biased parasitism: host-related, parasite-related and environment-related effects. *Parasitology*, 2010, vol. 137, no. 10, pp. 1527–1536.

<https://doi.org/10.1017/S0031182010000454>

23. Starostina O.Yu., Berezina E.S., Romanova S.N. Toxocariasis current state of the Russian Federation. Message 1: Risk of toxocariasis infection of the population on the territory of Russian Federation. *Epidemiologiya i vaksinoprofilaktika [Epidemiology and Vaccinoprophylaxis]*. 2015, vol. 14, no. 2, pp. 13–18. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Татьяна В. Табакаева собрала и обработала материал. Михаил Ю. Щелканов и Ирина В. Галкина обработали результаты. Антон В. Табакаев подготовил рукопись к подаче в редакцию, сверстал текст. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Tatyana V. Tabakaeva collected and processed material. Mikhail Yu. Shchelkanov and Irina V. Galkina processed the results. Anton V. Tabakaev prepared the manuscript for submission to the editor, typed up the text. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Татьяна В. Табакаева / Tatyana V. Tabakaeva <https://orcid.org/0000-0002-9517-7495>

Ирина В. Галкина / Irina V. Galkina <https://orcid.org/0000-0001-7000-5833>

Антон В. Табакаев / Anton V. Tabakaev <https://orcid.org/0000-0001-5658-5069>

Михаил Ю. Щелканов / Mikhail Yu. Shchelkanov <https://orcid.org/0000-0001-8610-7623>

Оригинальная статья / Original article

УДК 598.25

DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-3



Многолетние наблюдения за весенней миграцией водоплавающих птиц на юго-востоке лесной зоны Западной Сибири

Игорь Г. Коробицын¹, Олег Ю. Тютеньков^{1,2}, Андрей С. Панин¹, Евгений Б. Мурзаханов³, Андрей В. Баздырев³

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

²Муниципальное автономное учреждение «Северский природный парк», Северск, Россия

³Межрегиональная общественная организация «Экологический центр стрижа», Томск, Россия

Контактное лицо

Игорь Г. Коробицын, кандидат биологических наук, доцент, кафедра зоологии позвоночных и экологии, Национальный исследовательский Томский государственный университет; 634050, Россия, г. Томск, пр-т Ленина, 36.

Тел. +79138872350

Email rozenpom@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7709-3004>

Формат цитирования

Коробицын И.Г., Тютеньков О.Ю., Панин А.С., Мурзаханов Е.Б., Баздырев А.В. Многолетние наблюдения за весенней миграцией водоплавающих птиц на юго-востоке лесной зоны Западной Сибири // Юг России: экология, развитие. 2024. Т.19, N 2. С. 25-32. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-3

Получена 11 марта 2024 г.

Прошла рецензирование 14 апреля 2024 г.

Принята 26 апреля 2024 г.

Резюме

Цель – провести анализ многолетней динамики состава и численности мигрирующих водоплавающих на юго-востоке лесной зоны Западной Сибири.

Визуальные наблюдения за пролетом водоплавающих проводили в формате ежедневных 2-часовых утренних учетов в апреле-мае в течение 18 лет (1998–2023) в окрестности г. Томска на р. Томи. Дополнительно в 2002–2003 году одновременно миграцию наблюдали также на р. Оби в южной, центральной и северной части Томской области. Использовали методику Э.И. Гаврилова, Э.В. Кумари с некоторыми изменениями. Учитывали пролетающих транзитом птиц, а также сидящих на учетной площадке озер в районе наблюдательного пункта (НП).

Зарегистрирован 21 вид водоплавающих. Анализ многолетней динамики выявил тенденцию снижения суммарной численности пролетающих водоплавающих. У наиболее массового вида – *Anas acuta* тренд снижения статистически значимый. Для отдельных видов – *Anas strepera*, *Cygnus cygnus* выявлен положительный тренд.

Наиболее вероятной причиной снижения численности водоплавающих является неумеренная весенняя охота. Можно рекомендовать сократить ее продолжительность или вводить мораторий раз в несколько лет. Для мониторинга ресурса мигрирующих водоплавающих можно использовать период массового пролета, который короче, но именно в него пролетает основная масса птиц.

Ключевые слова

Миграции, водоплавающие, учеты численности, многолетняя динамика, Западная Сибирь.

Long-term observation of waterfowl migration in the south-east of the forest zone of Western Siberia, Russia

Igor G. Korobitsyn¹, Oleg Yu. Tyutenkov^{1,2}, Andrey S. Panin¹,
Evgeniy B. Murzakhanov³ and Andrey V. Bazdyrev³

¹National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

²Seversky Nature Park, Seversk, Russia

³Ecological Centre Strizh, Trans-regional Public Organisation, Tomsk, Russia

Principal contact

Igor G. Korobitsyn, PhD (Biology), Associate Professor, Department of Vertebrate Zoology and Ecology, Tomsk State University; 36 Lenina ave, Tomsk, Russia 634050.
Tel. +79138872350
Email rozenpom@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7709-3004>

How to cite this article

Korobitsyn I.G., Tyutenkov O.Yu., Panin A.S., Murzakhanov E.B., Bazdyrev A.V. Long-term observation of waterfowl migration in the south-east of the forest zone of Western Siberia, Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2024; 19(2):25-32. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-3

Received 11 March 2024

Revised 14 April 2024

Accepted 26 April 2024

Abstract

The aim of this research is an analysis of the long-term dynamics of the composition and number of migratory waterfowl in the southeast of the forest zone of Western Siberia.

Visual observations of waterfowl migration were carried out in the format of daily 2-hour morning counts in April-May through a period of 18 years (1998–2023) near the Tomsk on the Tom river. Additionally, in 2002–2003, simultaneous migration was also observed on the Ob river in the southern, central and northern parts of the Tomsk region. The method of E.I. Gavrilova and E.V. Kumari was used with some modifications. Birds were counted which were transit flying via the territory, as well as birds sitting on the lake water in the area of the observation point.

Twenty-one species of waterfowl have been registered. Analysis of long-term dynamics has revealed a trend towards a decrease in the total number of migrating waterfowl. In the most abundant species, *Anas acuta*, this trend is statistically significant. In some species – *Anas strepera* and *Cygnus Cygnus* – the trend of dynamics is positive.

Most likely reason for the decline in waterfowl numbers is excessive spring hunting. A reduced hunting duration or the introduction of a moratorium every few years may be among the responses required. We suggest using the period of mass migration to monitor the waterfowl resource. This period is shorter and when the greatest number of birds migrate.

Key Words

Migrations, waterfowl, population counts, long-term dynamics, Western Siberia.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение миграций водоплавающих птиц и их количественная и качественная оценка актуальны с позиций нескольких значимых проблем. Во-первых, важно учитывать численность водоплавающих как хозяйственно-значимого в охотничьем хозяйстве ресурса для его рационального использования [1–3]. Однако, практически нигде мониторинг численности водоплавающих в настоящее время не проводится, а сроки открытия охоты в регионах открываются на максимально разрешенный правилами охоты период, не опираясь на данные учетов [3; 4]. Во-вторых, знание сроков и путей миграции и ее количественной характеристики позволяет вести контроль за эпидемиологической обстановкой, предупреждая возможное распространение инфекционных агентов, связанных с птицами [5–7]. Безусловно, необходимо учитывать миграцию птиц и в интересах авиационной орнитологии [8], а также в фаунистических исследованиях и оценке влияния на население птиц климатических и антропогенных изменений [9–10] и т.д. К сожалению, в последние годы интерес исследователей к количественной оценке видимой миграции снизился, в том числе из-за не востребоваемости получаемых данных со стороны охотведомств, поскольку заранее известно, что весенняя охота будет производиться независимо от состава мигрантов и их численности. Изучение миграций, таким образом, в основном находится в сфере интересов орнитологов, неравнодушных к объектам своим исследований. Положительным на этом фоне является увеличение числа исследований, использующих для изучения миграции современные достижения науки, например, спутниковые передатчики, что позволяет точнее проследить пути и сроки пролета птиц, а также решать целый спектр дополнительных задач [11–13]. В основном эти исследования направлены на сохранение и изучение редких видов, подвидов и популяций водоплавающих. Наши наблюдения за видимой миграцией водно-околоводных птиц, начатые в конце 90-х годов XX века под руководством директора зоомузея Томского государственного университета С.С. Москвитина, охватывают более чем 20-летний период, что позволило выявить некоторые закономерности и тенденции, происходящие с водоплавающими. Это представляется ценным в отсутствие выстроенной системы централизованного мониторинга данного ресурса в России. Цель настоящей работы: провести анализ многолетней динамики состава и численности мигрирующих водоплавающих на юго-востоке лесной зоны Западной Сибири и дать современную оценку состояния ресурса гусеобразных.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ежедневные утренние 2-часовые наблюдения за весенней миграцией (апрель–май) проводили 18 лет в период с 1998 по 2023 гг. с некоторыми прерываниями работ (годы проведения учетов: 1998–2007, 2009–2011, 2013, 2020–2023). Ключевой участок наблюдения располагался в 15 км южнее города Томска у села Коларово в пойме р. Томи (56°19'47.29"С, 84°56'49.61" В). В настоящее время здесь создана ООПТ регионального значения Памятник природы «Коларовские водно-болотные угодья им. С.С. Москвитина».

Учеты проводили по методике, близкой к предложенным Э.В. Кумари [14] и Э.И. Гавриловым [15] с изменениями, заключающимися в отсутствии вечерних наблюдений и сокращением времени утренних наблюдений с 4 до 2 часов. В целом такой подход оправдал себя, так как позволял выявить состав мигрантов, фенологию и волновой характер пролета при значительной экономии времени. Пролетающих птиц фиксировали в 1 км полосе с НП, а также велся учет отдыхающих после ночной миграции птиц на системе озер в окрестности с. Коларово в пойме р. Томи (общая площадь 0,68 км²). В отдельные годы наблюдения за пролетом проводили одновременно и на Томи, и на участке верхней Оби: Кожевниковский район Томской области у д. Еловка в 2002 году (55°56'31.71" С, 83°44'8.01" В), а также на двух участках средней Оби: Колпашевский район у д. Петропавловка – в 2002 году (58°20'8.43" С, 82°28'39.90" В) и Александровский район Томской области на протоке Кривоуцкий Посол – в 2003 году (59°49'21.17" С, 78°43'0.81" В). Томский и Кожевниковский участок расположены в подзоне подтаежных лесов, Колпашевский и Александровский – в южной и средней тайге соответственно.

Степень количественного преобладания видов определяли исходя из их процентной доли в общей численности зарегистрированных для участка птиц: многочисленные составляли более 10 %, обычные – 1–10, редкие – менее 1 % и очень редкие – менее 0,1 %. Для оценки многолетней динамики численности введен показатель среднего числа зарегистрированных в период интенсивного пролета гусеобразных за 1 день наблюдений (число пролетевших птиц за 1 час в 1 км полосе вместе с сидящими на озерах на расчетной площади в 1 км²). Под интенсивным (массовым) пролетом подразумевали период, когда интенсивность пролета (число пролетающих особей/час) и плотность (особей /км²) птиц превышала средние за данный сезон значения. В отдельные годы сидящие птицы могли превышать по численности пролетающих и более наглядно иллюстрировать ежедневную динамику. Оценка с использованием только периода интенсивного пролета, на наш взгляд, более объективно позволила оценить происходящие межгодовые изменения. Это удобнее по сравнению с суммарными данными численности мигрантов или средними показателями за весну, поскольку продолжительность миграции значительно менялась по годам в зависимости от погодных условий и дат вскрытия рек. В период же интенсивного пролета в более сжатые сроки пролетала основная масса птиц, которую и сравнивали по годам. Проверку достоверности трендов проводили с помощью теста Кендалла в программе Statistica 8.0. Также учитывали число самцов и самок в пролетающих и сидящих стаях.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В разные годы пролет на Томи – основном ключевом участке, начинался в период с 10 апреля по 3 мая в зависимости от хода развития весны: повышения температур и вскрытия рек ото льда. Период массового пролета у Томска также варьировал по срокам в разные годы, приходясь на промежуток со II декады апреля по II декаду мая включительно. При этом во все годы он захватывал своим окончанием

или началом конца апреля – начало мая, что можно рекомендовать как оптимальный период для открытия охоты в южной части региона, независимо от характера весны. За годы исследования начала не отмечено тенденции смещения дат начала и массового пролета водоплавающих на более ранние сроки. В северных точках запаздывание начала и массового пролета по сравнению с южными в одни и те же годы составляло около 2 недель. Пролет в каждой из точек, как правило, проходил 2–3 волнами, подъемы и спады которых довольно четко скоррелированы с динамикой температуры. Резкое потепление с перепадом среднесуточных температур воздуха в 10 и более градусов в течение нескольких дней всегда приводило к всплеску интенсивности пролета. День с максимальной интенсивностью пролета в разные годы приходился у Томска на 17 апреля – 12 мая, в среднем – 29 апреля.

Всего за 18 весенних сезонов на р. Томи отмечено 55235 особей гусеобразных, то есть в среднем регистрировали около 3000 птиц за весну, хотя межгодовые колебания бывали и 2–3-кратные. В отдельные годы на других участках зарегистрировано в Кожевниковском районе на верхней Оби – 4447, Колпашевском – 3946 и Александровском – 3417 особей гусеобразных. Из этого становится понятно, что интенсивность пролета на обском притоке – Томи, лишь немногим уступает интенсивности миграции на Оби. Состав видов в целом довольно схож на всей территории. Всего отмечен 21 вид, из которых 14 встречено во всех точках. Всего же для территории известно 38 видов гусеобразных [16], то есть за годы наблюдений встречено 55 % из них. Оставшиеся, не встреченные нами виды, в основном представлены редкими и залетными. Ввиду более длительных наблюдений на Томи, наибольшее число видов – 19, было зарегистрировано именно здесь (табл. 1). Из них 11 встречались в районе Томска ежегодно. Это многочисленная шилохвость *Anas acuta*, свиязь *Anas penelope*, чирок-свистунок *Anas crecca*, чирок-трескун *Anas querquedula*; обычные: широконоска *Anas clypeata*, кряква *Anas platyrhynchos*, хохлатая черныш *Aythya fuligula*, красноголовая черныш *Aythya ferina*, гоголь *Vucephala clangula*, большой крохаль *Mergus merganser*; редким являлся луток *Mergus albellus*. Не ежегодно отмечалась серая утка *Anas strepera* (11 из 18 лет), гуменник *Anser fabalis* (в 8 из 18), лебедь-кликун *Cygnus cygnus* (в 6 из 18 лет). Еще пять видов встречались в 1–4 года из 18, – в основном это немногочисленные, редкие и даже залетные виды. Здесь стоит упомянуть пролетных длинноногого крохалья *Mergus serrator* и морянку *Clangula hyemalis*. Кроме них это серый гусь *Anser anser* – редкий вид, внесенный в федеральную и региональную Красные Книги, который за годы наблюдений встречен лишь дважды – 1 особь отмечена 7 мая 2004 года и стая из 7 птиц пролетела 29 апреля 2021 г., красноносый нырок *Netta rufina* (2 пары залетных птиц в 2020 г.) и белоглазый нырок *Aythya nyroca* (2 залетных самца встречены в 2021 г.). Между участками наблюдений имелись некоторые различия в видовом составе и соотношении видов. Так только в верхнеобской точке (Кожевниковский район) встречен турпан *Melanitta fusca*, в количестве 5 особей. Турпан стал повсеместно редким в Западной Сибири, в результате чего

возникает необходимость включения его в Красную Книгу регионов Сибири для взятия его под охрану. Только в северной среднеобской точке (Александровский район) зарегистрирована синьга *Melanitta nigra*. Последний факт не случаен, так как этот вид мигрирует с европейских зимовок на восток и север и захватывает пролетом преимущественно северную часть региона. В южных точках по сравнению с северными более типичными являлись красноголовая черныш и чирок-трескун. Из других особенностей пространственной неоднородности миграции следует указать на то, что лебедь-кликун преимущественно встречается на обских участках увеличивая численность к северу, а гуменник имел наиболее выраженный пролет на участке средней Оби в Колпашевском районе. В 2002 году он являлся здесь одним из доминирующих видов наряду с шилохвостью, тогда как на других он практически не регистрировался. Объясняется это тем, что через данный участок проходит выраженное русло пролета этого вида в меридиональном направлении, которое не связано с направлением течения Оби. Поскольку с тех пор учетов на путях его пролета не повторяли, судить о тенденции его численности по данным наблюдений на Томи, где он регистрируется не каждый год, не представляется возможным. Полученные нами данные по генетической и морфологической изменчивости гуменника [17] указывают, что через территорию пролетает группировка представленная западным лесным и восточным таежным подвидами, зимующими в Азии [18], которые считаются редкими, требующими охраны, и повсеместно внесены в региональные и федеральную Красные книги [19]. Вошли эти подвиды и в новую редакцию Красной книги Томской области [20].

Для большинства видов уток характерно преобладание самцов 1,6–1,8 на 1 самку, для красноголовой черныши и чирка-трескуна преобладание самцов еще больше – до 7,5 и 3 соответственно. Для большого крохалья соотношение близко к 1:1, у гоголя и лутка самцов 0,9 и 0,7 на 1 самку соответственно. Отмечена интересная особенность в динамике соотношения полов. После лет, когда весенняя охота длилась более, чем 10 дней (2009–2012, 2021–2022) соотношение полов уток менялось в сторону снижения доли самцов, что может указывать на перепромысел.

Анализируя многолетнюю динамику численности мигрирующих водоплавающих, просматривается тренд снижения числа пролетающих птиц (рис. 1). Для наиболее многочисленной шилохвости этот тренд статистически значимый ($P=0.04$). Это продолжение тенденции сокращения численности водоплавающих, которую отмечали, начиная со второй половины XX века ряд исследователей [21–23]. Многие факты указывают на то, что одним из основных влияющих на это фактором является неумеренная весенняя охота [24]. Вместе с тем, у отдельных видов есть и положительная динамика – так в последние годы увеличивается численность серой утки ($P=0.02$), лутка, лебедя-кликуна. Последние виды из категории редких и очень редких, встречаемых не ежегодно, стали регистрироваться регулярно и в большем числе.

Таблица 1. Видовой состав гусеобразных птиц нижнего течения р. Томи и их количественные категории. М – многочисленные, О – обычные, Р – редкие, ОР – очень редкие
 Table 1. Species composition of waterfowl in the lower reaches of the Tom River and their quantitative categories: М – numerous, О – common, Р – rare and ОР – very rare species

Виды / Species	Годы / Years																		
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2013	2020	2021	2022	2023	
Шилохвость <i>Anas acuta</i> L. Northern pintail <i>Anas acuta</i> L.	М	М	М	М	М	М	М	М	М	М	М	М	М	М	М	М	М	М	О
Свиязь <i>Anas penelope</i> L. Eurasian wigeon <i>Anas penelope</i> L.	О	О	М	О	М	М	М	О	М	М	М	М	М	М	М	М	О	О	О
Чирок-свиистунок <i>Anas crecca</i> L. Common teal <i>Anas crecca</i> L.	О	О	О	О	О	О	М	М	О	О	М	М	М	М	М	М	О	М	М
Чирок-трескунюк <i>Anas querquedula</i> L. Garganey <i>Anas querquedula</i> L.	О	М	М	М	О	О	О	О	О	М	М	О	М	О	О	О	М	М	М
Широконоска <i>Anas clypeata</i> L. Northern shoveler <i>Anas clypeata</i> L.	О	О	О	О	О	О	О	О	О	О	О	О	М	О	М	О	О	О	М
Кряква <i>Anas platyrhynchos</i> L. Mallard <i>Anas platyrhynchos</i> L.	О	О	О	О	М	О	О	О	О	О	О	О	О	О	М	О	О	М	О
Хохлатая черныш <i>Aythya fuligula</i> L. Tufted duck <i>Aythya fuligula</i> L.	О	О	О	О	О	М	О	О	О	О	М	О	М	О	О	О	О	О	О
Красноглазый нырок <i>Aythya ferina</i> L. Common pochard <i>Aythya ferina</i> L.	О	О	М	М	О	О	Р	М	М	О	М	О	О	О	О	О	О	М	М
Гороль <i>Vesphala clangula</i> L. Goldeneye <i>Vesphala clangula</i> L.	О	О	О	О	М	О	Р	О	О	М	О	О	О	О	О	О	О	О	О
Большой крохаль <i>Mergus merganser</i> L. Goosander <i>Mergus merganser</i> L.	Р	Р	О	О	О	О	Р	О	О	М	О	О	О	О	О	О	О	О	О
Луток <i>Mergus albellus</i> L. / Smew <i>Mergus albellus</i> L.	ОР	Р	ОР	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	Р	О
Серая утка <i>Anas strepera</i> L. / Gadwall <i>Anas strepera</i> L.	–	–	Р	–	–	–	–	Р	–	Р	О	Р	Р	Р	Р	О	О	О	О
Гуменник <i>Anser fabalis</i> Lath. Bean goose <i>Anser fabalis</i> Lath.	ОР	Р	–	–	–	–	О	–	–	Р	О	–	–	–	–	–	–	–	ОР
Серый гусь <i>Anser anser</i> L. / Greylag goose <i>Anser anser</i> L.	–	–	–	–	–	–	Р	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	Р
Длинноносый крохаль <i>Mergus serrator</i> L. Red-breasted Merganser <i>Mergus serrator</i> L.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	Р	–	–	–	–	–	–	–
Красноносый нырок <i>Netta rufina</i> Pallas Red-crested pochard <i>Netta rufina</i> Pallas	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	Р
Морянка <i>Clangula hyemalis</i> L. Long-tailed duck <i>Clangula hyemalis</i> L.	ОР	–	–	–	–	–	–	–	–	–	Р	–	–	–	–	–	–	–	–
Лебедь-кликун <i>Cygnus cygnus</i> L. Whooper swan <i>Cygnus cygnus</i> L.	–	–	ОР	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	Р	ОР	О	Р	Р
Белоглазый нырок <i>Aythya nyroca</i> Guelldenst. Ferruginous Duck <i>Aythya nyroca</i> Guelldenst.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	ОР

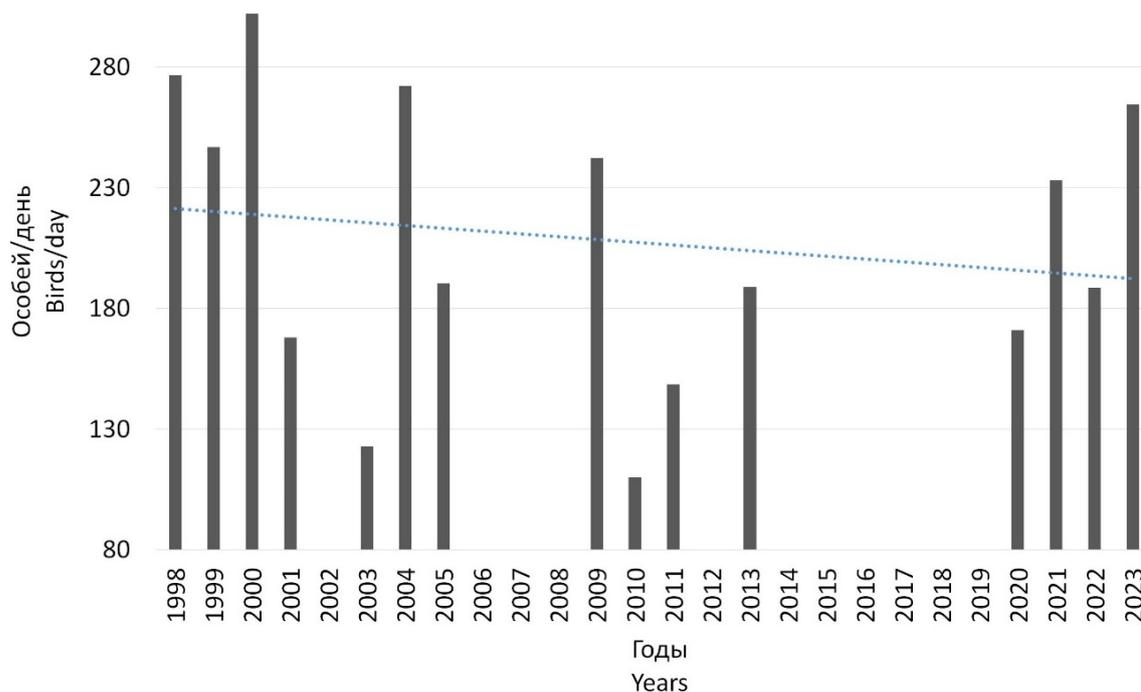


Рисунок 1. Межгодовая динамика численности гусеобразных в пойме реки Томи сумма пролетевших птиц за 1 час в 1 км полосе вместе с сидящими на озерах на расчетной площади в 1 км², пунктирная линия – линия тренда
Figure 1. Inter-annual dynamics of abundance of Anseriformes in the floodplain of the Tom River: the sum of birds flying per 1 hour within a 1 km wide strip, together with those sitting on lakes over an area of 1 km², dotted line – is the trend line

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для мониторинга состояния ресурса гусеобразных можно использовать период массового пролета, который короче общей продолжительности миграции, но именно в него пролетает основная масса птиц. Также хорошим индикатором состояния ресурса является соотношение полов – при перепромысле доля самцов снижается и приближается к паритету с самками. В связи с тенденцией снижения численности водоплавающих, рекомендуется сокращать продолжительность весенней охоты на срок менее 10 дневного периода, либо вводить раз в несколько лет мораторий на охоту. Так сокращение сроков охоты с 16 дней в 2009–2012 гг. до 10 дней (в 2013–2019 годы), а также закрытие охоты в регионе в 2020 г. в связи с коронавирусной инфекцией, приводили к улучшению показателей численности водоплавающих.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарны своему руководителю Москвитину Сергею Степановичу, инициировавшему это исследование и, к сожалению, ушедшему из жизни в 2020 г. Исследование поддержано государственным заданием Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWM-2020-0019).

ACKNOWLEDGMENT

The authors are grateful to their supervisor Sergey S. Moskvitin, who initiated this research and, unfortunately, passed away in 2020.

The research was performed within the framework of a state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSWM-2020-0019).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Reese J.G., Weterings R. Waterfowl migration chronologies in central Chesapeake Bay during 2002–2013 // *The Wilson Journal of Ornithology*. 2018. V. 130(1). P. 52–69. <https://doi.org/10.1676/16-043.1>
2. Харитонов С.П. О рациональном (неистощительном) использовании ресурсов водоплавающих птиц: демографическое благополучие популяции и нормы изъятия // *Зоологический журнал*. 2019. Т. 98. N 8. С. 903–914. <https://doi.org/10.1134/S0044513419080063>
3. Бондарев А.Я. Водоплавающие юго-востока Западной Сибири: состояние ресурсов, мониторинг и использование // *Вестник охотоведения*. 2019. Т. 16. N 4. С. 266–277.
4. Сыроечковский Е.Е. Принципы управления ресурсами водоплавающих птиц России: постановка проблемы // *Тезисы докладов Международной конференции «Гусеобразные Северной Евразии: география, динамика и управление популяциями»*, Элиста, 24–29 марта, 2011. С. 82–83.
5. Druzyaka A.V., Druzyaka O.R., Sharshov K.A., Kasianov N., Dubovitskiy N., Derko A.A., Frolov I.G., Tornainen J., Wang W., Minina M.A., Shestopalov A.M. Stable Isotope Analysis Reveals Common Teal (*Anas crecca*) Molting Sites in Western Siberia: Implications for Avian Influenza Virus Spread // *Microorganisms*. 2024. V.12. Article ID: 357. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12020357>
6. Korobitsyn I.G., Moskvitina N.S., Tyutenkov O.Y., Gashkov S.I., Moskvitin S.S., Romanenko V.N., Kononova Y.V., Mikryukova T.P., Protopopova E.V., Kartashov M.Y., Chausov E.V., Konovalova S.N., Tupota N.L., Sementsova A.O., Ternovoi V.A., Loktev V.B. Detection of tick-borne pathogens in wild birds and their ticks in Western Siberia and high level of their mismatch // *Folia Parasitologica*. 2021. V. 68. P. 1–13. <https://doi.org/10.14411/fp.2021.024>

7. Mine J., Uchida Y., Sharshov K., Sobolev I., Shestopalov A., Saito T. Phylogeographic evidence for the inter- and intracontinental dissemination of avian influenza viruses via migration flyways // *PLoS ONE*. 2019. N 14(6). Article id: e0218506. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218506>
8. Кухта А.Е., Большакова Н.П., Мацюра А.В. Концептуальные подходы к орнитологическому обеспечению безопасности полётов воздушных судов // Вестник Тувинского государственного университета. Естественные и сельскохозяйственные науки. 2017. N 2(33). С. 96–105.
9. Long P.R., Székely T., Kershaw M., O'Connell M. Ecological factors and human threats both drive wildfowl population declines // *Animal Conservation*. 2007. V. 10. P. 183–191.
10. Pakanen V.-T. Large scale climate affects the timing of spring arrival but local weather determines the start of breeding in a northern Little Tern (*Sternula albifrons*) population // *Ornis Fennica*. 2018. V. 95. N 4. P. 178–184.
11. Соколов Л.В. Современная телеметрия: новые возможности в орнитологии // Зоологический журнал. 2011. Т. 90. N 7. С. 861–882.
12. Ma R., Ma Sh., Wei Xu., Zheng J., Yuan Ch., Bo Sh., Yuan X., Ji L., Li Z., Shemyakin E., Tiuvon I., Sharshov K., Wang T., Wang Zh. Tracking migration of Eastern spot-billed ducks *Anas zonorhyncha* and Mallards *Anas platyrhynchos* wintering in Shanghai, China // *Waterbirds*. 2022. V. 45. Iss. 4. P. 467–478.
13. Li C., Zhao Q., Solovyeva D., Lameris T., Batbayar N., Byskatova-harmey I., Lee H., Emelyanov V., Rozenfeld S.B., Park J., Shimada T., Koyama K., Moriguchi S., Hou J., Natsagdor T., Kim H., Davaasuren B., Damba I., Liu G., Hu B., Xu W., Gao D., Goroshko O., Antonov A., Prokopenko O., Tsend O., Stepanov A., Savchenko A., Danilov G., Germogenov N., Zhang J., Deng X., Cao L., Fox A.D. Population trends and migration routes of the East Asian Bean Goose *Anser fabalis middendorffii* and *A. f. serrirostris* // *Wildfowl*. 2020. V. 6. P. 124–156.
14. Кумари Э.В. Инструкция для изучения миграций птиц. Тарту: АН ЭССР, 1955.
15. Гаврилов Э.И. О количественной характеристике видимых миграций птиц // Материалы Всесоюзной конференции по миграциям птиц. М., 1975. Ч. 1. С. 51–55.
16. Дубовик А.Д. Об экологии и запасах гусеобразных Средней Оби // Вопросы зоологии. 1966. С. 141–143.
17. Коробицын И.Г., Тютеньков О.Ю., Силин М.В., Бондарев А.Я. Генетическое и морфологическое разнообразие гусеника *Anser fabalis* на юге Западной Сибири // Материалы VI Международной орнитологической конференции «Современные проблемы орнитологии Сибири и Центральной Азии», Иркутск, 2018. С. 109–113.
18. Розенфельд С.Б., Замятин Д.О., Ванжелюв Д., Киртаев Г.В., Рогова Н.В., Као Л., Поповкина А.Б. Лесной гусеник в Ямало-Ненецком автономном округе // Казарка. 2018. Вып. 20. С. 28–52.
19. Красная книга Российской Федерации. М.: ФГБУ ВНИИ Экология, 2021. Т. «Животные». 2-ое издание. 1128 с.
20. Красная книга Томской области. Изд. 3-е, перераб. и доп. Элиста: Процвет, 2023. 580 с.
21. Иванов Г.К. Причины снижения численности водоплавающей дичи на озерах Северной Кулунды // Ресурсы водоплавающей дичи в СССР, их воспроизводство и использование. 1968. С. 36–37.
22. Дубовик А.Д. О запасах водоплавающей дичи в бассейне средней Оби // Ресурсы водоплавающей дичи в СССР, их воспроизводство и использование. Азиатская часть СССР. Тез. докл. Второго Всесоюз. Совещания 5–7 сентября 1968. М., 1968. Ч. II. С. 37–38.
23. Флинт В.Е., Кривенко В. Г. Водоплавающие птицы Евразии // Охота и охотничье хозяйство. 1999. N 4. С. 1–2.
24. Тютеньков О.Ю., Коробицын И.Г. Влияние весенней охоты на водоплавающих птиц юго-востока Западной Сибири // Тезисы доклада Международной конференции «Гусеобразные Северной Евразии: изучение, сохранение и рациональное использование», Салехард, 30 ноября – 5 декабря, 2015. С. 90–91.

REFERENCES

1. Reese J.G., Weterings R. Waterfowl migration chronologies in central Chesapeake Bay during 2002–2013. *The Wilson Journal of Ornithology*, 2018, vol. 130(1), pp. 52–69. <https://doi.org/10.1676/16-043.1>
2. Kharitonov S.P. On the sustainable use of waterfowl resources: population demographic status and harvest rates. *Zoological journal*, 2019, vol. 98, no. 8, pp. 903–914. (In Russian) <https://doi.org/10.1134/S0044513419080063>
3. Bondarev A.Ya. Waterfowl of the south-east of Western Siberia resource status, monitoring and use. *Vestnik okhotovedeniya* [Bulletin of hunting management]. 2019, vol. 16, no. 4, pp. 266–277. (In Russian)
4. Syroechkovskii E.E. Printsipy upravleniya resursami vodoplavayushchikh ptits Rossii: postanovka problemy [Principles of waterfowl resource management in Russia: problem statement]. In: *Tezisy докладov Mezhdunarodnoi konferentsii «Guseobraznye Severnoi Evrazii: geografiya, dinamika i upravlenie populyatsiyami»*, Elista, 24–29 marta, 2011 [Abstracts of reports of the International Conference “Anseriformes of Northern Eurasia: geography, dynamics and population management”, Elista, 24–29 March 2011]. Elista, 2011, pp. 82–83. (In Russian)
5. Druzyaka A.V., Druzyaka O.R., Sharshov K.A., Kasianov N., Dubovitskiy N., Derko A.A., Frolov I.G., Tornainen J., Wang W., Minina M.A., Shestopalov A.M. Stable Isotope Analysis Reveals Common Teal (*Anas crecca*) Molting Sites in Western Siberia: Implications for Avian Influenza Virus Spread. *Microorganisms*, 2024, vol. 12, article id: 357. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12020357>
6. Korobitsyn I.G., Moskvitina N.S., Tyutenkov O.Y., Gashkov S.I., Moskvitin S.S., Romanenko V.N., Kononova Y.V., Mikryukova T.P., Protopopova E.V., Kartashov M.Y., Chaousov E.V., Konovalova S.N., Tupota N.L., Sementsova A.O., Ternovoi V.A., Loktev V.B. Detection of tick-borne pathogens in wild birds and their ticks in Western Siberia and high level of their mismatch. *Folia Parasitologica*, 2021, vol. 68, pp. 1–13. <https://doi.org/10.14411/fp.2021.024>
7. Mine J., Uchida Y., Sharshov K., Sobolev I., Shestopalov A., Saito T. Phylogeographic evidence for the inter- and intracontinental dissemination of avian influenza viruses via migration flyways. *PLoS ONE*, 2019, no. 14(6), article id: e0218506. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218506>
8. Kukhta A., Bolshakova N., Matsyura A. Conceptual approaches to ornithological provision of aircraft flight safety. *Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye i sel'skokhozyaistvennye nauki* [Bulletin of Tuva state university. Natural and agricultural sciences]. 2017, no. 2(33), pp. 96–105. (In Russian)
9. Long P.R., Székely T., Kershaw M., O'Connell M. Ecological factors and human threats both drive wildfowl population declines. *Animal Conservation*. 2007, vol. 10, pp. 183–191.

10. Pakanen V.-T. Large scale climate affects the timing of spring arrival but local weather determines the start of breeding in a northern Little Tern (*Sternula albifrons*) population. *Ornis Fennica*. 2018, vol. 95, no. 4, pp. 178–184.
11. Sokolov L.V. Modern telemetry: new opportunities in ornithology. *Zoologicheskii zhurnal* [Zoological journal]. 2011, vol. 90, no. 7, pp. 861–882. (In Russian)
12. Ma R., Ma Sh., Wei Xu., Zheng J., Yuan Ch., Bo Sh., Yuan X., Ji L., Li Z., Shemyakin E., Tiuvon I., Sharshov K., Wang T., Wang Zh. Tracking migration of Eastern spot-billed ducks *Anas zonorhyncha* and Mallards *Anas platyrhynchos* wintering in Shanghai, China. *Waterbirds*. 2022, vol. 45, no. 4, pp. 467–478.
13. Li C., Zhao Q., Solovyeva D., Lameris T., Batbayar N., Bysyatova-harmey I., Lee H., Emelyanov V., Rozenfeld S.B., Park J., Shimada T., Koyama K., Moriguchi S., Hou J., Natsagdor T., Kim H., Davaasuren B., Damba I., Liu G., Hu B., Xu W., Gao D., Goroshko O., Antonov A., Prokopenko O., Tsend O., Stepanov A., Savchenko A., Danilov G., Germogenov N., Zhang J., Deng X., Cao L., Fox A.D. Population trends and migration routes of the East Asian Bean Goose *Anser fabalis middendorffii* and *A. f. serrirostris*. *Wildfowl*. 2020, vol. 6, pp. 124–156.
14. Kumari E.V. *Instruktsiya dlya izucheniya migratsii ptits* [Instructions for studying bird migrations]. Tartu, AN ESSR Publ., 1955. (In Russian)
15. Gavrilov E.I. O kolichestvennoi kharakteristike vidimyykh migratsii ptits [On the quantitative characteristics of visible bird migrations]. *Materialy Vsesoyuznoi konferentsii po migratsiyam ptits* [Materials of the All-Union Conference on bird migration]. Moscow, 1975, p. 1, pp. 51–55. (In Russian)
16. Dubovik A.D. On the ecology and stocks of Anseriformes of the Middle Ob river. *Voprosy zoologii* [Zoology issues]. 1966, pp. 141–143. (In Russian)
17. Korobitsyn I.G., Tyuten'kov O.Yu., Silin M.V., Bondarev A.Ya. Geneticheskoe i morfologicheskoe raznoobrazie gumennika *Anser fabalis* na yuge Zapadnoi Sibiri [Genetic and morphological diversity of Bean goose *Anser fabalis* in the south of Western Siberia]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi ornitologicheskoi konferentsii «Sovremennye problemy ornitologii Sibiri i Tsentral'noi Azii», Irkutsk, 2018* [Materials of the VI International Ornithological Conference “Modern problems of ornithology in Siberia and Central Asia”, Irkutsk, 2018]. Irkutsk, 2018, pp. 109–113. (In Russian)
18. Rozenfeld S.B., Zamyatin D.O., Vanzheliyev D., Kirtaev G.V., Rogova N.V., Kao L., Popovkina A.B. The taiga bean goose (*Anser fabalis fabalis*) in Yamalo-Nenets Autonomous okrug. Kazarka [Casarca]. 2018, iss. 20, pp. 28–52. (In Russian)
19. *Krasnaya kniga Rossiiskoi federatsii* [Red Book of Russian Federation, «Animals»]. Moscow, FGBU «VNIi Ekologiya» Publ., 2021, 2-nd edition, 1128 p. (In Russian)
20. *Krasnaya kniga Tomskoi oblasti* [Red Book of Tomsk region]. Elista, Prosvet Publ., 2023, 3-rd edition, 580 p. (In Russian)
21. Ivanov G.K. Reasons for the decline in the number of waterfowl on the lakes of Northern Kulunda. *Resursy vodoplavayushchei dichi v SSSR, ikh vosproizvodstvo i ispol'zovanie* [Waterfowl resources in the USSR, their reproduction and use]. 1968, pp. 36–37. (In Russian)
22. Dubovik A.D. O zapasakh vodoplavayushchei dichi v basseine srednei Obi [On waterfowl reserves in the middle Ob basin]. *Resursy vodoplavayushchei dichi v SSSR, ikh vosproizvodstvo i ispol'zovanie. Aziatskaya chast' SSSR* [Waterfowl resources in the USSR, their reproduction and use. Asian part of the USSR]. Moscow, 1968, part II, pp. 37–38. (In Russian)
23. Flint V.E., Krivenko V.G. Waterfowl of Eurasia. *Okhota i okhotnich'e khozyaistvo* [Hunting and game management]. 1999, no. 4, pp. 1–2. (In Russia)
24. Tyutenkov O.Yu., Korobitsyn I.G. Vliyanie vesennei okhoty na vodoplavayushchikh ptits yugo-vostoka Zapadnoi Sibiri [The influence of spring hunting on waterfowl in the southeast of Western Siberia]. *Tezisy doklada Mezhdunarodnoi konferentsii «Guseobraznye Severnoi Evrazii: izuchenie, sokhranenie i ratsional'noe ispol'zovanie», Salekhard, 30 noyabrya – 5 dekabrya 2015* [Abstracts of the report of the International Conference “Anseriformes of Northern Eurasia: study, conservation and rational use”, Salekhard, 30 November – 5 December 2015]. Salekhard, 2015, pp. 90–91. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Игорь Г. Коробицын собирал материал, проводил расчеты и анализ, писал текст рукописи. Олег Ю. Тютеньков собирал материал, участвовал в анализе и обсуждении. Андрей С. Панин собирал материал, обсуждал результаты. Евгений Б. Мурзаханов собирал материал, участвовал в обсуждении. Андрей В. Баздырев собирал материал, участвовал в обсуждении. 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

Igor G. Korobitsyn collected material, carried out calculations and analysis and wrote the text of the manuscript. Oleg Yu. Tyutenkov collected material and participated in analysis and discussion. Andrey S. Panin collected material and discussed the results. Evgeniy B. Murzakhanov collected material and participated in discussion. Andrey V. Bazdyrev collected material and participated in the discussion. 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

Игорь Г. Коробицын / Igor G. Korobitsyn <https://orcid.org/0000-0001-7709-3004>

Олег Ю. Тютеньков / Oleg Yu. Tyutenkov <https://orcid.org/0000-0003-0878-3890>

Андрей С. Панин / Andrey S. Panin <https://orcid.org/0009-0004-2383-9770>

Евгений Б. Мурзаханов / Evgeniy B. Murzakhanov <https://orcid.org/0009-0001-9412-1377>

Андрей В. Баздырев / Andrey V. Bazdyrev <https://orcid.org/0009-0009-7941-0849>

Оригинальная статья / Original article

УДК 619.616.995

DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-4



О фауне паразитов желудочно-кишечного тракта мелкого рогатого скота в горной зоне Армении

Роза Э. Барсемян¹, Роза А. Петросян¹, Карине В. Аюбян¹, Марине В. Варданян¹, Маня А. Никогосян¹, Нелли Э. Барсемян¹, Раиса Роз А. Жакмакян¹, Нарек Н. Тадевосян¹, Заруи М. Дудукчян¹, Мадина З. Магомедова², Патимат Д. Магомедова², Лаура Дж. Арутюнова¹

¹Научный центр зоологии и гидроэкологии НАН РА, Ереван, Армения

²Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

Контактное лицо

Роза Э. Барсемян, младший научный сотрудник, Научный центр зоологии и гидроэкологии НАН РА; 0014 Республика Армения, г. Ереван, ул. П. Севака 7.

Тел. +37498775451

Email roza-barseghyan@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0009-0000-4762-0475>

Формат цитирования

Барсемян Р.Э., Петросян Р.А., Аюбян К.В., Варданян М.В., Никогосян М.А., Барсемян Н.Э., Жакмакян Р.Р.А., Тадевосян Н.Н., Дудукчян З.М., Магомедова М.З., Магомедова П.Д., Арутюнова Л.Дж. О фауне паразитов желудочно-кишечного тракта мелкого рогатого скота в горной зоне Армении // Юг России: экология, развитие. 2024. Т.19, N 2. С. 33-39. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-4

Получена 22 февраля 2024 г.

Прошла рецензирование 14 апреля 2024 г.

Принята 26 апреля 2024 г.

Резюме

Целью исследований является изучение инвазированности мелкого рогатого скота в горной зоне Армении в течение летнего и осеннего периодов, определение инвазированности паразитами пищеварительного тракта овец.

Материалом служили фекалии, собранные от овец на пастбищах, а также моллюски и оribатидные клещи – промежуточные хозяева биогельминтов в прибрежной зоне реки Гетик в течение 2022 года.

Работа выполнена в Научном Центре зоологии и гидроэкологии НАН Республики Армения.

В результате изучения инвазированности мелкого рогатого скота в горной зоне Армении определен таксономический состав паразитов. Гельминты, обнаруженные у овец, относятся к классам Trematoda, Cestoda и Nematoda, простейшие – к классу Protozoa.

В осенний сезон встречались представители семи родов паразитов желудочно-кишечного тракта – *Dicrocoelium*, *Fasciola*, *Moniezia*, *Nematodirus*, *Strongylus*, *Trichuris*, *Eimeria*, в летний сезон были обнаружены представители только пяти родов – *Dicrocoelium*, *Moniezia*, *Nematodirus*, *Strongylus*, *Eimeria*.

Из результатов проведенных исследований следует, что природно-климатические факторы среды оказывают существенное влияние на инвазированность овец в горном регионе Армении. Все обнаруженные нами паразиты оказывают пагубное воздействие на организм овец. Однако применяемые в хозяйствах рациональные методы дегельминтизации и эффективные лечебные средства предотвращают развитие болезней овец.

Ключевые слова

Овцеводство, желудочно-кишечные паразиты, биогельминты, геогельминты, промежуточные хозяева, река Гетик.

On the fauna of parasites of the gastrointestinal tract of small ruminants in the mountainous zone of Armenia

Roza E. Barseghyan¹, Roza A. Petrosyan¹, Karine V. Akopyan¹, Marine V. Vardanyan¹,
Manya A. Nikoghosyan¹, Nelli E. Barseghyan¹, Raisa Rose A. Jakmakian¹, Narek N. Tadevosyan¹,
Zaruhi M. Dudukchyan¹, Madina Z. Magomedova², Patimat D. Magomedova² and Laura J. Harutyunova¹

¹Scientific Centre of Zoology and Hydroecology, National Academy of Sciences, Republic of Armenia, Yerevan, Armenia

²Dagestan State University, Makhachkala, Russia

Principal contact

Roza E. Barseghyan, junior researcher, Scientific Centre of Zoology and Hydroecology, National Academy of Sciences, Republic of Armenia;
7 Paruyr Sevak St, Yerevan, Republic of Armenia 0014.

Tel. +37498775451

Email roza-barseghyan@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0009-0000-4762-0475>

How to cite this article

Barseghyan R.E., Petrosyan R.A., Akopyan K.V., Vardanyan M.V., Nikoghosyan M.A., Barseghyan N.E., Jakmakian R.R.A., Tadevosyan N.N., Dudukchyan Z.M., Magomedova M.Z., Magomedova P.D., Harutyunova L.J. On the fauna of parasites of the gastrointestinal tract of small ruminants in the mountainous zone of Armenia. *South of Russia: ecology, development*. 2024; 19(2):33-39. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-4

Received 22 February 2024

Revised 14 April 2024

Accepted 26 April 2024

Abstract

The aim of the research is to study the parasitic invasion of small ruminants in the mountainous zone of Armenia during summer and autumn, in this case to determine the invasiveness of parasites of the digestive tract of sheep.

The material was feces collected from sheep on pastures in the coastal zone of the Getik River during 2022. The work was carried out at the Scientific Centre of Zoology and Hydroecology, National Academy of Sciences, Republic of Armenia. The material researched also included mollusks and oribatid mites – intermediate hosts of biohelminths.

As a result of the study of parasitic invasion of small ruminants in the mountain zone of Armenia, the taxonomic composition of parasites was determined. Helminths found in sheep belong to the classes Trematoda, Nematoda, and Cestoda, protozoa – to the class Protozoa.

In the autumn season, representatives of seven genera of parasites of the gastrointestinal tract were found – *Moniezia*, *Dicrocoelium*, *Fasciola*, *Nematodirus*, *Strongylus*, *Trichuris*, *Eimeria*, while in the summer season, only representatives of five genera were found – *Moniezia*, *Dicrocoelium*, *Nematodirus*, *Strongylus*, *Eimeria*.

As a result of these studies, it can be concluded that natural and climatic factors of the environment have a significant impact on the structure of the helminth complex of sheep in the mountain region of Armenia.

All parasites found can have a detrimental effect on the sheep's body. However, the severity of the invasion in the samples taken is not at the level that could lead to serious diseases in sheep. This suggests that the treatment methods used on farms are at a fairly high level.

Key Words

Sheep breeding, gastrointestinal parasites, biohelminths, geohelminths, intermediate hosts, Getik River.

ВВЕДЕНИЕ

Овцеводство является одной из важных традиционных отраслей животноводства Армении, с учетом климатических условий, пастбищ и потребностей рынка страны. Исходя из этого, несколько лет назад правительством была принята программа «Содействия развитию овцеводства и козоводства в Республике Армения на 2019–2023 годы».

В 60–70-е гг. 20-го века в республике было разведено более 2 млн овец, после чего количество голов овец резко сократилось. Однако, благодаря предпринятым мерам, за последние годы в Республике Армения значительно увеличился прирост поголовья овец и коз. Овцеводство наиболее развито в предгорных и горных зонах республики. Наибольшее количество поголовья сосредоточено в Гегаркуникском и Тавушском регионах республики. Увеличению поголовья мелкого рогатого скота, получению экологически безопасных продуктов в значительной мере препятствуют различные паразитарные болезни животных, среди которых наиболее распространенными являются гельминтозы: фасциолез, дикроцелиоз, стронгилятозы пищеварительного тракта. Гельминтозы причиняют большой социально – экономический ущерб народному хозяйству Армении.

Зараженность овец желудочно-кишечными паразитами является одной из основных экономических проблем, затрагивающих овцеводство [1]. В настоящее время известно более 8 тыс. видов гельминтов, среди которых только у сельскохозяйственных и промысловых животных насчитывается свыше 2 тыс. [2].

Мониторинг паразитарных болезней мелкого рогатого скота в горной зоне Армении (прибрежная зона реки Гетик) показал широкое распространение гельминтозов с различной степенью инвазированности животных.

Целью исследования является изучение инвазированности мелкого рогатого скота в горной зоне Армении (прибрежная зона реки Гетик) в летне-осенний период, определение структуры паразитоценоза пищеварительного тракта животных.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования зараженности овец гельминтами и простейшими проведены в горной зоне Армении, в июле и октябре 2022 года. Образцы фекалий были собраны у овец на пастбищах в прибрежной зоне реки Гетик: в Тавушском марзе – село Хачардзан и в Гегаркуникском марзе – села Дзораванк, Антарамеч, Ттуджур и Чамбарак (рис. 1).

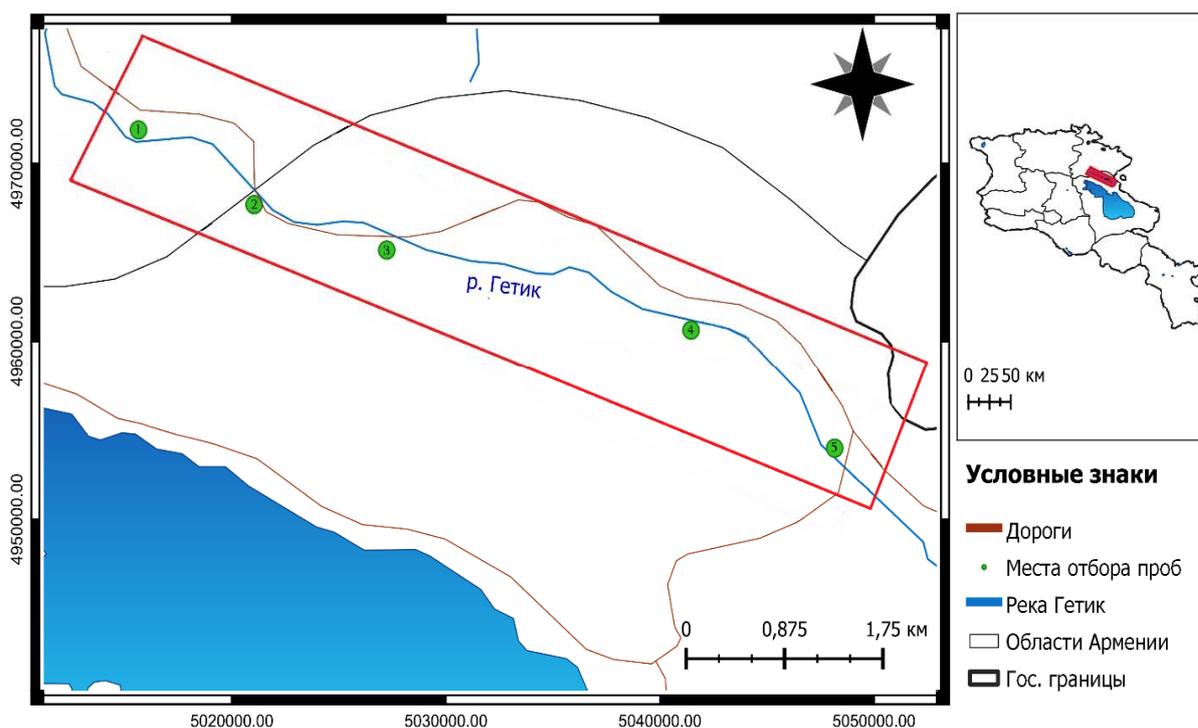


Рисунок 1. Места отбора проб

Места отбора проб взяты в красный прямоугольник. В Тавушском марзе – село Хачардзан (1), Гегаркуникском марзе – село Дзораванк(2), Антарамеч(3), Ттуджур(4) и Чамбарак (5)

Figure 1. Sampling locations

Sampling locations are within the red rectangle. In Tavush Marz – Khachardzan village (1). In Gegharkunik Marz – Dzoravank village (2), Antaramech (3), Ttujur (4) and Chambarak (5)

Собранные образцы хранились в промаркированных пластиковых контейнерах. Копровоскопические исследования были проведены в лаборатории паразитологии Института Зоологии Научного центра зоологии и гидроэкологии НАН РА.

Всего было исследовано 60 проб фекалий овец. Исследования проводили общепринятыми в паразито-

логии методами (седиментационным методом последовательного промывания образцов и методом Фюллеборна для обнаружения яиц кишечных паразитов) [3].

В результате исследований был выявлен таксономический состав паразитов [4–8] и выявлена разница в частоте их встречаемости между осенним и летним

сезонами. Были установлены также показатели экстенсивности инвазии (ЭИ), интенсивности инвазии (ИИ), а также индексы паразитокомплекса (ИП).

Экстенсивность инвазии (EI) рассчитывали по формуле:

$$EI = \frac{n}{N} * 100$$

где n – число зараженных особей хозяев; N – число исследованных особей хозяев;

Интенсивность инвазии (II) – рассчитывали по формуле.

$$II = \frac{m}{n}$$

где m – число обнаруженных гельминтов или ооцисты гельминтов, n – число зараженных особей хозяев.

Индексы паразитокомплекса (ИП) рассчитывали по формуле:

$$ИП = \frac{\sum ЭИ_i}{\sum ЭИ} \times 100$$

где ИП – индекс паразитоценоза; $\sum ЭИ_i$ – экстенсивность инвазии отдельно взятого вида, рода; $\sum ЭИ$ – сумма показателей экстенсивности инвазии. Для представления цифрового материала в более удобном виде полученные результаты умножают на 100.

Для выявления интенсивности кокцидиозной инвазии 1 мл взвеси, содержащей ооцисты, помещают в камеру Горяева. Поскольку объем камеры Горяева составляет 0,9 м³, количество подсчитанных ооцист умножали на 1111. Полученное число адекватно количеству ооцист в 1 см³ раствора.

Слабая инвазированность (+) – до 10000 ооцист на 1 г.

Средняя инвазированность (++) – до 100000 ооцист на 1 г.

Сильная инвазированность (+++) – больше 100000 ооцист на 1 г.

Также было собрано 500 экземпляров моллюсков, которые являются промежуточными хозяевами дикроцелий. Моллюски собирались вручную. Часть собранных моллюсков фиксировали в 70 % спирте для дальнейшего определения их видовой принадлежности, а другую часть вскрывали по общепринятым методам. Для изучения сезонной динамики инвазированности моллюсков парзенидами дикроцелий, ежемесячно, с июля по октябрь проводили вскрытие двух видов моллюсков – *Helicella derbentina* (Krynicky, 1838) и *Narapeopsis hohenackeri* (L. Pfeiffer, 1848), по 50 экземпляров каждого вида. Плотность населения моллюсков определяли на участках площадью 1–5 м².

Изучали также видовой состав и сезонную инвазированность обследованных пастбищ орибатидами клещами. С каждой точки было исследовано по 4 почвенных пробы. В лабораторных условиях из собранных почвенных проб было выделено 95 экз. клещей рода *Schelorbates*.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе наших исследований установлена зараженность овец как гельминтами, так и простейшими. Гельминты, обнаруженные у овец, относятся к классам Trematoda, Nematoda и Cestoda, простейшие к классу Protozoa. Всего было обнаружено семь родов желудочно-

кишечных паразитов. Были выявлены 3 вида нематод (*Nematodirus spathiger*, *Strongylus* sp., *Trichuris ovis*), 2 вида трематод (*Dicrocoelium dendriticum*, *Fasciola hepatica*), 2 вида цестод (*Moniezia expansa* и *M. benedeni*), а из простейших различные представители рода *Eimeria*.

Простейшие и гельминты регистрировались как в моноинвазии, так и в смешанной инвазии.

В результате овоскопических исследований установлено, что осенью у овец частота встречаемости трематод (в частности *Dicrocoelium dendriticum*) была самой высокой и составляла – 62.67 %. Показатели частоты встречаемости нематод и цестод в фекалиях овец были ниже и составили 17.96 %, и 3.17 % соответственно. Частота встречаемости простейших осенью также была низкой по сравнению с трематодами и составила 16.20 %.

В летний сезон встречаемость трематод также была высокой по сравнению с другими таксонами (нематоды и цестоды) и составляла 46.80 %, частота встречаемости нематод снижалась в летний сезон по сравнению с осенним. Показатели встречаемости цестод, наоборот, повышались в летний сезон – 13.10 % по сравнению с осенним – 3.17 %. В летний период частота встречаемости простейших (эймерий) повышалась и составила – 33.8 %, в то время как в осенний период показатели понижались и были на уровне 16.2 % (рис. 2).

Одним из факторов зараженности сельскохозяйственных животных некоторыми важными биогельминтами являются моллюски [9; 10]. В Армении наибольшее значение имеет фасциолез – печеночный трематодоз всех видов скота, вызываемый *Fasciola hepatica* и *Fasciola gigantica*. Основными промежуточными хозяевами этих гельминтов служат пресноводные моллюски *Lymnaea (Galba) truncatula* и *Lymnaea (Radix) auricularia*, они способны заселять любые стоячие и текущие водоемы, от ключей до рек и от болот до озер, образуя обычно многочисленные популяции. Основным промежуточным хозяином для *Fasciola hepatica* является моллюск *Lymnaea (Galba) truncatula*, а для *Fasciola gigantica* – *Lymnaea (Radix) auricularia*.

Большинство сельскохозяйственных животных в Армении поражаются также дикроцелиозом – возбудителем которого является *Dicrocoelium lanceatum*, наиболее распространенный в горных районах. Промежуточными хозяевами их являются наземные моллюски – *Helicella derbentina* (Krynicky, 1838) и *Narapeopsis hohenackeri* (L. Pfeiffer, 1848).

Некоторые цестоды также являются биогельминтами, такие как *Moniezia expansa* и *M. benedeni* промежуточные хозяева которых орибатидами клещи (*Schelorbates* sp.), численность которых летом повышается, соответственно повышается и численность цестод в летний сезон. Осенью численность клещей в почве уменьшается, так как они зарываются в более глубокие слои почвы, соответственно и численность цестод также уменьшается.

Количество нематод, наоборот, летом уменьшается, что связано с экологическими условиями данного региона Армении. К началу лета происходит естественное очищение организма овец от данной группы гельминтов в результате проведения профилактических мероприятий – дегельминтизации и использования некоторых видов растительности на пастбище, имеющих антгельминтные свойства.

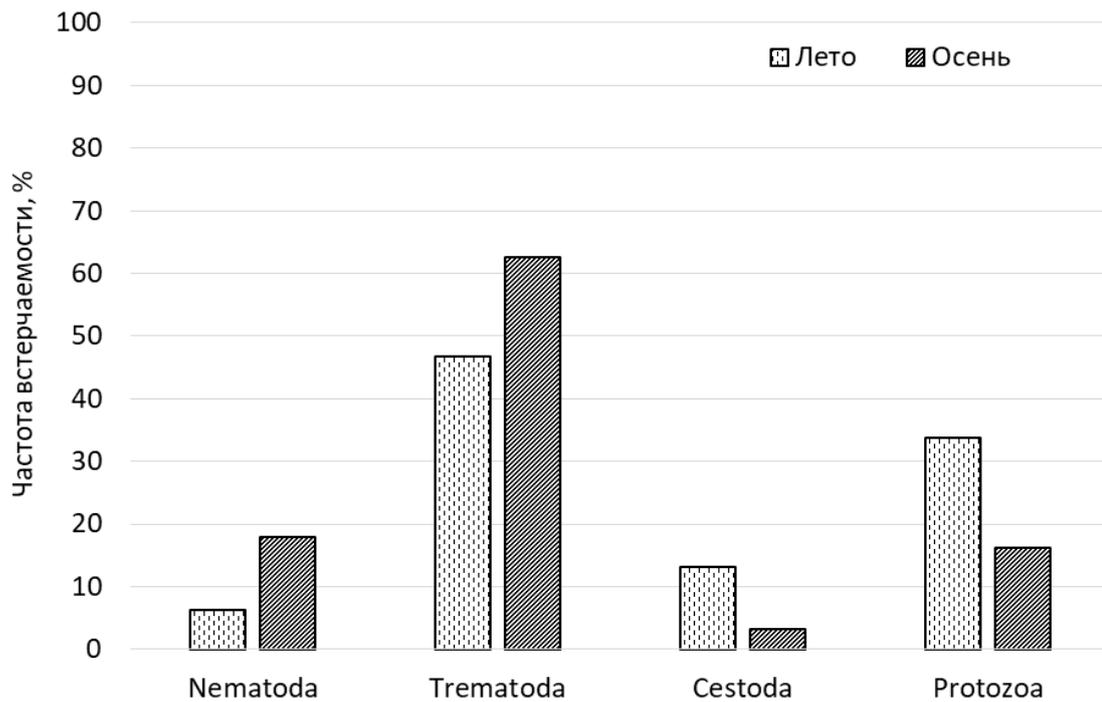


Рисунок 2. Частота встречаемости желудочно-кишечных паразитов в фекалиях овец в горной зоне Армении
Figure 2. Frequency of occurrence of gastrointestinal parasites in sheep feces in the mountainous zone of Armenia

Овцы на обследованных пастбищах были заражены как гельминтами, так и простейшими паразитами (*Eimeria* sp.).

Обычно вспышка кокцидиоза у животных наблюдается в весенне-осенний период. Источниками заражения являются загрязненные ооцистами трава, сено, почва на выгулах и вольерах, питьевая вода.

В результате овоскопических исследований установлено, что с лета по осень степень зараженности овец трематодами и нематодами повышалась, а степень зараженности цестодами, наоборот снижалась. Степень зараженности овец простейшими не изменилась (табл. 1).

Как в летний, так и в осенний период среди гельминтов доминировал *Dicrocoelium dendriticum*

(ИИ – 52.0–44.0), на втором месте были простейшие *Eimeria* sp. – среднее количество ооцист в 1 грамме фекалий составляло в летний период – 1055450, а в осенний период – 508289.

Eimeria sp. выступает как сопутствующая инвазия, что является обычным явлением при желудочно-кишечных инвазиях.

В образцах, собранных в осенний период, были обнаружены виды, относящиеся к семи родам желудочно-кишечных паразитов, тогда как в летний сезон обнаружены виды, относящиеся только к пяти родам.

Fasciola hepatica и *Trichuris ovis* были зафиксированы только в осенний сезон.

Таблица 1. Экстенсивность и интенсивность зараженности овец желудочно-кишечными паразитами в летний и осенний сезоны

Table 1. Prevalence and intensity of gastrointestinal parasite infection in sheep in summer and autumn seasons

Роды Genus	Лето / Summer		Осень / Autumn	
	Экстенсивность инвазии, % Prevalence of invasion, %	Интенсивность инвазии Intensity of invasion	Экстенсивность инвазии, % Prevalence of invasion, %	Интенсивность инвазии Intensity of invasion
Moniezia	50,00	15	15,79	12
Dicrocoelium	50,00	52	78,95	44
Fasciola	0,00	0	5,26	1
Nematodirus	25,00	2	31,59	3
Strongylus	50,00	6	52,63	15
Trichuris	0,00	0	52,63	4
Eimeria	50,00	1055450	50,00	508289

В структуре гельминтоценоза животных доминировали трематоды в осенний сезон. Суммарный ИП трематод (*Dicrocoelium dendriticum*, *Fasciola hepatica*) составлял осенью – 38,36. В осенний период субдоминирующее положение занимали нематоды, их суммарный ИП

(*Nematodirus spatiger*, *Strongylus* sp., *Trichuris ovis*) составлял – 27,40.

Максимальный ИП у цестод (*Moniezia expansa* и *M. benedeni*) зарегистрирован в летний сезон с показателями – 25,00 (табл. 2).

Таблица 2. Структура желудочно-кишечного паразитоценоза овец в горной зоне Армении
Table 2. Structure of gastrointestinal parasitocenosis of sheep in the mountainous zone of Armenia

Сезон Season	ИП / IP			
	Nematoda	Trematoda	Cestoda	Protozoa
Лето / Summer	25,00	25,00	25,00	25,00
Осень / Autumn	27,40	38,36	8,22	26,03

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате изучения паразитоценоза желудочно-кишечного тракта овец в прибрежной зоне реки Гетик Гегаркуникского и Тавушского регионов Армении, установлено, что частота встречаемости паразитов была разной в разные сезоны. В осенний сезон встречались представители семи родов паразитов желудочно-кишечного тракта, такие как – *Moniezia expansa* и *M. benedeni*, *Dicrocoelium dendriticum*, *Fasciola hepatica*, *Nematodirus spathiger*, *Strongylus* sp., *Trichuris ovis*, *Eimeria* sp., тогда как в летний сезон были обнаружены представители только пяти родов *Moniezia expansa* и *M. benedeni*, *Dicrocoelium dendriticum*, *Nematodirus spathiger*, *Strongylus* sp., *Eimeria* sp.. У обследованных овец обычно встречались как желудочно-кишечные нематоды, трематоды, цестоды, так и простейшие. Наиболее распространенным видом является *Dicrocoelium dendriticum* (46.8–62.55 %), на втором месте – *Eimeria* sp. (16.12–33.8 %).

В результате проведенных исследований можно заключить, что природно-климатические факторы среды оказывают существенное влияние на структуру гельминтокомплекса овец в горном регионе Армении.

Все обнаруженные нами паразиты оказывают пагубное воздействие на организм овец. Однако применяемые в хозяйствах рациональные методы дегельминтизации и эффективные лечебные средства предотвращают развитие болезней овец. Это говорит о том, что применяемые в исследованных нами хозяйствах методы лечения находятся на достаточно высоком уровне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Abo El Hadid S.M., Lotfy H.S. Some studies on enteric parasites of sheep in Beni-Suef Governorate // Journal of Veterinary Medical Research. 2007. N 17(1). P. 11–18. DOI: 10.21608/jvmr.2007.77887
2. Федоров В.Х., Миронова Л.П. Общая паразитология и гельминтология: учебное пособие / сост.: Тазаян А.Н., Донской ГАУ. Персиановский: Донской ГАУ, 2019. 159 с
3. Նախաշյան Յ. Զ. Հենդանիների ինվազիոն հիվանդություններ // Երևան 2006 Էջ՝ 8 (246)
4. Штанчаева У.Я., Субиас Л.С. Каталог панцирных клещей Кавказа. Махачкала: ДНЦ РАН, 2010. 276 с.
5. Pellerdy L. Coccidia and Coccidiosis. Budapest, 1974. 959 p.
6. Мовсесян С.О., Чубарян Ф.А., Никогосян М.А. Трематод фауны юга Малого Кавказа. Москва: Наука, 2004. 279 с.

7. Мовсесян С.О., Чубарян, Ф.А., Никогосян М.А. Цестоды фауны юга Малого Кавказа. Ин-т паразитологии РАН. М.: Наука, 2006. 331 с.
8. Мовсесян С.О., Никогосян М.А., Петросян Р.А., Кузнецов Д.Н. Нематоды и акантоцефалы фауны юга Малого Кавказа. Центр паразитологии Ин-та проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2017. 445 с.
9. Акрамовский Н.Н. Моллюски. Ереван: Изд-во Акад. наук Арм. ССР, 1976. 265 с.
10. Лихарев И.М. Наземные моллюски фауны СССР. Москва, Ленинград: Изд-во Акад. наук СССР, 1952. 511 с.

REFERENCES

1. Abo El S.M., Lotfy H.S. Some studies on enteric parasites of sheep in Beni-Suef Governorate. *Journal of Veterinary Medical Research*, 2007, no. 17(1), pp. 11–18. DOI: 10.21608/jvmr.2007.77887
2. Fedorov V.Kh., Mironova L.P. *Obshchaya parazitologiya i gel'mintologiya: uchebnoe posobie* [General parasitology and helminthology: a textbook]. Persianovsky, Donskoy State Agrarian University Publ., 2019, 159 p. (In Russian)
3. Naghashyan H.Z. Kendanineri invazion hivandutyunner [Invasive diseases of animals]. Yerevan, 2006, 246 p. (In Armenian)
4. Shtanchaeva U.Ya., Subias L.S. Katalog pantsirnykh kleshchei Kavkaza [Catalog of Oribatid mites from the Caucasus]. Makhachkala, DSC RAS Publ., 2010, 276 p. (In Russian)
5. Pellerdy L. Coccidia and Coccidiosis. Budapest, 1974, 959 p.
6. Movsesyan S.O., Chubaryan F.A., Nikoghosian M.A. *Trematody fauny yuga Malogo Kavkaza* [Trematodes of the fauna of the south of the Lesser Caucasus]. Moscow, Nauka Publ., 2004, 279 p. (In Russian)
7. Movsesyan S.O., Chubaryan F.A., Nikoghosyan M.A. *Tsestody fauny yuga Malogo Kavkaza* [Cestodes of the fauna of the south of the Lesser Caucasus]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 331 p. (In Russian)
8. Movsesyan S.O., Nikoghosyan, M.A. Petrosyan R.A., Kuznetsov D.N. *Nematody i akantotsefaly fauny yuga Malogo Kavkaza* [Nematodes and Acanthocephalens of the fauna of the south of the Lesser Caucasus]. Moscow, KMK Scientific Press Publ., 2017, 445 p. (In Russian)
9. Akramovskii N.N. *Mollyuski* [Mollusks]. Yerevan, Publishing House of the Academy of Sciences of the Armenian SSR, 1976, 265 p. (In Russian)
10. Likharev I.M. *Nazemnye mollyuski fauny SSSR* [Terrestrial mollusks of the fauna of the USSR]. Moscow–Leningrad, AS USSR Publ., 1952, 511 p. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Роза Э. Барсегян проводила лабораторное обследование и определение собранного паразитологического материала. Роза А. Петросян и Маня А. Никогосян проводили определение гельминтологического материала. Карине В. Акопян участвовала в написании рукописи. Марине В. Варданян проводила определение собранного материала по клещам. Нелли Э. Барсегян принимала участие в картировании и математических расчетах. Раиса Роз А. Жакмакян, Нарек Н. Тадевосян, Заруи М. Дудукчян принимали участие в лабораторных исследованиях и переводе рукописи. Мадина З. Магомедова, Патимат Д. Магомедова, Лаура Дж. Арутюнова проводила определение собранного малакофаунистического материала. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи, и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Rosa E. Barseghyan carried out laboratory examinations and the determination of the collected parasitological material. Rosa A. Petrosyan and Manya A. Nikoghosyan carried out the identification of helminthological material. Karine V. Akopyan participated in writing the manuscript. Marine V. Vardanyan performed the identification of the collected materials. Nelli E. Barseghyan took part in mapping and mathematical calculations. Raisa Rose A. Jakmakian, Narek N. Tadevosyan and Zaruhi M. Dudukchyan participated in laboratory research and the translation of the manuscript. Madina Z. Magomedova, Patimat D. Magomedova. and Laura J. Harutyunova carried out the identification of the collected malacofaunal material. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Роза Э. Барсегян / Roza E. Barseghyan <https://orcid.org/0009-0000-4762-0475>

Роза А. Петросян / Roza A. Petrosyan <https://orcid.org/0009-0000-4559-4138>

Карине В. Акопян / Karine V. Akopyan <http://orcid.org/0009-0000-5326-7954>

Марине В. Варданян / Marine V. Vardanyan <http://orcid.org/0009-0000-5610-0375>

Маня А. Никогосян / Manya A. Nikoghosyan <https://orcid.org/0009-0003-3071-8179>

Нелли Э. Барсегян / Nelli E. Barseghyan <https://orcid.org/0000-0002-2819-093X>

Раиса Роз А. Жакмакян / Raisa Rose A. Jakmakian <https://orcid.org/0009-0005-4959-0544>

Нарек Н. Тадевосян / Narek N. Tadevosyan <https://orcid.org/0009-0000-7893-3087>

Заруи М. Дудукчян / Zaruhi M. Dudukchyan <https://orcid.org/0009-0008-0283-8970>

Мадина З. Магомедова / Madina Z. Magomedova <https://orcid.org/0000-0001-8425-1664>

Патимат Д. Магомедова / Patimat Z. Magomedova <https://orcid.org/0000-0001-6072-1094>

Лаура Дж. Арутюнова / Laura J. Harutyunova <http://orcid.org/0000-0001-7814-6577>

Оригинальная статья / Original article
УДК 595.772+599.426(476)
DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-5



Видовой состав, распространение, хост-специфичность, морфологические и генетические особенности мух кровососок рукокрылых (Diptera, Nycteribiidae) в Беларуси

Александра И. Ларченко¹, Ульяна В. Горобейко², Екатерина В. Маковецкая¹, Павел С. Кирьянов³

¹Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам, Минск, Беларусь

²Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии Дальневосточного отделения

Российской академии наук, Владивосток, Россия

³Институт леса НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

Контактное лицо

Александра И. Ларченко, научный сотрудник лаборатории популяционной экологии наземных позвоночных и управления биоресурсами ГНПО «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам»; 220072 Республика Беларусь, г. Минск, ул. Академическая, д. 27.
Тел. +375291128849
Email alexa.lar@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2332-6914>

Формат цитирования

Ларченко А.И., Горобейко У.В., Маковецкая Е.В., Кирьянов П.С. Видовой состав, распространение, хост-специфичность, морфологические и генетические особенности мух кровососок рукокрылых (Diptera, Nycteribiidae) в Беларуси // Юг России: экология, развитие. 2024. Т.19, N 2. С. 40-56. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-5

Получена 16 марта 2024 г.

Прошла рецензирование 10 апреля 2024 г.

Принята 26 апреля 2024 г.

Резюме

Цель – определить видовой состав мух кровососок (Diptera: Nycteribiidae), паразитирующих на рукокрылых, на территории Беларуси. Обозначить области их распространения и виды хозяев-прокормителей. Установить таксономическое положение белорусских образцов Nycteribiidae.

Собственная коллекция мух кровососок, собранная в 2019–2023 гг. на территории Беларуси. Видовая идентификация проводилась как по морфологическим признакам, так и с помощью молекулярно-генетических методов.

Для территории Беларуси характерна видовая спецификация пауциц на рукокрылых-прокормителей: *P. monoceros* встречается преимущественно на ночнице прудовой, отмечена в северной части страны; *N. kolenatii* широко распространена по всей территории Беларуси, отмечена только на ночнице водяной. Выявлены отклонения некоторых таксономически значимых признаков изученных особей *N. kolenatii* от приведенных в определительных ключах и описаниях видов. Особи, представленные в GenBank как *N. kolenatii*, представляют собой три различные генетические линии. Белорусские образцы принадлежат к центральному гаплотипу КН1.

Муши-пауцицы в Беларуси обнаружены на двух видах рукокрылых: *M. daubentonii* и *M. dasycneme*. Генетическая неоднородность представителей вида *N. kolenatii* и обнаруженная вариабельность таксономически значимых морфологических признаков может свидетельствовать как о неправильной видовой идентификации депонированных в GenBank сиквентов *N. kolenatii*, так и о присутствии криптических видов среди представителей данной группы. Скрытое генетическое разнообразие и выявленные морфологические особенности видов рода *Nycteribia* требуют дальнейшего изучения, включая таксономическую ревизию на основе комплексного морфологического и генетического анализа.

Ключевые слова

Nycteribiidae, эктопаразиты, рукокрылые, пауцицы, *Penicillidia monoceros*, *Nycteribia kolenatii*.

Species composition, distribution, host-specificity, morphological and genetic characteristics of bat flies (Diptera, Nycteribiidae) in Belarus

Aleksandra I. Larchanka¹, Uliana V. Gorobeyko², Ekaterina V. Makovetskaya¹ and Pavel S. Kiryanov³

¹Scientific and Practical Centre for Bioresources, National Academy of Sciences, Minsk, Belarus

²Federal Scientific Centre, East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

³Forest Research Institute, Gomel, Belarus

Principal contact

Aleksandra I. Larchanka, Researcher, Laboratory of Population Ecology of Terrestrial Vertebrates and Bioresource Management SNPO, Scientific and Practical Centre for Bioresources, National Academy of Sciences of Belarus; 220072, 27 Akademicheskaya St, Minsk, Belarus.
Tel. +375291128849
Email alexa.lar@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2332-6914>

How to cite this article

Larchanka A.I., Gorobeyko U.V., Makovetskaya E.V., Kiryanov P.S. Species composition, distribution, host-specificity, morphological and genetic characteristics of bat flies (Diptera, Nycteribiidae) in Belarus. *South of Russia: ecology, development*. 2024; 19(2):40-56. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-5

Received 16 March 2024

Revised 10 April 2024

Accepted 26 April 2024

Abstract

To determine the species composition of bat flies (Diptera: Nycteribiidae) in Belarus and to indicate their areas of distribution and hosts. To establish the taxonomic position of Belarusian specimens of Nycteribiidae.

Own collection of bat flies, collected in 2019–2023 in Belarus. Species identification was carried out both by morphological characteristics and using molecular genetic methods.

There species preferences on hosts of bat flies in Belarus: *P. monoceros* is found mainly on *M. dasycneme*, recorded in the northern part of the country; *N. kolenatii* is widespread throughout Belarus, and recorded only on the *M. daubentonii*. Deviations of some morphological characteristics from the keys and descriptions of the species of the *N. kolenatii* individuals studied were revealed. The individuals presented in GenBank as *N. kolenatii* represent three different genetic lines. The Belarusian samples belong to the central haplotype KH1.

Bat flies in Belarus were found on two species of bats: *M. daubentonii* and *M. dasycneme*. The genetic heterogeneity of representatives of *N. kolenatii* and the detected variability of taxonomically significant morphological characters may indicate both incorrect species identification of *N. kolenatii* sequences deposited in GenBank, as well as the presence of cryptic species among representatives of this group. The hidden genetic diversity and identified morphological features of species of the genus *Nycteribia* require further study, including taxonomic revision based on comprehensive morphological and genetic analysis.

Key Words

Nycteribiidae, ectoparasites, bats, bat flies, *Penicillidia monoceros*, *Nycteribia kolenatii*.

ВВЕДЕНИЕ

Пауцины, или никтерибиды, – семейство специализированных паразитов летучих мышей, представленное в Палеарктике 55 видами [1]. Эта группа во многих регионах слабо изучена в силу особенностей своей экологии, которые затрудняют сбор материала. Для Беларуси в 1982 году специалист по данной группе Г.В. Фарафонов упоминала об обитании пяти видов пауцинов в БССР [2], однако не приводила конкретного списка. В 2020 г. удалось подтвердить обитание в Беларуси двух видов – *Penicillidia monoceros* Speiser, 1900 и *Nycteribia kolenatii* Theodor & Moscona, 1954 [3].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Учетные ловы рукокрылых проводились с 2019 по 2023 гг. в летний сезон. Отловы проводились по стандартной методике с использованием нейлоновых паутинных сетей длиной от 6 до 10 м в ночное время суток. Видовая идентификация проведена при помощи ключей для определения рукокрылых [4]. У пойманных летучих мышей определяли основные характеристики, а также собирали пробы эктопаразитов, обнаруженных на животном. Насекомые собирались пинцетом, после чего помещались в пробирки с 70 % этиловым спиртом для хранения и дальнейшей камеральной обработки. Видовая принадлежность никтерибид устанавливалась по определительным ключам для данной группы насекомых [5], а также для некоторых экземпляров с помощью молекулярно-генетических методов. Фотографии генитальных структур сделаны с помощью микроскопа Euromex NSZ-810, камеры Euromex CMEX-5 DC.5000-Pro и программного обеспечения ImageFocus Alpha v. 1.3.7.19879.20211123.

Получение препаратов суммарной ДНК осуществлялось с использованием модифицированного СТАВ-метода. В качестве маркерного региона выбран фрагмент митохондриального гена субъединицы I цитохром с-оксидазы (mtCOI), фланкированного олигонуклеотидными праймерами

следующего состава: LCO1490 (5'-GGTCAACAATCATAAAGATATTGG-3') и HCO2198 (5'-TAAACTTCAGGGTGACCAAAAAATCA-3') [6].

Полимеразная цепная реакция осуществлялась с применением набора ArtMix Форез (2X) (АртБиоТех, РБ) согласно инструкции фирмы-производителя. Электрофоретическое разделение ПЦР продуктов проводили в 1.5 % агарозном геле с использованием 1 × TBE. Окраска гелей осуществлялась в растворе бромистого этидия. Секвенирующую реакцию выполняли с использованием секвенирующего буфера BigDye Terminator v1.1 Cycle Sequencing Kit согласно инструкции фирмы-производителя. Секвенирование по Сэнгеру проводили на базе генетического анализатора Applied Biosystems 3500 (Thermo Scientific, США) [7].

Редактирование и выравнивание последовательностей COI проводили с использованием программы BioEdit 7.0.9.0. Полученные последовательности были депонированы в GenBank под номерами PP26138-42. Для сравнительного анализа привлечены аналогичные участки мтДНК видов рода *Nycteribia* и *P. monoceros* из базы Национального центра биотехнологической информации США [8]. В качестве внешней группы выступили *Basilisa rybini* Hurka 1969 (AB632538) и *Cyclopedia horsfieldi* Meijere, 1899 (KF273779).

В силу того, что для некоторых видов рода *Nycteribia* в GenBank была представлена неполная последовательность COI, филогенетическое дерево было построено по всем доступным последовательностям, длина которых варьировала от 421 до 658 п.н. (табл. 1). Для построения сети гаплотипов и вычисления внутри- и межвидовых генетических дистанций использован более короткий участок COI длиной 598 п.н., при этом особи, последовательность COI которых была короче, из дальнейшего анализа были исключены. В таблице 1 приведены гаплотипы и соответствующие номера особей из GenBank, вошедших в анализ.

Таблица 1. Гаплотипы и соответствующие номера особей из GenBank, вошедшие в анализ**Table 1.** Haplotypes and corresponding GenBank samples included in the analysis

Гаплотип Haplotype	ID GenBank	Страна Country	Хозяин Host	N
<i>Nycteribia kolenatii</i> s. l.				
KN1	PP261939-42	Беларусь / Belarus	<i>Myotis daubentonii</i>	14
	MK140064	Бельгия / Belgium	<i>Myotis daubentonii</i>	
	MK140119	Венгрия / Hungary	<i>Myotis daubentonii</i>	
	MK140065-66	Нидерланды / Netherlands	<i>Myotis daubentonii</i>	
	MK140118	Румыния / Romania	<i>Myotis daubentonii</i>	
	MK140120	Румыния / Romania	<i>Myotis oxygnathus</i>	
	MK140121-22	Румыния / Romania	<i>Miniopterus schreibersii</i>	
KN2	MW590968	Финляндия / Finland	неизвестен	2
	MK140123	Румыния / Romania	<i>Myotis daubentonii</i>	
KN3	MK140067	Нидерланды / Netherlands	<i>Myotis daubentonii</i>	1
	MK140129	Румыния / Romania	<i>Rhinolophus ferrumequinum</i>	
KN4	MK140126	Румыния / Romania	<i>Miniopterus schreibersii</i>	1
KN5	MZ627133	Финляндия / Finland	неизвестен	1
KN6	MK140125	Румыния / Romania	<i>Myotis daubentonii</i>	1
KN7	MK140127	Венгрия / Hungary	<i>Myotis daubentonii</i>	2
	MK140063	Бельгия / Belgium	<i>Myotis daubentonii</i>	

KN8	MK140124	Румыния / Romania	<i>Myotis daubentonii</i>	1
KN9	MK140128	Румыния / Romania	<i>Myotis daubentonii</i>	1
KN10	MK140131	Румыния / Romania	<i>Myotis myotis</i>	1
KN11	MK140132	Румыния / Romania	<i>Myotis myotis</i>	1
KN12	MK140134	Румыния / Romania	<i>Myotis myotis</i>	1
KN13	MK140133	Румыния / Romania	<i>Myotis oxygnathus</i>	1
KN14	MK140157-159	Румыния / Romania	<i>Myotis myotis</i>	3
KN15	MK140160	Румыния / Romania	<i>Myotis myotis</i>	1
KN16	MK140161	Румыния / Romania	<i>Myotis myotis</i>	1
<i>Nycteribia schmidlii</i> Schiner 1853				
SCH1	MZ380293	Сербия / Serbia	<i>Miniopterus schreibersii</i>	
	MK140135	Венгрия / Hungary	<i>Miniopterus schreibersii</i>	
	MK140136-38, MK140141, MK140143-46	Румыния / Romania	<i>Miniopterus schreibersii</i>	12
	MK140139	Румыния / Romania	<i>Myotis daubentonii</i>	
	MK140142	Румыния / Romania	<i>Myotis oxygnathus</i>	
SCH2	MZ380299	Сербия / Serbia	<i>Miniopterus schreibersii</i>	
	MK140148	Венгрия / Hungary	<i>Miniopterus schreibersii</i>	3
	MK140147	Румыния / Romania	<i>Miniopterus schreibersii</i>	
SCH3	MZ380310	Сербия / Serbia	<i>Miniopterus schreibersii</i>	
	MK140154	Румыния / Romania	<i>Miniopterus schreibersii</i>	3
	MK140155	Румыния / Romania	<i>Myotis daubentonii</i>	
SCH4	MK140130	Румыния / Romania	<i>Miniopterus schreibersii</i>	1
SCH5	KF021502, KF021504	Кения / Kenya	<i>Miniopterus africanus</i>	
	KF021503	Кения / Kenya	<i>Miniopterus inflatus</i>	3
n/a	MZ380294-298, MZ380300-306, MZ380308-13	Сербия / Serbia	<i>Miniopterus schreibersii</i>	
	MZ380307	Босния и Герцеговина / Bosnia and Herzegovina	<i>Miniopterus schreibersii</i>	
	MK140150	Венгрия / Hungary	<i>Miniopterus schreibersii</i>	
	MK140151, MK140153, MK140156	Румыния / Romania	<i>Miniopterus schreibersii</i>	
<i>Nycteribia styliidiopsis</i> Speiser, 1908				
STH1	KF021512	Мадагаскар / Madagascar	<i>Miniopterus majori</i>	1
STH2	KF021509-10, KF021515	Мадагаскар / Madagascar	<i>Miniopterus griveaudi</i>	
	KF021507, KF021516-17	Мадагаскар / Madagascar	<i>Miniopterus gleni</i>	7
	MF462045	Мадагаскар / Madagascar	<i>Myotis goudoti</i>	
STH3	KF021505	Коморские о-ва / Comoros	<i>Miniopterus griveaudi</i>	1
STH4	MF462046	Мадагаскар / Madagascar	<i>Myotis goudoti</i>	1
STH5	KF021506	Мадагаскар / Madagascar	<i>Miniopterus petersoni</i>	1
n/a	KF021511, KF021513	Мадагаскар / Madagascar	<i>Miniopterus majori</i>	
	KF021508	Мадагаскар / Madagascar	<i>Miniopterus griveaudi</i>	
	MF462044, KF021514	Мадагаскар / Madagascar	<i>Miniopterus aelleni</i>	
<i>Nycteribia pleuralis</i> Маа, 1968				
PLH1	AB632555	Япония / Japan	<i>Myotis macrodactylus</i>	
	AB632557	Япония / Japan	<i>Myotis petax</i>	
	AB632553-54	Япония / Japan	<i>Myotis bombinus</i>	5
	AB632556	Япония / Japan	<i>Myotis ikonnikovi</i>	
PLH2	AB632558	Япония / Japan	<i>Myotis petax</i>	1
<i>Nycteribia pugnax</i> (Kishida, 1932)				
PYH1	AB632549-52	Япония / Japan	<i>Myotis macrodactylus</i>	4
PYH2	AB632548	Япония / Japan	<i>Myotis macrodactylus</i>	1
<i>Nycteribia allotopa</i> Speiser, 1901				
АН1	MT362937, MT362943	Южная Корея / South Korea	<i>Miniopterus cf. schreibersii</i>	
	LC521998, LC522000, LC522015	Япония / Japan	<i>Miniopterus fuliginosus</i>	5
АН2	MT362944	Южная Корея / South Korea	<i>Rhinolophus ferrumequinum</i>	
	AB632541-42	Япония / Japan	<i>Rhinolophus pumilus</i>	
	AB632539-40	Япония / Japan	<i>Miniopterus fuscus</i>	6
	LC522005	Япония / Japan	<i>Miniopterus fuliginosus</i>	
АН3	LC521999, LC522002, LC715184	Япония / Japan	<i>Miniopterus fuliginosus</i>	3
АН4	AB632545, LC522014	Япония / Japan	<i>Miniopterus fuliginosus</i>	2
АН5	LC715183	Япония / Japan	<i>Miniopterus fuliginosus</i>	1
АН6	MT362943	Южная Корея / South Korea	<i>Miniopterus cf. schreibersii</i>	1

АН7	LC522003, LC715185 (<i>Nycteribia</i> sp.)	Япония / Japan	<i>Miniopterus fuliginosus</i>	2
п/а	MT362942 OQ270755 LC522001, LC522003-004, LC522006-13, LC522016-20, LC522022, LC5220226, AB632544, AB632546-47	Южная Корея / South Korea Китай / China Япония / Japan	<i>Myotis macrodactylus</i> <i>Miniopterus fuliginosus</i> <i>Miniopterus fuliginosus</i>	
<i>Nycteribia parvula</i> Speiser, 1900				
РН1	MT362938 OP442519 LC521995, LC521997, LC522023 OQ184583-86 (<i>Nycteribia</i> sp. B)	Южная Корея / South Korea Китай / China Япония / Japan	<i>Miniopterus</i> cf. <i>schreibersii</i> <i>Miniopterus fuliginosus</i> <i>Miniopterus fuliginosus</i>	9+2 АН7
РН2	LC521996, LC522021	Япония / Japan	<i>Miniopterus fuliginosus</i>	2
РН3	LC521994, LC522024	Япония / Japan	<i>Miniopterus fuliginosus</i>	2
РН4	OQ184587 (<i>Nycteribia</i> sp. B)	Китай, Гонконг / China, Hong Kong	<i>Miniopterus</i> sp.	1
РН5	KF021501	Филиппины / Philippines	<i>Miniopterus schreibersii</i>	1
п/а	MT362946 LC522025 OQ184588 (<i>Nycteribia</i> sp. B)	Южная Корея / South Korea Япония / Japan Китай, Гонконг / China, Hong Kong	<i>Miniopterus</i> cf. <i>schreibersii</i> <i>Miniopterus fuliginosus</i> <i>Miniopterus</i> sp.	
<i>Nycteribia formosana</i> nom. dub. (Karaman, 1939)				
FN1	OQ675011	Китай / China	<i>Myotis fimbriatus</i>	1
FN2	OQ184573-74 (<i>Nycteribia</i> sp. A)	Китай, Гонконг / China, Hong Kong	<i>Myotis pilosus</i>	2
FN3	OQ184575-77 sp. A	Китай, Гонконг / China, Hong Kong	<i>Myotis pilosus</i>	3
FN4	MZ483869 (<i>Nycteribia</i> sp.)	Япония / Japan	неизвестен / unknown	1
Неизвестные <i>Nycteribia</i> sp. / unknown <i>Nycteribia</i> sp.				
UNH1	MZ483870 (<i>Nycteribia</i> sp.)	Япония / Japan	неизвестен / unknown	1
UNH2	MZ483871 (<i>Nycteribia</i> sp.)	Япония / Japan	неизвестен / unknown	1
UNH3	OQ184578-79 (<i>Nycteribia</i> sp. D)	Китай, Гонконг / China, Hong Kong	<i>Miniopterus magnater</i>	2
UNH4	OQ184569-72 (<i>Nycteribia</i> sp. E)	Китай, Гонконг / China, Hong Kong	<i>Miniopterus</i> sp.	4
UNH5	OQ184580-82 (<i>Nycteribia</i> sp. F)	Китай, Гонконг / China, Hong Kong	<i>Miniopterus pusillus</i>	3
<i>Penicillidia monoceros</i>				
Н1	PP261938 MW590967 MW590972	Беларусь / Belarus Финляндия / Finland Финляндия / Finland	<i>Myotis dasycneme</i> неизвестен / unknown неизвестен / unknown	3
Н2	AB632564-65 AB632566-67	Япония / Japan Япония / Japan	<i>Myotis macrodactylus</i> <i>Myotis daubentonii</i>	4
Н3	MZ627717	Финляндия / Finland	неизвестен / unknown	1
Н4	MZ350230	Китай / China	неизвестен / unknown	1
Н5	MZ350231	Китай / China	неизвестен / unknown	1

Филогенетические реконструкции с использованием метода максимального правдоподобия (ML) выполнены в программе MEGA ver. 11 [9]. Наиболее подходящую филогенетическую модель для построения филогенетического дерева COI определили с помощью ModelTest в программе MEGA11: GTR+G+I (модель General Time-Reversible, включая инвариантные сайты и нормальное распределение). Устойчивость кластеризации оценивалась с помощью bootstrap-анализа при 1000 циклах. При построении сети гаплотипов COI использовано программное обеспечение PopART (Population Analysis with Reticu-

late Trees) [10], для расчета использован метод «Median Joining network». Генетические р-дистанции были подсчитаны в программе MEGA11, как между отдельными гаплотипами внутри *N. kolenatii* s. lato, так и между различными видами рода *Nycteribia*.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Всего с более чем тысячи отловленных животных, относящихся к 13 видам рукокрылых, было собрано и определено 69 проб пауциц (124 особи насекомых). Хозяевами выступали только 2 вида рукокрылых:

ночница водяная (*Myotis daubentonii* (Kuhl, 1817)) и
ночница прудовая (*Myotis dasycneme* (Boie, 1825)).

Penicillidia monoceros Speiser, 1900

Материал: 1♀ на *Myotis daubentonii*, Беларусь, Могилевская обл., Быховский р-н, д. Грудиновка, 04.VII.2019, (номер коллекции PS0013); 1♂ на *M. dasycneme*, Беларусь, Минская обл., Мядельский р-н, Дендросад, 19.VII.2019, (н. к. PS0029); 1♂ 1♀ на *M. dasycneme*, Беларусь, Минская обл., Мядельский р-н, о. Нарочь (окр.д. Степенево), 16.VI.2020, (н. к. PS0051); 1♀ на *M. dasycneme*, Беларусь, Минская обл., Мядельский р-н, окр.д. Володьки (р. Свирица), 19.VI.2020, (н. к. PS0058); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Витебская обл., Лепельский р-н, д. Кветча, 12.VIII.2020, (н. к. L_PS0010); 2♀ на *M. dasycneme*, Беларусь, Витебская обл., Лепельский р-н, д. Кветча, 12.VIII.2020, (н. к. L_PS0017); 1♀ на *M. dasycneme*, Беларусь, Минская обл., Мядельский р-н, р. Нарочанка, 04.VII.2022, (н. к. L_PS0107); 1♂ 1♀ на *M. dasycneme*, Беларусь, Минская обл., Мядельский р-н, р. Нарочанка, 04.VII.2022, (н. к. L_PS0108); 1♀ на *M. dasycneme*, Беларусь, Минская обл., Мядельский р-н, о. Белое, 06.VII.2022, (н. к. L_PS0113); 2♂ 1♀ на *M. dasycneme*, Беларусь, Минская обл., Мядельский р-н, о. Белое, 06.VII.2022, (н. к. L_PS0117); 1♂ на *M. dasycneme*, Беларусь, Минская обл., Мядельский р-н, о. Белое, 06.VII.2022, (н. к. L_PS0118); 1♀ на *M. dasycneme*, Беларусь, Витебская обл., Городокский р-н, окр.д. Волково, 02.VIII.2023, (н. к. L_PS0186); 1♂ на *M. dasycneme*, Беларусь, Витебская обл., Городокский р-н, окр.д. Прудок, окр.о. Большая Осмота, 03.VIII.2023, (н. к. L_PS0187);

Хозяева-прокормители: *Myotis dasycneme*, *M. daubentonii*, *M. petax* Hollister, 1912, *M. myotis* (Borkhausen, 1797), *M. emarginatus* (Geoffroy, 1806), *M. mystacinus* (Kuhl, 1817), *M. nattereri* (Kuhl, 1817), *M. ikonnikovii* Ognev, 1912, *M. bombinus* Thomas, 1906, *M. macrodactylus* (Temminck, 1840), *Nyctalus noctula* (Schreber, 1774), *Plecotus auritus* Linnaeus, 1758, *Vespertilio murinus* Linnaeus, 1758, *Eptesicus nilssonii* (Keyserling & Blasius, 1839).

Распространение: транспалеарктический бореальный вид. [11; 12].

Nycteribia kolenatii Theodor & Moscona, 1954

Материал: 1♂ на *Myotis daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Мядельский р-н, о. Бол. Швакшты, 23.VII.2019, (номер коллекции PS0035); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Воложинский р-н, Сябрыньские озера, 09.VII.2020, (н. к. PS0061); 1♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Воложинский р-н, р. Исlochь, ур. Марчеха, 28.VII.2020, (н. к. L_PS0001); 1♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Воложинский р-н, р. Исlochь, ур. Марчеха, 28.VII.2020, (н. к. L_PS0002); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Воложинский р-н, р. Исlochь, ур. Марчеха, 28.VII.2020, (н. к. L_PS0003); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Воложинский р-н, р. Исlochь, ур. Марчеха, 28.VII.2020, (н. к. L_PS0004); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Воложинский р-н, р. Исlochь, ур. Марчеха, 28.VII.2020, (н. к. L_PS0005); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Воложинский р-н, р. Исlochь, ур. Марчеха, 28.VII.2020, (н. к. L_PS0006); 1♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская

обл., Воложинский р-н, р. Исlochь, ур. Марчеха, 28.VII.2020, (н. к. L_PS0007); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Воложинский р-н, р. Исlochь, урочище марчеха, 28.VII.2020, (н. к. L_PS0008); 2♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Витебская обл., Лепельский р-н, д. Кветча, 12.VIII.2020, (н. к. L_PS0011); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Витебская обл., Лепельский р-н, д. Кветча, 12.VIII.2020, (н. к. L_PS0014); 1♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Витебская обл., Лепельский р-н, д. Кветча, 12.VIII.2020, (н. к. L_PS0015); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Витебская обл., Лепельский р-н, д. Кветча, 12.VIII.2020, (н. к. L_PS0016); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Борисовский р-н, д. Палик, кордон, 13.VIII.2020, (н. к. L_PS0019); 1♂ 2♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Мядельский р-н, о. Белое, кемпинг, 24.VIII.2020, (н. к. L_PS0023); 1♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Мядельский р-н, о. Белое, 25.VIII.2020, (н. к. L_PS0024); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Мядельский р-н, о. Вишневоое, 26.VIII.2020, (н. к. L_PS0025); 1♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Воложинский р-н, р. Исlochь, ур. Марчеха, 28.VII.2020, (н. к. L_PS0031); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Несвижский р-н, окр.г. Несвиж парк Альба, 23.VI.2021, (н. к. L_PS0037); 1♂ 2♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Копыльский р-н, окр.д. Долгое, 24.VI.2021, (н. к. L_PS0038); 1♂ 1♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Гродненская обл., Гродненский р-н, окр.д. Калеты, р. Черная Ганча, 06.VII.2021, (н. к. L_PS0040); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Гродненская обл., Гродненский р-н, окр.д. Калеты, р. Черная Ганча, 06.VII.2021, (н. к. L_PS0042); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Гродненская обл., Гродненский р-н, окр.д. Калеты, р. Черная Ганча, 06.VII.2021, (н. к. L_PS0043); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Гродненская обл., Гродненский р-н, окр.д. Калеты, р. Черная Ганча, 06.VII.2021, (н. к. L_PS0044); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Гродненская обл., Гродненский р-н, окр.д. Калеты, р. Черная Ганча, 06.VII.2021, (н. к. L_PS0045); 1♂ 1♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Витебская обл., Докшицкий р-н, окр.д. Черничка-2, р. Березина, 11.VIII.2021, (н. к. L_PS0063); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Витебская обл., Лепельский р-н, окр.д. Барсуки р. Кеста, 12.VIII.2021, (н. к. L_PS0067); 1♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Гомельская обл., Житковичский р-н, окр.д. Хлупин, дорога на мелиорацию, 14.VIII.2021, (н. к. L_PS0072); 1♂ 2♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Гродненская обл., Свислочский р-н, о. Песец, 31.VIII.2021, (н. к. L_PS0082, L_PS0083); 2♂ 1♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Брестская обл., Каменецкий р-н, берег вдхр. Лядское, 03.IX.2021, (н. к. L_PS0093); 2♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Брестская обл., Каменецкий р-н, берег вдхр. Лядское, 03.IX.2021, (н. к. L_PS0094); 1♂ 3♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Брестская обл., Каменецкий р-н, берег вдхр. Лядское, 03.IX.2021, (н. к. L_PS0095); 1♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Брестская обл., Каменецкий р-н, берег вдхр. Лядское, 03.IX.2021, (н. к. L_PS0096); 3♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Брестская обл., Каменецкий р-н, берег вдхр. Лядское, 03.IX.2021, (н. к. L_PS0097); 1♂ 1♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Брестская обл., Каменецкий р-н, берег вдхр. Лядское, 03.IX.2021, (н. к. L_PS0098); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Брестская обл., Каменецкий р-н, берег вдхр. Лядское, 03.IX.2021, (н. к. L_PS0099); 4♀ на

M. daubentonii, Беларусь, Брестская обл., Каменецкий р-н, берег вдхр. Лядское, 03.IX.2021, (н. к. L_PS0100); 1♂ 1♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Брестская обл., Каменецкий р-н, берег вдхр. Лядское, 03.IX.2021, (н. к. L_PS0101); 2♂ 2♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Брестская обл., Каменецкий р-н, берег вдхр. Лядское, 03.IX.2021, (н. к. L_PS0102); 2♂ 1♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Брестская обл., Каменецкий р-н, берег вдхр. Лядское, 03.IX.2021, (н. к. L_PS0103); 3♂ 2♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Мядельский р-н, р. Нарочанка, 04.VII.2022, (н. к. L_PS0110); 1♂ 1♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Мядельский р-н, о. Нарочь (окр.д. Степенево), 05.VII.2022, (н. к. L_PS0111); 1♂ 3♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Столбцовский р-н, р. Уса, 26.VII.2022, (н. к. L_PS0124); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Столбцовский р-н, Погорелки, 28.VII.2022, (н. к. L_PS0133); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Витебская обл., Городокский р-н, д. Бодякино, 24.VIII.2022, (н. к. L_PS0134); 2♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Витебская обл., Городокский р-н, пруд окр.о. Черново, 25.VIII.2022, (н. к. L_PS0135); 2♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Витебская обл., Городокский р-н, о. Жодень, 27.VIII.2022, (н. к. L_PS0138); 3♂ 1♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Могилевская обл., Бельничский р-н, окр.д. Кармановка, 11.VII.2023, (н. к. L_PS0159); 2♂ 2♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Могилевская обл., Славгородский р-н, р. Сож, Р-140, 12.VII.2023, (н. к. L_PS0162); 3♂ 1♀ на *M. daubentonii*, Беларусь,

Гомельская обл., Наровлянский р-н, окр.д. Рожава, 26.VII.2023, (н. к. L_PS0174); 3♀ на *M. daubentonii*, Беларусь, Витебская обл., Городокский р-н, пруд окр.о. Черново, 31.VII.2023, (н. к. L_PS0177); 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Витебская обл., Городокский р-н, окр.д. Ломоносово, 01.VIII.2023, (н. к. L_PS0181); 4♀ 1♂ на *M. daubentonii*, Беларусь, Минская обл., Солигорский р-н, окр.д. Листопадовичи, 16.VIII.2023, (н. к. L_PS0188);

Хозяева-прокормители: *Myotis daubentonii*, *M. nattereri*, *M. bechsteinii* (Kuhl, 1817), *M. brandtii* Eversmann, 1845, *M. mystacinus*, *M. dasycneme*, *M. emarginatus*, *M. myotis*, *Barbastella barbastellus* (Schreber, 1774), *Nyctalus noctula*, *N. leisleri* (Kuhl, 1817), *Eptesicus serotinus* Schreber, 1774, *Plecotus auritus*, *Pipistrellus pipistrellus* (Schreber, 1774), *Vespertilio murinus*, *Rhinolophus mehelyi* Matschie, 1901, *R. hipposideros* (Bechstein, 1800).

Распространение: европейский вид [11; 12].

Зараженность прудовой ночницы составила 26,2% (микробиоты обнаружены на 11 особях из 42 отловленных животных) и исключительно видом *P. monoceros* (рис. 1). Стоит заметить, что прудовая ночница преимущественно распространена по северу страны и является редким видом, занесенным в Красную книгу Республики Беларусь, относится ко II категории охраны. Также две находки *P. monoceros* обнаружены на водной ночнице, но только в северной части страны.

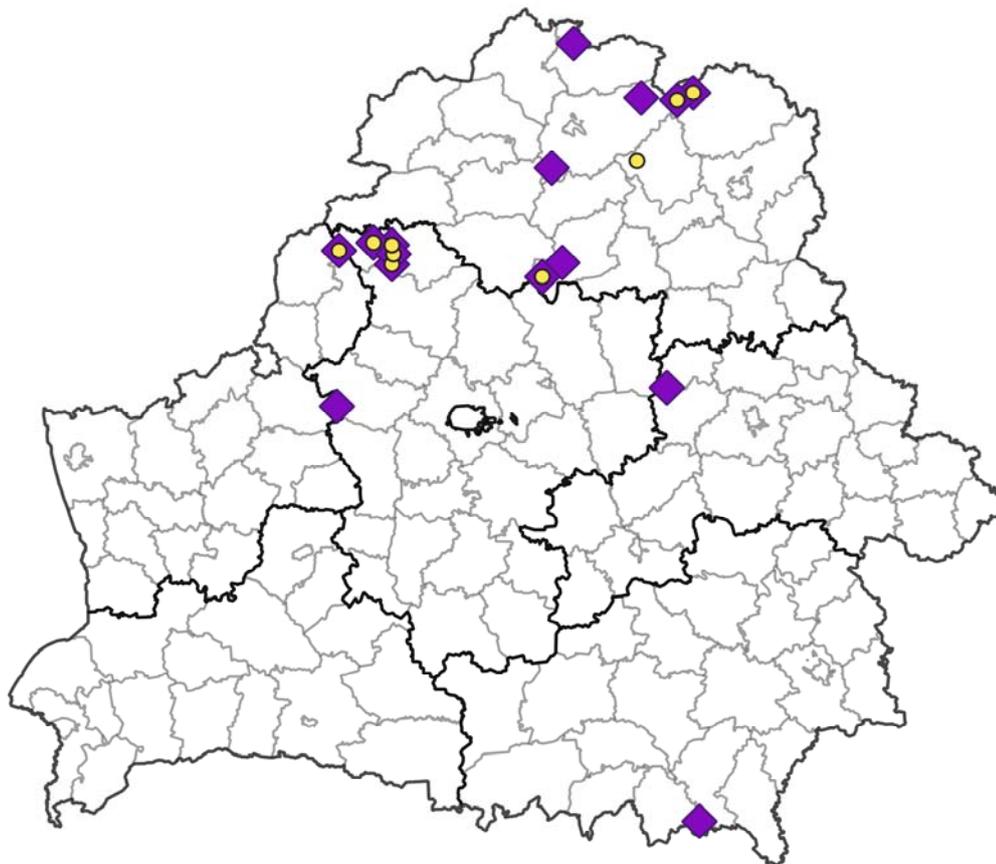


Рисунок 1. Распространение *Penicillidia monoceros* по результатам учетов 2019–2023 гг.

Желтыми точками указаны находки *P. monoceros*, ромбами указаны регистрации основного вида-хозяина – прудовой ночницы (*Myotis dasycneme*)

Figure 1. Distribution of *Penicillidia monoceros* according to the results of surveys 2019–2023

Yellow dots indicate findings of *P. monoceros*. The registrations of the main host species, the pond bat (*Myotis dasycneme*), are marked with rhombuses

Водяная ночница является широко распространенным видом и встречается по всей территории Беларуси. Из 245 животных пауцицы рода *Nycteribia* были обнару-

жены на 57 особях (23,3 %) (рис. 2), в отдельных случаях на одном животном обнаруживались одновременно *Penicillidia monoceros* и *Nycteribia kolenatii*.

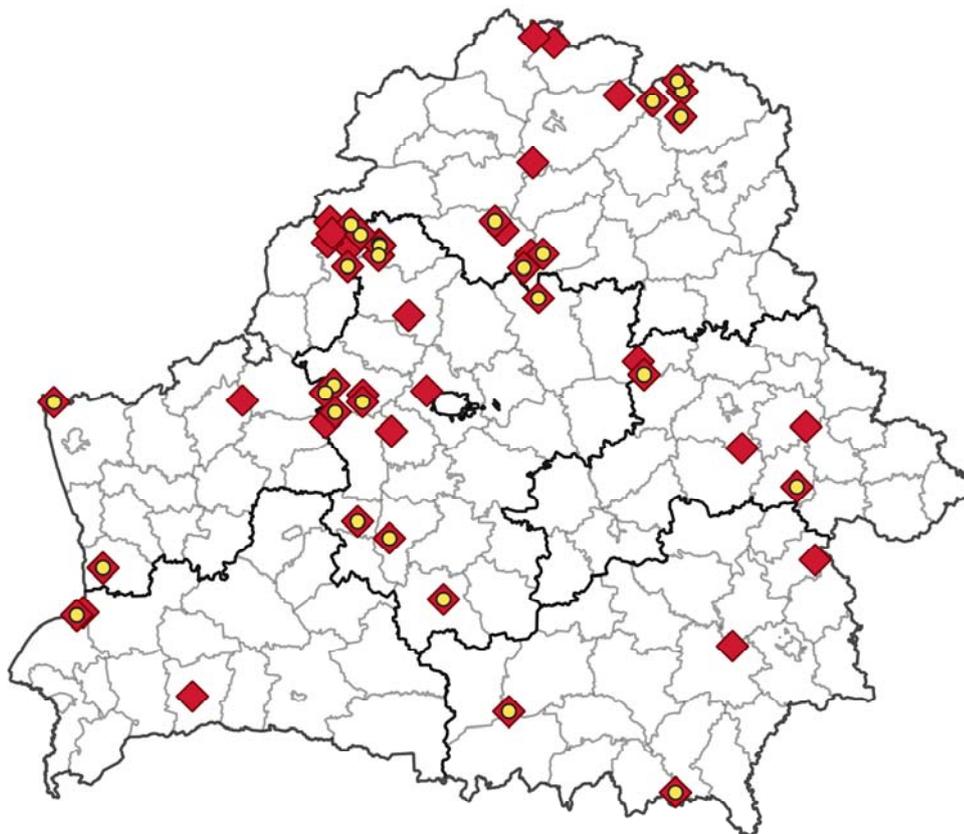


Рисунок 2. Распространение *Nycteribia kolenatii* по результатам учетов 2019–2023 гг. Желтыми точками указаны находки *N. kolenatii*, ромбами указаны регистрации основного вида-хозяина – водяной ночницы (*Myotis daubentonii*)

Figure 2. Distribution of *Nycteribia kolenatii* according to the results of surveys 2019–2023. Yellow dots indicate findings of *N. kolenatii*. The registrations of the main host species, Daubenton's bat (*Myotis daubentonii*), are marked with rhombuses

Идентификация видов рода *Penicillidia* не вызывала вопросов и, в настоящий момент, нами для территории Беларуси отмечена только *P. monoceros*. В генетическом банке NCBI представлено всего 9 проб участка субъединицы I цитохром с оксидазы вида *P. monoceros*, все они были использованы для построения сети гаплотипов. Нами получена одна

генетическая последовательность (PP261938), образующая единый гаплотип с частью образцов из Финляндии, при этом на 0,3 % отличающаяся от финского образца MZ627717, на 0,6 % от образцов из Японии, на 1,5 % и 1,8 % от образцов из Китая (2, 4, 9 и 11 замен из 622 пар нуклеотидов соответственно) (рис. 3).

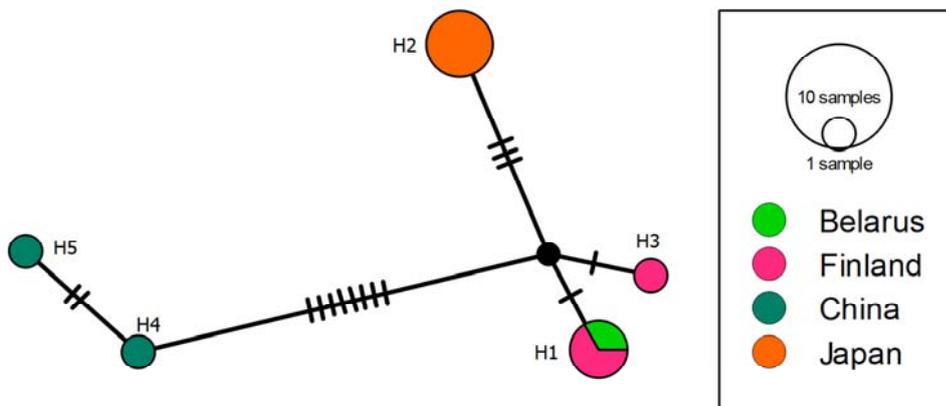


Рисунок 3. Сеть гаплотипов COI *P. monoceros*
Figure 3. COI haplotype network of *P. monoceros*

При определении видовой принадлежности собранных нами пауциц рода *Nycteribia* мы пришли к выводу, что

все изученные экземпляры принадлежат виду *N. kolenatii*. Вместе с тем, мы обнаружили отклонения

некоторых морфологических признаков изученных особей от приведенных в общепринятых определительных ключах и описаниях видов [5; 13; 14]. Стоит отметить, что описание вида *N. kolenatii* довольно скудное и дается как набор отличий от *N. pedicularia* Latreille, 1805. В связи с этим, нами были приняты во внимание иллюстрации из каталога никтерибид [5], которые приводятся во всех определительных ключах вплоть до современных. Опираясь на данные иллюстрации, гениталии самцов наших образцов представляют собой комбинацию признаков *N. kolenatii* и *N. pedicularia* (рис. 4), в то время как самки рассмотренных образцов в целом подпадают под определение *N. kolenatii* (рис. 5). При этом, надо отметить, что оба вида могут быть отмечены в Беларуси (*N. kolenatii* исключительно европейский вид, а

N. pedicularia имеет транспалеарктическое суббореальное распространение, но при этом в целом отмечается южнее). Оба вида могут быть отмечены на *Myotis daubentonii*, но при этом данный вид-хозяин указывается как типичный для *N. kolenatii* [14], тогда как *N. pedicularia* приписывается меньшей специфичностью [14]. Также, анализ литературных данных по некоторым сопредельным странам показал, что в Польше наблюдается сходная с нашей картина (наиболее распространенный вид – *N. kolenatii*, найденный в большинстве случаев именно на *M. daubentonii* [15]), в то время как в Латвии для данного вида рукокрылых массово отмечаемым видом пауциц указывают *N. pedicularia* (*N. kolenatii* не указана вовсе [16]).

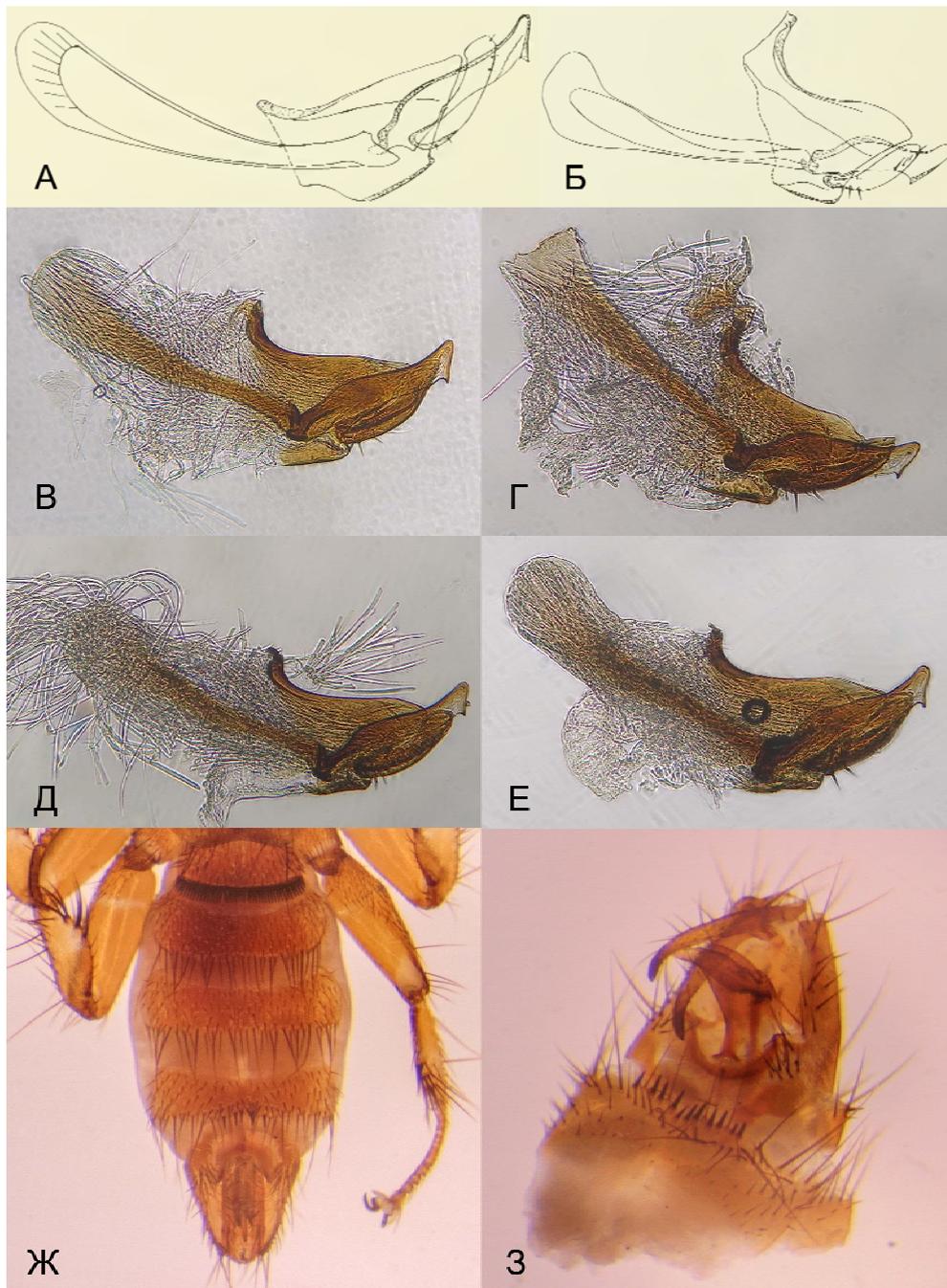


Рисунок 4. Внешний вид генитального аппарата самцов *N. kolenatii* из Беларуси. А – *N. kolenatii*, по Теодору, 1967 [5]; Б – *N. pedicularia*, по Теодору, 1967 [5]; В–З – *N. kolenatii* (Беларусь); В–Е – гениталии самцов; Ж – брюшко, вентральная сторона; 3 – V стернит и копулятивный аппарат
Figure 4. Appearance of *N. kolenatii* males from Belarus. А – *N. kolenatii*, male genitalia [5]; Б – *N. pedicularia*, male genitalia [5]; В–Е – *N. kolenatii* (Belarus), male genitalia; Ж – abdomen, ventral; 3 – sternite V

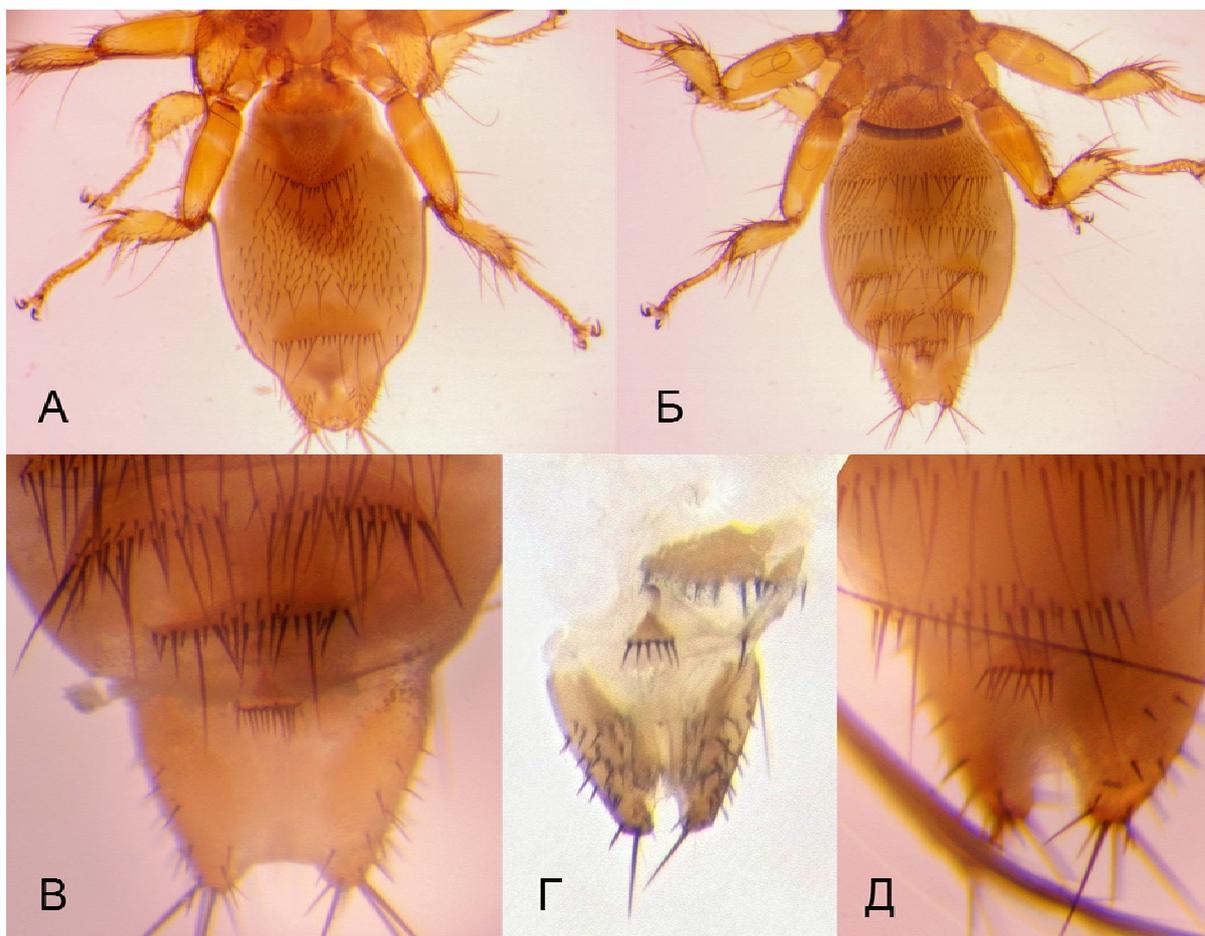


Рисунок 5. Внешний вид самок *N. kolenatii* из Беларуси. А – брюшко, дорсальная сторона; Б – брюшко, вентральная сторона; В–Д – генитальные пластинки

Figure 5. Appearance of *N. kolenatii* females from Belarus. А – abdomen, dorsal; Б – abdomen, ventral; В–Д – genital plates

У рассмотренных нами экземпляров самцов строение фаллобазы (рис. 4 В–Е) – дорсальное вздутие ("bulge"), характер склеротизации и изгиб основания, – было характерным для *N. pedicularia* (рис. 4 Б), тогда как склеротизация непосредственно эдеагуса была типичной для *N. kolenatii* (рис. 4 А). Также щетинки на парамерах достаточно крепкие и заметные (рис. 4 В–Е) в соответствии с иллюстрацией гениталий *N. pedicularia* по Теодору (рис. 4 Б). Вентральный зубец эдеагуса у *N. pedicularia*, согласно текстовому описанию вида, должен находиться в дистальной трети, у *N. kolenatii* в дистальной пятой части. У рассмотренных нами образцов положение зубца варьировало от 1/7 до 1/4 части, чаще располагаясь в дистальной шестой части.

Также, говоря о значимых для определения морфологических признаках самцов, количество шипов на заднем крае V стернита также довольно сильно варьировало (от 6 до 11 шт., чаще 8–9) (рис. 4 Ж–З). Данному признаку отдавалось наименьшее внимание, по причине сильного перекрытия признака между *N. kolenatii* и *N. pedicularia*. В описании вида приводятся следующие характеристики: у *N. kolenatii* на заднем крае V стернита 7–8 шипов, реже 5 или 9–10; у *N. pedicularia* – 9–12, реже 7–8 или 13–14 [5]. Волоски на четвертом тергите самцов у наших экземпляров также показали очень большой разброс – от полного отсутствия до 24 шт. (чаще 10–15 шт.).

У самок в первую очередь нами рассматривалась морфология генитальных пластинок, поскольку остальные видовые признаки у *N. kolenatii* и *N. pedicularia* перекрываются, которые у данных видов отличаются лишь количеством и длиной щетинок. У всех рассмотренных экземпляров длина щетинок на дорсальной генитальной пластинке превышает её длину, что характерно для *N. kolenatii*, однако их количество сильно варьировало от 6 до 11 (рис. 5 Б–Г) (в ключах приводится количество от 8 до 10 для *N. kolenatii* и около 12 для *N. pedicularia* [5]).

Форма, длина и хетотаксия заднего края 2 тергита у всех самок соответствовала *N. kolenatii* (рис. 5 А). Ряд щетинок перепончатой дорсальной части брюшка расположен на значительном удалении (чуть меньше или равном длине щетинок) от склеротизированной части (рис. 5 А), что, руководствуясь иллюстрациями Теодора [5], также характерно для *N. kolenatii*. У всех самок на последнем видимом стерните перед рядом краевых щетинок в центральной части наблюдался небольшой дополнительный ряд из 4–7 коротких щетинок (рис. 5 В, Д).

В связи с возникшими сложностями в определении видовой принадлежности пауциц, был проведен генетический анализ. Для исследованных нами особей получены четыре последовательности гена COI (PP261939-42), согласно которым они однозначно могут быть отнесены к виду *N. kolenatii* (рис. 6).

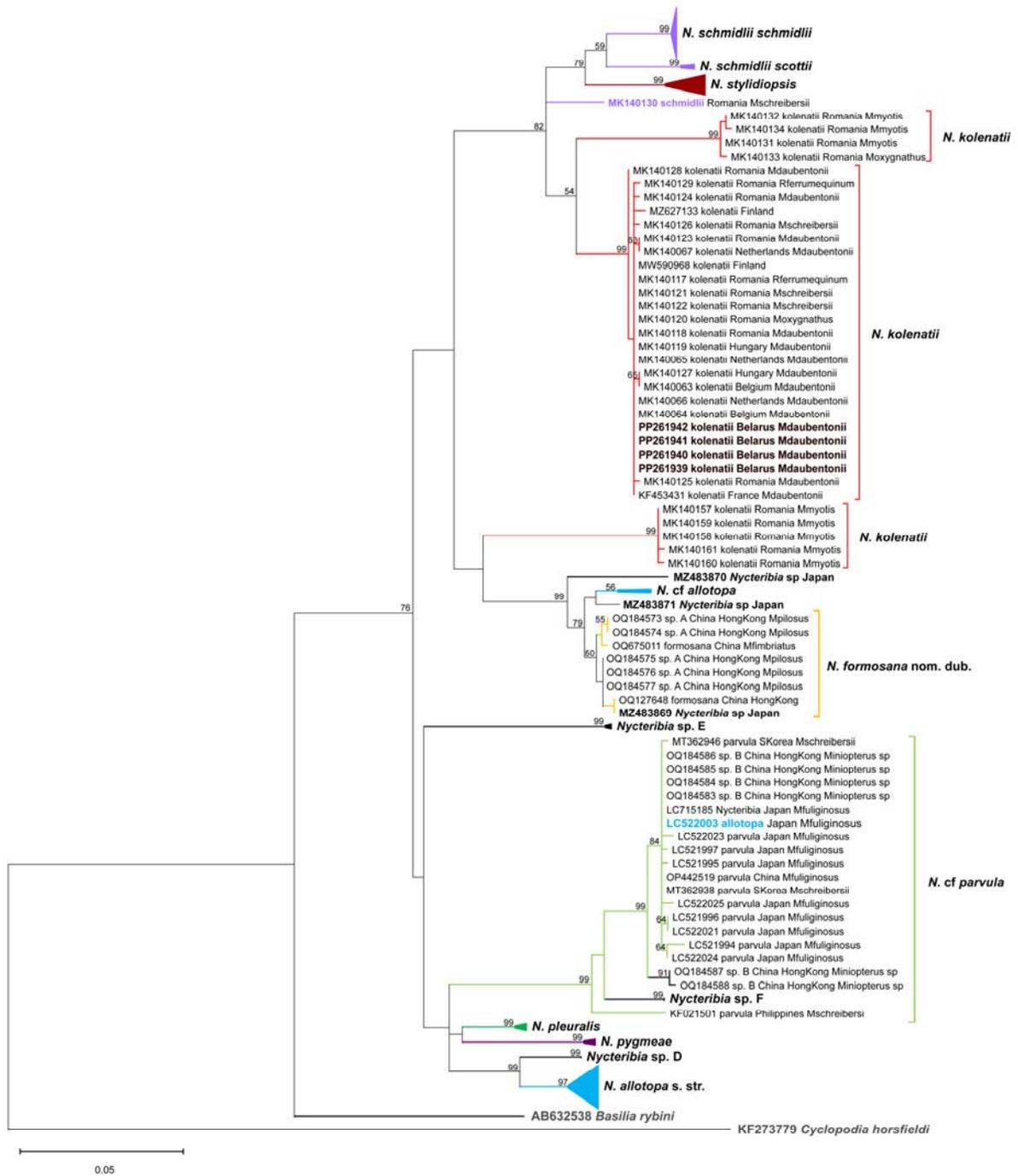


Рисунок 6. Филогенетическое дерево рода *Nycteribia* по гену COI (Bootstrapping Maximum Likelihood method), модель GTR+I, bootstrap 1000.

Figure 6. Phylogenetic tree of the genus *Nycteribia* based on the COI gene (Bootstrapping Maximum Likelihood method), GTR+I model, bootstrap 1000

Стоит отметить, что в GenBank группа видов *pedicularia* представлена не полностью: отсутствуют образцы, идентифицированные как *N. pedicularia*, при том, что этот вид считается широко распространенным в Европе [5; 14]. Мы обнаружили, что особи, представленные в GenBank как *N. kolenatii*, в действительности представляют собой три значительно дивергировавшие генетические линии. Исследованные нами особи из Беларуси принадлежат к центральному гаплотипу КН1, наиболее широко распространённому из трех линий (рис. 7, А). Особи данной линии (КН1-9) также обнаружены в Румынии, Венгрии, Бельгии, Нидерландах, Финляндии. Хозяевами-прокормителями выступали преимущественно *M. daubentonii*, но известны находки

на *M. oxygnathus* Monticelli, 1885, *Miniopterus schreibersii* (Kuhl, 1817), *Rhinolophus ferrumequinum* (Schreber, 1774). Особи двух других линий *N. cf. kolenatii* были обнаружены исключительно на территории Румынии, причем хозяевами для второй линии (КН10-13) выступали *M. myotis* и *M. oxygnathus*, а для третьей линии (КН14-16) – исключительно *M. myotis*.

Генетические расстояния внутри трех линий *N. cf. kolenatii* варьировали от 0,23 до 0,35 %, а внутри всей выборки составили 3,54 %, что сопоставимо с минимальной генетической дистанцией между отдельными видами рода *Nycteribia*: 3,92 % между *N. pygmaea* и *N. pleuralis* (табл. 3). При этом попарные *r*-дистанции между тремя линиями *N. cf. kolenatii*

составили: между 1 и 2 линиями – 4,32 %, между 1 и 3 – 6,31 % и между 2 и 3 – 6,97 %. Ранее показано, что внутривидовые дистанции по COI для представителей отряда Diptera редко превышают 2 %, а межвидовые дистанции обычно лежат в диапазоне от 4 до 16 % [17]. Все вышеперечисленное позволяет предположить, что, по меньшей мере, третья генетическая линия (KH14-16) *N. cf. kolenatii* является отдельным видом, предположительно, более близким к особям, относимым к азиатскому виду *N. formosana* (рис. 7, Б).

Учитывая высокую вариабельность морфологических признаков, отмеченную нами для особей *Nycteribia* группы *pedicularia*, одним из возможных объяснений подобной внутривидовой генетической неоднородности может быть неправильная видовая идентификация пауциц. К сожалению, последовательности COI для других видов данной группы отсутствуют в GenBank, также как и фотографии морфологических признаков данных образцов, что затрудняет проверку данного предположения. Другим возможным объясне-

нием может быть присутствие криптических форм внутри *N. cf. kolenatii*, как было показано для другого европейского вида – *N. schmidlii* [18; 19].

Проведенный нами филогенетический анализ показал заметное расхождение между европейскими (*N. kolenatii* s. l., *N. schmidlii*, *N. styliidiopsis*) и азиатскими (*N. allotopa*, *N. pygmaea*, *N. pleuralis*, *N. formosana*, *N. parvula*) видами, при этом одна генетических линий *N. cf. kolenatii* попадает в азиатскую кладу (рис. 7Б). Помимо неописанных форм видового ранга (*Nycteribia* spp., *Nycteribia* sp. D, *Nycteribia* sp. E и *Nycteribia* sp. F в таблице 3), генетическую неоднородность демонстрируют *N. allotopa*, *N. parvula*, *N. schmidlii*.

Скрытое разнообразие в роде *Nycteribia* неоднократно обсуждалось для африканских [20] и азиатских видов пауциц [21–30], в то время как европейские виды чаще рассматривались в контексте взаимоотношений с патогенными бактериями *Bartonella* и рукокрылыми [31–35] и, как показывает настоящее исследование, по-видимому, нуждаются в таксономической ревизии.

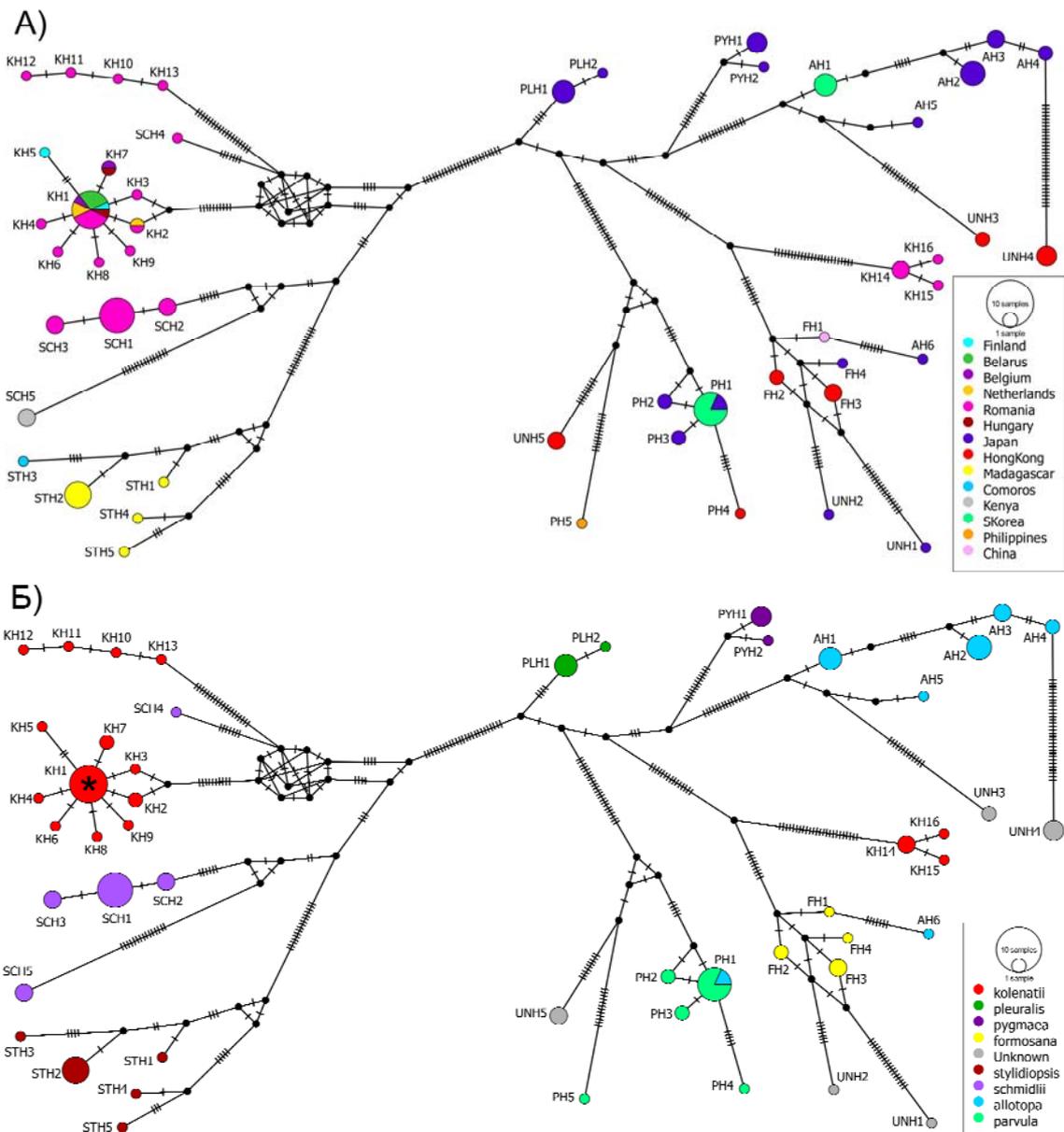


Рисунок 7. MJ-сеть гаплотипов гена COI *Nycteribia* spp. А – Географическая принадлежность образцов, Б – видовая принадлежность образцов в соответствии с GenBank

Figure 7. Median Joining network of COI gene haplotypes of *Nycteribia* spp. А – Geographical affiliation of samples, В – species affiliation of samples in accordance with GenBank

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований мухи-паучницы в Беларуси обнаружены только на двух видах рукокрылых: *M. daubentonii* и *M. dasycneme*. Выявлена значительная вариабельность таксономически значимых морфологических признаков у особей рода *Nycteribia* отмеченных в Беларуси, что в сочетании с генетической неоднородностью представителей вида *N. kolenatii* s. l., может свидетельствовать как о неправильной видовой идентификации депонированных в GenBank сиквентов *N. kolenatii*, так и о присутствии криптических видов среди представителей данной группы. Скрытое генетическое разнообразие видов рода *Nycteribia* требует дальнейших исследований, включая таксономическую ревизию на основе комплексного морфологического и генетического анализа.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Мы хотели бы выразить огромную благодарность коллегам Велигурову П.А., Соловей И.А., Крищук И.А., Шакуну В.В., Волнистому А.А., Семенову А.А., Машкову Е.И. и др. за совместные полевые исследования, М.В. Орловой за помощь и консультации в определении видовой принадлежности паучниц, А.В. Дерункову за предоставление оборудования для фотосъемки.

ACKNOWLEDGMENT

We would like to express gratitude to our colleagues P.A. Velihurau, I.A. Solovej, I.A. Kryshchuk, V.V. Shakun, A.A. Valnisty, A.A. Semyonova, E.I. Mashkov and others for joint field research, M.V. Orlova for help and advice in determining the species of bat flies, and A.V. Derunkov for providing equipment for photography.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Soos A., Hurka K. Nycteribiidae // Catalogue of Palaearctic Diptera. Scathophagidae – Hypodermatidae. 1986. V. 11. P. 226–234.
- Фарафонова Г.В. Никтерибииды Советского Союза (Diptera: Nycteribiidae) // Двукрылые фауны СССР и их роль в экосистемах: сборник докладов III Всесоюзного симпозиума диптерологов, г. Белая Церковь, 15–17 сентября, 1982. Ленинград, 1984. С. 130–131.
- Маковецкая Е.В., Ларченко А.И. К познанию фауны паучниц (Diptera: Nycteribiidae) Беларуси // Актуальные проблемы экологии: сборник научных статей. Гродно: ГрГУ. 2020. С. 51–52.
- Dietz C., Kiefer A. Bats of Britain and Europe. London: Bloomsbury Wildlife, 2018. 400 p.
- Theodor O. An illustrated catalogue of the Rothschild collection of Nycteribiidae (Diptera) in the British Museum (Natural History). London: British Museum (Natural History), 1967. 521 p.
- Folmer O., Black M., Hoeh W., Lutz R., Vrijenhoek R. DNA primers for amplification of mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I from diverse metazoan invertebrates // Molecular Marine Biology Biotechnology. 1994. V. 3. N 5. P. 294–299.
- Баранов О.Ю. Методы молекулярно-генетического анализа. Минск: Юнипол, 2007. 175 с.
- National Center for Biotechnology Information (NCBI) // Bethesda (MD): National Library of Medicine (US), National Center for Biotechnology Information. 1998. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/> (дата обращения: 07.08.2023)
- Kumar S., Nei M., Dudley J., Tamura K. MEGA: a biologist-centric software for evolutionary analysis of DNA and protein sequences // Briefings in Bioinformatics. 2008. V. 9. N 4. P. 299–306. <https://doi.org/10.1093/bib/bbn017>
- Leigh J.W., Bryant D. PopART: Full-feature software for haplotype network construction // Methods in Ecology and Evolution. 2015. V. 6. N 9. P. 1110–1116. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12410>
- Orlova M.V., Klimov P.B., Moskvitina N.S., Orlov O.L., Zhigalin A.V., Smirnov D.G., Dzhamirzoyev H.S., Vekhnik V.P., Pavlov A.V., Emelyanova A.A., Khristenko E. New records of bat flies (Diptera: Nycteribiidae), with an updated checklist of the nycteribiids of Russia // Zootaxa. 2021. V. 4927. N 3. P. 410–430. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4927.3.5>
- Орлова М.В. Обзор кровососущих мух рукокрылых (Nycteribiidae, Streblidae) Палеарктики // XI Всероссийский диптерологический симпозиум (с международным участием), Воронеж, 24–29 августа 2020: сборник материалов. Санкт-Петербург: Русское энтомологическое общество: ООО «Издательство “ЛЕМА”», 2020. С. 165–167.
- Бей-Биенко Г.Я. Определитель насекомых Европейской части СССР. Двукрылые, блохи. Ленинград: Наука, 1970. Т. 5. Ч. 2. 943 с.
- Mlynárová L., Korytár L., Manko P., Ondrejková A., Prokeš M., Smolák R., Oboňa J. Updated Taxonomic Key of European Nycteribiidae (Diptera), with a Host-Parasite Network // Diversity. 2023. V. 15. N 4. Article ID: 573. <https://doi.org/10.3390/d15040573>
- Nowosad A. Stan badań nad mrokawkowatymi – Nycteribiidae (Diptera, Pupipara) w Polsce, z przegłędem gatunków i stanowisk ich występowania // Wiadomości Entomologiczne. 1990. V. 9. N 3–4. P. 77–85.
- Frank R., Kuhn T., Werblow A., Liston A., Kochmann J., Klimpel S. Parasite diversity of European Myotis species with special emphasis on *Myotis myotis* (Microchiroptera, Vespertilionidae) from a typical nursery roost // Parasites and Vectors. 2015. V. 8. Article ID: 101. <https://doi.org/10.1186/s13071-015-0707-7>
- Hebert P.D., Ratnasingham S., deWaard J.R. Barcoding animal life: cytochrome c oxidase subunit 1 divergences among closely related species // Proceedings. Biological sciences. 2003. V. 270. Suppl 1. P. S96–S99. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2003.0025>
- Bruyndonckx N., Dubey S., Ruedi M., Christe P. Molecular cophylogenetic relationships between European bats and their ectoparasitic mites (Acari, Spinturnicidae) // Molecular phylogenetics and evolution. 2009. V. 51. N 2. P. 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2009.02.005>
- Pejić B., Budinski I., van Schaik J., Blagojević J. Sharing roosts but not ectoparasites: high host-specificity in bat flies and wing mites of *Miniopterus schreibersii* and *Rhinolophus ferrumequinum* (Mammalia: Chiroptera) // Current zoology. 2021. V. 68. N 5. P. 507–516. <https://doi.org/10.1093/cz/zoab086>
- Ramasindrazana B., Goodman S.M., Gomard Y., Dick C.W., Tortosa P. Hidden diversity of Nycteribiidae (Diptera) bat flies from the Malagasy region and insights on host-parasite interactions // Parasites and Vectors. 2017. V. 10.

- N 1. Article ID: 630. <https://doi.org/10.1186/s13071-017-2582-x>
21. Tortosa P., Dsouli N., Gomard Y., Ramasindrazana B., Dick C.W., Goodman S.M. Evolutionary history of Indian Ocean nycteribiid bat flies mirroring the ecology of their hosts // *PLoS one*. 2013. V. 8. N 9. Article ID: e75215. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0075215>
22. Nabeshima K., Sato S., Kabeya H., Komine N., Nanashima R., Takano A., Shimoda H., Maeda K., Suzuki K., Maruyama S. Detection and phylogenetic analysis of Bartonella species from bat flies on eastern bent-wing bats (*Miniopterus fuliginosus*) in Japan // *Comparative immunology, microbiology and infectious diseases*. 2020. V. 73. Article ID: 101570. <https://doi.org/10.1016/j.cimid.2020.101570>
23. Lee H., Seo M.G., Lee S.H., Oem J.K., Kim S.H., Jeong H., Kim Y., Jheong W.H., Kwon O.D., Kwak D. Relationship among bats, parasitic bat flies, and associated pathogens in Korea // *Parasites and Vectors*. 2021. V. 14. N 1. Article ID: 503 <https://doi.org/10.1186/s13071-021-05016-6>
24. Han H.J., Li Z.M., Li X., Liu J.X., Peng Q.M., Wang R., Gu X.L., Jiang Y., Zhou C.M., Li D., Xiao X., Yu X.J. Bats and their ectoparasites (Nycteribiidae and Spinturnicidae) carry diverse novel Bartonella genotypes, China // *Transboundary and emerging diseases*. 2022. V. 69. N 4. P. 845–858. <https://doi.org/10.1111/tbed.14357>
25. Poon E.S.K., Chen G., Tsang H.Y., Shek C.T., Tsui W.C., Zhao H., Guénard B., Sin S.Y.W. Species richness of bat flies and their associations with host bats in a subtropical East Asian region // *Parasites and Vectors*. 2023. V. 16. N 1. Article ID: 37. <https://doi.org/10.1186/s13071-023-05663-x>
26. Olival K.J., Dick C.W., Simmons N.B., Morales J.C., Melnick D.J., Dittmar K., Perkins S.L., Daszak P., Desalle R. Lack of population genetic structure and host specificity in the bat fly, *Cyclopodia horsfieldi*, across species of Pteropus bats in Southeast Asia // *Parasites and Vectors*. 2013. V. 6. Article ID: 231. <https://doi.org/10.1186/1756-3305-6-231>
27. Yang J., Huang X., Wang Y., Yang H., Zhang X., Zheng X. Complete mitogenome of *Nycteribia allotopa* Speiser, 1901 (Diptera, Hippoboscoidae, Nycteribiidae) and comparative analysis of mitochondrial genomes of Nycteribiidae // *Parasitology international*. 2023. V. 96. Article ID: 102769. <https://doi.org/10.1016/j.parint.2023.102769>
28. Yang J., Huang X., Yang H., Wang Y., Zhang X., Zheng X. The complete mitochondrial genome of *Nycteribia parvula* Speiser, 1901 (Diptera, Nycteribiidae) // *Mitochondrial DNA. Part B, Resources*. 2023. V. 8. N 2. P. 276–280. <https://doi.org/10.1080/23802359.2023.2169573>
29. Zheng X., Huang X., Yang J., Yang H., Zhang X. The complete mitochondrial genome of *Nycteribia formosana* (Diptera, Nycteribiidae) // *Mitochondrial DNA. Part B, Resources*. 2023. V. 8. N 12. P. 1406–1410. <https://doi.org/10.1080/23802359.2023.2290127>
30. Rosyadi I., Shimoda H., Takano A., Yanagida T., Sato H. Isolation and molecular characterization of Polychromophilus spp. (Haemosporida: Plasmodiidae) from the Asian long-fingered bat (*Miniopterus fuliginosus*) and Japanese large-footed bat (*Myotis macrodactylus*) in Japan // *Parasitology research*. 2022. V. 121. N 9. P. 2547–2559. <https://doi.org/10.1007/s00436-022-07592-7>
31. Duron O., Schnepat U.E., Berthomieu A., Goodman S.M., Droz B., Paupy C., Nkoghe J.O., Rahola N., Tortosa P. Origin, acquisition and diversification of heritable bacterial endosymbionts in louse flies and bat flies // *Molecular ecology*. 2014. V. 23. N 8. P. 2105–2117. <https://doi.org/10.1111/mec.12704>
32. McKee C.D., Krawczyk A.I., Sándor A.D., Görföl T., Földvári M., Földvári G., Dekeukeleire D., Haarsma A.-J., Kosoy M.Y., Webb C.T., Sprong H. Host Phylogeny, Geographic Overlap, and Roost Sharing Shape Parasite Communities in European Bats // *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2019. V. 7. Article ID: 69. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00069>
33. Hosokawa T., Nikoh N., Koga R., Satô M., Tanahashi M., Meng X.Y., Fukatsu T. Reductive genome evolution, host-symbiont co-speciation and uterine transmission of endosymbiotic bacteria in bat flies // *The ISME Journal*. 2012. V. 6. N 3. P. 577–587. <https://doi.org/10.1038/ismej.2011.125>
34. Lehtikoinen A., Pohjola P., Valkama J., Mutanen M., Pohjoismäki J.L.O. Promiscuous specialists: Host specificity patterns among generalist louse flies // *PLoS one*. 2021. V. 16. N 5. Article ID: e0247698. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247698>
35. Roslin T., Somervuo P., Pentinsaari M., Hebert P.D.N., Agda J., Ahlroth P., Anttonen P., Aspi J., Blagoev G., Blanco S., Chan D., Clayhills T., deWaard J., deWaard S., Elliot T., Elo R., Haapala S., Helve E., Ilmonen J., Hirvonen P., Mutanen M. A molecular-based identification resource for the arthropods of Finland // *Molecular ecology resources*. 2022. V. 22. N 2. P. 803–822. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.13510>

REFERENCES

- Soos A., Hurka K. Nycteribiidae. *Catalogue of Palaearctic Diptera. Scathophagidae – Hypodermatidae*, 1986, vol. 11, pp. 226–234.
- Farafonova G.V. Nycteribiidi Sovetskogo soyuza (Diptera: Nycteribiidae) [Nycteribiidae of the Soviet Union (Diptera: Nycteribiidae)]. *Dvukrylye fauny SSSR i ikh rol' v ekosistemakh: sbornik dokladov 3-go Vsesoyuznogo simpoziuma dipterologov, Belaya Tserkov', 15–17 sentyabrya 1982* [Diptera of the fauna of the USSR and their role in ecosystems: collection of reports of the Third All-Union Symposium of Dipterologists, Belaya Tserkov', 15/17 September 1982]. Leningrad, 1984, pp. 130–131. (In Russian)
- Makavetskaya K., Larchanka A. K poznaniyu fauny pauchnits (Diptera: Nycteribiidae) Belarusi [To the knowledge of bat-flies fauna (Diptera: Nycteribiidae) of Belarus]. In: *Aktual'nye problemy ekologii: sbornik nauchnykh statei* [Current problems of ecology: collection of scientific articles]. Grodno, State University of Grodno Publ., 2020, pp. 51–52. (In Russian)
- Dietz C., Kiefer A. *Bats of Britain and Europe*. London, Bloomsbury Wildlife Publ., 2018, 400 p.
- Theodor O. *An illustrated catalogue of the Rothschild collection of Nycteribiidae (Diptera) in the British Museum (Natural History)*. London, British Museum (Natural History) Publ., 1967, 521 p.
- Folmer O., Black M., Hoeh W., Lutz R., Vrijenhoek R. DNA primers for amplification of mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I from diverse metazoan invertebrates. *Molecular Marine Biology Biotechnology*. 1994, vol. 3, no. 5, pp. 294–299.
- Baranov O.Yu. *Metody molekulyarno-geneticheskogo analiza* [Methods of molecular genetic analysis]. Minsk, Yunipol Publ., 2007, 175 p. (in Russian)
- National Center for Biotechnology Information (NCBI). Bethesda (MD): National Library of Medicine (US), National Center for Biotechnology Information. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/> (accessed 07.08.2023)

9. Kumar S., Nei M., Dudley J., Tamura K. MEGA: a biologist-centric software for evolutionary analysis of DNA and protein sequences. *Briefings in Bioinformatics*, 2008, vol. 9, no. 4, pp. 299–306. <https://doi.org/10.1093/bib/bbn017>
10. Leigh J.W., Bryant D. PopART: Full-feature software for haplotype network construction. *Methods in Ecology and Evolution*, 2015, vol. 6, no. 9, pp. 1110–1116. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12410>
11. Orlova M.V., Klimov P.B., Moskvitina N.S., Orlov O.L., Zhigalin A.V., Smirnov D.G., Dzhamirzoyev H.S., Vekhnik V.P., Pavlov A.V., Emelyanova A.A., Khristenko E. New records of bat flies (Diptera: Nycteribiidae), with an updated checklist of the nycteribiids of Russia. *Zootaxa*, 2021, vol. 4927, no. 3, pp. 410–430. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4927.3.5>
12. Orlova M.V. Obzor krovososushchikh mukh rukokrylykh (Nycteribiidae, Streblidae) Palearktiki [Review of bats flies (Nycteribiidae, Streblidae) of the palaeartic region]. *XI Vserossiiskii dipterologicheskii simpozium (s mezhdunarodnym uchastiem), Voronezh, 24–29 avgusta 2020: sbornik materialov* [All-Russian Dipterological Symposium (with international participation), Voronezh, 24–29 August 2020: materials]. St.-Petersburg, “LEMA” Publ., 2020, pp. 165–167.
13. Bei-Bienko G.Ya. *Opredelitel' nasekomykh Evropeiskoi chasti SSSR. Dvukrylye, blokhi* [Key to insects of the European part of the USSR. Diptera, Siphonaptera]. Leningrad, Nauka Publ., 1970, vol. 5, p. 2, 943 p. (In Russian)
14. Mlynárová L., Korytár L., Manko P., Ondrejková A., Prokeš M., Smolák R., Oboňa J. Updated Taxonomic Key of European Nycteribiidae (Diptera), with a Host-Parasite Network. *Diversity*, 2023, vol. 15, no. 4, article id: 573. <https://doi.org/10.3390/d15040573>
15. Nowosad A. Stan badań nad mrokawkowatymi – Nycteribiidae (Diptera, Pupipara) w Polsce, z przeglądem gatunków i stanowisk ich występowania [The state of research on bat flies – Nycteribiidae (Diptera, Pupipara) in Poland, with a survey of species and their localities]. *Wiadomości Entomologiczne*. 1990, vol. 9, no. 3–4, pp. 77–85. (In Polish)
16. Frank R., Kuhn T., Werblow A., Liston A., Kochmann J., Klimpel S. Parasite diversity of European *Myotis* species with special emphasis on *Myotis myotis* (Microchiroptera, Vespertilionidae) from a typical nursery roost. *Parasites and Vectors*, 2015, vol. 8, article id: 101. <https://doi.org/10.1186/s13071-015-0707-7>
17. Hebert P.D., Ratnasingham S., deWaard J.R. Barcoding animal life: cytochrome c oxidase subunit 1 divergences among closely related species. *Proceedings. Biological sciences*, 2003, vol. 270, Suppl 1, pp. S96–S99. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2003.0025>
18. Bruyndonckx N., Dubey S., Ruedi M., Christe P. Molecular cophylogenetic relationships between European bats and their ectoparasitic mites (Acari, Spinturnicidae). *Molecular phylogenetics and evolution*, 2009, vol. 51, no. 2, pp. 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2009.02.005>
19. Pejić B., Budinski I., van Schaik J., Blagojević J. Sharing roosts but not ectoparasites: high host-specificity in bat flies and wing mites of *Miniopterus schreibersii* and *Rhinolophus ferrumequinum* (Mammalia: Chiroptera). *Current zoology*, 2021, vol. 68, no. 5, pp. 507–516. <https://doi.org/10.1093/cz/zoab086>
20. Ramasindrazana B., Goodman S.M., Gomard Y., Dick C.W., Tortosa P. Hidden diversity of Nycteribiidae (Diptera) bat flies from the Malagasy region and insights on host-parasite interactions. *Parasites and Vectors*, 2017, vol. 10, no. 1, article id: 630. <https://doi.org/10.1186/s13071-017-2582-x>
21. Tortosa P., Dsouli N., Gomard Y., Ramasindrazana B., Dick C.W., Goodman S. M. Evolutionary history of Indian Ocean nycteribiid bat flies mirroring the ecology of their hosts. *PloS one*, 2013, vol. 8, no. 9, article id: e75215. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0075215>
22. Nabeshima K., Sato S., Kabeya H., Komine N., Nanashima R., Takano A., Shimoda H., Maeda K., Suzuki K., Maruyama S. Detection and phylogenetic analysis of Bartonella species from bat flies on eastern bent-wing bats (*Miniopterus fuliginosus*) in Japan. *Comparative immunology, microbiology and infectious diseases*, 2020, vol. 73, article id: 101570. <https://doi.org/10.1016/j.cimid.2020.101570>
23. Lee H., Seo M.G., Lee S.H., Oem J.K., Kim S.H., Jeong H., Kim Y., Jheong W.H., Kwon O.D., Kwak D. Relationship among bats, parasitic bat flies, and associated pathogens in Korea. *Parasites and Vectors*, 2021, vol. 14, no. 1, article id: 503 <https://doi.org/10.1186/s13071-021-05016-6>
24. Han H.J., Li Z.M., Li X., Liu J.X., Peng Q.M., Wang R., Gu X.L., Jiang Y., Zhou C.M., Li D., Xiao X., Yu X.J. Bats and their ectoparasites (Nycteribiidae and Spinturnicidae) carry diverse novel Bartonella genotypes, China. *Transboundary and emerging diseases*, 2022, vol. 69, no. 4, pp. 845–858. <https://doi.org/10.1111/tbed.14357>
25. Poon E.S.K., Chen G., Tsang H.Y., Shek C.T., Tsui W.C., Zhao H., Guénard B., Sin S.Y.W. Species richness of bat flies and their associations with host bats in a subtropical East Asian region. *Parasites and Vectors*, 2023, vol. 16, no. 1, article id: 37. <https://doi.org/10.1186/s13071-023-05663-x>
26. Olival K.J., Dick C.W., Simmons N.B., Morales J.C., Melnick D.J., Dittmar K., Perkins S.L., Daszak P., Desalle R. Lack of population genetic structure and host specificity in the bat fly, *Cyclopodia horsfieldi*, across species of Pteropus bats in Southeast Asia. *Parasites and Vectors*, 2013, vol. 6, article id: 231. <https://doi.org/10.1186/1756-3305-6-231>
27. Yang J., Huang X., Wang Y., Yang H., Zhang X., Zheng X. Complete mitogenome of *Nycteribia allotopa* Speiser, 1901 (Diptera, Hippoboscoidea, Nycteribiidae) and comparative analysis of mitochondrial genomes of Nycteribiidae. *Parasitology international*, 2023, vol. 96, article id: 102769. <https://doi.org/10.1016/j.parint.2023.102769>
28. Yang J., Huang X., Yang H., Wang Y., Zhang X., Zheng X. The complete mitochondrial genome of *Nycteribia parvula* Speiser, 1901 (Diptera, Nycteribiidae). *Mitochondrial DNA. Part B, Resources*, 2023, vol. 8, no. 2, pp. 276–280. <https://doi.org/10.1080/23802359.2023.2169573>
29. Zheng X., Huang X., Yang J., Yang H., Zhang X. The complete mitochondrial genome of *Nycteribia formosana* (Diptera, Nycteribiidae). *Mitochondrial DNA. Part B, Resources*, 2023, vol. 8, no. 12, pp. 1406–1410. <https://doi.org/10.1080/23802359.2023.2290127>
30. Rosyadi I., Shimoda H., Takano A., Yanagida T., Sato H. Isolation and molecular characterization of Polychromophilus spp. (Haemosporida: Plasmodiidae) from the Asian long-fingered bat (*Miniopterus fuliginosus*) and Japanese large-footed bat (*Myotis macrodactylus*) in Japan. *Parasitology research*, 2022, vol. 121, no. 9, pp. 2547–2559. <https://doi.org/10.1007/s00436-022-07592-7>
31. Duron O., Schneppat U.E., Berthomieu A., Goodman S.M., Droz B., Paupy C., Nkoghe J.O., Rahola N., Tortosa P. Origin, acquisition and diversification of heritable bacterial endosymbionts in louse flies and bat flies. *Molecular*

ecology, 2014, vol. 23, no. 8, pp. 2105–2117.

<https://doi.org/10.1111/mec.12704>

32. McKee C.D., Krawczyk A.I., Sándor A.D., Görföl T., Földvári M., Földvári G., Dekeukeleire D., Haarsma A.-J., Kosoy M.Y., Webb C.T., Sprong H. Host Phylogeny, Geographic Overlap, and Roost Sharing Shape Parasite Communities in European Bats. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2019, vol. 7, article id: 69.

<https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00069>

33. Hosokawa T., Nikoh N., Koga R., Satō M., Tanahashi M., Meng X.Y., Fukatsu T. Reductive genome evolution, host-symbiont co-speciation and uterine transmission of endosymbiotic bacteria in bat flies. *The ISME journal*, 2012, vol. 6, no. 3, pp. 577–587.

<https://doi.org/10.1038/ismej.2011.125>

34. Lehtikoinen A., Pohjola P., Valkama J., Mutanen M., Pohjoismäki J.L.O. Promiscuous specialists: Host specificity patterns among generalist louse flies. *PLoS one*, 2021, vol. 16, no. 5, article id: e0247698.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247698>

35. Roslin T., Somervuo P., Pentinsaari M., Hebert P.D.N., Agda J., Ahlroth P., Anttonen P., Aspi J., Blagoev G., Blanco S., Chan D., Clayhills T., deWaard J., deWaard S., Elliot T., Elo R., Haapala S., Helve E., Ilmonen J., Hirvonen P., Mutanen, M. A molecular-based identification resource for the arthropods of Finland. *Molecular ecology resources*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 803–822.

<https://doi.org/10.1111/1755-0998.13510>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Александра И. Ларченко собрала материал, разработала концепцию и дизайн исследования. Екатерина В. Маковецкая определила энтомологический материал. Павел С. Кирьянов провел исследование нуклеотидной последовательности маркерного региона мтДНК молекулярно-генетическими методами анализа. Ульяна В. Горобейко провела филогенетический анализ для представителей рода *Nycteribia*. Александра И. Ларченко, Ульяна В. Горобейко и Екатерина В. Маковецкая в равной степени участвовали в написании работы, анализе и интерпретации данных. 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

Aleksandra I. Larchanka collected the material and developed the concept and design of the study. Ekaterina V. Makovetskaya determined the entomological material. Pavel S. Kiryanov studied the nucleotide sequence of the mtDNA marker region using molecular genetic analysis methods. Uliana V. Gorobeyko carried out a phylogenetic analysis for representatives of the genus *Nycteribia*. Aleksandra I. Larchanka, Uliana V. Gorobeyko and Ekaterina V. Makovetskaya contributed equally to the writing of the article and analysis and interpretation of data. All authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Александра И. Ларченко / Aleksandra I. Larchanka <https://orcid.org/0000-0002-2332-6914>

Ульяна В. Горобейко / Uliana V. Gorobeyko <https://orcid.org/0000-0001-8059-140X>

Екатерина В. Маковецкая / Ekaterina V. Makovetskaya <https://orcid.org/0009-0009-0880-8219>

Павел С. Кирьянов / Pavel S. Kiryanov <https://orcid.org/0000-0002-6224-9771>

Обзорная статья / Review article
УДК 574.24:591.1
DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-6



Зимняя спячка млекопитающих как стратегия адаптации к неблагоприятным факторам среды

Айна К. Бейбалаева^{1,2}, Шамиль И. Чалабов³, Нисред К. Кличханов^{1,4}

¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

²Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Махачкала, Россия

³Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

⁴Автономная некоммерческая организация высшего образования «Научно-клинический центр имени Башларова», Махачкала, Россия

Контактное лицо

Нисред К. Кличханов, доктор биологических наук, профессор; Дагестанский государственный университет; 367000 Россия, г. Махачкала, Республика Дагестан, ул. Гаджиева, 43а.
Тел. +79288394950
Email klich-khan@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9405-6552>

Формат цитирования

Бейбалаева А.К., Чалабов Ш.И., Кличханов Н.К. Зимняя спячка млекопитающих как стратегия адаптации к неблагоприятным факторам среды // Юг России: экология, развитие. 2024. Т.19, N 2. С. 57-68. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-6

Получена 1 апреля 2024 г.
Прошла рецензирование 20 апреля 2024 г.
Принята 26 апреля 2024 г.

Резюме

Цель: проанализировать имеющиеся литературные данные о путях выживания гетеротермных эндотермов в неблагоприятных экологических условиях, в периоды низкой доступности пищевых ресурсов.

В статье приводятся данные о различиях суточной и сезонной гетеротермии. Выделены особенности подготовки к зимней спячке факультативных и облигатных гибернаторов. Рассмотрены гипотезы происхождения и эволюции гетеротермии. Обобщены наиболее вероятные причины периодических пробуждений животных от спячки в период гибернации. Значительное внимание уделено перестройке энергетического обмена в период зимней спячки – переходу от углеводного к липидному метаболизму. Проанализированы данные, свидетельствующие о значении жирных кислот, получаемых с пищей в активный летний период, как для синтеза запасных жиров, так и в регуляции самой спячки. Опираясь на данные о накоплении в тканях моноеновых жирных кислот в период спячки, высказано предположение об их адаптивном значении, направленном на ограничение окислительного стресса и сохранение жизненно важных функций клеток.

Приведённые данные могут быть использованы как для проведения фундаментальных исследований адаптивных механизмов взаимодействия организма со средой, так и для решения практических задач, особенно при выборе моделей ограничения калорий или прерывистого голодания, а также изучения толерантности тканей к окислительному стрессу и устойчивости к повреждающему действию ишемии-реперфузии.

Ключевые слова

Зимняя спячка, сезонная адаптация, физиология, периодические пробуждения, роль липидов.

Mammal hibernation as a strategy for adaptation to unfavorable environmental conditions

Aina K. Beibalaeva^{1,2}, Shamil I. Chalabov³ and Nisred K. Klichkhanov^{1,4}

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia

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

³Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry, Russian Academy of Sciences, St Petersburg, Russia

⁴Bashlarov Scientific and Clinical Center named after Bashlarov, Makhachkala, Russia

Principal contact

Nisred K. Klichkhanov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of Biology, Dagestan State University; 43a M. Gadzhiev St, Makhachkala, Russia 367000.

Tel. +79288394950

Email klich-khan@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9405-6552>

How to cite this article

Beibalaeva A.K., Chalabov Sh.I., Klichkhanov N.K. Mammal hibernation as a strategy for adaptation to unfavorable environmental conditions. *South of Russia: ecology, development*. 2024; 19(2):57-68. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-6

Received 1 April 2024

Revised 20 April 2024

Accepted 26 April 2024

Abstract

To analyse the literature data on the survival pathways of heterothermic endotherms in unfavorable environmental conditions, during periods of low availability of food resources.

The article provides data on the differences between daily and seasonal heterothermy. The features of preparation for hibernation in facultative and obligate hibernators are highlighted. Hypotheses of the origin and evolution of heterothermy are considered. The most probable causes of periodic awakenings of animals from hibernation during the hibernation period are summarised. Considerable attention is paid to the restructuring of energy metabolism during hibernation – the transition from carbohydrate to lipid metabolism. Data have been analysed indicating the importance of fatty acids obtained from food during the active summer period, both for the synthesis of reserve fats and in the regulation of hibernation. Based on data on the accumulation of monoenoic fatty acids in tissues during hibernation, it has been suggested that they have an adaptive significance aimed at limiting oxidative stress and preserving vital cell functions.

The data presented can be used both for conducting fundamental research on the adaptive mechanisms of interaction of an organism with its environment, and for solving practical problems, especially when choosing models of calorie restriction or intermittent fasting, as well as studying tissue tolerance to oxidative stress and resistance to the damaging effects of ischemia – reperfusion.

Key Words

Hibernation, seasonal adaptation, physiology, periodic arousals, the role of lipids.

ВВЕДЕНИЕ

Существование живых организмов невозможно без получения энергии, необходимой для поддержания роста и размножения. Их выживание зависит от тонкого баланса между получением энергии (добыванием пищи) и ее расходом, что имеет большое значение для экологии и эволюции животных [1]. Этот баланс особенно сложен для эндотермных животных, которые функционируют при фиксированной и относительно высокой заданной температуре тела, что влечет за собой высокие затраты на поддержание жизнедеятельности. В периоды дефицита энергии, такие как воздействие холода, нехватка пищи, уменьшение светлого времени суток, поддержание положительного энергетического баланса имеет решающее значение для выживания и будущего воспроизводства [2]. Чтобы решить эту проблему, некоторые эндотермные виды (гетеротермы) используют механизмы энергосбережения, позволяющие им сбалансировать свои энергетические бюджеты перед сезонными изменениями климата, а также связанными с ними переменаами доступности, составе и количестве растительных и животных кормов, различий в доступе к ним, различий в меж- и внутривидовых взаимодействиях. В отличие от гомойотермных эндотермов, которые вынуждены постоянно производить эндогенное тепло для компенсации высоких теплопотерь, гетеротермные эндотермы обладают способностью временно снижать свои энергетические затраты, вступая в длительные периоды контролируемого гипометаболизма и гипотермии, т.е. в гибернацию [3; 4].

В статье рассмотрены данные научной литературы об эволюционно выработанных механизмах, обеспечивающих выживание гетеротермных эндотермов в неблагоприятных экологических условиях с упором на физиологию и биохимию.

ОБСУЖДЕНИЕ

Гибернация как феномен

Торпидные состояния используются эндотермными животными в широком диапазоне экологических и физиологических условий [5]. Существует большое разнообразие гибернационных и гетеротермных фенотипов. Торпидные состояния у организмов умеренных и арктических зон дифференцируются на «суточный торпор» и «спячку» в зависимости от продолжительности гипометаболического состояния [5; 6]. Суточный торпор состоит из гипометаболических фаз продолжительностью менее 24 часов. При этом уровень обмена веществ составляет ~19% от базального уровня, а температура тела обычно снижается до 12–25°C. В то же время спячка длится несколько месяцев и состоит из серии гипометаболических фаз, сопровождающихся регулярными эутермическими пробуждениями, а уровень обмена веществ снижается до 4% от базальных показателей, наряду со снижением температуры тела до 0–10°C у большинства видов [7]. Ежедневные гетеротермы впадают в оцепенение, более напоминающее глубокий сон, чем спячку. Суточная гетеротермия широко распространена у многих видов птиц, мелких грызунов, сумчатых и летучих мышей и обычно не является такой сезонной, как спячка [5; 6]. Использование торпидного состояния в качестве адаптивной стратегии позволяет гетеротермным видам

существенно снижать свои энергетические потребности в периоды нехватки пищевых ресурсов. Экономия энергии при зимней спячке более выражена, чем при суточном оцепенении, но в отличие от оцепенения спячка требует подготовки (например, накопления жировых запасов, перестройки систем органов) [8]. Оцепенение демонстрируют организмы как умеренных и арктических зон, так и неголоарктические виды. В отличие от обитателей умеренных и арктических зон, впадающих в спячку сезонно, неголоарктические виды физиологически проявляют оцепенение в экстремальных условиях для корректировки энергетического баланса при сезонных неблагоприятных условиях (низкая температура, большое количество осадков, низкая доступность пищи) [9].

Торпор зафиксирован у всех трех подклассов млекопитающих, а также у нескольких отрядов птиц, тогда как спячка зарегистрирована у млекопитающих всех трех подклассов, но известна только для одного вида птиц (обыкновенный бедняга, *Phalaenoptilus nuttallii*) [6]. Многодневные периоды оцепенения характерны для млекопитающих следующих отрядов: *Monotremata* (ехидны), *Diprotodontia* (карликовые опоссумы), *Erinaceomorpha* (ежи), *Carnivora* (медведи), *Chiroptera* (летучие мыши), *Primates* (толстохвостый карликовый лемур) и *Rodentia* (суслики) [10]. У таких млекопитающих, как сурки и суслики, спячка носит ярко выраженный сезонный характер и в основном ограничивается периодом, когда доступность пищи и температура окружающей среды низкие. В отличие от этой модели, некоторые другие млекопитающие, особенно летучие мыши и сумчатые, более оппортунистичны и могут впадать в длительное оцепенение в любое время года, когда неблагоприятные условия окружающей среды или нехватка пищи требуют сокращения затрат энергии [10]. Медведи и некоторые другие плотоядные животные подвергаются «зимней летаргии», во время которой на несколько месяцев прекращается прием пищи и воды. Уровень метаболизма при этом снижается, но не до такой степени, как у более мелкие зимоспящих видов [11]. В зависимости от физиологических и этологических особенностей, гетеротермных эндотермов подразделяют на две группы: факультативные и облигатные гибернаторы. Факультативные гибернаторы преимущественно запасают корм и впадают в спячку, когда ресурсов недостаточно, температура низкая, а изменения фотопериода предвещают сезонные изменения. Данная категория включает мелких и средних грызунов, таких как хомяки, бурундуки, а также некоторых сумчатых и летучих мышей. Другие животные, называемые облигатными гибернаторами, накапливают значительные запасы жира и впадают в спячку сезонно, независимо от наличия ресурсов, температуры окружающей среды и фотопериода [12]. Поскольку спячка устойчива к некоторым изменениям окружающей среды, считается, что она координируется внутренними циркадными часами [13]. Облигатные гибернаторы включают нескольких представителей семейства *Sciuridae*, среди которых суслики, белохвостые луговые собачки (*Cynomys leucurus*) и сурки (*Marmota*); некоторые виды приматов рода *Cheirogaleus*, известные как карликовые лемуры; европейские ежи (*Erinaceus europaeus*); и европейские барсуки (*Meles meles*). Из них глубокоспящие обитают в

наиболее экстремальных условиях и остаются в спячке 5–7 месяцев [14–16].

Альтернативой стратегии спячки является миграция. Мигрирующие виды сохраняют основные физиологические показатели и находят среду, соответствующую этим параметрам. Данное обстоятельство может быть одной из причин того, почему существует мало птиц, впадающих в спячку [14].

Исследования последних лет выявляют оцепенение у все большего числа видов млекопитающих и отрядов птиц, превращая таксономически ограниченный признак в признак с широким филогенетическим разнообразием [17]. Независимо от того, является ли спячка наследственной или недавно возникшей чертой, широкое распространение видов млекопитающих, впадающих в спячку, позволяет предположить, что гены, необходимые для определения фенотипа гибернации, распространены среди геномов всех млекопитающих [7].

Происхождение гетеротермии не вполне ясно. Сходство терморегуляторных механизмов у новорожденных млекопитающих и у современных гетеротермов привело к гипотезе о возникновении гетеротермии вследствие неотении у некоторой ветви млекопитающих, то есть утраты в процессе эволюции стадий развития, ведущих к формированию взрослого фенотипа [18]. С другой стороны, гетеротермы присутствуют среди эволюционно удаленных клад, что, как предполагается, связано с эволюцией консервативных физиологических путей, общих для всех позвоночных. Самая распространенная гипотеза эволюции гетеротермии придерживается ее плезiomорфности, то есть, способность гетеротермов снижать температуру тела является остатком более древней пойкилотермии, в то время как гомойотермия является производной гетеротермии, эволюционировавшей у других позвоночных [17; 19; 20].

Физиологические особенности гибернации

Гибернацию можно охарактеризовать как эффективную энергосберегающую стратегию адаптации к длительному существованию в условиях глубокой гипотермии, гипоксии и дефицита пищевых ресурсов, позволяющую гетеротермным млекопитающим выживать в этих условиях [21]. Для переживания неблагоприятных условий среды гетеротермы выработали комплекс адаптаций на физиологическом, биохимическом и молекулярном уровнях. Эти адаптации можно описать как обеспечивающие подготовку к спячке, снижение уровня метаболизма, поддерживающие целостность клеток в торпидном состоянии, а также обуславливающие восстановление эутермных показателей при пробуждении организма [22].

Механизмы гибернации подробно изучены у облигатных гибернаторов – сурков и сусликов (13-ти полосных сусликов *Ictidomys tridecemlineatus*, сусликов Ричардсона *Urocyon richardsonii* и арктических сусликов *Urocyon parryi*), спячка которых регулируется эндогенными цирканнуальными ритмами [23]. У зимоспящих зафиксированы разные температурные диапазоны, при которых они впадают в спячку. У большинства грызунов (сурки, суслики) этот показатель варьирует от 1 до 6°C [4]. Спячка у них длится почти полгода, начинается осенью и завершается весной. Спячка не является непрерывной физиологической реакцией, а состоит из серии

гипометаболических периодов оцепенения, прерываемых периодами спонтанного пробуждения, при которых физиологические и биохимические показатели достигают значений эутермии. Каждый из таких периодов включает четыре различных состояния: вход в состояние оцепенения, при котором уровень метаболизма и температура тела снижаются до предельно допустимого минимума; глубокая спячка, когда основные параметры сохраняются на низком уровне в течение нескольких дней; пробуждение и период эутермии продолжительностью 1–2 дня [24]. Продолжительность оцепенения зависит от вида и условий обитания гибернаторов. Короткие периоды оцепенения характерны для начала и конца спячки, в середине зимы продолжительность периодов оцепенения может достигать 15–20 дней [4]. По нашим данным у малого суслика (*Spermophilus pygmaeus*) продолжительность баутов в начале спячки составляла 3–5 дней, в середине спячки (январь) – 14–15 дней, а к концу спячки весной снова сокращалась до 3–5 дней [25]. При этом длительность повторного входа в спячку составляла примерно 6–7 ч, а выхода – 2–2,5 ч.

Пластичность физиологических, биохимических и молекулярных функций способствует выживанию организма в условиях спячки. Ключевыми физиологическими событиями спячки выступают периодическое, но контролируемое снижение температуры тела и скорости метаболизма [6]. Снижение энергетических затрат обусловлено подавлением стимуляции термогенных тканей (скелетные мышцы и бурая жировая ткань), пассивным снижением скорости биохимических реакций из-за снижения температуры тела (эффект Q_{10}) и независимой от температуры метаболической супрессией базального уровня в нетермогенных тканях. Все вышеуказанные компоненты способствуют комплексному снижению уровня метаболизма у гетеротермных эндотермов, но данный параметр в некоторой степени зависит от массы тела, вида организма и условий окружающей среды [24]. Скорость метаболизма при спячке достигает уровня $0.014 \text{ мл O}_2 \text{ г}^{-1} \text{ ч}^{-1}$, что составляет 1/25 от скорости метаболизма в эутермном состоянии ($0.34 \text{ мл O}_2 \text{ г}^{-1} \text{ ч}^{-1}$) [4]. Снижение скорости метаболизма сопровождается падением температуры тела. В торпидном состоянии температура тела поддерживается на уровне 2°C (критический уровень). Снижение температуры ниже допустимого минимума может привести к усилению метаболизма, пробуждению или гибели животного [26]. Минимально допустимые значения температуры тела зависят от вида оцепенения. Так у животных, впадающих в дневное оцепенение, она варьирует в пределах 10–22°C, и от -3 до 5°C у облигатных зимоспящих [27]. Такие различия, возможно, обусловлены разной степенью холодовой резистентности мембранно-зависимых функций [28]. Экстремальный случай фенотипа гибернации зафиксирован у арктического суслика, у которого уровень метаболизма снижается на 98 %, а температура тела составляет всего -2°C [29]. Таким образом, подавление метаболизма значительно снижает энергетические затраты и, соответственно, вызывает критическим паттерном фенотипа гибернации [7].

При глубокой спячке меняются все физиологические функции, связанные с метаболизмом: угнетение сердечного ритма и последующее усиление

вазоконстрикции, снижение частоты дыхательных движений (1/100 от базального уровня). Частота сердечных сокращений снижается с 200–300 до 3–5 ударов в минуту, дыхание снижается с нормальных 100–200 до 4–6 вдохов в минуту, характерны длительные периоды апноэ, значительное или полное прекращение функционирования почек [7; 28]. Частота дыхательных движений снижается параллельно с частотой сердечных сокращений, но непрерывная вентиляция сменяется на прерывистую. Наряду с этими процессами снижается и скорость газообмена, даже больше, чем скорость метаболизма, следствием чего выступает респираторный ацидоз. Все вышеназванные факторы вызывают широкие колебания уровня pO_2 в крови. В целом гипоксическая дыхательная реакция при гипометаболизме значительно снижена или вовсе отсутствует [30]. Во время спячки животные поддерживают внеклеточный pH на уровне 7,40 [31]. Известно, что снижение температуры повышает pH до нейтральных значений. Однако во время спячки животные поддерживают внеклеточный pH на уровне 7,40 за счет дополнительного подкисления среды [28]. Данное обстоятельство способствует поддержанию гипометаболизма помимо того уровня, что определяется низкими значениями температуры тела. Поскольку при спячке организмы подвергаются глубокому физиологическому ремоделированию даже при отсутствии воздействия со стороны окружающей среды, то это, по мнению Кери и коллег [7], служит доказательством того, что спячка инициируется молекулярно-генетическими механизмами, а не является только выраженным физиологическим ответом на периодический дефицит пищи и/или экстремально низкие температуры среды.

Предполагаемые причины периодических пробуждений животных от спячки

Между пробуждениями и периоды эутермии с энергетической точки зрения невыгодны зимоспящим, поскольку на их долю приходится большая часть энергии, используемой в течение всего периода спячки [32]. По данным Ван [33] на согревание и последующее бодрствование, перед тем как снова войти в торпидное состояние, приходится не менее 70 % общего расхода энергии в период гибернации.

Необходимость и причины периодических пробуждений мелких грызунов в период гибернации до сих пор не понятны. Предполагают, что уменьшение энергетических субстратов или накопление конечных продуктов обмена заставляет животных пробуждаться для восстановления гомеостаза [34; 35]. Согласно этой гипотезе пробуждение вызывается постепенными процессами, подобными песочным часам, приводящими к накоплению метаболитических отходов, которые не могут быть выведены из организма при низкой температуре тела или способствующих истощению энергетических запасов, зависящих от температуры. Следовательно, пробуждение может быть связано с восстановительной функцией, противодействуя метаболитическому дисбалансу.

Теория песочных часов нашла поддержку в недавнем исследовании, проведенном на садовых сонях (*Eliomys quercinus*). Руф с коллегами [36] обнаружили, что во время спячки потребление кислорода было наиболее важной переменной, определяющей продолжительность торпидного

состояния. Это полностью соответствует предположению, что животные должны выходить из оцепенения, когда повышенный обмен веществ способствует метаболитическому дисбалансу.

Другая гипотеза связана с иммунной функцией. В торпидном состоянии у ряда видов наблюдается снижение активности иммунной системы [37; 38]. Это может быть связано с истощением запасов лимфоцитов в крови во время торпора, которые восстанавливаются при периодических пробуждениях [38]. Следовательно, периодические пробуждения могут активировать дремлющую иммунную систему для борьбы с патогенами во время междуторпидного бодрствования [37].

Еще одна гипотеза касается работы мозга. Было обнаружено, что ультраструктура синапсов в лобной коре европейского суслика (*Spermophilus citellus*) изменяется в цикле торпор-пробуждение [39]. При этом в торпидном состоянии количество нейронных связей уменьшается, но во время пробуждения после синаптической регрессии следует повторное соединение синаптических контактов [40; 41]. Если бы такие изменения зависели от температуры, они могли бы способствовать объяснению температурной зависимости длительности баутов спячки.

Особенности энергетического метаболизма во время спячки

Подготовка к гибернации начинается в конце лета, когда животные проходят через период гиперфагии, что значительно увеличивает жировые запасы (в основном, хранятся в виде триглицеридов в белой жировой ткани), иногда удваивая массу тела [42]. Во всех органах происходит перестройка ферментных систем для перехода на катаболизм липидов. Переход от углеводного к липидному метаболизму требует существенной перестройки путей превращения субстратов. Ключевое место в перестройках такого рода занимает регуляция активности пируватдегидрогеназы под действием различных изоферментов семейства киназ (PDK4), факторов транскрипции, PPAR α и AMP-активируемой протеинкиназы (AMPK) [42–44]. Во время спячки увеличивается активность этих регуляторов. Согласно Хили и коллегам [45] фосфорилированная форма AMPK (pAMPK) активирует процессы окисления жирных кислот в тканях, подавляет биосинтез жирных кислот в печени и жировой ткани, ингибирует синтез белка в печени и мышцах, инактивирует ацетил-КоА-карбоксилазу у золотистых сусликов (*Callospermophilus ternalis*). Ингибирование пируватдегидрогеназы нарушает поступление промежуточных продуктов гликолиза в цикл Кребса. Бак и коллеги [44] обнаружили, что ген, кодирующий PDK4, активируется у зимоспящих в сердце, белой жировой ткани и скелетных мышцах 13-ти полосного суслика. Считают [46], что обусловленный ингибированием PDK4 переход от окисления углеводов к окислению липидов направлен на сохранение и использование глюкозы в междуторпидные периоды и после выхода из спячки. В отличие от других органов, мозг не использует жирные кислоты в качестве источника топлива, но может использовать кетоновые тела [47]. Жирные кислоты, образовавшиеся при липолизе, в митохондриях печени превращаются в кетоновые тела. Один из эндогенных продуктов липидного гидролиза D- β -гидроксибутират является предпочтительным энергетическим субстратом для клеток мозга в состоянии спячки, но при

спонтанных пробуждениях его уровень снижается, в то же время повышается уровень глюкозы. У 13-ти полосного суслика в состоянии спячки на гематоэнцефалическом барьере возрастает количество переносчиков D-β-гидроксibuтирата – МСТ1, а количество транспортера глюкозы GLUT-1 не меняется. Исследования Эндрюс и коллег [48] показывают, что и D-β-гидроксibuтират, и глюкоза транспортируются в сердце и мозг в торпидном состоянии, но в качестве энергетического субстрата используется только D-β-гидроксibuтират, так как при его метаболизме не накапливается лактат.

Липиды пищи в регуляция зимней спячки

Известно, что гибернаторы перед спячкой потребляют пищу, богатую ненасыщенными жирными кислотами [42]. Сезонное увеличение полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК), которым свойственна более низкая температура плавления, важно для поддержания текучести депонированных жиров, необходимых для метаболизма в торпидном состоянии и текучести мембранных фосфолипидов [49] и защиты сердца при низких температурах тела [50]. Установлена связь между содержанием ПНЖК в рационе и их влиянием на снижение температуры тела, длительность периодов оцепенения и снижение скорости метаболических реакций [51].

Существенное влияние на паттерны спячки оказывают n-3 и n-6 ПНЖК. Снижение температуры тела при входе в торпидное состояние у альпийских сурков сопровождалось увеличением концентрации линолевой (C18:2, n-6) и арахидоновой кислот (C20:4, n-6) в мембранах сердца и печени [52]. В то же время у спящих сурков зафиксировано значительное снижение концентрации n-3 ПНЖК в жировых отложениях. Линолевая кислота (C18:2, n-6) важна для нормальной спячки млекопитающих. Экспериментальное исследование Хилл и Флоран [53] позволило установить, что недостаток этой кислоты в жировых тканях желтобрюхих сурков (*Marmota flaviventris*) способствует более коротким периодам оцепенения и высокой скорости метаболизма во время спячки. Диета же с высоким содержанием n-3 ПНЖК снижает склонность к спячке у желтобрюхих сурков и подавляет наступление спячки у садовой сони (*Eliomys quercinus*) [54]. Аналогичные результаты получены в ходе лабораторных исследований на золотистых сусликах. Суслики, получавшие 33–74 мг линолевой кислоты/г, имели низкую скорость метаболизма, а периоды оцепенения были более продолжительными [55]. Такая же концентрация альфа-линоленовой кислоты (C18:3) в рационе оказывала влияние на спячку золотистых сусликов аналогичным образом [56]. Исследования Жиру и коллег [50] демонстрируют, что при потреблении линолевой кислоты улучшается функционирование сердечной мышцы за счет перекачки ионов кальция при активации Ca²⁺-АТФазы эндоплазматической сети. Руф и Арнольд [51] на основе исследований, проведенных на альпийских сурках (*Marmota marmota*), установили, что влияние жирных кислот на спячку обусловлено соотношением n-6/n-3 ПНЖК в фосфолипидах мембран. В частности, высокие соотношения n-6/n-3 ПНЖК повышают активность Ca²⁺-АТФазы саркоплазматического ретикулума сердца. Авторы полагают, что n-6 и n-3 ПНЖК (и, возможно, n-9 мононенасыщенная жирная кислота) облегчают

встраивание белков в мембраны, изменяют их физические свойства, влияют на конформацию и специфическую активность трансмембранных ферментов.

Кормление арктических сусликов перед спячкой рационом с повышенным содержанием ПНЖК n-3 положительно модулирует термогенез в торпидном состоянии [57]. Этот эффект может быть опосредован увеличением докозагексаеновой и эйкозапентоеновой кислот в плазме, бурой и белой жировых тканях. Влияние ПНЖК n-3 на спячку может зависеть от концентрации. Исследования на садовой соне во время спячки не выявили влияния омега-3 ПНЖК на термогенез, что позволяет предположить вероятность существования видоспецифичных реакций на кормление омега-3 ПНЖК [54]. Обнаружено снижение уровня докозагексаеновой кислоты в тканях и мембранных фосфолипидах до начала спячки садовой сони [54], что связано с положительным влиянием этой кислоты на метаболические пути [58]. Клетки с высоким содержанием докозагексаеновой кислоты демонстрируют повышенный митохондриальный потенциал [59]. Эти данные позволяют предположить, что при спячке происходит ремоделирование мембран с удалением и/или окислением докозагексаеновой кислоты и сохранением линолевой кислоты в тканях и мембранах клеток [54]. ПНЖК влияют на продолжительность торпора не только у облигатных гибернаторов, но и у других видов, проявляющих разные вариации оцепенения. Так, у тропических лемуров уровень ненасыщенных жирных кислот в жировой ткани и печени возрастал при кратковременном гипометаболизме [60]. При этом уровень ненасыщенных жирных кислот положительно коррелировал с длительностью и глубиной гипотермического состояния лемуров. В последующем было установлено, что потребление диеты, обогащенной омега-3 ПНЖК, предотвращало падение температуры тела у лемуров в отличие от контрольных животных [61].

Предполагается, что ПНЖК не являются единственным средством регуляции текучести мембраны, иначе насекомоядные летучие мыши и ехидны не могли бы впадать в спячку. Возможно, у грызунов развилась физиологическая зависимость от потребления большого количества ПНЖК. Насекомоядные виды, которые сталкиваются с низким уровнем ПНЖК в своем рационе, могут в гораздо большей степени полагаться на альтернативные механизмы поддержания текучести жиров [62].

Интерес представляют данные об изменении жирнокислотного состава тканей при наступившей спячке. Прайс с коллегами [63] показали, что у грызунов при гибернации происходит селективная мобилизация жирных кислот из триацилглицеринов жирового депо. По их данным в торпидном состоянии у 13-ти полосных сусликов олеиновая (C18:1ω9) и линолевая кислоты (C18:2ω6) избирательно сохранялись в белой жировой ткани, в то время как уровни стеариновой кислоты (C18:0) и пальмитиновой кислоты (16:0) в этой же ткани снижались. Эти данные согласуются с результатами, полученными у медведей при гибернации. По данным Жиру и коллег [64] у бурых медведей (*Ursus arctos*) во время гибернации содержание НЖК в белой жировой ткани и мышцах снижалось, а в плазме крови существенно возрастало. В то же время содержание

ПНЖК в тканях увеличивалось, а в плазме крови снижалось. Избирательная мобилизация насыщенных жирных кислот и сохранение в тканях ПНЖК, видимо, связана с важной физиологической ролью полиеновых кислот, отличной от использования их только как источников энергии [64]. Следует отметить, что у гибернарующих якутских сусликов (*Spermophilus undulatus*) в миокарде и скелетных мышцах общее количество ПНЖК снижается, а сумма насыщенных (НЖК) и мононенасыщенных жирных кислот (МНЖК) – возрастает [65]. Эти данные частично согласуются с результатами определения жирных кислот у бурых медведей, у которых уровень МНЖК в мембранах во время спячки был выше, чем ПНЖК [64]. Известно, что ПНЖК подвержены перекисному окислению и могут образовывать соединения, нарушающие структуру биологических мембран [66]. Исходя из этого можно предположить, что снижение содержания суммы ПНЖК по сравнению с общим количеством НЖК+МНЖК в тканях в период гибернации может иметь адаптивное значение, направленное на ограничение перекисного окисления жирных кислот для сохранения жизненно важных функций клеток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование зимней спячки в качестве адаптивной стратегии позволяет различным гетеротермным млекопитающим существенно подавлять свои потребности в энергии в периоды резкого снижения доступности пищи. Зимняя спячка связана с выраженными метаболическими адаптациями не только на уровне всего организма, но и на клеточном и молекулярном уровнях. Выявление механизмов адаптации животных к суточному и сезонному оцепенению у запасующих жир в сравнении с видами, запасующими пищу, позволяет сделать практические выводы, особенно при выборе моделей ограничения калорий или прерывистого голодания. Непрерывная спячка у крупных млекопитающих, а также прерывистая спячка у мелких грызунов являются важными моделями в изучении толерантности тканей к окислительному стрессу, а также устойчивости к повреждающему действию ишемии-реперфузии. Важной задачей современной экологической физиологии и биохимии является изучение эволюции адаптивных механизмов гетеротермных эндотермов в контексте глобального изменения климата, других изменений в физической среде, а также в популяциях и сообществах.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование частично выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ в рамках научного проекта №20-34-9011.

ACKNOWLEDGMENT

The research was partially carried out with the financial support of an RFBR grant within the framework of scientific project No. 20-34-9011.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kronfeld-Schor N., Dayan T. Thermal ecology, environments, communities, and global change: energy intake and expenditure in endotherms // *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 2013. V. 44. P. 461–

480. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110512-135917>

2. Humphries M.M., Thomas D.W., Kramer D.L. The role of energy availability in mammalian hibernation: a cost-benefit approach // *Physiological and Biochemical Zoology*. 2003. V. 76. N 2. P. 165–179.

3. Geiser F. Hibernation // *Current Biology*. 2013. V. 23. N 5. P. 188–193. DOI: 10.1016/j.cub.2013.01.062

4. Heldmaier G., Ortman S., Elvert R. Natural hypometabolism during hibernation and daily torpor in mammals // *Respiratory Physiology and Neurobiology*. 2004. V. 141. N 3. P. 17–29.

<https://doi.org/10.1016/j.resp.2004.03.014>

5. Geiser F. Seasonal expression of avian and mammalian daily torpor and hibernation: not a simple summer-winter affair // *Frontiers in Physiology*. 2020. V. 11.

<https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00436>

6. Ruf T., Geiser F. Daily torpor and hibernation in birds and mammals // *Biological Reviews Cambridge Philosophical Society*. 2015. V. 90. N 3. P. 891–926.

<https://doi.org/10.1111/brv.12137>

7. Carey H.V., Andrews M.T., Martin S.L. Mammalian hibernation: cellular and molecular responses to depressed metabolism and low temperature // *Physiological Reviews*. 2003. V. 83. N 4. P. 1153–1181.

<https://doi.org/10.1152/physrev.00008.2003>

8. Liu J.N., Karasov W.H. Metabolism during winter in a subtropical hibernating bat, the Formosan leaf-nosed bat (*Hipposideros terasensis*) // *Journal of Mammalogy*. 2012. V. 93. N 1. P. 220–228. <https://doi.org/10.1644/11-MAMM-A-144.1>

9. Nowack J., Levesque D.L., Reher S., Dausmann K.H. Variable climates lead to varying phenotypes: «weird» mammalian torpor and lessons from non-holarctic species // *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2020. V. 8.

<https://doi.org/10.3389/fevo.2020.00060>

10. Geiser F. Yearlong hibernation in a marsupial mammal // *The Science of Nature*. 2007. V. 94. P. 941–944.

<http://dx.doi.org/10.1007/s00114-007-0274-7>

11. Toien O., Blake J., Barnes B.M. Thermoregulation and energetics in hibernating black bears: Metabolic rate and the mystery of multi-day body temperature cycles // *Journal of Comparative Physiology*. 2015. V. 185. N 4. P. 447–461.

<http://dx.doi.org/10.1007/s00360-015-0891-y>

12. Giroud S., Haldol C., Nespolo R.F., Mejías C., Terrien J., Logan S.M., Henning R.H., Storey K.B. The torpid state: recent advances in metabolic adaptations and protective mechanisms // *Frontiers Physiology*. 2021. V. 11. Article id: 623665.

<https://doi.org/10.3389/fphys.2020.623665>

13. Ануфриев А.И. Очерки экологии и зимней спячки млекопитающих в условиях холода. Новосибирск: СО РАН, 2023. 152 с.

14. Mohr S.M., Bagriantsev S.N., Gracheva E.O. Molecular and physiological adaptations of hibernation: the solution to environmental challenges // *Annual Review of Cell and Development Biology*. 2020. V. 36. P. 315–338.

<https://doi.org/10.1146/annurev-cellbio-012820-095945>

15. Chayama Y., Ando L., Tamura Y., Miura M., Yamaguchi Y. Decreases in body temperature and body mass constitute pre-hibernation remodelling in the Syrian golden hamster, a facultative mammalian hibernator // *Royal Society Open Science*. 2016. V. 3. N 4.

<https://doi.org/10.1098/rsos.160002>

16. Florant G., Healy J. The regulation of food intake in mammalian hibernators: a review // *Journal of*

- Comparative Physiology B. 2012. V. 182. N 4. P. 451–67. <https://doi.org/10.1007/s00360-011-0630-y>
17. Geiser F. Ontogeny and phylogeny of endothermy and torpor in mammals and birds // *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology*. 2008. V. 150. N 2. P. 176–80. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2007.02.041>
18. Harris M.B., Olson L.E., Milsom W.K. The origin of mammalian heterothermy: a case for perpetual youth? // *Life in the Cold: Evolution, Mechanisms, Adaptation, and Application*. Twelfth International Hibernation Symposium. 2004. P. 144–52.
19. Grigg G.C., Beard L.A., Augee M.L. The evolution of endothermy and its diversity in mammals and birds // *Physiological and Biochemical Zoology*. 2004. V. 77. N 6. P. 982–997. <https://doi.org/10.1086/425188>
20. Lovegrove B.G., Ruf T., Bieber C., Arnold W., Milesi E., eds. *A single origin of heterothermy in mammals. Living in a Seasonal World: Thermoregulatory and Metabolic Adaptations*. Berlin: Springer, 2012. P. 3–11.
21. Andrews M.T. Molecular interactions underpinning the phenotype of hibernation in mammals // *The Journal of Experimental Biology*. 2019. V. 222. Iss. 2. Article Id: jeb160606. <https://doi.org/10.1242/jeb.160606>
22. Klug B.J., Brigham R.M. Changes to Metabolism and Cell Physiology that Enable Mammalian Hibernation // *Springer Science Reviews*. 2015. V. 3. N 1. P. 39–56. <http://dx.doi.org/10.1007/s40362-015-0030-x>
23. Frare C., Williams C.T., Drew K.L. Thermoregulation in hibernating mammals: The role of the «thyroid hormones system» // *Molecular and Cellular Endocrinology*. 2021. Article id: 111054. <https://doi.org/10.1016/j.mce.2020.111054>
24. Staples J.F. Metabolic flexibility: hibernation, torpor, and estivation // *Comprehensive Physiology*. 2016. V. 6. N 2. P. 737–771. <https://doi.org/10.1002/cphy.c140064>
25. Klichkhanov N.K., Nikitina E.R., Shihamirova Z.M., Astaeva M.D., Chalabov S.I., Krivchenko A.I. Erythrocytes of little ground squirrels undergo reversible oxidative stress during arousal from hibernation // *Frontiers Physiology*. 2021. V. 12. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.730657>
26. Buck C.L., Barnes B.M. Effects of ambient temperature on metabolic rate, respiratory quotient, and torpor in an arctic hibernator // *American Journal Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. 2000. V. 279. N 1. P. 255–262. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.2000.279.1.r255>
27. Geiser F. Hibernation: Endotherms // *Encyclopedia of life sciences*. 2001. <http://dx.doi.org/10.1038/npg.els.0003215>
28. Wang L.C.H., Lee T.F. Torpor and hibernation in mammals: metabolic, physiological, and biochemical adaptations // *Comprehensive Physiology*. 2011. <https://doi.org/10.1002/cphy.cp040122>
29. Ануфриев А.И. Температурная регуляция ритмов зимней спячки // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020. Т. 25. N 1. С.60–67. DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-1-6
30. Milsom W.K., Jackson D.C. Hibernation and gas exchange // *Comprehensive Physiology*. 2011. V. 1. N 1. P. 397–420. <https://doi.org/10.1002/cphy.c090018>
31. Maginniss L.A., Milsom W.K. Effects of hibernation on blood oxygen transport in the golden-mantled ground squirrel // *Respiration Physiology*. 1994. V. 95. N 2. P. 195–208. [https://doi.org/10.1016/0034-5687\(94\)90116-3](https://doi.org/10.1016/0034-5687(94)90116-3)
32. Karpovich S.A., Tøien O., Buck C.L., Barnes B.M. Energetics of arousal episodes in hibernating arctic ground squirrels // *Journal of Comparative Physiology B*. 2009. V. 179. N 6. P. 691–700. <https://doi.org/10.1007/s00360-009-0350-8>
33. Wang L.C. H. Time patterns and metabolic rates of natural torpor in the Richardson's ground squirrel // *Canadian Journal of Zoology*. 1979. V. 57. P. 149–155. DOI:10.1139/Z79-012
34. Jinka T.R., Rasley B.T., Drew K.L. Inhibition of NMDA-type glutamate receptors induces arousal from torpor in hibernating arctic ground squirrels (*Urocitellus parryii*) // *Journal of Neurochemistry*. 2012. V. 122. P. 934–940. <https://doi.org/10.1111/j.1471-4159.2012.07832.x>
35. Zimmerman M.L. Carbohydrate and torpor duration in hibernating golden-mantled ground squirrels (*Citellus lateralis*) // *Journal of Comparative Physiology*. 1982. V. 147. N 1. P. 129–135. URL: <http://hdl.handle.net/2027.42/47127>
36. Ruf T., Gasch K., Stalder G., Gerritsmann H., Giroud S. An hourglass mechanism controls torpor bout length in hibernating garden dormice // *Journal of Experimental Biology*. 2021. V. 224. N 23. Article Id: jeb243456. <https://doi.org/10.1242/jeb.243456>
37. Prendergast B.J., Freeman D.A., Zucker I, Nelson R.J. Periodic arousal from hibernation is necessary for initiation of immune responses in ground squirrels // *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. 2002. V. 282. N 4. P. 1054–1062. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00562.2001>
38. Bouma H.R., Koese F.G.M., Kok J.W., Talaei F., Boerema A.S., Herwig A., Draghiciu O., van Buiten A., Epema A.H., van Dam A., Strijkstra A.M., Henning R.H. Low body temperature governs the decline of circulating lymphocytes during hibernation through sphingosine-1-phosphate // *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*. 2011. V. 108. N 5. P. 2052–2057. <https://doi.org/10.1073/pnas.1008823108>
39. Ruediger J., van der Zee E.A., Strijkstra A.M., Aschoff A., Daan S., Hut R.A. Dynamics in the ultrastructure of asymmetric axospinous synapses in the frontal cortex of hibernating European ground squirrels (*Spermophilus citellus*) // *Synapse*. 2007. V. 61. N 5. P. 343–352. <https://doi.org/10.1002/syn.20380>
40. Popov V.I., Bocharova L.S., Bragin A.G. Repeated changes of dendritic morphology in the hippocampus of ground squirrels in the course of hibernation // *Neuroscience*. 1992. V. 48. N 1. P. 45–51. [https://doi.org/10.1016/0306-4522\(92\)90336-z](https://doi.org/10.1016/0306-4522(92)90336-z)
41. Arendt T., Bullmann T. Neuronal plasticity in hibernation and the proposed role of the microtubule-associated protein tau as a “master switch” regulating synaptic gain in neural networks // *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. 2013. V. 305. N 5. P. R478–489. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00117.2013>
42. Dark J. Annual lipid cycles in hibernators: integration of physiology and behavior // *Annual Review of Nutrition*. 2005. V. 25. P. 469–497. <https://doi.org/10.1146/annurev.nutr.25.050304.092514>
43. Storey K.B. Out cold: biochemical regulation of mammalian hibernation – a mini-review // *Gerontology*. 2010. V. 56. N 2. P. 220–230. <https://doi.org/10.1159/000228829>
44. Buck M.J., Squire T.L., Andrews M.T. Coordinate expression of the PDK4 gene: a means of regulating fuel

- selection in a hibernating mammal // *Physiological Genomics*. 2002. V. 8. N 1. P. 5–13. <https://doi.org/10.1152/physiolgenomics.00076.2001>
45. Healy G.N., Clark B.K., Winkler E.A., Gardiner P.A., Brown W.J., Matthews C.E. Measurement of adults sedentary time in population-based studies // *American Journal of Preventive Medicine*. 2011. V. 41. N 2. P. 216–27. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2011.05.005>
46. Puchalska P., Crawford P.A. Multi-dimensional roles of ketone bodies in fuel metabolism, signaling, and therapeutics // *Cell Metabolism*. 2017. V. 25. N 2. P. 262–284. <https://doi.org/10.1016%2Fj.cmet.2016.12.022>
47. García-Rodríguez D., Giménez-Cassina A. Ketone bodies in the brain beyond fuel metabolism: from excitability to gene expression and cell signaling // *Frontiers in Molecular Neuroscience*. 2021. V. 14. <https://doi.org/10.3389/fnmol.2021.732120>
48. Andrews M.T., Russeth K.P., Drewes L.R., Henry P.G. Adaptive mechanisms regulate preferred utilization of ketones in the heart and brain of a hibernating mammal during arousal from torpor // *The American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. 2009. V. 296. N 2. P. 383–393. <https://doi.org/10.1152%2Fajpregu.90795.2008>
49. Aloia R.C. Lipid, fluidity, and functional studies of the membranes of hibernating mammals. In: Aloia R.C., Curtain C.C., Gordon L.M. (eds.), *Advances in membrane fluidity*. Alan R. Liss, Inc., New York. 1988. P. 1–39.
50. Giroud S., Frare C., Strijkstra A., Boerema A., Arnold W., Ruf T. Membrane phospholipid fatty acid composition regulates cardiac SERCA activity in a hibernator, the Syrian hamster (*Mesocricetus auratus*) // *PLoS ONE*. 2013. V. 8. N 5. Article Id: e63111. <https://doi.org/10.1371%2Fjournal.pone.0063111>
51. Ruf T., Arnold W. Effects of polyunsaturated fatty acids on hibernation and torpor: a review and hypothesis // *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. 2008. V. 294. N 3. P. 1044–1052. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00688.2007>
52. Arnold W., Ruf T., Frey-Roos F., Bruns U. Diet-Independent remodeling of cellular membranes precedes seasonally changing body temperature in a hibernator // *PLoS ONE*. 2011. V. 6. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0018641>
53. Hill V.L., Florant G.L. The effect of a linseed oil diet on hibernation in yellow-bellied marmots (*Marmota flaviventris*) // *Physiology and Behavior*. 2000. V. 68. N 4. P. 431–437. [https://doi.org/10.1016/s0031-9384\(99\)00177-8](https://doi.org/10.1016/s0031-9384(99)00177-8)
54. Giroud S., Stalder G., Gerritsmann H., Kübber-Heiss A., Kwak J., Arnold W., Ruf T. Dietary lipids affect the onset of hibernation in the garden dormouse (*Eliomys quercinus*): implications for cardiac function // *Frontiers Physiology*. 2018. V. 18. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01235>
55. Frank C.L. Short-term variations in diet fatty acid composition and torpor by ground squirrels // *Journal of Mammalogy*. 2002. V. 83. N 4. P. 1013–1019. [https://doi.org/10.1644/15451542\(2002\)083%3C1013:STVDF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1644/15451542(2002)083%3C1013:STVDF%3E2.0.CO;2)
56. Frank C.L., Hood W.R., Donnelly M.C. The role of alpha-linolenic acid (18:3) in mammalian torpor. In: Barnes B.M., Carey H.V., eds. *Life in the cold: evolution, mechanisms, adaptation, and application*. AK: University of Alaska Fairbanks, 2004. pp. 71–80.
57. Rice S.A., Mikes M., Bibus D., Berdyshev E., Reisz J.A., Gehrke S., Bronova I., D'Alessandro A., Drew K.L. Omega 3 fatty acids stimulate thermogenesis during torpor in the Arctic Ground Squirrel // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. N 1340. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78763-8>
58. Arnold W., Giroud S., Valencak T.G., Ruf T. Ecophysiology of omega fatty acids: a lid for every jar // *Physiology (Bethesda)*. 2015. V. 30. N 3. P. 232–240. DOI: 10.1152/physiol.00047.2014
59. Watkins S.M., Carter L.C., German J.B. Docosahexaenoic acid accumulates in cardiolipin and enhances HT-29 cell oxidant production // *Journal of Lipid Research*. 1998. V. 39. N 8. P. 1583–1588.
60. Vuarin P., Henry P.Y., Guesnet P., Alessandri J.M., Aujard F., Perret M., Pifferi F. Shallow hypothermia depends on the level of fatty acid unsaturation in adipose and liver tissues in a tropical heterothermic primate // *Journal of Thermal Biology*. 2014. V. 43. P. 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2014.05.002>
61. Vuarin P., Henry P.Y., Perret M., Pifferi F. Dietary Supplementation with n-3 Polyunsaturated Fatty Acids Reduces Torpor Use in a Tropical Daily Heterotherm // *Physiological and Biochemical Zoology*. 2016. V. 89. N 6. P. 536–545. <https://doi.org/10.1086/688659>
62. Munro D., Thomas D.W. The role of polyunsaturated fatty acids in the expression of torpor by mammals: a review // *Zoology (Jena)*. 2004. V. 107. N 1. P. 29–48. <https://doi.org/10.1016/j.zool.2003.12.001>
63. Price E.R., Armstrong C., Guglielmo C.G., Staples J.F. Selective mobilization of saturated fatty acids in isolated adipocytes of hibernating 13-lined ground squirrels *Ictidomys tridecemlineatus* // *Physiological and Biochemical Zoology*. 2013. V. 86. N 2. P. 205–212. <https://doi.org/10.1086/668892>
64. Giroud S., Chery I., Bertile F., Bertrand-Michel J., Tascher G., Gauquelin-Koch G., Arnemo J.M., Swenson J.E., Singh N.J., Lefai E., Evans A.L., Simon C., Blanc S. Lipidomics reveals seasonal shifts in a large-bodied hibernator, the brown bear // *Frontiers in Physiology*. 2019. V. 10. <https://doi.org/10.3389%2Ffphys.2019.00389>
65. Kulagina T.P., Popova S.S., Aripovsky A.V. Seasonal changes in the content of fatty acids in the myocardium and m. longissimus dorsi of the Long-Tailed Ground Squirrel *Urocitellus undulates* // *Biophysics*. 2021. V. 66. N 6. P. 1004–1010. DOI: 10.1134/S0006350921060087
66. Kodali S.T., Kauffman P., Kotha S.R., Yenigalla A., Veeraraghavan R., Pannu S.R., Hund T.J., Satoskar A.R., McDaniel J.C., Maddipati R.K., Parinandi N.L. Oxidative lipidomics: analysis of oxidized lipids and lipid peroxidation in biological systems with relevance to health and disease. In: Berliner L., Parinandi N., eds. *Measuring Oxidants and Oxidative Stress in Biological Systems*. Biological Magnetic Resonance. 2020. V. 34. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47318-1_5

REFERENCES

- Kronfeld-Schor N., Dayan T. Thermal ecology, environments, communities, and global change: energy intake and expenditure in endotherms. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 2013, vol. 44, pp. 461–480. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110512-135917>
- Humphries M.M., Thomas D.W., Kramer D.L. The role of energy availability in mammalian hibernation: a cost-benefit approach. *Physiological and Biochemical Zoology*. 2003, vol. 76, no. 2, pp. 165–179.
- Geiser F. Hibernation. *Current Biology*, 2013, vol. 23, no. 5, pp. 188–193. DOI: 10.1016/j.cub.2013.01.062

4. Heldmaier G., Ortman S., Elvert R. Natural hypometabolism during hibernation and daily torpor in mammals. *Respiratory Physiology and Neurobiology*, 2004, vol. 141, no. 3, pp. 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2004.03.014>
5. Geiser F. Seasonal expression of avian and mammalian daily torpor and hibernation: not a simple summer-winter affair. *Frontiers in Physiology*, 2020, vol. 11. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00436>
6. Ruf T., Geiser F. Daily torpor and hibernation in birds and mammals. *Biological Reviews Cambridge Philosophical Society*, 2015, vol. 90, no. 3, pp. 891–926. <https://doi.org/10.1111/brv.12137>
7. Carey H.V., Andrews M.T., Martin S.L. Mammalian hibernation: cellular and molecular responses to depressed metabolism and low temperature. *Physiological Reviews*, 2003, vol. 83, no. 4, pp. 1153–1181. <https://doi.org/10.1152/physrev.00008.2003>
8. Liu J.N., Karasov W.H. Metabolism during winter in a subtropical hibernating bat, the Formosan leaf-nosed bat (*Hipposideros terasensis*). *Journal of Mammalogy*, 2012, vol. 93, no. 1, pp. 220–228. <https://doi.org/10.1644/11-MAMM-A-144.1>
9. Nowack J., Levesque D.L., Reher S., Dausmann K.H. Variable climates lead to varying phenotypes: «weird» mammalian torpor and lessons from non-holarctic species. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2020, vol. 8. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.00060>
10. Geiser F. Yearlong hibernation in a marsupial mammal. *The Science of Nature*, 2007, vol. 94, pp. 941–944. <http://dx.doi.org/10.1007/s00114-007-0274-7>
11. Toien O., Blake J., Barnes B.M. Thermoregulation and energetics in hibernating black bears: Metabolic rate and the mystery of multi-day body temperature cycles. *Journal of Comparative Physiology*, 2015, vol. 185, no. 4, pp. 447–61. <http://dx.doi.org/10.1007/s00360-015-0891-y>
12. Giroud S., Habold C., Nespolo R.F., Mejías C., Terrien J., Logan S.M., Henning R.H., Storey K.B. The torpid state: recent advances in metabolic adaptations and protective mechanisms. *Frontiers Physiology*, 2021, vol. 11, article id: 623665. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.623665>
13. Anufriev A.I. *Ocherki ekologii i zimnei spyachki mlekopitayushchikh v usloviyakh kholoda* [Essays on the ecology and hibernation of mammals in cold conditions]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2023, 152 p. (In Russian)
14. Mohr S.M., Bagriantsev S.N., Gracheva E.O. Molecular and physiological adaptations of hibernation: the solution to environmental challenges. *Annual Review of Cell and Development Biology*, 2020, vol. 36, pp. 315–338. <https://doi.org/10.1146/annurev-cellbio-012820-095945>
15. Chayama Y., Ando L., Tamura Y., Miura M., Yamaguchi Y. Decreases in body temperature and body mass constitute pre-hibernation remodelling in the Syrian golden hamster, a facultative mammalian hibernator. *Royal Society Open Science*, 2016, vol. 3, no. 4. <https://doi.org/10.1098/rsos.160002>
16. Florant G., Healy J. The regulation of food intake in mammalian hibernators: a review. *Journal of Comparative Physiology B*, 2012, vol. 182, no. 4, pp. 451–67. <https://doi.org/10.1007/s00360-011-0630-y>
17. Geiser F. Ontogeny and phylogeny of endothermy and torpor in mammals and birds. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 2008, vol. 150, no. 2, pp. 176–80. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2007.02.041>
18. Harris M.B., Olson L.E., Milsom W.K. The origin of mammalian heterothermy: a case for perpetual youth? *Life in the Cold: Evolution, Mechanisms, Adaptation, and Application*. Twelfth International Hibernation Symposium, 2004, pp. 144–152.
19. Grigg G.C., Beard L.A., Augee M.L. The evolution of endothermy and its diversity in mammals and birds. *Physiological and Biochemical Zoology*, 2004, vol. 77, no. 6, pp. 982–997. <https://doi.org/10.1086/425188>
20. Lovegrove B.G., Ruf T., Bieber C., Arnold W., Millesi E., eds. A single origin of heterothermy in mammals. *Living in a Seasonal World: Thermoregulatory and Metabolic Adaptations*. Berlin, Springer Publ., 2012, pp. 3–11.
21. Andrews M.T. Molecular interactions underpinning the phenotype of hibernation in mammals. *The Journal of Experimental Biology*, 2019, vol. 222, iss. 2, article id: jeb160606. <https://doi.org/10.1242/jeb.160606>
22. Klug B.J., Brigham R.M. Changes to Metabolism and Cell Physiology that Enable Mammalian Hibernation. *Springer Science Reviews*, 2015, vol. 3, no. 1, pp. 39–56. <http://dx.doi.org/10.1007/s40362-015-0030-x>
23. Frare C., Williams C.T., Drew K.L. Thermoregulation in hibernating mammals: The role of the «thyroid hormones system». *Molecular and Cellular Endocrinology*, 2021, article id: 111054. <https://doi.org/10.1016/j.mce.2020.111054>
24. Staples J.F. Metabolic flexibility: hibernation, torpor, and estivation. *Comprehensive Physiology*, 2016, vol. 6, no. 2, pp. 737–771. <https://doi.org/10.1002/cphy.c140064>
25. Klichkhanov N.K., Nikitina E.R., Shihamirova Z.M., Astaeva M.D., Chalabov S.I., Krivchenko A.I. Erythrocytes of little ground squirrels undergo reversible oxidative stress during arousal from hibernation. *Frontiers Physiology*, 2021, vol. 12. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.730657>
26. Buck C.L., Barnes B.M. Effects of ambient temperature on metabolic rate, respiratory quotient, and torpor in an arctic hibernator. *American Journal Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2000, vol. 279, no. 1, pp. 255–262. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.2000.279.1.r255>
27. Geiser F. Hibernation: Endotherms. *Encyclopedia of life sciences*, 2001. <http://dx.doi.org/10.1038/npg.els.0003215>
28. Wang L.C.H., Lee T.F. Torpor and hibernation in mammals: metabolic, physiological, and biochemical adaptations. *Comprehensive Physiology*, 2011. <https://doi.org/10.1002/cphy.cp040122>
29. Anufriev A.I. Temperature regulation of hibernation rhythms. *Natural resources of the Arctic and Subarctic*, 2020, vol. 25, no. 1, pp. 60–67. (In Russian) DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-1-6
30. Milsom W.K., Jackson D.C. Hibernation and gas exchange. *Comprehensive Physiology*, 2011, vol. 1, no. 1, pp. 397–420. <https://doi.org/10.1002/cphy.c090018>
31. Maginniss L.A., Milsom W.K. Effects of hibernation on blood oxygen transport in the golden-mantled ground squirrel. *Respiration Physiology*, 1994, vol. 95, no. 2, pp. 195–208. [https://doi.org/10.1016/0034-5687\(94\)90116-3](https://doi.org/10.1016/0034-5687(94)90116-3)
32. Karpovich S.A., Tøien O., Buck C.L., Barnes B.M. Energetics of arousal episodes in hibernating arctic ground squirrels. *Journal of Comparative Physiology B*, 2009, vol. 179, no. 6, pp. 691–700. <https://doi.org/10.1007/s00360-009-0350-8>
33. Wang L.C.H. Time patterns and metabolic rates of natural torpor in the Richardson's ground squirrel. *Canadian Journal of Zoology*, 1979, vol. 57, pp. 149–155. DOI:10.1139/Z79-012

34. Jinka T.R., Rasley B.T., Drew K.L. Inhibition of NMDA-type glutamate receptors induces arousal from torpor in hibernating arctic ground squirrels (*Urocitellus parryii*). *Journal of Neurochemistry*, 2012, vol. 122, pp. 934–940. <https://doi.org/10.1111/j.1471-4159.2012.07832.x>
35. Zimmerman M.L. Carbohydrate and torpor duration in hibernating golden-mantled ground squirrels (*Citellus lateralis*). *Journal of Comparative Physiology*. 1982, vol. 147, no. 1, pp. 129–135. Available at: <http://hdl.handle.net/2027.42/47127>
36. Ruf T., Gasch K., Stalder G., Gerritsmann H., Giroud S. An hourglass mechanism controls torpor bout length in hibernating garden dormice. *Journal of Experimental Biology*, 2021, vol. 224, no. 23. article id: jeb243456. <https://doi.org/10.1242/jeb.243456>
37. Prendergast B.J., Freeman D.A., Zucker I., Nelson R.J. Periodic arousal from hibernation is necessary for initiation of immune responses in ground squirrels. *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2002, vol. 282, no. 4, pp. 1054–1062. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00562.2001>
38. Bouma H.R., Koese F.G.M., Kok J.W., Talaei F., Boerema A.S., Herwig A., Draghiciu O., van Buiten A., Epema A.H., van Dam A., Strijkstra A.M., Henning R.H. Low body temperature governs the decline of circulating lymphocytes during hibernation through sphingosine-1-phosphate. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 2011, vol. 108, no. 5, pp. 2052–2057. <https://doi.org/10.1073/pnas.1008823108>
39. Ruediger J., van der Zee E.A., Strijkstra A.M., Aschoff A., Daan S., Hut R.A. Dynamics in the ultrastructure of asymmetric axospinous synapses in the frontal cortex of hibernating European ground squirrels (*Spermophilus citellus*). *Synapse*, 2007, vol. 61, no. 5, pp. 343–352. <https://doi.org/10.1002/syn.20380>
40. Popov V.I., Bocharova L.S., Bragin A.G. Repeated changes of dendritic morphology in the hippocampus of ground squirrels in the course of hibernation. *Neuroscience*, 1992, vol. 48, no. 1, pp. 45–51. [https://doi.org/10.1016/0306-4522\(92\)90336-z](https://doi.org/10.1016/0306-4522(92)90336-z)
41. Arendt T., Bullmann T. Neuronal plasticity in hibernation and the proposed role of the microtubule-associated protein tau as a “master switch” regulating synaptic gain in neural networks. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2013, vol. 305, no. 5, pp. R478–489. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00117.2013>
42. Dark J. Annual lipid cycles in hibernators: integration of physiology and behavior. *Annual Review of Nutrition*, 2005, vol. 25, pp. 469–497. <https://doi.org/10.1146/annurev.nutr.25.050304.092514>
43. Storey K.B. Out cold: biochemical regulation of mammalian hibernation - a mini-review. *Gerontology*, 2010, vol. 56, no. 2, pp. 220–230. <https://doi.org/10.1159/000228829>
44. Buck M.J., Squire T.L., Andrews M.T. Coordinate expression of the PDK4 gene: a means of regulating fuel selection in a hibernating mammal. *Physiological Genomics*, 2002, vol. 8, no. 1, pp. 5–13. <https://doi.org/10.1152/physiolgenomics.00076.2001>
45. Healy G.N., Clark B.K., Winkler E.A., Gardiner P.A., Brown W.J., Matthews C.E. Measurement of adults sedentary time in population-based studies. *American Journal of Preventive Medicine*, 2011, vol. 41, no. 2, pp. 216–27. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2011.05.005>
46. Puchalska P., Crawford P.A. Multi-dimensional roles of ketone bodies in fuel metabolism, signaling, and therapeutics. *Cell Metabolism*, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 262–284. <https://doi.org/10.1016%2Fj.cmet.2016.12.022>
47. García-Rodríguez D., Giménez-Cassina A. Ketone bodies in the brain beyond fuel metabolism: from excitability to gene expression and cell signaling. *Frontiers in Molecular Neuroscience*, 2021, vol. 14. <https://doi.org/10.3389/fnmol.2021.732120>
48. Andrews M.T., Russeth K.P., Drewes L.R., Henry P.G. Adaptive mechanisms regulate preferred utilization of ketones in the heart and brain of a hibernating mammal during arousal from torpor. *The American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2009, vol. 296, no. 2, pp. 383–393. <https://doi.org/10.1152%2Fajpregu.90795.2008>
49. Aloia R.C. Lipid, fluidity, and functional studies of the membranes of hibernating mammals. In: Aloia R.C., Curtain C.C., Gordon L.M. (eds.), *Advances in membrane fluidity*. Alan R. Liss, Inc., New York. 1988, pp. 1–39.
50. Giroud S., Frare C., Strijkstra A., Boerema A., Arnold W., Ruf T. Membrane phospholipid fatty acid composition regulates cardiac SERCA activity in a hibernator, the Syrian hamster (*Mesocricetus auratus*). *PLoS ONE*, 2013, vol. 8, no. 5, article id: e63111. <https://doi.org/10.1371%2Fjournal.pone.0063111>
51. Ruf T., Arnold W. Effects of polyunsaturated fatty acids on hibernation and torpor: a review and hypothesis. *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2008, vol. 294, no. 3, pp. 1044–1052. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00688.2007>
52. Arnold W., Ruf T., Frey-Roos F., Bruns U. Diet-Independent remodeling of cellular membranes precedes seasonally changing body temperature in a hibernator. *PLoS ONE*, 2011, vol. 6. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0018641>
53. Hill V.L., Florant G.L. The effect of a linseed oil diet on hibernation in yellow-bellied marmots (*Marmota flaviventris*). *Physiology and Behavior*, 2000, vol. 68, no. 4, pp. 431–437. [https://doi.org/10.1016/s0031-9384\(99\)00177-8](https://doi.org/10.1016/s0031-9384(99)00177-8)
54. Giroud S., Stalder G., Gerritsmann H., Kübber-Heiss A., Kwak J., Arnold W., Ruf T. Dietary lipids affect the onset of hibernation in the garden dormouse (*Eliomys quercinus*): implications for cardiac function. *Frontiers Physiology*, 2018, vol. 18. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01235>
55. Frank C.L. Short-term variations in diet fatty acid composition and torpor by ground squirrels. *Journal of Mammalogy*, 2002, vol. 83, no. 4, pp. 1013–1019. [https://doi.org/10.1644/15451542\(2002\)083%3C1013:STVDF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1644/15451542(2002)083%3C1013:STVDF%3E2.0.CO;2)
56. Frank C.L., Hood W.R., Donnelly M.C. The role of alpha-linolenic acid (18:3) in mammalian torpor. In: Barnes B.M., Carey H.V., eds. *Life in the cold: evolution, mechanisms, adaptation, and application*. AK, University of Alaska Fairbanks Publ., 2004, pp. 71–80.
57. Rice S.A., Mikes M., Bibus D., Berdyshev E., Reisz J.A., Gehrke S., Bronova I., D'Alessandro A., Drew K.L. Omega 3 fatty acids stimulate thermogenesis during torpor in the Arctic Ground Squirrel. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, no. 1340. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78763-8>
58. Arnold W., Giroud S., Valencak T.G., Ruf T. Ecophysiology of omega fatty acids: a lid for every jar. *Physiology (Bethesda)*, 2015, vol. 30, no. 3, pp. 232–240. DOI: 10.1152/physiol.00047.2014.

59. Watkins S.M., Carter L.C., German J.B. Docosahexaenoic acid accumulates in cardiolipin and enhances HT-29 cell oxidant production. *Journal of Lipid Research*. 1998, vol. 39, no. 8, pp. 1583–1588.
60. Vuarin P., Henry P.Y., Guesnet P., Alessandri J.M., Aujard F., Perret M., Pifferi F. Shallow hypothermia depends on the level of fatty acid unsaturation in adipose and liver tissues in a tropical heterothermic primate. *Journal of Thermal Biology*, 2014, vol. 43, pp. 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2014.05.002>
61. Vuarin P., Henry P.Y., Perret M., Pifferi F. Dietary Supplementation with n-3 Polyunsaturated Fatty Acids Reduces Torpor Use in a Tropical Daily Heterotherm. *Physiological and Biochemical Zoology*, 2016, vol. 89, no. 6, pp. 536–545. <https://doi.org/10.1086/688659>
62. Munro D., Thomas D.W. The role of polyunsaturated fatty acids in the expression of torpor by mammals: a review. *Zoology (Jena)*, 2004, vol. 107, no. 1, pp. 29–48. <https://doi.org/10.1016/j.zool.2003.12.001>
63. Price E.R., Armstrong C., Guglielmo C.G., Staples J.F. Selective mobilization of saturated fatty acids in isolated adipocytes of hibernating 13-lined ground squirrels *Ictidomys tridecemlineatus*. *Physiological and Biochemical Zoology*, 2013, vol. 86, no. 2, pp. 205–212. <https://doi.org/10.1086/668892>
64. Giroud S., Chery I., Bertile F., Bertrand-Michel J., Tascher G., Gauquelin-Koch G., Arnemo J.M., Swenson J.E., Singh N.J., Lefai E., Evans A.L., Simon C., Blanc S. Lipidomics reveals seasonal shifts in a large-bodied hibernator, the brown bear. *Frontiers in Physiology*, 2019, vol. 10. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00389>
65. Kulagina T.P., Popova S.S., Aripovsky A.V. Seasonal changes in the content of fatty acids in the myocardium and m. longissimus dorsi of the Long-Tailed Ground Squirrel *Urocyon undulatus*. *Biophysics*, 2021, vol. 66, no. 6, pp. 1004–1010. DOI: 10.1134/S0006350921060087
66. Kodali S.T., Kauffman P., Kotha S.R., Yenigalla A., Veeraraghavan R., Pannu S.R., Hund T.J., Satoskar A.R., McDaniel J.C., Maddipati R.K., Parinandi N.L., Berliner L., Parinandi N., eds. Oxidative lipidomics: analysis of oxidized lipids and lipid peroxidation in biological systems with relevance to health and disease. In: *Measuring Oxidants and Oxidative Stress in Biological Systems. Biological Magnetic Resonance*, 2020, vol. 34. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47318-1_5

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Айна К. Бейбалаева и Шамиль И. Чалабов собрали данные и провели их анализ. Нисред К. Кличханов осуществил кураторство и редактировал рукопись перед подачей в редакцию. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Aina K. Beibalaeva and Shamil I. Chalabov collected and analysed the data. Nisred K. Klichkhanov provided supervision and edited the manuscript before submission to the Editor. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Айна К. Бейбалаева / Aina K. Beibalaeva <https://orcid.org/0009-0006-1910-6296>

Шамиль И. Чалабов / Shamil I. Chalabov <https://orcid.org/0000-0001-5707-2070>

Нисред К. Кличханов / Nisred K. Klichkhanov <https://orcid.org/0000-0002-9405-6552>

Оригинальная статья / Original article

УДК 597.554.3.591.111

DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-7



Генотоксические эффекты в клетках крови осетровых рыб (Acipenseridae) в условиях садкового хозяйства дельты Волги

Анна В. Конькова, Дина Р. Файзулина, Юлия М. Ширина, Иван А. Богатов

Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева, Астрахань, Россия

Контактное лицо

Анна В. Конькова, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Аквакультура и гидробиология», доцент кафедры биотехнологии, биоэкологии, почвоведения и управления земельными ресурсами, Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева; 414056 Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а. Тел. +79275513010

Email avkonkova@yandex.ruORCID <https://orcid.org/0000-0003-4957-2969>**Формат цитирования**

Конькова А.В., Файзулина Д.Р., Ширина Ю.М., Богатов И.А. Генотоксические эффекты в клетках крови осетровых рыб (Acipenseridae) в условиях садкового хозяйства дельты Волги // Юг России: экология, развитие. 2024. Т.19, N 2. С. 69-81. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-7

Получена 8 ноября 2023 г.

Прошла рецензирование 25 ноября 2023 г.

Принята 27 ноября 2023 г.

Резюме

Целью настоящей работы явилась оценка степени генотоксического влияния среды обитания на особей русского осетра и стерляди, выращиваемых в условиях садкового хозяйства дельты Волги, с помощью микроядерного и ДНК-комет тестов.

Кровь у особей русского осетра и стерляди была отобрана прижизненно. Тест ДНК-комет выполняли щелочным методом. Количество эритроцитов с микроядрами определяли микроскопически. Для оценки физиологического состояния осетровых рыб использовали общепринятые гематологические и биохимические методики.

В исследованной выборке рыб на мазках крови количество эритроцитов с микроядрами в среднем составило у русского осетра $3,20 \pm 1,24 \%$, у стерляди – $5,25 \pm 1,18 \%$. Доля ДНК в хвосте кометы у эритроцитов русского осетра составила $3,99 \%$, у стерляди – $6,48 \%$. Величины показателей момента хвоста и момента Оливе так же были ниже у русского осетра. Среди эритроцитов стерляди можно отметить более гетерогенную картину повреждения ДНК. Показатель длины хвоста кометы у особей стерляди оказался ниже, чем у русского осетра, видимо при повреждении ДНК эритроцитов стерляди образовывались более крупные фрагменты этих молекул. Физиологическое состояние особей стерляди можно охарактеризовать как нормальное, а русского осетра как удовлетворительное, в связи с выявленными отклонениями в значениях некоторых гематологических и биохимических показателей крови.

Изучив влияние среды на особей осетровых рыб, содержащихся в условиях садковой аквакультуры в дельте Волги методом микроядерного и ДНК-комет тестов можно сделать вывод об отсутствии острого генотоксического влияния в момент исследования.

Ключевые слова

Русский осетр, стерлядь, микроядро, ДНК-кометы, гематологические и биохимические показатели крови.

Genotoxic effects in blood cells of sturges (Acipenseridae) grown in conditions of cage farming of the Volga delta, Russia

Anna V. Konkova, Dina R. Faizulina, Yulia M. Shirina and Ivan A. Bogatov

Astrakhan State Tatishchev University, Astrakhan, Russia

Principal contact

Anna V. Konkova, Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Aquaculture and Hydrobiology, Associate Professor, Department of Biotechnology, Bioecology, Soil Science and Land Management, Astrakhan State Tatishchev University; Tatishcheva St, Astrakhan, Russia 414056.

Tel. +79275513010

Email avkonkova@yandex.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4957-2969>

How to cite this article

Konkova A.V., Faizulina D.R., Shirina Yu.M., Bogatov I.A. Genotoxic effects in blood cells of sturges (Acipenseridae) grown in conditions of cage farming of the Volga delta, Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2024; 19(2):69-81. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-7

Received 8 November 2023

Revised 25 November 2023

Accepted 27 November 2023

Abstract

The purpose of this work was to assess the degree of genotoxic influence of the habitat on individuals of Russian sturgeon and sterlet raised in cage farming conditions in the Volga delta, using micronucleus and DNA comet tests.

The blood of the individual Russian sturgeon and sterlet was shaved off during their lifetime. A comet DNA test was performed using the alkaline method. The number of erythrocytes with micronuclei was determined microscopically. To assess the physiological state of sturgeons, conventional hematological and biochemical methods were used.

In the samples of fish blood smears studied, the average proportion of erythrocytes with micronuclei was 3.20 ± 1.24 ‰ in Russian sturgeon and 5.25 ± 1.18 ‰ in sterlet. The proportion of DNA in the comet tail in erythrocytes of Russian sturgeon was 3,99 %, and in sterlet 6, 48 %. The values of tail moment and Olivet moment were also lower in Russian sturgeon. Among sterlet erythrocytes, a more heterogeneous pattern of DNA damage can be noted. The length of the comet tail in sterlet individuals turned out to be lower than in Russian sturgeon: apparently, larger fragments of these molecules were formed when the DNA of sterlet erythrocytes was damaged. The physiological state of sterlet individuals can be characterised as normal, and that of the Russian sturgeon as satisfactory, due to the deviations identified in the values of some hematological and biochemical blood parameters.

Having studied the influence of the environment on individual sturgeon kept in cage aquaculture conditions in the Volga delta using micronuclear and DNA comet tests, we can conclude that there was no acute genotoxic effect at the time of the study.

Key Words

Russian sturgeon, sterlet, micronucleus, DNA comets, hematological and biochemical blood parameters.

ВВЕДЕНИЕ

Численность естественных популяций некоторых видов рыб дельты реки Волги и Каспийского моря в настоящее время значительно сокращается, на фоне действия разноплановых факторов этот процесс затронул и каспийских осетровых. В условиях снижения запасов рыб получает активное развитие аквакультура этих видов ихтиофауны в различных водоемах рыбохозяйственного значения, в том числе и в водоемах Астраханской области. Назначение аквакультуры в данном регионе определяется двумя направлениями – искусственное воспроизводство с целью пополнения естественных запасов и товарное осетроводство для насыщения потребительского рынка ценной рыбной продукцией. Перспективным направлением в товарном осетроводстве является выращивание в садковых линиях на открытых водоемах [1].

При всех преимуществах садкового выращивания осетровых рыб на открытых водоемах (сокращение затрат на капитальное строительство, не требуется изъятие значительных площадей земли, экономия на электроэнергии) следует отметить возможное негативное влияние естественной среды воды дельты р. Волга, в связи с напряженной экологической обстановкой. Основным источником поступления загрязняющих веществ в дельту – сток речных вод. Несмотря на то, что в последние годы потоки некоторых загрязняющих веществ заметно уменьшились, особенно нефтяных углеводородов, хлорорганических соединений и меди из тяжелых металлов, качество вод в дельте Волги по комплексной оценке загрязненности в настоящее время определено классом “грязная вода”. По-прежнему локально отмечают превышение предельно допустимых концентраций в волжских водах для тяжелых металлов (железо, медь, цинк, ртуть, никель), фенолов, нефтепродуктов. По большинству перечисленных ингредиентов специалисты определяют загрязнение как “характерное”, а по никелю – “единичное” [2–3].

Вышеперечисленные токсиканты обладают свойством генотоксичности, в том числе и в отношении рыб [4–6]. Генотоксическое влияние подразумевает процесс, включающий прямое и косвенное воздействие на структурную целостность ДНК. Последствия генотоксического влияния могут включать в себя повреждения ДНК (например, образования аддуктов ДНК и одно- или двухцепочечных разрывов), эффекты, связанные с мутагенезом (“незаконный” синтез ДНК, то есть внеплановый, хромосомные транслокации) и как итог индукция мутаций (генных, хромосомных, геномных, рекомбинационных) [7–8]. Клетки распознают повреждения ДНК и инициируют ответ в виде репарации этих молекул. Механизмы восстановления повреждений ДНК высококонсервативны у позвоночных, однако, отмечается видоспецифичность в процессах и мишенях репарации ДНК. У рыб описывают первичные пути репарации повреждений ДНК – эксцизионная репарация оснований и нуклеотидов, гомологичная рекомбинация и нехомологичное соединение концов [9].

Подавляющее большинство повреждений ДНК репарируются. Однако, редко, но возникают нерепарируемые повреждения ДНК [10]. Частота их возникновения в том числе зависит и от степени генотоксического влияния внешних факторов среды. К

методам, которые в настоящее время применяются при анализе генотоксического воздействия, можно отнести оценку следующих цитогенетических характеристик: абберации хромосом, сестринские хроматидные обмены, микроядра, ДНК-кометы, нарушения мейоза. К наиболее распространенным следует отнести только два из вышеприведенных, а именно анализ частот микроядер и ДНК-комет тест [11].

Преимущества кометного анализа – это высокая чувствительный метода, его способность обнаруживать начальные и неспецифические повреждения ДНК в клетке, он более быстрый, чем другие доступные методы обнаружения разрывов цепей, относительно недорогостоящий и способный обнаруживать раннее воздействие генотоксикантов [12]. Тест на наличие микроядер, возникающих либо в результате поломки хромосом во время клеточного деления, либо в результате потери хромосом при повреждении во время анафазы, дает возможность оценить генотоксический ответ клеток на сложные смеси загрязнителей окружающей среды [13]. Метод ДНК-комет и микроядерный тест часто дополняют друг друга [14].

Осетровые обладают необычайной геномной пластичностью. Однако такая пластичность требует высокоэффективной репарации ДНК [15]. Таким образом, целью настоящей работы явилась оценка степени генотоксического влияния среды на особей русского осетра (*Acipenser gueldenstaedtii* Brandt, 1833) и стерляди (*Acipenser ruthenus* Linnaeus, 1758), выращиваемых в условиях садкового хозяйства дельты р. Волга, с помощью микроядерного и ДНК-комет тестов, и попытка охарактеризовать насколько геном изученных рыб устойчив к этому воздействию, в том числе с учетом общей оценки физиологического состояния рыб на основе результатов гематологических исследований и биохимических анализов крови.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования были проведены в мае 2023 г. Сбор материала осуществлен в условиях садкового рыбоводного комплекса крестьянско-фермерского хозяйства Ю.С. Полякова, расположенного на рукаве Хурдун (нижняя зона дельты реки Волга) в Астраханской области, в Икрянинском районе около села Икряное (координаты 46°06'03"–46°00'03"с. ш., 47°44'36"–47°32'56" в. д.), Россия. У 20 особей русского осетра (возраст 3 года, средняя масса 592,20±89,07 г и абсолютная длина 59,60±2,50 см) и у 20 особей стерляди (возраст 4–5 лет, средняя масса 569,00±39,15 г и абсолютная длина 51,05±1,28 см) прижизненным методом с помощью шприца была отобрана кровь из гемального канала.

Гепаринизированные образцы крови (1:50) были использованы для определения количества гемоглобина, эритроцитов (подсчет в камере Горяева), скорости оседания эритроцитов (на СОЭ-метре Панченкова ПР-3) и проведения анализа ДНК-комет щелочным методом [16–18]. Для проведения метода ДНК-комет предметные стёкла покрывали тонким слоем агарозы. 10 мкл крови смешивали с 1 мл фосфатно-солевого буфера+1м МЭДТА, далее 10 мкл разведенной таким образом крови смешивали с 90 мкл лезковлаковой агарозы (42° С) и раскапывали на подготовленные слайды агарозы. Затем в течение 60 минут проводили лизис (2,5М NaCl, 100мМ ЭДТА,

10мМ Трис, 1 % Тритон X-100, pH 10, 4° С). После лизиса препараты помещали в горизонтальную камеру для электрофореза (Helicon SE-1, УИП Эльф-4, Россия), заполненную щелочным буфером (0,3М NaOH, 1мМ ЭДТА, pH>13) и оставляли на 20 минут для расплетения нитей ДНК. Затем в течение 15 минут проводили процедуру электрофореза при напряжении 25 V и силе электрического тока 300 А. После слайды промывали в нейтрализационном буфере (0,4 М Трис-HCl, pH 7,5) и окрашивали бромистым этидием (4 мкг/мл, 4° С). Слайды с агарозой просматривали на флуоресцентном микроскопе (Carl Zeiss Axioscope 5, Германия). Для одной особи просматривали по 50 комет и с помощью программы TriTek CometScore 2.0.0.38 (TriTek Corp. <http://trittekcorp.com>) оценивали следующие показатели: долю ДНК в хвосте, момент хвоста, момент Оливе и длину хвоста [19].

Препараты свежей крови были использованы для приготовления мазков и образцов сыворотки. Свежие мазки крови были фиксированы в растворе этилового спирта (96°) и окрашены по Романовскому-Гимзе. На мазках крови микроскопически были определены лейкоцитарная формула, патологии эритроцитов и проведен микроядерный тест [17; 20]. В каждом препарате просматривали 1000 эритроцитов и вычисляли частоту встречаемости эритроцитов с микроядрами – МЯ [21–23]. Так же были проведены измерения клеток красной крови (по 100 клеток каждой особи рыб). У эритроцитов были определены следующие показатели: большая ось эритроцита (мкм), малая ось эритроцита (мкм), большая ось ядра (мкм), малая ось ядра (мкм), большая ось микроядра (мкм), малая ось микроядра (мкм), а также расстояние от микроядра до основного ядра и до клеточной мембраны [24].

В образцах сыворотки крови с применением общепризнанных фотометрических методов исследования был определен ряд биохимических показателей, отраженных в табличном материале и обработанном на специализированном лабораторном оборудовании (спектрофотометр Экрос ПЭ5300, Россия, биохимический анализатор Chem Well-2902 V+, США). Были использованы готовые наборы реагентов («Агат», «Ольвекс диагностикум», Россия). Все полученные числовые данные подвергались статистической

обработке и представлены в виде среднего и стандартной ошибки среднего, достоверность различий рассчитывали с помощью t-критерия Стьюдента при нормальном распределении данных или с помощью критерия Манна-Уитни при ненормальном (Excel, Microsoft Office 2019, SigmaStat 3.5.). Корреляцию рассчитывали согласно ранговому коэффициенту Спирмена, так как часть данных имела ненормальное распределение.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В исследованной выборке рыб на мазках крови количество эритроцитов с МЯ в среднем составило у русского осетра $3,20 \pm 1,24$ ‰, у стерляди – $5,25 \pm 1,18$ ‰. При этом у последней группы рыб данный показатель был достоверно выше ($p \leq 0,05$). Помимо этого, количество МЯ в одном эритроците у стерляди также было выше. Так, у русского осетра встречалось не более 1 МЯ в одной клетке эритроидного ряда, в то время как у стерляди – достигало 2 МЯ (рис. 1). Размеры эритроцитов, основного ядра и МЯ представлены в (табл. 1).

Размеры эритроцитов стерляди и русского осетра в исследуемом садковом хозяйстве совпадали с размерами аналогичных клеток в исследованиях других авторов как речной и морской популяции осетровых в Волго-Каспийском районе [25; 26], а также выращиваемых в системе УЗВ [27], в различных экспериментальных условиях [28]. Измерения на фиксированных мазках крови не искажают реальную картину размеров клеток, так как ранее было установлено, что между размерами большой и малой осей ядер эритроцитов фиксированных и живых клеток крови рыб отсутствуют значительные различия [24; 28; 29]. При сопоставлении клеток красной крови было установлено, что размеры эритроцитов русского осетра были достоверно выше эритроцитов стерляди, при этом во всех видах промеров. Помимо этого, закономерности выявлены в таких показателях как малая ось основного ядра (больше в группе эритроцитов без МЯ у русского осетра) и большая ось основного ядра (больше в группе эритроцитов с МЯ у стерляди), табл. 1.

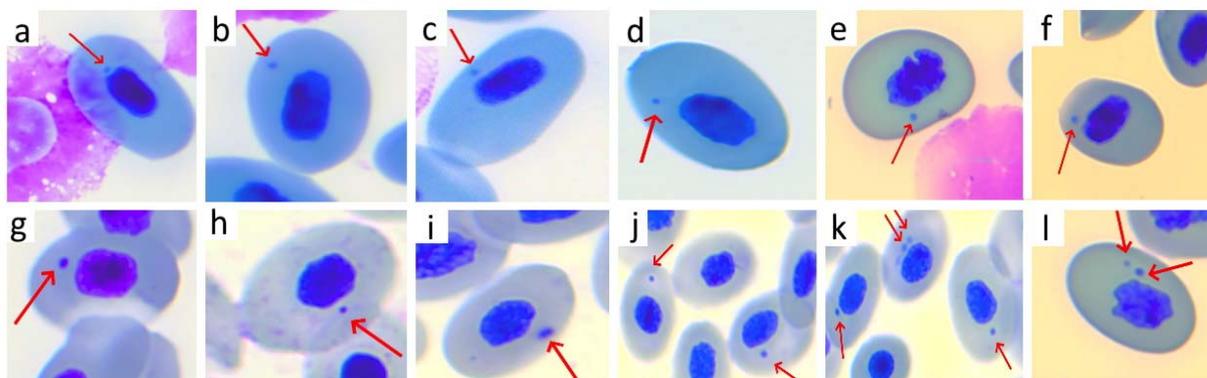


Рисунок 1. Эритроциты русского осетра (а–ф) и стерляди (г–л) в условиях садкового хозяйства, 2023 г. Ув. 10x100, иммерсия, стрелкой указано расположение микроядра

Figure 1. Erythrocytes of Russian sturgeon (a–f) and sterlet (g–l) in cage farming conditions, 2023 Increase 10x100, immersion, the arrow indicates the location of the microkernel

Таблица 1. Размеры эритроцитов, основного ядра и микроядер особей русского осетра и стерляди в условиях садкового хозяйства, 2023 г.**Table 1.** Sizes of erythrocytes, main nucleus and micronuclei of Russian sturgeon and Sterlet specimens in cage farming conditions, 2023

Показатели Index	Русский осетр / Russian sturgeon				Стерлядь / Sterlet			
	Эритроциты с микроядрами Erythrocytes with micronucleus		Эритроциты без микроядер Erythrocytes without micronucleus		Эритроциты с микроядрами Erythrocytes with micronucleus		Эритроциты без микроядер Erythrocytes without micronucleus	
	M ± m	Диапазон Range	M ± m	Диапазон Range	M ± m	Диапазон Range	M ± m	Диапазон Range
Большая ось клетки (мкм) Cell major axis (µm)	16,63 ± 0,27	16,13 – 17,06	17,96 ± 0,99	16,20 – 18,01	13,05 ± 0,50	11,79 – 14,18	12,30 ± 0,05**	11,00 – 13,50
Малая ось клетки (мкм) Cell minor axis (µm)	10,18 ± 0,67	9,03 – 11,34	11,50 ± 0,67	9,50 – 11,73	8,50 ± 0,21	7,97 – 8,96	8,02 ± 0,30	7,50 – 8,55
Большая ось ядра (мкм) Nuclear major axis (µm)	7,66 ± 0,51	6,65 – 8,33	7,88 ± 0,70	6,70 – 8,50	5,50 ± 0,13	5,29 – 5,86	4,91 ± 0,35**	4,53 – 5,71
Малая ось ядра (мкм) Nuclear minor axis (µm)	5,06 ± 0,37	4,62 – 5,80	6,78 ± 0,12*	4,70 – 6,01	3,22 ± 0,20	2,68 – 3,62	3,19 ± 0,20	2,67 – 3,62
Большая ось микроядра (мкм) Micronucleus major axis (µm)	1,13 ± 0,26	0,73 – 1,63	-	-	0,90 ± 0,04	0,84 – 1,00	-	-
Малая ось микроядра (мкм) Micronucleus minor axis (µm)	0,75 ± 0,22	0,41 – 1,15	-	-	0,56 ± 0,10	0,44 – 0,84	-	-
Расстояние от микроядра до основного ядра (мкм) Distance from micronucleus to main nucleus (µm)	1,75 ± 0,44	1,16 – 2,60	-	-	1,71 ± 0,35	1,10 – 2,66	-	-
Расстояние от микроядра до клеточной мембраны (мкм) Distance from micronucleus to cell membrane (µm)	2,31 ± 0,50	1,32 – 2,95	-	-	1,36 ± 0,47	0,20 – 2,30	-	-

Примечание: * – достоверность различий $p \leq 0,05$ (между особями русского осетра), ** – достоверность различий $p \leq 0,05$ (между особями стерляди)

Note: * – significance of differences $p \leq 0.05$ (between individuals of Russian sturgeon), ** – significance of differences $p \leq 0.05$ (between individuals of Sterlet)

МЯ в эритроцитах были зарегистрированы как рядом с основным ядром, так отдалены от него, располагаясь у края. Варианты расположения микроядра в эритроцитах особей русского осетра и стерляди представлено на рис. 1. В зависимости от удаления МЯ от основного ядра и клеточной мембраны было рассчитано процентное соотношения эритроцитов с МЯ, имеющих пристеночное или центральное расположение (критерием являлся расстояние равное прямой линии, соединяющей основное ядро-МЯ-клеточную мембрану, и составляющей длине расположения МЯ менее $\frac{1}{4}$ этого расстояния). У русского осетра доля эритроцитов с пристеночным расположением МЯ и у основного ядра составила 81,25 % и 18,75, у стерляди – 68,52 % и 31,48 % соответственно виду локализации МЯ.

В целом результаты микроядерного теста на основе выявленного среднего количества эритроцитов с МЯ у обследованных осетровых рыб был относительно на невысоком уровне. По имеющимся литературным данным, у особей русского осетра, содержащихся в контроле, уровень МЯ не превышал 3 %, в то время

когда в ходе экспериментального воздействия донных осадков Бакинской бухты, загрязненных тяжелыми металлами и нефтеуглеводородами, он достигал 12–15 % [30]. При этом следует отметить, что если у обследованных особей осетра в садковом хозяйстве выявленное количество эритроцитов МЯ схоже с приведенными выше сведениями, то у стерляди этот показатель был в 1,6 раза выше, что может указывать на то, что стерлядь, которая находилась с русским осетром в одинаковых условиях, более подвержена действию потенциальных неблагоприятных факторов.

Если учитывать процентное соотношение эритроцитов с МЯ относительно общего числа эритроцитов, то полученные показатели (0,32 % у русского осетра и 0,53 % у стерляди) также свидетельствовали о низкой вероятности мутагенеза и генотоксичности среды обитания рыб, так как ранее было установлено, что вероятность появления эритроцитов с МЯ при спонтанном мутагенезе может быть высокой при появлении более 0,5–1,0 % клеток с МЯ [31–32].

Помимо МЯ в эритроцитах обследованных осетровых рыб были выявлены такие патологии как анизоцитоз (микро), ядра-тени, инвагинация ядра, гипохромазия, появление шистоцитов, кариорексис, пикноз, вакуолизация цитоплазмы эритроцитов (табл. 2). В целом уровень выявленных нарушений с учетом обратимости некоторых процессов и особенностей естественных процессов гемопоэза в момент проведения исследований не выходил за пределы явных отклонений физиологического состояния рыб [20]. Лейкограмма обследованных особей носила лимфоидный характер, у обоих видов рыб преобладали в кровотоке зрелые лимфоциты, в меньшей степени были приставлены моноциты, нейтрофилы, эозинофилы (табл. 2). При этом последние две группы лейкоцитарного ряда были зафиксированы на разных

стадиях своего развития, а у стерляди количество нейтрофилов было достоверно выше по сравнению с русским осетром. Основная функция нейтрофилов – защита организма от инфекции и одновременно от токсического воздействия, у эозинофилов – фагоцитоз в том числе бактерий, способность адсорбировать многие токсические продукты белковой природы и разрушать их. Также на мазках был зарегистрирован распад эозинофилов на гранулы. Для осетровых рыб распыление эозинофила на гранулы указывает о недоброкачественности корма, об отсутствии в нем фосфатидов, несбалансированности по белку [20]. В целом лейкограмма обследованных рыб свидетельствовала об активации защитной системы организма на неблагоприятные факторы.

Таблица 2. Патологии эритроцитов и лейкограмма особей русского осетра и стерляди в условиях садкового хозяйства, 2023 г.

Table 2. Pathologies of erythrocytes and leukogram of individuals of Russian sturgeon and Sterlet in cage farming conditions, 2023

Показатели Index	Русский осетр Russian sturgeon	Стерлядь Sterlet
Развитие эритроцитов / Development of erythrocyte		
Эритробласт, 10^{-3} / Erythroblast, 10^{-3}	2,33 ± 0,88	4,67 ± 1,12
Барофильный нормобласт, 10^{-3} / Basophilic normoblasts, 10^{-3}	1,00	5,00 ± 1,00
Патология эритроцитов / Pathology of erythrocytes		
Анизоцитоз (микро), 10^{-3} / Anisocytosis (micro), 10^{-3}	2,00	1,00
Ядра-тени, 10^{-3} / Nuclear shadows, 10^{-3}	9,20 ± 1,71	12,20 ± 2,06
Инвагинация ядра, 10^{-3} / Invagination of nucleus, 10^{-3}	2,00	1,57 ± 0,30
Гипохромазия, 10^{-3} / Hypochroasia, 10^{-3}	14,67 ± 6,89	6,00
Шистоцит, 10^{-3} / Schistocyte, 10^{-3}	3,33 ± 1,86	1,91 ± 0,72
Кариорексис, 10^{-3} / Karyorrhexis, 10^{-3}	0,00	1,67 ± 0,42
Пикноз, 10^{-3} / Pyknose, 10^{-3}	0,00	1,29 ± 0,29
Вакуолизация цитоплазмы эритроцитов, 10^{-3} / Vacuolization of the erythrocyte cytoplasm, 10^{-3}	3,00	0,00
Микроядро, 10^{-3} / Micronucleus, 10^{-3}	3,20 ± 1,24	5,25 ± 1,18*
Лейкограмма / Leukogram		
Лимфоцит (зрелый), % / Lymphocyte (mature), %	95,00 ± 0,63	94,20 ± 0,59
Моноцит, % / Monocyte, %	0,60 ± 0,10	1,10 ± 0,33
Нейтрофил метамиелоцит, % / Neutrophil metamyelocyte, %	1,00 ± 0,50	3,35 ± 0,57*
Нейтрофил сегментоядерный, % / Segmented neutrophil, %	0,80 ± 1,00	0,30 ± 0,10
Нейтрофил палочкоядерный, % / Neutrophil stab, %	1,20 ± 1,00	0,90 ± 0,66
Эозинофил метамиелоцит, % / Eosinophil metamyelocyte, %	0,40	0,20
Эозинофил сегментоядерный, % / Segmented eosinophil, %	1,00 ± 0,50	0,00
Тромбоциты / Thrombocytes		
Тромбоциты, 10^{-3} / Thrombocytes, 10^{-3}	22,00 ± 21,00	12,70 ± 3,22

Примечание: * – различия статистически значимые при $p \leq 0,05$
Note: * – significance of differences $p \leq 0,05$

У изучаемых особей осетровых рыб отмечены ядра эритроцитов с различным уровнем повреждения ДНК согласно методу ДНК-комет (табл. 3; рис. 2).

Средний уровень ДНК в хвосте кометы у особей стерляди оказался выше в 1,6 раза чем, у особей русского осетра. Доля мигрировавшей ДНК отражает количество повреждений, то есть чем выше процент ДНК в хвосте кометы, тем более повреждены молекулы ДНК в ядре клетки [33; 34]. Соответственно у стерляди были выше показатели момента хвоста и момента Оливе. Момент хвоста учитывает и количество и размеры мигрировавших в хвост фрагментов ДНК, показатель рассчитывается как произведение длины хвоста и доли мигрировавшей ДНК/100. Несмотря на значительную разницу этого показателя у стерляди и русского осетра различия были не достоверны. Момент

Оливе особенно полезен для описания гетерогенности повреждения ДНК внутри клеточной популяции [33]. То есть среди эритроцитов стерляди можно отметить более разнородную картину повреждения ДНК. Так доля ДНК в хвосте кометы у стерляди варьировала от 0 до 95,36 %, тогда как у русского осетра отмечена минимальная доля мигрировавшей в хвост ДНК 0 %, а максимальная всего 23,49, что в 4 раза ниже максимального значения отмеченного, для особей стерляди. А вот показатель длины хвоста кометы у особей стерляди оказался ниже, чем у русского осетра. Длина хвоста кометы указывает на размер фрагментов, образующихся в результате разрывов молекулы: чем длиннее хвост, тем меньше размеры фрагментов. То есть можно предположить, что при повреждении ДНК эритроцитов стерляди образовывались более крупные

фрагменты этих молекул, чем в эритроцитах русского осетра. Длина хвоста кометы у стерляди варьировала от 0 до 100 рх, у русского осетра от 0 до 42 рх.

Таблица 3. Показатели ДНК-комет эритроцитов особей русского осетра и стерляди в условиях садкового хозяйства, 2023 г.

Table 3. Indicators of DNA comets of erythrocytes of individuals of Russian sturgeon and Sterlet in cage farming conditions, 2023

Показатели Index	Русский осетр Russian sturgeon	Стерлядь Sterlet
Доля ДНК в хвосте, % / Tail DNA, %	3,99±0,32*	6,48±0,28*
Момент хвоста / Tail moment	0,32±0,06	0,65±0,12
Момент Оливе / Olive moment	1,14±0,12*	1,51±0,11*
Длина хвоста, пкс. / Tail length, px	3,68±0,42*	3,03±0,24*

Примечание: * – различия статистически значимые при $p \leq 0,05$
Note: * – significance of differences $p \leq 0.05$

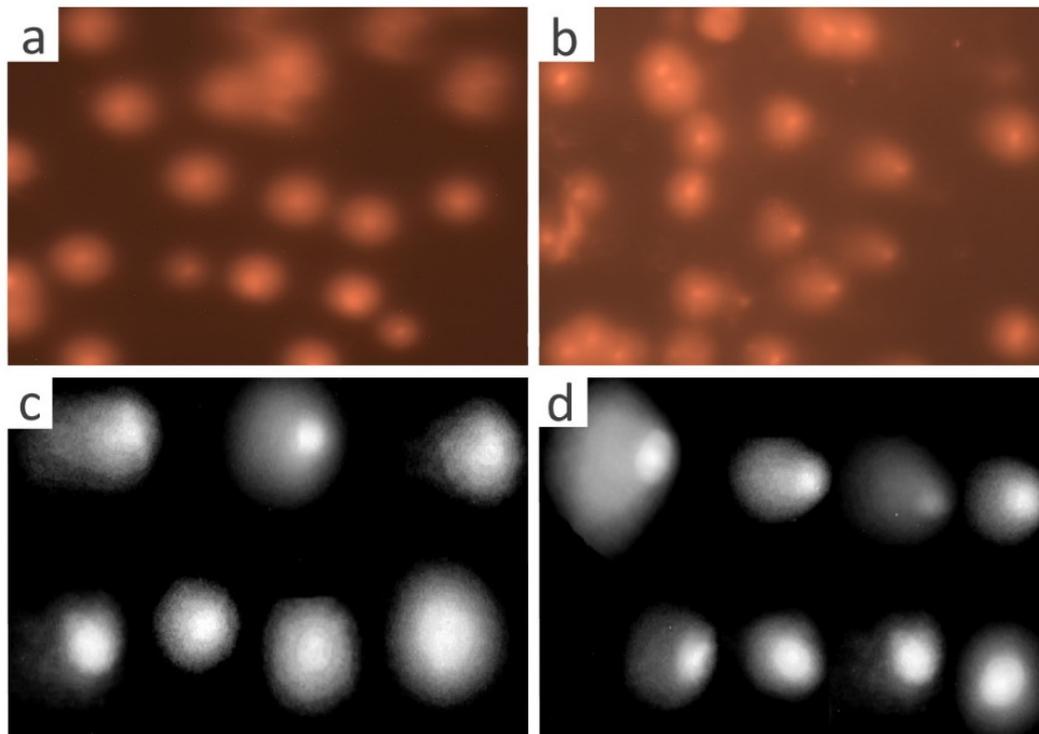


Рисунок 2. ДНК-кометы эритроцитов русского осетра (а, с) и стерляди (b, d) с разной степенью повреждения ДНК (в условиях садкового хозяйства, 2023 г.). Ув. 10x20 (а, b – изображения с микроскопа; с, d – изображения клеток крови при обработке в программе TriTek CometScore 2.0.0.3)

Figure 2. DNA comets of Russian sturgeon (a, c) and sterlet (b, d) erythrocytes with varying degrees of DNA damage (in cage farming conditions, 2023). Increase 10x20 (a, b – images from a microscope; c, d – images of blood cells when processed in the TriTek CometScore 2.0.0.3 program)

Таким образом, несмотря на то, что особи русского осетра и стерляди находятся в одних и тех же условиях садкового хозяйства и испытывают одинаковое по силе и степени воздействия негативное влияние загрязнения воды дельты Волги повреждения молекул ДНК эритроцитов этих рыб было достоверно различными. Следовательно, можно предположить, что механизмы репарации поврежденной ДНК у русского осетра в какой-то степени эффективнее и оперативнее, чем у стерляди.

В среднем показатели, полученные методом ДНК-комет, отражающее генотоксическое влияние внешней среды у изученных особей русского осетра и стерляди были на не высоком уровне, то есть оказались значительно ниже, по сравнению с тем, что можно наблюдать у видов рыб, подвергающихся токсическому воздействию и практически соответствовали данным

получаемых в эритроцитах рыб из нетронутых природных районов [12]. Marie-Laure Acolas с соавторами [35] изучая долю ДНК в хвосте кометы у европейского осетра (Франция) получили в среднем 2–4 % и охарактеризовали эти цифры как очень низкие. Ievgeniia Gazo с соавторами [15] изучая влияние генотоксикантов на молодь стерляди на ранних этапах развития в контрольных, то есть оптимальных искусственных условиях выращивания, получили значение доли ДНК в хвосте от 3,5 до 11 %.

Достоверные различия так же были обнаружены между гематологическими и биохимическими показателями крови русского осетра и стерляди, которые отображены в таблице 4. Уровень гемоглобина и количества эритроцитов у особей стерляди оказался значительно выше, чем у русского осетра, соответственно СОЭ у последних было выше. Показа-

тели белкового и углеводного обменов (общий белок, альбумин и глюкоза) у рыб двух этих видов оказались примерно на одном уровне, достоверно не отличались и соответствовали референсным значениям [36]. Изученные показатели липидного профиля сыворотки крови осетровых рыб (триглицериды, холестерин и β -липопротеиды) достоверно отличались, причем у русского осетра все они были ниже, чем у стерляди. Снижение содержания холестерина в крови часто происходит вследствие уменьшения кормовых объектов животного происхождения или в результате ухудшения работы печени. Триглицериды – основной источник энергии в клетки, при недостаточном питании

уровень этого показателя снижается [37]. У русского осетра этот показатель оказался в 2 раза ниже минимального референсного значения [38]. Макроэлементы кальций и фосфор указывают на работу различных гомеостатических механизмов в организме осетровых рыб, они необходимы для выработки энергии, регуляции работы почек, мышечной и нервной системы, а также для роста костей [39]. И в этом случае у русского осетра средние показатели этих биохимических компонентов были ниже, чем у стерляди, однако и у тех и у других рыб входили в пределы референсных значений и показателей здоровых рыб, выращиваемых в искусственных условиях [38; 40].

Таблица 4. Гематологические и биохимические показатели крови особей русского осетра и стерляди в условиях садкового хозяйства, 2023 г.

Table 4. Hematological and biochemical blood parameters of Russian sturgeon and Sterlet individuals in cage farming conditions, 2023

Показатели / Index	Русский осетр Russian sturgeon	Стерлядь Sterlet
Гемоглобин, г/л / Hemoglobin, g/l	30,58±0,55*	72,29±4,37*
СОЭ, мм/ч / ESR, mm/h	5,60±1,69	2,89±0,37
Общее количество эритроцитов, млн/мкл / Total number of erythrocytes, mln/ μ l	0,54±0,09*	1,52±0,11*
Общий белок, г/л / Total protein, g/l	25,42±2,57	27,83±1,60
Альбумин, г/л / Albumin, g/l	12,80±1,32	16,69±1,31
Глюкоза, ммоль/л / Glucose, mmol/l	1,06±0,15	0,92±0,39
Триглицериды, ммоль/л / Triglycerides, mmol/l	1,84±1,44*	7,19±0,93*
Холестерин, ммоль/л / Cholesterol, mmol/l	1,24±0,32*	2,99±0,29*
β -липопротеиды, г/л / β -lipoproteins, g/l	0,71±0,43*	1,24±0,27*
Фосфор, ммоль/л / Phosphorus, mmol/l	2,62±0,23*	3,86±0,28*
Кальций, ммоль/л / Calcium, mmol/l	1,10±0,14*	1,96±0,11*
Мочевина, ммоль/л / Urea, mmol/l	1,52±0,32*	0,92±0,14*
Мочевая кислота, мкмоль/л / Uric acid, μ mol/l	55,82±8,68*	31,64±4,55*
Активность АЛТ, Ед/л / ALT activity, U/l	6,28±1,10*	69,96±6,13*
Активность АСТ, Ед/л / AST activity, U/l	152,52±11,11*	99,01±8,39*
Активность ГГТ, Ед/л / GGT activity, U/l	5,42±1,47	4,25±0,78
Активность щелочной фосфатазы, Ед/л / Alkaline phosphatase activity, U/l	289,64±31,08*	158,62±18,81*
Активность ЛДГ, Ед/л / LDH activity, U/l	488,12±51,01*	880,92±42,66*

Примечание: * – различия статистически значимые при $p \leq 0,05$ /
Note: * – significance of differences $p \leq 0,05$

Количество мочевины, конечного продукта азотистого обмена и катаболизма белков может использоваться в качестве индикатора для выявления метаболических нарушений. У русского осетра этот показатель был достоверно выше, чем у стерляди, но входил в пределы референсных значений [38]. Мочевая кислота у рыб в крови так же является конечным продуктом обмена (образуется в результате распада макроэргических соединений). Ранее было показано, что низкое содержание мочевой кислоты (на фоне высокого содержания аскорбиновой кислоты и нормального токоферола) образуют в крови рыб особую антиоксидантную защитную систему против перекисного окисления липидов [41]. Но у русского осетра этот показатель превысил референсные значения (3,57–38,66 мкмоль/л) [38].

Аминотрансферазы (АЛТ и АСТ) играют существенную роль в общем обмене веществ, способствуя единому течению белкового, липидного и углеводного обменов. Фермент ГГТ является мембраносвязанным и энергозависимым энзимом, транспортирующим аминокислоты и пептиды в клетки [36]. Уровень активности ЛДГ может отразить степень физической активности рыб и их роста, адаптационный

потенциал в том числе и к загрязнению водной среды [42]. У русского осетра отмечено достоверно более низкие показатели уровня АЛТ и ЛДГ, причем активность АЛТ была немного ниже референсного значения (12–137 Ед/л) [38]. Ферменты у рыб имеют довольно широкий диапазон значений и реактивно реагируют на различные стресс факторы. В общем в основном все изученные показатели активности ферментов крови у двух этих видов осетровых рыб входили в пределы референсных значений показателей здоровых рыб, выращиваемых в искусственных условиях [38; 40; 43].

В целом, совокупность изученных гематологических и биохимических показателей дает возможность оценить физиологическое состояние особей осетровых рыб – стерляди как нормальное, а русского осетра как удовлетворительное, в связи с выявленными отклонениями в значениях некоторых показателей.

Проведя корреляционный анализ между генотоксическими показателями, полученными методами микроядерного теста и ДНК-комет, а также общими биологическими, гематологическими и биохимическими показателями были получены некоторые достоверные средние и высокие коэффициента. У

русского осетра между количеством эритроцитов с МЯ и уровнем глюкозы в крови выявлена отрицательная взаимосвязь ($r=-0,92$, $p=0,01$). Между уровнем мочевой кислоты и моментом хвоста коэффициент корреляции составил $1,00$ ($p=0,01$), между величиной активности АЛТ, уровнем альбумина и длиной хвоста выявлен высокий уровень корреляции $r=1,00$ и $0,88$ соответственно ($p=0,01-0,03$). У стерляди обнаружена достоверная отрицательная взаимосвязь между количеством эритроцитов с МЯ и количеством эритроцитов $r=-0,49$ ($p=0,02$), а также положительная с количеством клеток с кариорексисом $r=0,50$ ($p=0,02$). Выявлена достоверная корреляция между количеством нейтрофильных метамиелоцитов ($r=-0,45$, $p=0,02$), моноцитов ($r=0,44$, $p=0,04$) и длиной хвоста кометы. Момент хвоста, момент Оливе и длина хвоста проявили взаимосвязь с эозинофильными метамиелоцитами ($r=0,49-0,54$, $p=0,01$). Так же выявлена достоверная корреляция между уровнем гемоглобина и долей ДНК в хвосте $r=0,54$ ($p=0,01$), между уровнем кальция и моментом Оливе $r=0,67$ ($p=0,04$). Между количеством эритроцитов с МЯ у особей стерляди, а также длиной хвоста и моментом Оливе выявлена положительная достоверная корреляция ($r=0,45$, $p=0,04$). Следовательно, учитывая полученные суммарные данные о взаимосвязи повреждения ДНК и показателей крови, для уменьшения генотоксических эффектов в организме осетровых рыб необходимо контролировать их физиологическое состояние, в том числе иммунитет. Так, например, уровень кальция, альбумина в крови возможно регулировать путем полноценного сбалансированного кормления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изучив влияние среды на особей осетровых рыб, содержащихся в условиях садковой аквакультуры в дельте Волги методами микроядерного и ДНК-комет тестов можно сделать вывод об отсутствии острого генотоксического влияния в момент проведения исследования, а к влиянию хронического воздействия токсикантов, постоянно присутствующих в водах дельты Волги геном изученных осетровых рыб достаточно устойчив. Эритроциты особей русского осетра характеризовались достоверно более низкими изученными генотоксическими показателями, чем эритроциты стерляди. Однако, как показали литературные данные даже в оптимальных условиях для стерляди характерны более широкий диапазон показателей, характеризующих повреждение ДНК в клетке. Общее физиологическое состояние русского осетра вызывает необходимость осуществления более тщательного контроля и применения реабилитационных мер. К тому же, применение таких мер вероятно снизит уровень повреждения ДНК, так как корреляционный анализ показал достоверную взаимосвязь некоторых биохимических компонентов крови, характеризующих здоровье рыб и показателей ДНК-комет.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00151 «Разработка и внедрение высокоточного метода прижизненной оценки генотоксических эффектов у объектов аквакультуры для своевременной коррекции их

физиологического состояния на основе применения микроядерного теста и теста ДНК-комет», <https://rscf.ru/project/23-26-00151/>.

ACKNOWLEDGMENT

The study was carried out within the framework of and with the financial support of the Russian Science Foundation grant № 23-26-00151 "Development and implementation of a high-precision method for intravital assessment of genotoxic effects in aquaculture objects for the timely correction of their physiological state based on the use of a micronucleus test and a DNA comet test", <https://rscf.ru/project/23-26-00151/>.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильева Л.М. Состояние осетроводства Нижнего Поволжья // Материалы Международного научного форума «Каспий XXI века: пути устойчивого развития», Астрахань, 19–20 февраля, 2020. Астрахань: Изд-во «Астраханский университет», 2020. С. 185–188.
2. Загрязняющие вещества в водах Волжско-Каспийского бассейна / Отв. ред. Бреховских В.Ф., Островская Е.В. Астрахань: Издатель Сорокин Р.В., 2017. 406 с.
3. Петреченкова В.Г., Радованова И.Г. Загрязнение устьевой области р. Волги // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. N 2. С. 208–217. <https://doi.org/10.31857/S0321059620020121>
4. Li Y., Qu M., Sun L., Wu Y., Chen Y., Chen H., Kong Z., Liu Z. Genotoxicity study of phenol and o-cresol using the micronucleus test and the comet assay // Toxicological & environmental chemistry. 2005. V. 87. N 3. P. 365–372. <https://doi.org/10.1080/02772240500043264>
5. Vanzella T., Reis Martinez C., Colus I. Genotoxic and mutagenic effects of diesel oil water soluble fraction on a neotropical fish species // Mutation research. 2007. V. 631. N 1. P. 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2007.04.004>
6. Hussain B., Sultana T., Sultana S., Masoud M., Ahmed Z., Mahboob S. Fish eco-genotoxicology: Comet and micronucleus assay in fish erythrocytes as in situ biomarker of freshwater pollution // Saudi journal of biological sciences. 2018. V. 25. N 2. P. 393–398. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.11.048>
7. Bohne J., Catomen T. Genotoxicity in gene therapy: A report on vector integration and designer nucleases // Current opinion in molecular therapeutics. 2008. V. 10. N 3. P. 214–223.
8. Ревазова Ю.А., Илюшина Н.А. К вопросу о негенотоксических канцерогенах // Токсикологический вестник. 2021. Т. 29. N 4. С. 51–55. <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2021-29-4-51-55>
9. Kienzler A., Bony S., Devaux A. DNA repair activity in fish and interest in ecotoxicology. A review // Aquatic toxicology. 2013. V. 134–135. P. 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2013.03.005>
10. Hoesjmakers J. DNA repair mechanisms // Maturitas. 2001. V. 38. N 1. P. 17–23. [https://doi.org/10.1016/S0378-5122\(00\)00188-2](https://doi.org/10.1016/S0378-5122(00)00188-2)
11. Крысанов Е.Ю., Орджоникидзе К.Г., Симановский С.А. Цитогенетические индикаторы при оценке состояния окружающей среды // Онтогенез. Т. 49. N 1. 2018. С. 41–46. <https://doi.org/10.7868/S0475145018010056>
12. Frenzilli G., Nigro M., Lyons B. The Comet assay for the evaluation of genotoxic impact in aquatic environments //

- Mutation research. 2008. V. 681. P. 80–92. DOI: 10.1016/j.mrrev.2008.03.001
13. Bolognesi C., Hayashi M. Micronucleus assay in aquatic animals // *Mutagenesis*. 2011. V. 26. P. 205–213. <https://doi.org/10.1093/mutage/geq073>
14. Vasquez M. Combining the in vivo comet and micronucleus assays: a practical approach to genotoxicity testing and data interpretation // *Mutagenesis*. 2010. V. 25. N 2. P. 187–199. <https://doi.org/10.1093/mutage/gep060>
15. Gazo I., Franěk R., Šindelka R., Lebeda I., Shivaramu S., Pšenička M., Steinbach C. Ancient sturgeons possess effective dna repair mechanisms: influence of model genotoxicants on embryo development of sterlet, *Acipenser ruthenus* // *International journal of molecular sciences*. 2021. V. 22. N 1. P. 1–6. <https://doi.org/10.3390/ijms22010006>
16. Singh N., McCoy M., Tice R., Schneider E. A simple technique for quantitation of low levels of DNA damage in individual cells // *Experimental cell research*. 1988. V. 175. N 1. P. 184–191. [https://doi.org/10.1016/0014-4827\(88\)90265-0](https://doi.org/10.1016/0014-4827(88)90265-0)
17. Иванова Н.Т. Атлас клеток крови рыб (сравнительная морфология и классификация форменных элементов крови рыб). М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1983. 184 с.
18. Оценка генотоксических свойств методом ДНК-комет *in vitro*: Методические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. 16 с.
19. Olive P., Banáth J. The comet assay: a method to measure DNA damage in individual cells // *Nature protocols*. 2006. V. 1. N 1. P. 23–29. <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.5>
20. Житенева Л.Д. Атлас нормальных и патологически измененных клеток крови рыб. Ростов-на-Дону: Ростовское книжное издательство, 1989. 109 с.
21. Schmidt W. The micronucleus test // *Mutation Research/Environmental Mutagenesis and Related Subjects*. 1975. V. 31. N 1. P. 9–15. [https://doi.org/10.1016/0165-1161\(75\)90058-8](https://doi.org/10.1016/0165-1161(75)90058-8)
22. Mersh J., Beauvais M.N., Nagel P. Induction of micronuclei in haemocytes and gill cells of zebra mussels, *Dreissena polymorpha*, exposed to clastogens // *Mutation Research*. 1996. V. 371. P. 47–55. [https://doi.org/10.1016/s0165-1218\(96\)90093-2](https://doi.org/10.1016/s0165-1218(96)90093-2)
23. Крюков В.И. Анализ микроядер и ядерных аномалий в эритроцитах рыб, амфибий, рептилий и птиц: критерии выявления и типирования. Научно-методическое пособие. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2023. 94 с. <https://doi.org/10.58351/230110.2023.91.54.003>
24. Vytyutsky D., Kholodnyy V., Flajšhans M. 3-D structure, volume, and DNA content of erythrocyte nuclei of polyploid fish // *Cell Biology International*. 2014. V. 38. N 6. P. 708–715. <https://doi.org/10.1002/cbin.10247>
25. Лепилина И.Н., Романов А.А., Федорова Н.Н. Некоторые гематологические показатели стерляди в речной и морской периоды жизни // *Вестник Астраханского государственного технического университета*. 2006. N 3. С. 145–150.
26. Лепилина И.Н. Морфологический состав периферической крови предличинки осетровых // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2006. N 4(54). С. 101–105.
27. Серпунин Г.Г., Сементина Е.В., Савина Л.В. Характеристика крови стерляди разного возраста, выращиваемой в установке замкнутого водоснабжения // *Осетровое хозяйство*. 2009. N 3. С. 46–51.
28. Flajšhans M., Psenicka M., Rodina M., Tesitel J. Image cytometric measurements of diploid, triploid and tetraploid fish erythrocytes in blood smears reflect the true dimensions of live cells // *Cell Biol. Intern*. 2011. V. 35. P. 67–71. <https://doi.org/10.1042/CBI20100198>
29. Ballarin L., Dall'oro M., Bertotto D., Libertini A., Francescon A., Barbaro A. Haematological parameters in *Umbra cirrosa* (Teleostei, Sciaenidae): a comparison between diploid and triploid specimens // *Comp. Biochem. Physiol. A*. 2004. V. 138. P. 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2004.02.019>
30. Bickham J.W., Rowe G.T., Palatnikov G., Mekhtiev A., Mekhtiev M., Kasimov R.Y., Hauschultz D. W., Wickliffe J.K., Rogers W.J. Acute and genotoxic effects of baku harbor sediment on russian sturgeon, *acipenser guildensteidti* // *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. 1998. V. 61. P. 512–518. <https://doi.org/10.1007/s001289900792>
31. Ильинских Н.Н., Ильинских И.Н., Некрасов В.Н. Использование микроядерного теста в скрининге и мониторинге мутагенов // *Цитология и генетика*. 1988. T. 22. N 7. С. 67–72.
32. Ильинских Н.Н., Новицкий В.В., Ванчугова Н.Н., Ильинских И.Н. Микроядерный анализ и цитогенетическая нестабильность. Томск: Издательство Томского Университета, 1992. 272 с.
33. Olive P., Banáth J. Induction and rejoining of radiation-induced DNA single-strand breaks: «tail moment» as a function of position in the cell cycle // *Mutation research*. 1993. V. 294. N 3. P. 275–283. [https://doi.org/10.1016/0921-8777\(93\)90010-e](https://doi.org/10.1016/0921-8777(93)90010-e)
34. Стяжкина Е.В., Обвинцева Н.А., Шапошникова И.А., Тряпицына Г.А., Стукалов П.М., Пряхин Е.А. Оценка уровня повреждения и репарации ядерной ДНК у плотвы (*Rutilus rutilus* L.) из водоемов с разным уровнем радиоактивного загрязнения // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2012. T. 52. N 2. С. 198–206.
35. Acolas M., Davail B., Gonzalez P., Jean S., Clérandeau C., Morin B., Gourves P., Daffe G., Labadie P., Perrault A., Lauzent M., Pierre M., Le Barh R., Baudrimont M., Peluhet L., Le Menach K., Budzinski H., Rochard E., Cachot J. Health indicators and contaminant levels of a critically endangered species in the Gironde estuary, the sturgeon // *Environmental science and pollution research*. 2020. V. 27. N 4. P. 3726–3745. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05139-5>
36. Пронина Г.И., Корягина Н.Ю. Референсные значения физиолого-иммунологических показателей гидробионтов разных видов // *Вестник АГТУ. Серия Рыбное хозяйство*. 2015. N 4. С. 103–108.
37. Войкина А.В., Сергеева С.Г., Лисовская В.В., Жарынина И.И. Некоторые биохимические показатели сыворотки крови пиленгаса *Planiliza haematocheila* (Temminck & Schlegel, 1845) Азовского моря в 2019 // *Материалы II Международной научно-практической конференции «Биологическое разнообразие: изучение, сохранение, восстановление, рациональное использование»*, Керчь, 27–30 мая, 2020. Керчь: ООО «Издательство типография «Ариал», 2020. С. 274–278.
38. Cassel S.E., Yanong R.P.E., Pouder D.B., Rodriguez C., Mylniczenko N., Thompson P.M., Stilwell N.K., Heym K.J., Harmon T., Stacy N.I. Reference intervals for blood analytes

- of adult aquarium-housed russian sturgeon *Acipenser gueldenstaedtii* // *Journal of aquatic animal health*. 2021. V. 33. N 1. P. 33–43. <https://doi.org/10.1002/aah.10116>
39. Lall S., Hardy R., Kaushik S. Fish nutrition (fourth edition). Academic Press. 2022. P. 469–554. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-03211-9>
40. Bavi Z., Zakeri M., Mousavi S., Yavari V. Effects of dietary taurine on growth, body composition, blood parameters, and enzyme activities of juvenile sterlet (*acipenser ruthenus*) // *Aquaculture nutrition*. 2022. V. 2022. Article ID: 1713687. <https://doi.org/10.1155/2022/1713687>
41. Xue C., Yu G., Hirata T., Sakaguchi M., Terao J. Antioxidative Activity of Carp Blood Plasma on Lipid Peroxidation // *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*. 1998. V. 62. N 2. P. 201–205. <https://doi.org/10.1271/bbb.62.201>
42. Гераскин П.П., Металлов Г.Ф., Аксенов В.П., Дубовская А.В., Файзулина Д.Р., Галактионова М.Л. Использование биологических индикаторов для оценки загрязненности морской среды в районах расположения ликвидированных поисково-разведочных скважин // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2009. N 9. С. 55–58.
43. Мирошникова Е.П., Аринжанов А.Е., Килякова Ю.В., Мирошникова М.С., Маленкина К.А., Мирошников И.С. Гематологические параметры молоди стерляди на фоне совместного использования культуры *Bacillus subtilis* и наночастиц сплава Cu-Zn // *Животноводство и кормопроизводство*. 2018. N 3. С. 100–109.
- REFERENCES**
- Vasil'eva L.M. Sostoyanie osetrovodstva Nizhnego Povolzh'ya [State of sturgeon farming in the Lower Volga region]. *Materialy Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma «Kaspii XXI veka: puti ustoychivogo razvitiya», Astrakhan', 19–20 fevralya 2020* [Materials of the International Scientific Forum “Caspian Sea of the XXI century: ways of sustainable development”, Astrakhan, 19–20 February 2020]. Astrakhan', Astrakhanskii universitet Publ., 2020, pp. 185–188 (In Russian)
 - Brekhovskikh V.F., Ostrovskaya E.V., eds. *Zagryaznyayushchie veshchestva v vodakh Volzhsko-Kaspiiskogo basseina* [Pollutants in the waters of the Volga-Caspian basin]. Astrakhan, Sorokin R.V. Publ., 2017, 406 p. (In Russian)
 - Petrenchenkova V.G., Radovanova I.G. Pollution of the mouth area of the river. Volga. *Water resources*, 2020, vol. 47, no. 2, pp. 208–217. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0321059620020121>
 - Li Y., Qu M., Sun L., Wu Y., Chen Y., Chen H., Kong Z., Liu Z. Genotoxicity study of phenol and o-cresol using the micronucleus test and the comet assay. *Toxicological & environmental chemistry*, 2005, vol. 87, no. 3, pp. 365–372. <https://doi.org/10.1080/02772240500043264>
 - Vanzella T., Reis Martinez C., Colus I. Genotoxic and mutagenic effects of diesel oil water soluble fraction on a neotropical fish species. *Mutation research*, 2007, vol. 631, no. 1, pp. 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2007.04.004>
 - Hussain B., Sultana T., Sultana S., Masoud M., Ahmed Z., Mahboob S. Fish eco-genotoxicology: Comet and micronucleus assay in fish erythrocytes as in situ biomarker of freshwater pollution. *Saudi journal of biological sciences*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 393–398. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.11.048>
 - Bohne J., Catomen T. Genotoxicity in gene therapy: A report on vector integration and designer nucleases. *Current opinion in molecular therapeutics*, 2008, vol. 10, no. 3, pp. 214–223.
 - Revazova Yu.A., Ilyushina N.A. On the issue of non-genotoxic carcinogens. *Toxicological Bulletin*, 2021, vol. 29, no. 4, pp. 51–55. (In Russian) <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2021-29-4-51-55>
 - Kienzler A., Bony S., Devaux A. DNA repair activity in fish and interest in ecotoxicology. A review. *Aquatic toxicology*, 2013, vol. 134–135, pp. 47–56. DOI: 10.1016/j.aquatox.2013.03.005
 - Hoeijmakers J. DNA repair mechanisms. *Maturitas*, 2001, vol. 38, no. 1, pp. 17–23. [https://doi.org/10.1016/s0378-5122\(00\)00188-2](https://doi.org/10.1016/s0378-5122(00)00188-2)
 - Krysanov E.Yu., Ordzhonikidze K.G., Cytogenetic indicators in assessing the state of the environment. *Ontogenesis*, 2018, vol. 49, no. 1, pp. 41–46. (In Russian) <https://doi.org/10.7868/S0475145018010056>
 - Frenzilli G., Nigro M., Lyons B. The Comet assay for the evaluation of genotoxic impact in aquatic environments. *Mutation research*, 2008, vol. 681, pp. 80–92. DOI: 10.1016/j.mrrrev.2008.03.001
 - Bolognesi C., Hayashi M. Micronucleus assay in aquatic animals. *Mutagenesis*, 2011, vol. 26, pp. 205–213. <https://doi.org/10.1093/mutage/geq073>
 - Vasquez M. Combining the in vivo comet and micronucleus assays: a practical approach to genotoxicity testing and data interpretation. *Mutagenesis*, 2010, vol. 25, no. 2, pp. 187–199. <https://doi.org/10.1093/mutage/gep060>
 - Gazo I., Franěk R., Šindelka R., Lebeda I., Shivaramu S., Pšenička M., Steinbach C. Ancient sturgeons possess effective dna repair mechanisms: influence of model genotoxicants on embryo development of sterlet, *Acipenser ruthenus*. *International journal of molecular sciences*, 2021, vol. 22, no. 1, pp. 1–6. <https://doi.org/10.3390/ijms22010006>
 - Singh N., McCoy M., Tice R., Schneider E. A simple technique for quantitation of low levels of DNA damage in individual cells. *Experimental cell research*, 1988, vol. 175, no. 1, pp. 184–191. [https://doi.org/10.1016/0014-4827\(88\)90265-0](https://doi.org/10.1016/0014-4827(88)90265-0)
 - Ivanova N.T. *Atlas kletok krovi ryb (sravnitel'naya morfologiya i klassifikatsiya formennykh elementov krovi ryb)* [Atlas of fish blood cells (comparative morphology and classification of the formed elements of fish blood)]. Moscow, Light and food industry Publ., 1983, 184 p. (In Russian)
 - Otsenka genotoksicheskikh svoystv metodom DNK-komet in vitro: Metodicheskie rekomendatsii* [Assessment of genotoxic properties by the DNA comet method in vitro: Methodological recommendations]. Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology Rospotrebnadzor Publ., 2011, 16 p. (In Russian)
 - Olive P., Banáth J. The comet assay: a method to measure DNA damage in individual cells. *Nature protocols*, 2006, vol. 1, no. 1, pp. 23–29. <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.5>
 - Zhiteneva L.D. *Atlas normal'nykh i patologicheskii izmenennykh kletok krovi ryb* [Atlas of normal and pathologically altered fish blood cells]. Rostov-on-Don, Rostov Book Publ., 1989, 109 p. (In Russian)
 - Schmidt W. The micronucleus test. *Mutation Research/Environmental Mutagenesis and Related*

- Subjects*, 1975, vol. 31, no. 1, pp. 9–15.
[https://doi.org/10.1016/0165-1161\(75\)90058-8](https://doi.org/10.1016/0165-1161(75)90058-8)
22. Merish J., Beauvais M.N., Nagel P. Induction of micronuclei in haemocytes and gill cells of zebra mussels, *Dreissena polymorpha*, exposed to clastogens. *Mutation Research*, 1996, vol. 371, pp. 47–55.
[https://doi.org/10.1016/s0165-1218\(96\)90093-2](https://doi.org/10.1016/s0165-1218(96)90093-2)
23. Kryukov V.I. *Analiz mikroyader i yadernykh anomalii v eritrotsitakh ryb, amfibii, reptilii i ptits: kriterii vyyavleniya i tipirovaniya* [Analysis of micronuclei and nuclear abnormalities in the erythrocytes of fish, amphibians, reptiles and birds: criteria for detection and typing]. Krasnoyarsk, Research and Innovation Center Publ., 2023. 94 p. (In Russian)
<https://doi.org/10.58351/230110.2023.91.54.003>
24. Bytutsky D., Kholodnyy V., Flajshans M. 3-D structure, volume, and DNA content of erythrocyte nuclei of polyploid fish. *Cell Biology International*, 2014, vol. 38, no. 6, pp. 708–715. <https://doi.org/10.1002/cbin.10247>
25. Lepilina I.N., Romanov A.A., Fedorova N.N. Some hematological parameters of sterlet in the river and sea periods of life. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Astrakhan State University]. 2006, no. 3, pp. 145–150. (In Russian)
26. Lepilina I.N. Morphological composition of the peripheral blood of sturgeon prelarvae. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Orenburg State University]. 2006, no. 4(54), pp. 101–105. (In Russian)
27. Serpunin G.G., Sementina E.V., Savina L.V. Characteristics of the blood of sterlet of different ages grown in a closed water supply system. *Osetrovoe khozyaistvo* [Sturgeon farming]. 2009, no. 3, pp. 46–51. (In Russian)
28. Flajshans M., Psenicka M., Rodina M., Tesitel J. Image cytometric measurements of diploid, triploid and tetraploid fish erythrocytes in blood smears reflect the true dimensions of live cells. *Cell Biology International*, 2011, vol. 35, pp. 67–71. <https://doi.org/10.1042/CBI20100198>
29. Ballarin L., Dall'oro M., Bertotto D., Libertini A., Francescon A., Barbaro A. Haematological parameters in *Umbrina cirrosa* (Teleostei, Sciaenidae): a comparison between diploid and triploid specimens. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2004, vol. 138, pp. 45–51. DOI: [10.1016/j.cbpa.2004.02.019](https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2004.02.019)
30. Bickham J.W., Rowe G.T., Palatnikov G., Mekhtiev A., Mekhtiev M., Kasimov R.Y., Hauschultz D.W., Wickliffe J.K., Rogers W.J. Acute and genotoxic effects of baku harbor sediment on russian sturgeon, *acipenser guildensteidti*. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 1998, vol. 61, pp. 512–518.
<https://doi.org/10.1007/s001289900792>
31. Il'inskikh N.N., Il'inskikh I.N., Nekrasov V.N. The use of micronucleus test in screening and monitoring of mutagens. *Tsitologiya i genetika* [Cytology and Genetics]. 1988, vol. 22, no. 7, pp. 67–72. (In Russian)
32. Il'inskikh N.N., Novitskii V.V., Vanchugova N.N., Il'inskikh I.N. *Mikroyadernyi analiz i tsitogeneticheskaya nestabil'nost'* [Micronucleus analysis and cytogenetic instability]. Tomsk, Tomsk University Publ., 1992, 272 p. (In Russian)
33. Olive P., Banáth J. Induction and rejoining of radiation-induced DNA single-strand breaks: «tail moment» as a function of position in the cell cycle. *Mutation research*, 1993, vol. 294, no. 3, pp. 275–283.
[https://doi.org/10.1016/0921-8777\(93\)90010-e](https://doi.org/10.1016/0921-8777(93)90010-e)
34. Styazhkina E.V., Obvintseva N.A., Shaposhnikova I.A., Tryapitsyna G.A., Stukalov P.M., Pryakhin E.A. Assessment of the level of damage and repair of nuclear DNA in roach (*Rutilus rutilus* L.) from water bodies with different levels of radioactive contamination. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation Biology. Radioecology]. 2012, vol. 52, no. 2, pp. 198–206. (In Russian)
35. Acolas M., Davail B., Gonzalez P., Jean S., Clérandeau C., Morin B., Gourves P., Daffe G., Labadie P., Perrault A., Lauzent M., Pierre M., Le Barh R., Baudrimont M., Peluhet L., Le Menach K., Budzinski H., Rochard E., Cachot J. Health indicators and contaminant levels of a critically endangered species in the Gironde estuary, the sturgeon. *Environmental science and pollution research*, 2020, vol. 27, no. 4, pp. 3726–3745. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05139-5>
36. Pronina G.I., Koryagina N.Yu. Reference values of physiological and immunological parameters of hydrobionts of different species. *Vestnik AGTU. Seriya Rybnoe khozyaistvo* [Vestnik ASTU. Series Fisheries]. 2015, no. 4, pp. 103–108. (In Russian)
37. Voikina A.V., Sergeeva S.G., Lisovskaya V.V., Zharynina I.I. Nekotorye biokhimicheskie pokazateli syvorotki krovi pilengasa *Planilizaemaatocheila* (Temminck & Schlegel, 1845) *Azovskogo morya v 2019* [Some biochemical parameters of the blood serum of the *planilizaemaatocheila* (Temminck & Schlegel, 1845) of the Azov Sea in 2019]. *Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Biologicheskoe raznoobrazie: izuchenie, sokhranenie, vosstanovlenie, ratsional'noe ispol'zovanie», Kerch', 27–30 maya 2020* [Materials of the II International Scientific and Practical Conference “Biological Diversity: Study, Conservation, Restoration, Rational Use”, Kerch, 27–30 May 2020]. Kerch', Arial Publ., 2020, pp. 274–278 (In Russian)
38. Cassel S.E., Yanong R.P.E., Pouder D.B., Rodriguez C., Mylniczenko N., Thompson P.M., Stilwell N.K., Heym K.J., Harmon T., Stacy N.I. Reference intervals for blood analytes of adult aquarium-housed russian sturgeon *Acipenser gueldenstaedtii*. *Journal of aquatic animal health*, 2021, vol. 33, no. 1, pp. 33–43.
<https://doi.org/10.1002/aah.10116>
39. Lall S., Hardy R., Kaushik S. *Fish nutrition* (fourth edition). Academic Press, 2022, pp. 469–554.
<https://doi.org/10.1016/C2018-0-03211-9>
40. Bavi Z., Zakeri M., Mousavi S., Yavari V. Effects of dietary taurine on growth, body composition, blood parameters, and enzyme activities of juvenile sterlet (*acipenser ruthenus*). *Aquaculture nutrition*, 2022, vol. 2022, article id: 1713687.
<https://doi.org/10.1155/2022/1713687>
41. Xue C., Yu G., Hirata T., Sakaguchi M., Terao J. Antioxidative Activity of Carp Blood Plasma on Lipid Peroxidation. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, 1998, vol. 62, no. 2, pp. 201–205. <https://doi.org/10.1271/bbb.62.201>
42. Geraskin P.P., Metallov G.F., Aksenov V.P., Dubovskaya A.V., Faizulina D.R., Galaktionova M.L. The use of biological indicators to assess marine pollution in the areas where abandoned exploration wells are located. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse* [Environmental Protection in the Oil and Gas Complex]. 2009, no. 9, pp. 55–58. (In Russian)

43. Miroshnikova E.P., Arinzhanov A.E., Kilyakova Yu.V., Miroshnikova M.S., Malenkina K.A., Miroshnikov I.S. Hematological parameters of juvenile sterlet against the background of the combined use of *Bacillus subtilis* culture

and alloy nanoparticles Cu-Zn. *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo* [Animal husbandry and feed production]. 2018, no. 3, pp. 100–109. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

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

Анна В. Конькова / Anna V. Konkova <https://orcid.org/0000-0003-4957-2969>

Дина Р. Файзулина / Dina R. Faizulina <https://orcid.org/0000-0001-6789-6102>

Юлия М. Ширина / Yulia M. Shirina <https://orcid.org/0000-0001-6459-5435>

Иван А. Богатов / Ivan A. Bogatov <https://orcid.org/0000-0002-5739-1538>

Оригинальная статья / Original article
УДК 639.31(597):611.018.6
DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-8



Химический состав мышечной ткани рыб, выращенных в условиях аквакультуры Южного Вьетнама

Александра А. Паюта¹, Дарья А. Гульдина¹, Екатерина А. Флёрова¹,
Николай В. Лобус², Евгений Г. Евдокимов¹

¹Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль, Россия

²Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, Москва, Россия

Контактное лицо

Александра А. Паюта, к.б.н., научный сотрудник
Научной лаборатории Экобиомониторинга и
контроля качества, Ярославский государственный
университет им. П. Г. Демидова; 150003 Россия,
г. Ярославль, ул. Советская, 14.
Тел. +79056389475
Email a.payuta@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0478-4709>

Формат цитирования

Паюта А.А., Гульдина Д.А., Флёрова Е.А., Лобус
Н.В., Евдокимов Е.Г. Химический состав
мышечной ткани рыб, выращенных в условиях
аквакультуры Южного Вьетнама // Юг России:
экология, развитие. 2024. Т.19, N 2. С. 82-91. DOI:
10.18470/1992-1098-2024-2-8

Получена 22 мая 2023 г.

Прошла рецензирование 14 августа 2023 г.

Принята 15 января 2024 г.

Резюме

Цель – изучение химического состава четырех видов ценных рыб, выращенных в условиях аквакультуры Южного Вьетнама.

Особей полосатого змееголова *Channa striata*, карликового змееголова *Channa gachua*, нильской тилляпии *Oreochromis niloticus* и гибрида двух сомов *Clarias gariepinus* и *Clarias macrocephalus* приобрели на рынках у фермеров садковых хозяйств и непосредственно в самих хозяйствах провинции Кханьхоа. Рыб измеряли, взвешивали, после чего иссекали мышечную ткань для химического анализа. В ткани определяли содержание воды двухступенчатым методом определения влаги, липидов – методом обезжиренного остатка в аппарате Сокслета. Количество белка получали по принципу метода Кьельдаля с помощью полуавтоматической перегонной установки UDK 139 (Velp Scientifica, Италия, 2011 г.), минеральных веществ – гравиметрическим методом, углеводов – расчетным путем. Индекс физиологического состояния рассчитывали по стандартной методике.

Мышцы гибрида сомов *Clarias gariepinus* и *Clarias macrocephalus* характеризуются наибольшей питательной ценностью. По содержанию липидов исследованные особи относятся к рыбам с низким содержанием жира, *Channa striata* – к категории нежирных рыб. Высокий индекс физиологического состояния у *Oreochromis niloticus* связан с повышенной обводненностью мышечной ткани. Не выявлено значимых различий в химическом составе мышц с увеличением размера тела рыб, лишь у *Channa striata* увеличивалась доля минеральных веществ.

Полученные данные могут быть использованы при организации рационального кормления и содержания объектов аквакультуры.

Ключевые слова

Channa striata, *Channa gachua*, *Oreochromis niloticus*, гибрид *Clarias gariepinus*×*Clarias macrocephalus*, липиды, белок, Южный Вьетнам, аквакультура, химический состав мышц.

Chemical composition of muscle tissue of fish reared in the aquaculture of South Vietnam

Aleksandra A. Payuta¹, Daria A. Guldina¹, Ekaterina A. Flerova¹,
Nikolay V. Lobus² and Evgeniy G. Evdokimov¹

¹P.G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

²K.A. Timiryazev Institute of Plant Physiology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Principal contact

Aleksandra A. Payuta, Candidate of Biological Sciences, Researcher, Scientific Laboratory of Ecobiomonitoring and Quality Control, P.G. Demidov Yaroslavl State University; 14 Sovetskaya St, Yaroslavl, Russia 150003. Tel. +79056389475
Email a.payuta@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0478-4709>

How to cite this article

Payuta A.A., Guldina D.A., Flerova E.A., Lobus N.V., Evdokimov E.G. Chemical composition of muscle tissue of fish reared in the aquaculture of South Vietnam. *South of Russia: ecology, development*. 2024; 19(2):82-91. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-8

Received 22 May 2023

Revised 14 August 2023

Accepted 15 January 2024

Abstract

To study the chemical composition of four species of valuable fish reared in aquaculture conditions in South Vietnam.

Individuals of *Channa striata*, *Channa gachua*, *Oreochromis niloticus*, a hybrid of *Clarias gariepinus* and *Clarias macrocephalus* were purchased in markets from farmers of cage farms and directly in the farms of Khanh Hoa province. The fish were measured, weighed, and then muscle tissue was dissected for chemical analysis. The water content in the tissue was determined by a two-stage method for determining moisture, while lipids were determined by the fat-free residue method in a Soxhlet apparatus. The amount of protein was obtained according to the principle of the Kjeldahl method, using a semi-automatic distillation unit UDK 139 (Velp Scientifica, Italy, 2011); minerals were determined by the gravimetric method, and carbohydrates – by calculation. The index of physiological state was calculated according to the standard method.

Hybrid catfish muscles are characterised as having the greatest nutritional value. In terms of lipid content, the individuals studied belonged to fish with a low fat content, *Channa striata*, which belongs to the category of lean fish. A high index of physiological state in *Oreochromis niloticus* was found to be associated with increased water content in muscle tissue. No significant differences were found between the biochemical parameters in the muscles of fish with an increase in body size, and only in *Channa striata* did the proportion of minerals increase. The data obtained can be used in the organisation of rational feeding and maintenance of aquacultural species.

Key Words

Channa striata, *Channa gachua*, *Oreochromis niloticus*, hybrid *Clarias gariepinus*×*Clarias macrocephalus*, lipids, protein, South Vietnam, aquaculture, muscle proximate composition.

ВВЕДЕНИЕ

Сектор аквакультуры играет важную роль в национальной экономике Вьетнама. Отмечают значительный рост производства в рыбном хозяйстве, который объясняется не только ростом объема продукции, но и продолжающимся расширением ассортимента объектов аквакультуры, что обеспечивает новые рабочие места и сокращает уровень бедности населения [1]. Сегодня суммарный объем продукции аквакультуры Вьетнама превышает долю промышленного рыболовства этой страны. Экспорт продукции рыбоводства Вьетнама является одним из ключевых товарных производств страны. К наиболее перспективным направлениям экспорта рыбной продукции из Вьетнама относят Китай, США, некоторые страны Европы и Россию [1; 2]. В Указе президента РФ № 605 от 7 мая 2012 г. Вьетнам назван одним из трёх самых важных (наряду с Китаем и Индией) стратегических партнеров России в Азии. Такой тренд, прежде всего, связан с тем, что в рационе питания современного российского потребителя рыбные продукты занимают с каждым днем все более весомый удельный вес. Так как в рационе питания для сохранения здоровья человека в обязательном порядке должны присутствовать продукты питания из рыбы и иных водных ресурсов [3; 4]. Рыба является источником незаменимых аминокислот, витаминов и минеральных веществ, диетического белка, усвояемость которого превышает 90%, содержит длинноцепочечные полиненасыщенные омега-3 жирные кислоты, считающиеся физиологически важными для

нормальной жизни человека и играющие ключевую роль в облегчении ряда заболеваний [4; 5]. По этой причине с каждым годом отмечается увеличение потребления рыбной продукции [6; 7].

Существует необходимость изучения химического состава мышечной ткани рыбы – части тела, которую чаще всего используют в пищу. С одной стороны, данные по содержанию основных макроэлементов позволяют конечному потребителю сделать выбор подходящего вида в соответствии с его потребностями в питании. С другой стороны, химический состав указывает на состояние особи и популяции в целом, что используют при рациональной организации кормления и содержания объектов аквакультуры.

Цель работы – изучение химического состава четырех видов ценных рыб, выращенных в условиях аквакультуры Южного Вьетнама.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования служили 4 вида пресноводных рыб: полосатый змееголов *Channa striata* (Bloch, 1793), карликовый змееголов *Channa gachua* (Hamilton, 1822), нильская тилapia *Oreochromis niloticus* (Peters, 1852), гибрид двух сомов *Clarias gariepinus* (Burchell 1822) и *Clarias macrocephalus* (Günther, 1864).

Рыбы приобретались на рынках провинции Кханьхоа у фермеров садковых хозяйств, а также непосредственно в самих хозяйствах. Все особи были половозрелыми (табл. 1).

Таблица 1. Морфофизиологические показатели исследованных особей
Table 1. Morphophysiological indicators of individuals studied

Вид рыб Fish species	n	Показатель Index		
		масса, г weight, g	длина, см length, sm	индекс физиологического состояния по Фультону Fulton condition factor
Полосатый змееголов <i>Channa striata</i>	11	568±20	33,8±1,2 ^a	1,54±0,12 ^a
Карликовый змееголов <i>Channa gachua</i>	36	460±14	32,2±0,4 ^a	1,37±0,02 ^{a,c}
Нильская тилapia <i>Oreochromis niloticus</i>	26	179±12 ^a	17,4±0,4	3,38±0,08 ^b
Гибрид сомов <i>Clarias gariepinus</i> и <i>Clarias macrocephalus</i> Catfish hydride <i>Clarias gariepinus</i> and <i>Clarias macrocephalus</i>	96	285±11 ^b	29,1±0,4 ^b	1,14±0,02 ^c

Примечания: здесь и в таблице 2 статистически значимые различия между показателями в столбце отмечены разными надстрочными буквенными индексами, p≤0,05
Notes: here and in Table 2 statistically significant differences between the indicators in the column are marked by different superscript letter indices, p≤0.05

Рыбу измеряли, взвешивали, после чего у каждой особи иссекали мышечную ткань вдоль позвоночника и высушивали до постоянной массы при 60 °С. После высушивания пробы помещали в индивидуальные герметичные пакеты и хранили до проведения химического анализа. В лаборатории определяли содержание воды и сухого вещества путем высушивания проб при температуре 105 °С [8], липидов – методом обезжиренного остатка в аппарате Сокслета [9]. Для определения доли белка использовали принцип метода Кьельдаля. С помощью

полуавтоматической перегонной установки UDK 139 (Velp Scientifica, Италия, 2011 г.) получали содержание азота, которое умножали на коэффициент 6,25 для рыб [10]. Содержание минеральных веществ получали путем сжигания навески в муфельной печи при температуре 550°С [11]. Углеводы рассчитывали по разнице количества сухого вещества и количества белка, липидов и минеральных веществ [8].

У рыб определяли индекс физиологического состояния по Фультону (k) по формуле $k = w \times 100 / l^3$, где w – масса рыбы (г); l – длина тела рыбы (см).

Результаты обработаны статистически в программе MS Excel 2007 и с помощью программы анализа данных AtteStat и представлены в виде средних величин и их ошибок. Достоверность различий оценивали, используя критерии Краскела-Уоллеса и Данна для множественных сравнений и U-Манна-Уитни для парных сравнений при уровне значимости $p \leq 0,05$.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования выявлено, что индекс физиологического состояния у *Channa striata* варьировался от 0,74 до 1,95, у *Channa gachua* – в пределах 1,15–1,65, у *Oreochromis niloticus* – 2,20–4,50, у гибрида сомов – от 0,14 до 2,27. Наибольшее значение индекса обнаружено у *Oreochromis niloticus*, наименьшее у гибрида *Clarias gariepinus* × *Clarias macrocephalus* (табл. 1). Стоит отметить, что исследованные нами особи *Channa striata*, *Oreochromis niloticus* и гибрида *Clarias gariepinus* × *Clarias*

macrocephalus превосходили своих сородичей из других мест обитания по величине индекса физиологического состояния, особи *Channa gachua* – уступали [11–18].

Индекс физиологического состояния считается ключевой детерминантой общей приспособленности отдельного животного и его влияния на здоровье с точки зрения пригодности биомассы и благополучия рыболовской популяции в среде обитания [19; 20]. Информация о показателе используется при управлении системой аквакультуры и изменении технологии выращивания гидробионтов, например, путем улучшения качества корма, изменения плотности посадки рыбы, чтобы уменьшить конкуренцию за пищу и пространство [12].

При сравнении химического состава мышц исследуемых видов наибольшее количество воды обнаружено у нильской тилапии, наименьшее – у гибрида африканского сома (табл. 2).

Таблица 2. Химический состав мышц исследованных особей

Table 2. Muscle proximate composition of individuals studied

Вид рыб Fish species	Содержание, % / Content, %					
	воды water	сухого вещества dry matter	белка protein	липидов lipids	минеральных веществ mineral substances	углеводов carbo-hydrates
Полосатый змееголов <i>Channa striata</i>	77,1±0,09 ^a	22,8±0,09 ^a	18,4±0,50 ^a	1,07±0,11 ^a	1,31±0,04 ^a	2,11±0,10 ^a
Карликовый змееголов <i>Channa gachua</i>	70,8±0,24 ^{b,c}	29,2±0,24 ^{b,c}	22,9±0,44 ^b	2,21±0,27 ^{a,b}	1,56±0,12 ^a	2,56±0,05 ^a
Нильская тилапия <i>Oreochromis niloticus</i>	78,0±0,19 ^{a,c}	22,0±0,19 ^{a,c}	16,5±0,90 ^{a,b}	2,56±0,51 ^{a,b}	1,30±0,05 ^a	1,56±0,07 ^b
Гибрид сомов <i>Clarias gariepinus</i> и <i>Clarias macrocephalus</i> Catfish hydride <i>Clarias gariepinus</i> and <i>Clarias macrocephalus</i>	70,3±0,18 ^b	29,9±0,29 ^b	22,7±0,45 ^b	2,67±0,43 ^b	1,65±0,04 ^b	2,87±0,13 ^a

Мышцы гибрида *Clarias gariepinus* × *Clarias macrocephalus* характеризовались повышенным содержанием липидов, минеральных веществ и углеводов. Наибольшее количество белка обнаружено в мышечной ткани *Channa gachua* и гибрида сомов. Наименьшее количество липидов содержалось в мышцах *Channa striata*, белка, минеральных веществ и углеводов у *Oreochromis niloticus*. Таким образом, наибольшая питательная ценность выявлена у гибрида африканского сома.

По содержанию липидов исследованные виды можно отнести к рыбам с низким содержанием жира, за исключением особей *Channa striata*, которые принадлежат к категории нежирных рыб [21]. По соотношению белка и липидов в мышцах особи *Channa striata* и *Oreochromis niloticus* относятся к категории А, *Channa gachua* и гибрида *Clarias gariepinus* × *Clarias macrocephalus* – к категории D [22].

На состав тела гидробионтов оказывают влияние тип питания рыб и особенности усвоения ими

питательных веществ [23; 24]. Змееголовы – хищники, которые плохо усваивают углеводы и менее эффективно переваривают крахмал [25]. Особи нильской тилапии являются всеядными, но по причине питания на всех уровнях водоема, в их рационе преобладает растительная пища [26]. Гибрид *Clarias gariepinus* × *Clarias macrocephalus* является условно-всеядным, при этом его характерной особенностью является способность дышать воздухом, благодаря которой особи могут обитать при чрезвычайно высокой плотности [27]. Кроме этого, они отличаются способностью переваривать сахара, крахмал и клетчатку [25]. Липиды в организме рыб откладываются преимущественно из пищи, в особенности из богатого полиненасыщенными жирными кислотами зоопланктона [28]. Вероятно, благодаря возможности потреблять более разнообразную пищу, всеядные виды в нашем исследовании характеризовались повышенным содержанием липидов в мышцах по сравнению с хищными. Ранее нами была показана

схожая тенденция накопления жировых веществ в мышцах чехони *Pelecus cultratus* – планктофага-ихтиофага и судака *Sander lucioperca* – пелагического хищника [24]. Повышенное содержание липидов в теле всеядных видов, по сравнению с хищными было отмечено в других исследованиях [29].

Интересно отметить, что, несмотря на высокий индекс физиологического состояния, в мышцах *Oreochromis niloticus* содержалось наименьшее количество сухого вещества, в том числе белка, минеральных веществ и углеводов. Ранее мы сообщали, что у леща *Abramis brama* происходило увеличение индекса физиологического состояния за счет повышения обводненности мышц [30]. Предполагается, что вода замещает в тканях макронутриенты при энергетических тратах из-за неблагоприятных условий обитания рыб. Поэтому для мониторинга благополучия особей индекс физиологического состояния стоит применять в комплексе с другими показателями.

Исследованные нами особи *Channa striata* превосходили своих сородичей из водоемов Центрального Калимантана по содержанию в мышцах сухого вещества, в том числе белка, липидов, минеральных веществ и углеводов [31], но уступали по количеству белка и минеральных веществ особям из водохранилища Джатигеды (Западная Ява) [32]. Особи *Channa striata*, выращенные в условиях аквакультуры Вьетнама, содержали меньшее количество липидов и минеральных веществ в мышечной ткани, чем разводимые рыбы в Индонезии [33].

Исследованные нами особи *Channa gachua* характеризовались большим количеством макронутриентов, чем их сородичи из Лаоса [34], но меньшим содержанием липидов и минеральных веществ, чем рыбы из Индии [35].

Особи нильской тилапии из Вьетнама превосходили своих сородичей из водоемов Нигерии и Эфиопии по содержанию липидов и белка в мышечной ткани, но уступали им по количеству минеральных веществ [36; 37]. Кроме этого, в их мышцах содержалось больше липидов, но меньше белка, чем у рыб из Мексики [38].

Особи гибридного сома, полученные в условиях аквакультуры Вьетнама, отличались более высоким содержанием сухих веществ, в том числе белка и более низким количеством липидов, чем гибриды, выращенные в Индии и Таиланде [23; 39; 40].

Известно, что содержание биохимических компонентов в организме гидробионтов зависит от условий местообитания, качества и количества корма, сбалансированности рациона, антропогенных факторов [41–43]. Наиболее важным показателем состояния рыб является содержание липидов в их теле, т.к. при влиянии неблагоприятных факторов (загрязнения, отсутствия пищи, заболеваний, паразитов) именно эти компоненты расходуются на нужды организма в первую очередь. Интенсивный расход белков организма происходит при истощении жировых запасов и недостатка протеина в рационе рыб [44–47]. Можно предположить, что в условиях аквакультуры более низкое содержание макронутриентов в мышечной ткани рыб может быть связано с нарушением технологии кормления и содержания.

Определение химического состава тела в зависимости от размера рыбы тесно связано с качеством мяса и считается важным свойством, используемым потребителями [48]. С увеличением размеров тела рыб выявлено статистически значимое повышение содержания минеральных веществ в мышцах *Channa striata* (табл. 3).

Таблица 3. Химический состав мышц особей разного размера

Table 3. Muscle proximate composition of the individuals of different sizes

Размер тела, см Body size, sm	Содержание, % / Content, %					
	воды water	сухого вещества dry matter	белка protein	липидов lipids	минеральных веществ mineral substances	углеводов carbohydrates
Полосатый змееголов <i>Channa striata</i>						
30–33	77,2±0,15	22,8±0,15	17,9±0,94	1,08±0,19	1,24±0,05	2,52±1,03
35–41	77,1±0,15	22,9±0,15	18,8±0,52	1,05±0,19	1,40±0,04*	1,60±0,68
Карликовый змееголов <i>Channa gachua</i>						
28–32	70,6±0,29	29,4±0,29	23,1±0,71	2,46±0,38	1,77±0,36	2,05±1,25
33–35	70,9±0,34	29,1±0,34	22,7±0,58	1,98±0,45	1,44±0,08	2,97±0,93
Нильская тилапия <i>Oreochromis niloticus</i>						
15–17	78,2±0,25	21,8±0,25	15,7±1,77	2,86±0,74	1,35±0,14	1,89±0,55
18–22	77,8±0,24	22,2±0,24	17,7±1,24	1,97±0,20	1,27±0,04	1,80±0,59
Гибрид сомов <i>Clarias gariepinus</i> и <i>Clarias macrocephalus</i> Catfish hybride <i>Clarias gariepinus</i> and <i>Clarias macrocephalus</i>						
20–30	70,3±0,27	29,7±0,27	23,0±0,59	2,37±0,59	1,67±0,04	2,66±0,50
31–39	70,2±0,18	30,3±0,67	22,3±0,71	3,16±0,61	1,63±0,07	3,21±1,30

Примечания: статистически значимые различия между показателями в столбце отмечены *, p<0,05

Notes: statistically significant differences between the indicators in the column are marked *, p<0.05

Во многих работах отмечают как увеличение, так и сокращение количества белка в теле гидробионтов с увеличением их размера, в то время как доля жировых запасов преимущественно увеличивается, а воды сокращается [45; 48–51]. Несмотря на данные литературы, различия между биохимическими показа-

телями в мышцах исследованных нами особей в указанном диапазоне длины тела не выявлены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучен химический состав мышечной ткани четырех видов пресноводных рыб, выращенных в условиях аквакультуры Южного Вьетнама. Сравнительный анализ

полученных данных выявил, что наибольшее содержание липидов, минеральных веществ и углеводов содержалось в мышцах гибрида *Clarias gariepinus* × *Clarias macrocephalus*, белка – у *Channa gachua*. По содержанию липидов исследованные особи относятся к рыбам с низким содержанием жира, *Channa striata* – к категории нежирных рыб. Высокий индекс физиологического состояния у *Oreochromis niloticus* связан с повышенным содержанием воды. Значимых различий между биохимическими показателями в мышцах особей разных размеров не выявлено, лишь у *Channa striata* с увеличением размера повышалась доля минеральных веществ. Более низкое содержание макронутриентов в мышечной ткани гидробионтов в условиях аквакультуры может быть связано с нарушением технологии кормления и содержания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Khanh Nguyen H.T., Nang Thu T.T., Lebaillly P., Azadi H. Economic challenges of the export-oriented aquaculture sector in Vietnam // *Journal of Applied Aquaculture*. 2019. V. 31. N 4. P. 367–383. DOI: 10.1080/10454438.2019.1576568
- Tri N.N., Tu N.P.C., Van Tu N. An overview of aquaculture development in Viet Nam // *Proceedings International Conference on Fisheries and Aquaculture*. 2021. V. 7. N 1. P. 53–73. DOI: 10.17501/23861282.2021.7105
- Li X., Han T., Zheng S., Wu G. Nutrition and functions of amino acids in aquatic crustaceans. *Amino Acids in Nutrition and Health: Amino Acids in the Nutrition of Companion, Zoo and Farm Animals*. Cham: Springer, 2021. P. 169–198. DOI: 10.1007/978-3-030-54462-1_9
- Kwasek K., Thorne-Lyman A.L., Phillips M. Can human nutrition be improved through better fish feeding practices? a review paper // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020. V. 60. N 22. P. 3822–3835. DOI: 10.1080/10408398.2019.1708698
- Tacon A.G.J., Lemos D., Metian M. Fish for health: improved nutritional quality of cultured fish for human consumption // *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*. 2020. V. 28. N 4. P. 449–458. DOI: 10.1080/23308249.2020.1762163
- FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2018 – Meeting the sustainable development goals. Rome, 2018. 227 p.
- Богачев А.И. Роль рыболовства и аквакультуры в обеспечении продовольственной безопасности: мировой аспект // *Вестник сельского развития и социальной политики*. 2017. N 4(16). С. 2–4.
- Флёрова Е.А. Физиолого-биохимические методы исследования рыб. Ярославль: Изд-во ФГБОУ ВПО «Ярославская ГСХА», 2014. 40 с.
- Min D.B., Ellefson W.C. Fat analysis. *Food analysis*. Boston, MA: Springer, 2010. P. 117–132. DOI: 10.1007/978-1-4419-1478-1_8
- Chang S.K.C. Protein analysis. *Food analysis*. Food analysis. Boston, MA: Springer, 2010. P. 133–146. DOI: 10.1007/978-1-4419-1478-1_9
- Marshall M.R. Ash analysis. *Food analysis*. Boston, MA: Springer, 2010. P. 105–115. DOI: 10.1007/978-1-4419-1478-1_7
- Hạnh H.M., Tâm B.M. ĐẶC ĐIỂM SINH HỌC SINH SẢN CỦA CÁ CHÀNH DỤC (*Channa gachua*) phân bố ở tỉnh Hậu Giang // *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*. 2014. N 1. P. 188–195.
- Ahmedi A. The length-weight relationship and condition factor of the threatened snakehead (*Channa striata*) from Sungai Batang river, Indonesia // *Polish Journal of Natural Sciences*. 2018. V. 33. N 4. P. 607–623.
- Munglue P., Rattana K., Sangchanjiradet S., Jankam A., Dasri, K. Growth performance and intestinal morphology of hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* × *Clarias gariepinus*) fed diet supplemented with rice paddy herb (*Limnophila aromatica*) extract // *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*. 2019. V. 24. N 2. P. 1–12.
- Komba E.A., Munubi R.N., Chenyambuga S.W. Comparison of body length-weight relationship and condition factor for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured in two different climatic conditions in Tanzania // *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*. 2020. N 8(3). P. 44–48.
- Shija B.S. Length-weight relationship and Fulton's condition factor of the Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L., 1758) in Lake Chamo, Ethiopia // *Journal of Agriculture and Environmental Sciences*. 2020. V. 5. N 2. P. 44–54.
- Hossain M.A., Bapary M.A.J., Rahman M.A. A multi-model analysis of growth and maturity biometrics in common Snakeheads, *Channa striata*, and *Channa punctatus* collected from Hakaluki Haor, Northeast Bangladesh // *Acta Aquatica Turcica*. 2021. V. 17. N 3. P. 429–439. DOI: 10.22392/actaqua.878998
- Asyhari A., Machrizal R. Length-weight relationship and condition factors of *Channa striata* in Tanjung Haloban village, Labuhanbatu // *Jurnal Biologi: Jurnal Penelitian Pendidikan Biologi dan Biologi*. 2022. V. 5. N 2. P. 107–113. DOI: 10.30821/biolokus.v5i2.1316
- Badr El-Bokhty E.A.E., Fetouh M.A. Some biological aspects of *Oreochromis niloticus* and *Oreochromis aureus* caught by trammel nets from El-Salam Canal, Egypt // *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*. 2023. V. 27. N 1. P. 167–177. DOI: 10.21608/EJABF.2023.284416
- Jewel M.A.S., Haque M.A., Ferdous M.S., Khatun M.S., Akter, S. Length-weight relationships and condition factors of *Cirrhinus reba* (Hamilton, 1822) in Padma River, Bangladesh // *J. Fish. Aquat. Sci*. 2019. V. 14. N 2. P. 39–45. DOI: 10.3923/jfas.2019.39.45
- Suwal T.L., Chi M.J., Tsai C.F., Chan F.T., Lin K.H., Pei K.J.C. Morphometric Relationships, Growth and Condition Factors of Critically Endangered Chinese Pangolin (*Manis pentadactyla*) // *Animals*. 2022. V. 12. N 7. P. 910. DOI: 10.3390/ani12070910
- Nurnadia A.A., Azrina A., Amin I. Proximate composition and energetic value of selected marine fish and shellfish from the West coast of Peninsular Malaysia // *International Food Research Journal*. 2011. V. 18. N 1. P. 137–148.
- Ahmed I., Jan K., Fatma S., Dawood M.A. Muscle proximate composition of various food fish species and their nutritional significance: A review // *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2022. V. 106. N 3. P. 690–719. DOI: 10.1111/jpn.13711
- Singh S., Khan M.A. Dietary arginine requirement of fingerling hybrid *Clarias* (*Clarias gariepinus* × *Clarias macrocephalus*) // *Aquaculture Research*. 2007. V. 38. N 1. P. 17–25. DOI: 10.1111/j.1365-2109.2006.01618.x
- Payuta A.A., Flerova E.A. Some indicators of metabolism in the muscles, liver, and gonads of pike-perch *Sander lucioperca* and sibel *Pelecus cultratus* from the Gorky Reservoir // *Journal of Ichthyology*. 2019. V. 59. N 2. P. 255–262. DOI: 10.1134/S0032945219020152
- Jantrarotai W., Sitasit P., Rajchapakdee S. The optimum carbohydrate to lipid ratio in hybrid *Clarias catfish* (*Clarias*

- macrocephalus* × *C. gariepinus*) diets containing raw broken rice // *Aquaculture*. 1994. V. 127. N 1. P. 61–68. DOI: 10.1016/0044-8486(94)90192-9
27. Degani G., Revach A. Digestive capabilities of three commensal fish species: Carp, *Cyprinus carpio* L., tilapia, *Oreochromis aureus* × *O. niloticus*, and African catfish, *Clarias gariepinus* (Burchell 1822) // *Aquaculture Research*. 1991. V. 22. N 4. P. 397–403. DOI: 10.1111/j.1365-2109.1991.tb00753.x
28. Yi Y., Lin C.K., Diana J.S. Hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* × *C. gariepinus*) and Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) culture in an integrated pen-cum-pond system: growth performance and nutrient budgets // *Aquaculture*. 2003. V. 217. N 1–4. P. 395–408. DOI: 10.1016/S0044-8486(02)00540-9
29. Гладышев М.И. Незаменимые полиненасыщенные жирные кислоты и их пищевые источники для человека // *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*. 2012. Т. 4. N 5. С. 352–386.
30. Hussain M.Z., Naqvi A.A., Shahzadah W.A., Latif A., Hussain S., Iqbal R., Ali M. Effect of feeding habit, size and season on proximate composition of commercially important fishes from lentic water bodies of Indus river at ghazi ghat, Pakistan // *Pakistan Journal of Zoology*. 2016. V. 48. N 6. P. 1877–1884.
31. Payuta A.A., Flerova E.A. Dynamics of indices of metabolism in muscle tissue, liver and gonads of *Abramis brama* in different periods of the annual cycle // *Biosystems Diversity*. 2020. V. 28. N 2. P. 146–153. DOI: 10.15421/012020
32. Suprayitno E., Nursyam H., Mustafa A. Chemical composition and amino acid profile of Channidae collected from Central Kalimantan, Indonesia // *IEESE International Journal of Science and Technology*. 2013. V. 2. N 4. P. 25–31.
33. Herawati T., Yustiati A., Nurhayati A., Mustikawati R. Proximate composition of several fish from Jatigede Reservoir in Sumedang district, West Java // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. V. 137. N 1. Article ID: 012055. DOI: 10.1088/1755-1315/137/1/012055
34. Chasanah E., Nurilmala M., Purnamasari A.R., Fithriani D. Chemical composition, albumin content and bioactivity of crude protein extract of native and cultured *Channa striata* // *JPB Kelautan dan Perikanan*. 2015. V. 10. N 2. P. 123–132.
35. Fujita K., Saito M., Vongvichith B., Hasada K., Boutsavath P., Mahathilath X., Morioka S. Analysis of the nutritional composition of aquatic species toward nutritional improvement in a Lao PDR rural area // *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*. 2019. V. 53. N 3. P. 191–199. DOI: 10.6090/jarq.53.191
36. Chakraborty S., Brahma B.K., Goyal A.K. Proximate composition of three small indigenous fish species encountered in the local fish market of Kokrajhar, BTAD, Assam // *Indian Journal of Applied Research*. 2015. V. 5. N 10. P. 712–714.
37. Olopade O.A., Taiwo I.O., Lamidi A.A., Awonaiké O.A. Proximate composition of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) (Linnaeus, 1758) and tilapia hybrid (red tilapia) from Oyan Lake, Nigeria // *Bulletin UASVM Food Science and Technology*. 2016. V. 73. N 1. P. 19–23. DOI: 10.15835/buasvmcn-fst:11973
38. Desta D., Zello G.A., Alemayehu F., Estfanos T., Zatti K., Drew M. Proximate analysis of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*), fish fillet harvested from farmers pond and Lake Hawassa, Southern Ethiopia // *International Journal for research and development in technology*. 2019. V. 11. N 1. P. 94–99.
39. Garduño-Lugo M., Granados-Alvarez I., Olvera-Novoa M.A., Muñoz-Córdova G. Comparison of growth, fillet yield and proximate composition between Stirling Nile tilapia (wild type) (*Oreochromis niloticus*, Linnaeus) and red hybrid tilapia (Florida red tilapia × Stirling red *O. niloticus*) males // *Aquaculture Research*. 2003. V. 34. N 12. P. 1023–1028.
40. Chomnawang C., Nantachai K., Yongsawatdigul J., Thawornchinsombut S., Tungkawachara S. Chemical and biochemical changes of hybrid catfish fillet stored at 4° C and its gel properties // *Food Chemistry*. 2007. V. 103. N 2. P. 420–427. DOI: 10.1016/j.foodchem.2006.07.039
41. Phetsang H., Panpipat W., Panya A., Phonsatta N., Cheong L.Z., Chaijan M. Chemical characteristics and volatile compounds profiles in different muscle part of the farmed hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* × *Clarias gariepinus*) // *International Journal of Food Science & Technology*. 2022. V. 57. N 1. P. 310–322. DOI: 10.1111/ijfs.15419
42. Паюта А.А., Богданова А.А., Флерова Е.А., Мирошниченко Д.А., Малин М.И., Андреева М.И. Химический состав мышц рыб малых рек Ярославской области // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство*. 2019. N 1. С. 112–121. DOI: 10.24143/2073-5529-2019-1-112-121
43. Payuta A.A., Flerova E.A. Impact of habitation conditions on metabolism in the muscles, liver, and gonads of different sex and age groups of bream // *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2021. V. 12. N 2. P. 240–250. DOI: 10.15421/022133
44. Мирошниченко Д.А., Флёрва Е.А. Опыт выращивания радужной форели в условиях высокогорья Южного Вьетнама: показатели роста и химический состав скелетных мышц // *Труды ВНИРО*. 2018. Т. 170. С. 116–123.
45. Ravichandran S., Kumaravel K., Florence E. P. Nutritive composition of some edible fin fishes // *International Journal of Zoological Research*. 2011. V. 7. N 3. P. 241–251. DOI: 10.3923/ijzr.2011.241.251
46. Naeem M., Ishtiaq A. Proximate composition of *Mystus bleekeri* in relation to body size and condition factor from Nala Daik, Sialkot, Pakistan // *African Journal of Biotechnology*. 2011. V. 10. N 52. P. 10765–10773. DOI: 10.5897/AJB10.2339
47. Murzina S.A., Pekkoeva S.N., Kondakova E.A., Nefedova Z.A., Filippova K.A., Nemova N.N., Orlov A.M., Berge J., Falk-Petersen S. Tiny but fatty: lipids and fatty acids in the daubed shanny (*Leptoclinus Maculatus*), a small fish in svalbard waters // *Biomolecules*. 2020. V. 10. N 3. P. 368. DOI: 10.3390/biom10030368
48. Васильева О.Б., Назарова М.А., Ильмаст Н.В., Немова Н.Н. Липиды тканей рыб из акваторий Онежского озера с разной степенью антропогенного загрязнения // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2018. N 6. С. 95–102. DOI: 10.17076/eb715
49. Furuya V.R.B., Michelato M., Salaro A.L., Cruz T.P.D., Urbich A.V., Ribeiro J.W.A., Batista D.C., Furuya W.M. Mathematical models to predict growth, fillet traits, and composition of wild traíra, *Hoplias malabaricus* // *Revista Brasileira de Zootecnia*. 2019. V. 48. Article ID: e20170176. DOI: 10.1590/rbz4820170176
50. Edea G.O., Montchowui E., Hinvi L.G., Abou Y., Gbangboche A.B., Laleye P.A. Proximate composition of

cultured (*Oreochromis niloticus*) and (*Clarias gariepinus*) based on commercial feed in Benin // International Journal of Agriculture, Environment and Bioresearch. 2018. V. 3. N 5. P. 176–183.

51. Silva T.S.D.C., Santos L.D.D., Silva L.C.R.D., Michelato M., Furuya V.R.B., Furuya W.M. Length-weight relationship and prediction equations of body composition for growing-finishing cage-farmed Nile tilapia // Revista Brasileira de Zootecnia. 2015. V. 44. P. 133–137. DOI: 10.1590/S1806-92902015000400001

52. Naeem M., Salam A., Zuberi A. Proximate composition of freshwater Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in relation to body size and condition factor from Pakistan // Pakistan Journal of Agricultural Sciences. 2016. V. 53. N 2. P. 468–472. DOI: 10.21162/PAKJAS/16.2653

REFERENCES

- Khanh Nguyen H.T., Nang Thu T.T., Lebailly P., Azadi H. Economic challenges of the export-oriented aquaculture sector in Vietnam. *Journal of Applied Aquaculture*, 2019, vol. 31, no. 4, pp. 367–383. DOI: 10.1080/10454438.2019.1576568
- Tri N.N., Tu N.P.C., Van Tu N. An overview of aquaculture development in Viet Nam. *Proceedings International Conference on Fisheries and Aquaculture*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 53–73. DOI: 10.17501/23861282.2021.7105
- Li X., Han T., Zheng S., Wu G. Nutrition and functions of amino acids in aquatic crustaceans. *Amino Acids in Nutrition and Health: Amino Acids in the Nutrition of Companion, Zoo and Farm Animals*. Cham, Springer Publ., 2021, pp. 169–198. DOI: 10.1007/978-3-030-54462-1_9
- Kwasek K., Thorne-Lyman A.L., Phillips M. Can human nutrition be improved through better fish feeding practices? a review paper. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, vol. 60, no. 22, pp. 3822–3835. DOI: 10.1080/10408398.2019.1708698
- Tacon A.G.J., Lemos D., Metian M. Fish for health: improved nutritional quality of cultured fish for human consumption. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 2020, vol. 28, no. 4, pp. 449–458. DOI: 10.1080/23308249.2020.1762163
- FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2018 – Meeting the sustainable development goals. Rome, 2018, 227 p.
- Bogachev A.I. The role of fisheries and aquaculture in food security: the world aspect. *Vestnik sel'skogo razvitiya i sotsial'noi politiki* [Bulletin of rural development and social policy]. 2017, no. 4(16), pp. 2–4. (In Russian)
- Flerova E.A. *Fiziologo-biokhimicheskie metody issledovaniya ryb* [Physiological and biochemical methods for the study of fish]. Yaroslavl, Yaroslavl State Agricultural Academy Publ., 2014, 40 p. (In Russian)
- Min D.B., Ellefson W.C. Fat analysis. Food analysis. Boston, Springer Publ., 2010, pp. 117–132. DOI: 10.1007/978-1-4419-1478-1_8
- Chang S.K.C. Protein analysis. Food analysis. Food analysis. Boston, Springer Publ., 2010, pp. 133–146. DOI: 10.1007/978-1-4419-1478-1_9
- Marshall M.R. Ash analysis. Food analysis. Boston, Springer Publ., 2010, pp. 105–115. DOI: 10.1007/978-1-4419-1478-1_7
- Hạnh H.M., Tâm B.M. Đặc điểm sinh học sinh sản của cá chình dẹt (*Channa gachua*) phân bố ở tỉnh Hậu Giang. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*. 2014, no. 1, pp. 188–195.

13. Ahmadi A. The length-weight relationship and condition factor of the threatened snakehead (*Channa striata*) from Sungai Batang river, Indonesia. *Polish Journal of Natural Sciences*. 2018, vol. 33, no. 4, pp. 607–623.

14. Munglue P., Rattana K., Sangchanjiradet S., Jankam A., Dasri, K. Growth performance and intestinal morphology of hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* × *Clarias gariepinus*) fed diet supplemented with rice paddy herb (*Limnophila aromatica*) extract. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*. 2019, vol. 24, no. 2, pp. 1–12.

15. Komba E.A., Munubi R.N., Chenyambuga S.W. Comparison of body length-weight relationship and condition factor for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured in two different climatic conditions in Tanzania. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*. 2020, no. 8(3), pp. 44–48.

16. Shija B.S. Length-weight relationship and Fulton's condition factor of the Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L., 1758) in Lake Chamo, Ethiopia. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences*. 2020, vol. 5, no. 2, pp. 44–54.

17. Hossain M.A., Bapary M.A.J., Rahman M.A. A multi-model analysis of growth and maturity biometrics in common Snakeheads, *Channa striata*, and *Channa punctatus* collected from Hakaluki Haor, Northeast Bangladesh. *Acta Aquatica Turcica*, 2021, vol. 17, no. 3, pp. 429–439. DOI: 10.22392/actaqua.878998

18. Asyhari A., Machrizal R. Length-weight relationship and condition factors of *Channa striata* in Tanjung Haloban village, Labuhanbatu. *Jurnal Biolokus: Jurnal Penelitian Pendidikan Biologi dan Biologi*, 2022, vol. 5, no. 2, pp. 107–113. DOI: 10.30821/biolokus.v5i2.1316

19. Badr El-Bokhty E.A.E., Fetouh M.A. Some biological aspects of *Oreochromis niloticus* and *Oreochromis aureus* caught by trammel nets from El-Salam Canal, Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 167–177. DOI: 10.21608/EJABF.2023.284416

20. Jewel M.A.S., Haque M.A., Ferdous M.S., Khatun M.S., Akter, S. Length-weight relationships and condition factors of *Cirrhinus reba* (Hamilton, 1822) in Padma River, Bangladesh. *Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 2019, vol. 14, no. 2, pp. 39–45. DOI: 10.3923/jfas.2019.39.45

21. Suwal T.L., Chi M.J., Tsai C.F., Chan F.T., Lin K.H., Pei K.J.C. Morphometric Relationships, Growth and Condition Factors of Critically Endangered Chinese Pangolin (*Manis pentadactyla*). *Animals*, 2022, vol. 12, no. 7, p. 910. DOI: 10.3390/ani12070910

22. Nurnadia A.A., Azrina A., Amin I. Proximate composition and energetic value of selected marine fish and shellfish from the West coast of Peninsular Malaysia. *International Food Research Journal*, 2011, vol. 18, no. 1, pp. 137–148.

23. Ahmed I., Jan K., Fatma S., Dawood M.A. Muscle proximate composition of various food fish species and their nutritional significance: A review. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2022, vol. 106, no. 3, pp. 690–719. DOI: 10.1111/jpn.13711

24. Singh S., Khan M.A. Dietary arginine requirement of fingerling hybrid *Clarias* (*Clarias gariepinus* × *Clarias macrocephalus*). *Aquaculture Research*, 2007, vol. 38, no. 1, pp. 17–25. DOI: 10.1111/j.1365-2109.2006.01618.x

25. Payuta A.A., Flerova E.A. Some indicators of metabolism in the muscles, liver, and gonads of pike-perch *Sander lucioperca* and sibel *Pelecus cultratus* from the Gorky Reservoir. *Journal of Ichthyology*, 2019, vol. 59, no. 2, pp. 255–262. DOI: 10.1134/S0032945219020152

26. Jantrarat W., Sitasit P., Rajchapakdee S. The optimum carbohydrate to lipid ratio in hybrid *Clarias catfish* (*Clarias macrocephalus* × *C. gariepinus*) diets containing raw broken rice. *Aquaculture*, 1994, vol. 127, no. 1, pp. 61–68. DOI: 10.1016/0044-8486(94)90192-9
27. Degani G., Revach A. Digestive capabilities of three commensal fish species: Carp, *Cyprinus carpio* L., tilapia, *Oreochromis aureus* × *O. niloticus*, and African catfish, *Clarias gariepinus* (Burchell 1822). *Aquaculture Research*, 1991, vol. 22, no. 4, pp. 397–403. DOI: 10.1111/j.1365-2109.1991.tb00753.x
28. Yi Y., Lin C.K., Diana J.S. Hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* × *C. gariepinus*) and Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) culture in an integrated pen-cum-pond system: growth performance and nutrient budgets. *Aquaculture*, 2003, vol. 217, no. 1–4, pp. 395–408. DOI: 10.1016/S0044-8486(02)00540-9
29. Gladyshev M.I. Essential polyunsaturated fatty acids and their dietary sources for man. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya* [Journal of SibFU. Biology]. 2012, vol. 4, no. 5, pp. 352–386. (In Russian)
30. Hussain M.Z., Naqvi A.A., Shahzadah W.A., Latif A., Hussain S., Iqbal R., Ali M. Effect of feeding habit, size and season on proximate composition of commercially important fishes from lentic water bodies of Indus river at ghazi ghat, Pakistan. *Pakistan Journal of Zoology*. 2016, vol. 48, no. 6, pp. 1877–1884.
31. Payuta A.A., Flerova E.A. Dynamics of indices of metabolism in muscle tissue, liver and gonads of *Abramis brama* in different periods of the annual cycle. *Biosystems Diversity*, 2020, vol. 28, no. 2, pp. 146–153. DOI: 10.15421/012020
32. Suprayitno E., Nursyam H., Mustafa A. Chemical composition and amino acid profile of Channidae collected from Central Kalimantan, Indonesia. *IEESE International Journal of Science and Technology*. 2013, vol. 2, no. 4, pp. 25–31.
33. Herawati T., Yustiati A., Nurhayati A., Mustikawati R. Proximate composition of several fish from Jatigede Reservoir in Sumedang district, West Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 137, no. 1, article id: 012055. DOI: 10.1088/1755-1315/137/1/012055
34. Chasanah E., Nurilmala M., Purnamasari A.R., Fithriani D. Chemical composition, albumin content and bioactivity of crude protein extract of native and cultured *Channa striata*. *JPB Kelautan dan Perikanan*. 2015, vol. 10, no. 2, pp. 123–132.
35. Fujita K., Saito M., Vongvichith B., Hasada K., Boutsavath P., Mahathilath X., Morioka S. Analysis of the nutritional composition of aquatic species toward nutritional improvement in a Lao PDR rural area. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, 2019, vol. 53, no. 3, pp. 191–199. DOI: 10.6090/jarq.53.191
36. Chakraborty S., Brahma B.K., Goyal A.K. Proximate composition of three small indigenous fish species encountered in the local fish market of Kokrajhar, BTAD, Assam. *Indian Journal of Applied Research*. 2015, vol. 5, no. 10, pp. 712–714.
37. Olopade O.A., Taiwo I.O., Lamidi A.A., Awonaik O.A. Proximate composition of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) (Linnaeus, 1758) and tilapia hybrid (red tilapia) from Oyan Lake, Nigeria. *Bulletin UASVM Food Science and Technology*, 2016, vol. 73, no. 1, pp. 19–23. DOI: 10.15835/buasvmcn-fst:11973
38. Desta D., Zello G.A., Alemayehu F., Estefanos T., Zatti K., Drew M. Proximate analysis of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*), fish fillet harvested from farmers pond and Lake Hawassa, Southern Ethiopia. *International Journal for research and development in technology*. 2019, vol. 11, no. 1, pp. 94–99.
39. Garduño-Lugo M., Granados-Alvarez I., Olvera-Novoa M.A., Muñoz-Córdova G. Comparison of growth, fillet yield and proximate composition between Stirling Nile tilapia (wild type) (*Oreochromis niloticus*, Linnaeus) and red hybrid tilapia (Florida red tilapia × Stirling red *O. niloticus*) males. *Aquaculture Research*. 2003, vol. 34, no. 12, pp. 1023–1028.
40. Chomnawang C., Nantachai K., Yongsawatdigul J., Thawornchinsombut S., Tungkawachara S. Chemical and biochemical changes of hybrid catfish fillet stored at 4° C and its gel properties. *Food Chemistry*, 2007, vol. 103, no. 2, pp. 420–427. DOI: 10.1016/j.foodchem.2006.07.039
41. Phetsang H., Panpipat W., Panya A., Phonsatta N., Cheong L.Z., Chaijan M. Chemical characteristics and volatile compounds profiles in different muscle part of the farmed hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* × *Clarias gariepinus*). *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, vol. 57, no. 1, pp. 310–322. DOI: 10.1111/ijfs.15419
42. Payuta A.A., Bogdanova A.A., Flerova E.A., Miroshnichenko D.A., Malin M.I., Andreeva M.I. Chemical composition of fish muscle of small rivers of the Yaroslavl Region. *Bulletin of Astrakhan State Technical University, Series Fishing Industry*, 2019, no. 1, pp. 112–121. (In Russian) DOI: 10.24143/2073-5529-2019-1-112-121
43. Payuta A.A., Flerova E.A. Impact of habitation conditions on metabolism in the muscles, liver, and gonads of different sex and age groups of bream. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 2021, vol. 12, no. 2, pp. 240–250. DOI: 10.15421/022133
44. Miroshnichenko D.A., Flerova E.A. The experience of growing rainbow trout in high-mountain conditions of South Vietnam: growth and chemical composition of skeletal muscle. *Trudy VNIRO [VNIRO Proceedings]*. 2018, vol. 170, pp. 116–123. (In Russian)
45. Ravichandran S., Kumaravel K., Florence E. P. Nutritive composition of some edible fin fishes. *International Journal of Zoological Research*, 2011, vol. 7, no. 3, pp. 241–251. DOI: 10.3923/ijzr.2011.241.251
46. Naeem M., Ishtiaq A. Proximate composition of *Mystus bleekeri* in relation to body size and condition factor from Nala Daik, Sialkot, Pakistan. *African Journal of Biotechnology*, 2011, vol. 10, no. 52, pp. 10765–10773. DOI: 10.5897/AJB10.2339
47. Murzina S.A., Pekkoeva S.N., Kondakova E.A., Nefedova Z.A., Filippova K.A., Nemova N.N., Orlov A.M., Berge J., Falk-Petersen S. Tiny but fatty: lipids and fatty acids in the daubed shanny (*Leptoclinius Maculatus*), a small fish in svalbard waters. *Biomolecules*, 2020, vol. 10, no. 3, p. 368. DOI: 10.3390/biom10030368
48. Vasil'eva O.B., Nazarova M.A., Il'mast N.V., Nemova N.N. Lipids of fish from Lake Onego areas with different levels of anthropogenic pollution. *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*, 2018, no. 6, pp. 95–102. (In Russian) DOI: 10.17076/eb715
49. Furuya V.R.B., Michelato M., Salario A.L., Cruz T.P.D., Urbich A.V., Ribeiro J.W.A., Batista D.C., Furuya W.M. Mathematical models to predict growth, fillet traits, and composition of wild traíra, *Hoplias malabaricus*. *Revista*

Brasileira de Zootecnia, 2019, vol. 48, article id: e20170176. DOI: 10.1590/rbz4820170176
50. Edea G.O., Montchowui E., Hinvi L.G., Abou Y., Gbangboche A.B., Laleye P.A. Proximate composition of cultured (*Oreochromis niloticus*) and (*Clarias gariepinus*) based on commercial feed in Benin. *International Journal of Agriculture, Environment and BioResearch*. 2018, vol. 3, no. 5, pp. 176–183.
51. Silva T.S.D.C., Santos L.D.D., Silva L.C.R.D., Michelato M., Furuya V.R.B., Furuya W.M. Length-weight relationship

and prediction equations of body composition for growing-finishing cage-farmed Nile tilapia. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 2015, vol. 44, pp. 133–137. DOI: 10.1590/S1806-92902015000400001
52. Naeem M., Salam A., Zuberi A. Proximate composition of freshwater Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in relation to body size and condition factor from Pakistan. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 2016, vol. 53, no. 2, pp. 468–472. DOI: 10.21162/PAKJAS/16.2653

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Александра А. Паюта, Екатерина А. Флёрова, Дарья А. Гульдина, Николай В. Лобус, Евгений Г. Евдокимов провели исследование. 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. Эксперименты проведены с соблюдением этических норм работы с животными, установленными Комиссией по биоэтике Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Aleksandra A. Payuta, Ekaterina A. Flerova, Daria A. Guldina, Nikolay V. Lobus and Evgeniy G. Evdokimov conducted the study. 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. The experiments were carried out in compliance with the ethical standards of work with animals established by the Commission on Bioethics of P.G. Demidov Yaroslavl State University.

ORCID

Александра А. Паюта / Aleksandra A. Payuta <https://orcid.org/0000-0002-0478-4709>
Дарья А. Гульдина / Daria A. Guldina <https://orcid.org/0009-0008-4565-7686>
Екатерина А. Флёрова / Ekaterina A. Flerova <https://orcid.org/0000-0002-9745-6746>
Николай В. Лобус / Nikolay V. Lobus <https://orcid.org/0000-0002-2517-4061>
Евгений Г. Евдокимов / Evgeniy G. Evdokimov <https://orcid.org/0000-0002-4265-1173>

Оригинальная статья / Original article

УДК 631.416

DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-9



Особенности минералогического состава техногенных почв угольных отвалов Кузбасса

Дарья Е. Колпакова¹, Ирина С. Милентьева², Людмила К. Асякина¹,
Наталья В. Фотина¹, Александр Ю. Просеков³

¹Лаборатория фиторемедиации техногенно нарушенных экосистем НИУ, Кемерово, Россия

²ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», Кемерово, Россия

³Лаборатория биокатализа КемГУ, Кемерово, Россия

Контактное лицо

Дарья Е. Колпакова, младший научный сотрудник, лаборатория фиторемедиации техногенно нарушенных экосистем, НИУ; 650056 Россия, г. Кемерово, бульвар Строителей, 47. Тел. +79235019720

Email kolpakova1205@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8508-3372>

Формат цитирования

Колпакова Д.Е., Милентьева И.С., Асякина Л.К., Фотина Н.В., Просеков А.Ю. Особенности минералогического состава техногенных почв угольных отвалов Кузбасса // Юг России: экология, развитие. 2024. Т.19, N 2. С. 92-103. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-9

Получена 11 августа 2022 г.

Прошла рецензирование 14 января 2023 г.

Принята 25 сентября 2023 г.

Резюме

Цель – исследование минералогического состава почв угольных отвалов, сформированных на разрезах Кемеровской области для дальнейшей ремедиации посттехногенных ландшафтов.

Исследованы образцы техногенно нарушенных почв Моховского, Корчаковского и Барзасского отвалов, расположенных на территории Кемеровской области. Результаты получены с помощью рентгеноструктурного анализа.

Получены результаты о химическом составе почв Моховского, Барзасского и Корчаковского угольных отвалов. В образцах Моховского отвала преобладает содержание пиррофосфата хрома ($\text{Cr}_2\text{O}_7\text{P}_2$), сульфида алюминия (Al_2S_3), силицида циркония (ZrSi), в составе образцов Корчаковского отвала отмечено наибольшее содержание диоксида кремния (SiO_2) и гидроксида марганца ($\text{Mn}(\text{OH})_2$), а образцы Барзасского отвала содержат значительное количество углерода (С), цирконата стронция (SrZrO_3) и карбоната кальция (CaCO_3).

На основе результатов сделаны выводы о строении и некоторых физико-химических показателях почвы.

Ключевые слова

Минералогический состав почв, тяжелые металлы, техногенные ландшафты, токсикологические показатели почв, ризобактерии.

Features of the mineralogical composition of technogenic soils of coal dumps in Kuzbass, Kemerovo Region, Russia

Daria E. Kolpakova¹, Irina S. Milentieva², Lyudmila K. Asyakina¹,
Natalya V. Fotina¹ and Alexander Yu. Prosekov²

¹Laboratory for Phytoremediation of Post-technogenic Landscapes, National Research University, Kemerovo, Russia

²Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Principal contact

Daria E. Kolpakova, junior researcher, Laboratory of Phytoremediation of Technogenically Disturbed Ecosystems, National Research University; 47 Stroiteley Blvd, Kemerovo, Russia 650056.

Tel. +79235019720

Email kolpakova1205@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8508-3372>

How to cite this article

Kolpakova D.E., Milentieva I.S., Asyakina L.K., Fotina N.V., Prosekov A.Yu. Features of the mineralogical composition of technogenic soils of coal dumps in Kuzbass, Kemerovo Region, Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2024; 19(2):92-103. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-9

Received 11 August 2022

Revised 14 January 2023

Accepted 25 September 2023

Abstract

Study of the mineralogical composition of soils in coal dumps formed in sectors of the Kemerovo region for further remediation of post-technogenic landscapes.

Samples of technogenically disturbed soils of the Mokhov, Korchakol and Barzas dumps located on the territory of the Kemerovo region were studied. The results were obtained using X-ray diffraction analysis.

The chemical composition of the soils of the Mokhovskiy, Barzasskiy and Korchakolskiy coal dumps have been determined. Chromium pyrophosphate ($\text{Cr}_2\text{O}_7\text{P}_2$), aluminium sulphide (Al_2S_3) and zirconium silicide (ZrSi) prevail in the samples of the Mokhov dump, while the Barzas dump contains a significant amount of carbon (C), strontium zirconate (SrZrO_3) and calcium carbonate (CaCO_3).

Based on these results, conclusions were drawn about the structure and some physical and chemical parameters of the soil.

Key Words

Mineralogical composition of soils, heavy metals, technogenic landscapes, toxicological indicators of soils, rhizobacteria.

ВВЕДЕНИЕ

Уникальные экосистемы, образованные в условиях рельефа Кузнецкой котловины, составляют природный фонд Кузбасса. Горнодобывающие компании, функционирующие на территории Кемеровской области, непрерывно увеличивают темпы производства, при этом вызывая антропогенные загрязнения, что иногда приводит к полному уничтожению экосистем [1]. Угледобывающая промышленность является одной из ведущих отраслей региона, но также она способствует ухудшению экологической обстановки [2–4]. Увеличение объема производства угля ведет к расширению техногенных ландшафтов, в которых естественные биоценозы находятся на грани уничтожения [5]. Актуальность приобретают вопросы химического, минералогического, токсикологического состава антропогенно-нарушенных почв, расположенных в местах угольных отвалов [6–9].

Сегодня в Кемеровской области функционирует около 80 предприятий, специализирующихся на добыче «черного золота». На их территории расположено около 100 тыс. га земель, представленных отвалам или карьерами [10]. Такие земли оказывают непосредственное влияние на формирование экологической ситуации Кузбасса [11–14]. Они изменяют природный водный режим, влияя на подземные воды, воздушную составляющую, посредством окисления и испарения отходов производства, а также на биологические элементы (снижение содержания гумуса, изменение pH, накопление тяжелых металлов). Также к опасным факторам относятся способность к самовоспламенению и пожароопасность. Наиболее негативные последствия на окружающую среду оказывает добыча угля открытым способом, так как вследствие этого происходит полное уничтожение почвенной структуры. При взаимодействии с водой, воздухом и микробном окислении вредные металлы и сульфиды угольной пустой породы вызывают серьезные загрязнения [15; 16]. Вещества, содержащие в своем составе серу, в том числе сульфиды, способны оседать в виде нерастворимых соединений в почве. Негативное воздействие серосодержащих веществ, как правило, косвенное и незначительное. Они снижают pH почвы и способствуют ее засолению [17].

Химический состав почв является одним из наиболее важных и значимых показателей состояния и свойств ландшафтов. Основными показателями, описывающие состав, содержание и распределение элементов в посттехногенных почвах являются: минералогический, гранулометрический составы, физико-химические и химические свойства, накопленные органические вещества.

Породы отвалов и карьеров являются основой для формирования новых почвенных слоев. Поэтому изучение минерального и химического элементного состава почв является важным для исследования экологического уровня качества жизни населения, проживающего в непосредственной близости с угольными предприятиями [18; 19].

Уголь является многокомпонентной породой органического происхождения. Его состав зависит от месторождения и включает: простые химические элементы, сложные органические соединения (в том числе ПАУ), минеральные примеси [20]. Почвенный покров является сложной неоднородной структурой и

провести зависимости между минералогическим и химическим составами практически невозможно. При проведении исследований необходимо каждый из показателей литосферы рассматривать как отдельную составляющую [21].

Для исследований химического и минералогического состава почв применяется множество методов. Основными являются: рентгеноструктурный анализ, инфракрасная спектроскопия, методы термического анализа и электронная микроскопия.

Метод инфракрасной спектроскопии является одним из наиболее быстрых способов изучения химических показателей почвы и содержания питательных веществ. Она обладает высокой скоростью обнаружения веществ, также обладает способностью улавливать органические связи, которые входят в состав органического вещества почвы. Но у этого метода существуют недостатки. При относительно низком содержании органического вещества в почвах (обычно < 5% по массе) и перекрытии абсорбции минеральных и органических функциональных групп в среднем инфракрасном (MIR) диапазоне (4000–400 см⁻¹) образуются существенные помехи из-за поглощения доминирующих минералов, затрудняя или даже препятствуя интерпретации спектров для характеристики состава почв [22; 23].

К методам термического анализа относятся: термогравиметрия, дифференциальная термогравиметрия и дифференциальный термический анализ. С их помощью происходит получение информации о качественной и количественной оценке разложения (окисления) компонентов почвы в процессе ее нагрева. Также этот метод позволяет провести исследование термоустойчивости и термохимических превращений гуминовых кислот различного происхождения, которые определяются их химическим составом и молекулярной структурой. Он является быстрым, точным и весьма информативным при исследовании таких сложных объектов, как гуминовые кислоты [24; 25].

В настоящее время существует два вида электронной микроскопии – это сканирующая и просвечивающая. Для изучения химического и минералогического состава почв наиболее часто используется сканирующий микроскоп, который сопряжен с рентгеновским микроанализатором. Просвечивающий микроскоп также используется для изучения состава почв. С помощью него возможно получить электронографию частицы, что важно для определения ее минералогической принадлежности. В свою очередь данный микроскопом сопряжен со спектрометром энергетических потерь электроном. Благодаря этому расширяются возможности микроскопа и приобретает возможность получения карты распределения химических элементов в микромасштабе.

Атомно-силовой микроскоп более совершенный, так как позволяет анализировать любую поверхность. В нем изображение формируется за счет отражения лазерного луча миниатюрной пластинкой, которая заканчивается сканирующим зондом молекулярных размеров из алмаза или нитрида кремния. Атомно-силовой микроскоп, как и электронный, имеет очень высокую разрешающую способность, не ограниченную длиной световой волны. Благодаря

этому виду микроскопа становится возможным анализ влажных и живых микрообъектов. Поскольку сканирование участка занимает несколько секунд, можно проследить развитие химического и биологического процессов на поверхности твердого тела [26].

Рентгеноструктурный анализ представляет собой инструментальный аналитический метод, используемый для идентификации кристаллических материалов уже почти столетие. Этот метод первоначально использовался для изучения природы кристаллических решеток путем дифракции рентгеновских лучей через близко расположенную решетку атомов. Также этот метод использовался для идентификации кристаллических «отпечатков пальцев» путем сравнения расстояния между соседними плоскостями атомов неизвестных образцов со стандартными эталонными образцами и измерениями. Археологи использовали этот метод для идентификации глинистых минералов в древней керамике. Сейчас же рентгеноструктурный анализ является широко используемым методом с многочисленными научными исследованиями для промышленного применения. Он обладает рядом преимуществ перед другими методами изучения химического состава почв, например, простота проведения исследований, несложная пробоподготовка образцов, широкий динамический диапазон количественного анализа, относительно низкие пределы обнаружения веществ, высокие скорость и точность, а также относительно низкая стоимость анализа [27; 28].

Целью работы являлось исследование минералогического состава почв угольных отвалов, сформированных на разрезах Кемеровской области для дальнейшей ремедиации посттехногенных ландшафтов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор проб

Техногенное загрязнение окружающей среды при добыче угля вызвано высокой концентрацией химических элементов, которые попадают в верхние слои почвы с извлекаемыми из недр породами. Сам уголь также обладает богатым химическим составом, в нем содержится свыше 30 химических элементов. Его состав зависит от типоморфной ассоциации, геологических и геохимических факторов угленосных бассейнов.

Объектами исследования являлись почвы отвалов угольных разрезов Кемеровской области. Отбор проб проводили в следующих районах: «Моховский угольный разрез» (Беловский муниципальный округ, с. Мохово), «Разрез «Корчаковский» (Калтанский городской округ, п. Малиновка) и обогатительная фабрика «Барзасское товарищество» (г. Березовский). Разрезы разрабатываются открытым способом. Отвалообразование осуществляется неселективным, по породам, способом. Отвалы представляют собой бугристую плакорную возвышенность высотой 11–15 м, отбор образцов произведен на уплощенной вершине отвала. На рисунке 1 представлен отвал Корчаковского угольного разреза, а на рисунке 2 Барзасский отвал.



Рисунок 1. Отвал Корчаковского угольного разреза

Figure 1. Dump of Korchakol coal mine



Рисунок 2. Отвал Барзасского угольного разреза
Figure 2. Dump of Barzas coal mine

В табл. 1 представлены координаты районов исследования, а также приведено сокращенное наименование образцов и место их отбора. Первая буква в шифре обозначает разрез, римские цифры – зону отбора. На

каждом разрезе исследовали пять зон, при этом количество параллельных проб составляло не менее 4.

На рисунке 3 изображено фото со спутника Моховского угольного отвала.

Таблица 1. Характеристика объектов исследования

Table 1. Characteristics of the objects of study

Наименование Name	Место отбора проб Sampling site
M-I M-II M-III M-IV M-V	Почва внешнего отвала участка «Первоочередной – Беловский» филиала АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Моховский угольный разрез», расположенного на юго-востоке Западной Сибири Кемеровской области – Кузбасса (54°35'31.3"N северной широты, 86°24'53.4"E восточной долготы), недалеко от с. Заринское. Soil of the external dump of the Pervocheroednoy – Belovsky site of the branch of the UK Kuzbassrazrezugol JSC of Mokhovskoy coal mine, located in the southeast of Western Siberia, Kemerovo region – Kuzbass (54°35'31.3"N northern latitude, 86°24'53.4"E east longitude), not far from the village of Zarinskoye.
B-I B-II B-III B-IV B-V	Почва отвала пород, расположенного на юго-востоке Западной Сибири Кемеровской области – Кузбасса (55°37'32.7"N северной широты, 86°10'06.7"E восточной долготы), недалеко от обогатительной фабрики ООО «СП «Барзасское товарищество» (с поверхности отвала и на территории железнодорожной защитной лесополосы, находящейся у границ угольного отвала). Soil of a rock dump located in the southeast of Western Siberia, Kemerovo region – Kuzbass (55°37'32.7"N north latitude, 86°10'06.7"E east longitude), not far from the processing plant of JV Barzasskoye Partnership LLC (from the surface of the dump and on the railway protective forest belt located near the coal dump boundaries).
K-I K-II K-III K-IV K-V	Почва внешнепородного отвала Корчаковский, расположенного на юго-востоке Западной Сибири Кемеровской области – Кузбасса (53°25'12.9"N северной широты, 87°15'19.8"E восточной долготы), недалеко от п. Малиновка Калтанского городского округа. Soil of the Korchakolsky outer rock dump located in the southeast of Western Siberia, Kemerovo region – Kuzbass (53°25'12.9"N north latitude, 87°15'19.8"E east longitude), near the village of Malinovka, Kaltan urban district.

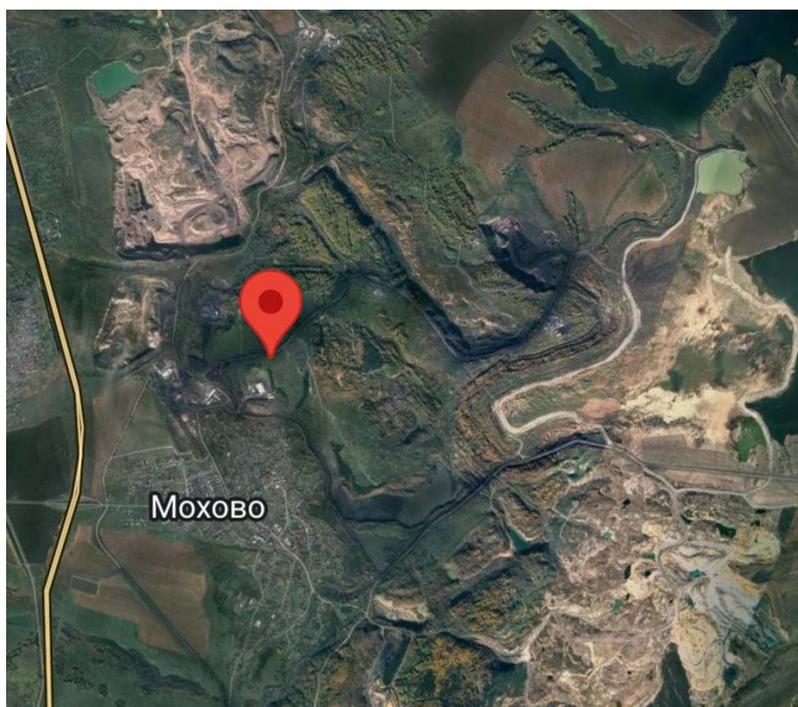


Рисунок 3. Фото со спутника Моховского угольного отвала
Figure 3. Satellite photo of Mokhovskiy coal dump

Отбор образцов почв техногенно нарушенных территорий Кемеровской области осуществляли в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02–2017 «Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа». Сбор образцов почв производили осенью 2021 года.

Для определения минералогического состава использовали рентгеноструктурный анализ. Исследуемые образцы почв Барзасского, Корчаковского и Моховского отвалов изучены на многофункциональном рентгеновском дифрактометре ДРОН–8Н («ИЦ «Буревестник», Россия) в параллельных лучах, фокусируемых зеркалом Гебеля, с системой быстрой регистрации на основе стрипового позиционно-чувствительного кремниевое детектора Mythen 2R 1D («DECTRIS», Швейцария) и трубкой с медным анодом (Cu K α , $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$). Диапазон регистрации по 2θ 2–100°, эффективный шаг сканирования 0,0144°. Образцы почв готовили методом прессования в чистых и обезжиренных плоских кварцевых кюветках, всю поверхность образцов тщательно выравнивали. Далее кювету устанавливали в дифрактометр, закрепляли и осуществляли сканирование образца направленным рентгеновским пучком дифрактометра [27].

Определение ионов кальция и магния проводили в соответствии с ГОСТ 26428-85 «Почвы. Методы определения кальция и магния в водной вытяжке».

Определение содержания подвижного алюминия осуществляли по ГОСТ 26485-85 «Почвы. Определение обменного (подвижного) алюминия по методу ЦИНАО».

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рентгеноструктурный анализ позволил идентифицировать и определить полукристовое содержание минералов тонкодисперсной фракции почв. В результате проведенного анализа химического состава

(таблица 2) установлено, что в образцах почв ООО СП «Барзасское товарищество» содержится ряд химических соединений: углерод (C), цирконат стронция (SrZrO₃), карбонат кальция (CaCO₃), нитрид дикальцийзолота (AuCa₂N), селенат кобальта (CoSeO₄), дисурьмадимарганцевропий (EuMn₂Sb₂), нитрид молибдена (MoN). Химический элемент углерод (C) во всех зонах забора проб почв ООО СП «Барзасское товарищество» находился в максимальном количестве в сравнении с другими веществами.

Высокое содержание углерода возможно из-за преобладания угольной породы в образцах почвы. Углерод в такой форме недоступен для использования растениями. Кроме того, повышенная концентрация углерода может значительно повысить риск самовозгорания в летний период.

Содержание карбоната кальция в концентрации 30,50 мг/г может свидетельствовать о том, что образцы почвы Барзасского отвала имеют pH > 7, так как это вещество способствует нейтрализации избыточной кислотности.

На рисунке 4 представлена дифрактограмма химических соединений в почве Барзасского отвала.

Исходя из результатов исследования химического состава образцов почв отвала ООО «Корчаковский», представленных в таблице 3, сделали вывод о том, что в образцах почв данного отвала содержался ряд химических соединений: диоксид кремния (SiO₂), гидроксид марганца (Mn(OH)₂), оксид кобальта (CoO), фосфид бортрицеция (BCs₃P₂), ниобат лантана (LaNbO₄), гидроксилбастнезит-(Ce) ((Ce,La)CO₃(OH,F)), тригаллий-железо (FeGa₃), фосфат-гидроксид барий-железо(II) (BaFe₂Fe₂(PO₄)₃(OH)₃), теллурид уранила ((VO₂) (TeO₃)), трилитийкадмий (CdLi₃), фторид пентастронцийдиалюминия (Al₂F₁₆SrF₅), оксид меди (Cu₂O). В образцах почв отвала ООО «Корчаковский» диоксид кремния (SiO₂) содержался в максимальном количестве.



Рисунок 4. Дифрактограмма образцов почв Барзасского отвала
Figure 4. Diffraction pattern of soil samples of Barzas dump]

Таблица 2. Химический состав образцов почв Барзасского отвала
Table 2. Chemical composition of soil samples of the Barzas dump

Химическое соединение Chemical compound	Процентное содержание веществ, % / Percentage of substances, %				
	Зона отбора / Selection zone				
	B-I/B-I	B-II/B-II	B-III/B-III	B-IV/B-IV	B-V/B-V
C	86,56±2,51	88,02±1,51	87,52±2,74	92,27±2,64	91,21±2,33
SrZrO ₃	3,05±0,03	3,17±0,05	3,14±0,09	2,15±0,05	2,64±0,04
CaCO ₃	3,54±0,02	3,54±0,02	3,21±0,05	2,11±0,09	2,37±0,03
AuCa ₂ N	3,19±0,07	3,59±0,06	3,41±0,03	3,02±0,04	2,14±0,04
CoSeO ₄	2,08±0,05	1,26±0,01	2,03±0,08	2,02±0,06	2,13±0,02
EuMn ₂ Sb ₂	0,25±0,02	0,29±0,05	1,09±0,05	0,57±0,01	1,01±0,05
MoN	0,57±0,01	0,35±0,04	0,17±0,01	0,17±0,02	0,54±0,04

Концентрация кремнезема в образце почв Корчакольского угольного отвала составляет 837,1 мг/г почвы. Такое высокое содержание может свидетельствовать о произрастании сосен в непосредственной близости отбора проб, ведь они являются его аккумуляторами. Высокое значение показателя свиде-

тельствует о высоком плодородии и богатом микробиологическом составе почв.

Также образцы почвы содержат большое количество труднорастворимого гидроксида марганца, что может способствовать выщелачиванию почвы.

На рисунке 5 представлена дифрактограмма химических соединений в почве Корчакольского отвала.

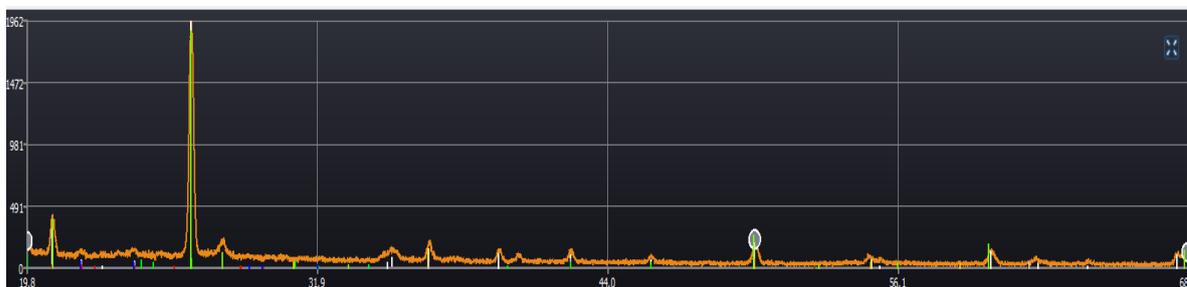


Рисунок 5. Дифрактограмма образцов почв Корчакольского отвала
Figure 5. Diffraction pattern of soil samples of Korchakol dump

Таблица 3. Химический состав образцов почв Корчакольского отвала
Table 3. Chemical composition of soil samples of Korchakol dump

Химическое соединение Chemical compound	Процентное содержание веществ, % / Percentage of substances, %				
	Зона отбора / Selection zone				
	K-I/K-I	K-II/K-II	K-III/K-III	K-IV/K-IV	K-V/K-V
SiO ₂	83,71±2,65	81,88±3,26	83,56±3,24	83,92±1,87	83,18±1,49
Na _{0,5} S ₂ Ti	7,60±0,52	7,48±0,54	7,38±0,73	7,97±0,65	7,40±0,81
Mn(OH) ₂	5,65±1,56	5,93±1,54	5,70±1,53	5,56±1,52	5,68±1,58
CoO	2,37±0,61	2,20±0,55	2,03±0,84	2,79±0,64	2,43±0,79
BCs ₃ P ₂	2,98±0,06	1,81±0,04	1,82±0,08	2,93±0,05	2,51±0,08
LaNbO ₄	2,46±0,07	2,57±0,05	1,76±0,06	2,36±0,02	2,76±0,03
(Ce,La)CO ₃ (OH,F)	1,57±0,08	2,11±0,03	2,11±0,03	1,83±0,07	1,54±0,05
FeGa ₃	0,99±0,04	1,72±0,03	1,09±0,09	1,08±0,03	1,33±0,07
BaFe ₂ Fe ₂ (PO ₄) ₃ (OH) ₃	0,56±0,03	2,34±0,06	1,06±0,02	0,91±0,03	1,45±0,05
(YO ₂)(TeO ₃)	0,32±0,03	0,52±0,04	0,35±0,02	0,35±0,02	0,33±0,08
CdLi ₃	0,14±0,01	0,15±0,05	0,19±0,08	0,17±0,09	0,15±0,09
Al ₂ F ₁₆ Sr ₅	0,14±0,03	0,20±0,02	0,10±0,02	0,17±0,08	0,17±0,09
Cu ₂ O	0,03±0,01	0,07±0,05	0,12±0,09	0,08±0,05	0,11±0,09

В соответствии с данными, приведёнными в таблице 4, в состав образцов почв АО «Моховский угольный разрез» входили пирофосфат хрома ($\text{Cr}_2\text{O}_7\text{P}_2$), сульфид алюминия (Al_2S_3), силицид циркония (ZrSi), карбид дибордиспрозия (DyB_2C_2), карбонат кальция (CaCO_3), ниобат лантанта (LaNbO_4), тетраникельцериймарганец (CeMnNi_4), тригаллийжелезо (FeGa_3), сульфид титаннатрия ($\text{Na}_{0,5}\text{S}_2\text{Ti}$), гептадекамагнийдицерий ($\text{Mg}_{17}\text{Ce}_2$), аурид кальция (CaAu_5), арсенид церийтрипалладия (CePd_3As_2). По результатам исследования во всех образцах почв обнаружен пирофосфат хрома ($\text{Cr}_2\text{O}_7\text{P}_2$) в максимальном количестве.

Цирконий является металлом малоподвижным, он плохо подвергается окислению и растворению. Высокое содержание силицида циркония (0,1128 мг/г почвы) свидетельствует о его накоплении в почве в течение долго времени.

В образцах Моховского угольного отвала содержится большое количество сульфила алюминия. Можно предположить, что почва имеет низкий окислительно-восстановительный потенциал, следовательно, подвижность и доступность элементов, необходимых растениям, таких как азот, сера и др. снижена.

На рисунке 6 представлена дифрактограмма химических соединений в почве Моховского отвала.

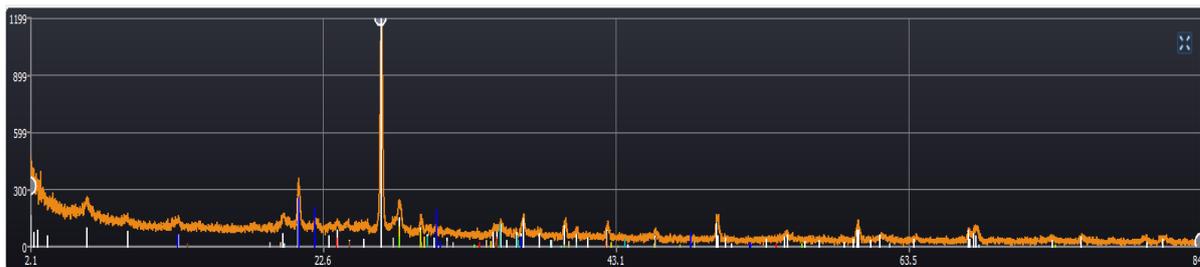


Рисунок 6. Дифрактограмма образцов почв Моховского отвала

Figure 6. Diffraction pattern of soil samples of Mokhov dump

Таблица 4. Химический состав образцов почв Моховского отвала

Table 4. Chemical composition of soil samples of Mokhov dump

Химическое соединение Chemical compound	Процентное содержание веществ, % / Percentage of substances, %				
	Зона отбора / Selection zone				
	M-I/M-I	M-II/M-II	M-III/M-III	M-IV/M-IV	M-V/M-V
$\text{Cr}_2\text{O}_7\text{P}_2$	32,01±1,24	35,09±1,36	30,64±1,39	31,36±1,63	29,03±1,69
Al_2S_3	13,37±0,64	12,91±0,82	13,40±0,72	13,12±0,15	14,40±0,57
ZrSi	11,28±0,62	11,65±0,54	12,23±0,81	12,24±0,66	11,57±0,15
CeMnNi_4	10,04±0,23	10,11±0,26	10,52±0,34	10,62±0,26	10,21±0,11
FeGa_3	9,06±0,45	9,08±0,21	9,06±0,56	8,76±0,51	8,88±0,48
$\text{Mg}_{17}\text{Ce}_2$	5,78±0,01	5,60±0,06	5,54±0,03	5,16±0,02	6,39±0,08
DyB_2C_2	3,79±0,05	3,79±0,07	3,70±0,06	3,96±0,05	3,80±0,01
CaCO_3	3,09±0,04	3,13±0,08	3,72±0,04	3,66±0,03	3,53±0,04
LaNbO_4	2,29±0,03	2,59±0,08	1,86±0,04	2,99±0,02	2,31±0,03
CaAu_5	1,01±0,06	1,16±0,03	1,36±0,01	0,95±0,09	1,46±0,06
CePd_3As_2	0,67±0,01	0,53±0,08	0,59±0,02	0,61±0,04	0,51±0,04

Таким образом, на основе рентгенодифракционного анализа установлен химический состав почв отвалов ООО СП «Барзасское товарищество», ООО «Корчаковский» и АО «Моховский угольный разрез». Установлено, что исследуемые образцы имели в своем составе минералы, интерметаллиды и неорганические соли.

Исследуя содержания катионов кальция и магния в почве, определили, что наиболее богаты ими образцы, отобранные с поверхностного слоя отвала АО «Моховский угольный разрез» (среднее значение ионов кальция составило 0,0150 мг-экв. на 100 г почвы; среднее значение ионов магния составило 0,0109 мг-экв. на 100 г почвы). Наибольшее содержание обменного алюминия наблюдалось в почвах, отобранных с поверхностного слоя отвала ООО СП «Барзасское товарищество» (среднее значение составило 0,0615 ммоль на 100 г почвы), в остальных образцах были обнаружены лишь следовые значения. Не обнаружены данные катионы в образцах почвы,

отобранных с поверхностного слоя отвалов ООО «Корчаковский».

Результаты определения содержания катионов кальция, магния и обменного алюминия в почве представлены в таблице 5.

Образцы почв Моховского угольного отвала характеризуются наиболее высоким содержанием растворимых в воде органических и минеральных соединений. Минимальное количество химических соединений характерно для почв Барзасского угольного отвала. Образцы почв Барзасского отвала характеризуются высокими концентрациями хлорид- и сульфат-ионов. Карбонат-ионы не были обнаружены в образцах исследуемых территорий. Для Моховского угольного отвала характерно высокое содержание катионов кальция и магния. В образцах Корчаковского отвала катионы магния и кальция не обнаружены, а обменный алюминий обнаружен в минимальных количествах (менее 0,05 ммоль на 100 г почвы). Моховский и Барзасский угольные отвалы содержат минимальное количество обменного Ca^{2+} и Mg^{2+} . Это

связано с отсутствием растительности, так как корни растений могут повышать уровень обменного Ca^{2+} за счет образования больших количеств CO_2 и H^+ в ризосфере и увеличения скорости растворения кальцита (CaCO_3). Отсутствие обменного Ca^{2+} и Mg^{2+} Корчакольского отвала может быть связано с тем, что

Na замещает Ca и Mg из катионообменных центров, а затем вызывает потери способных к обмену Ca^{2+} и Mg^{2+} . Таким образом, катионный обмен является важным показателем при оценке качества почвы.

В таблице 6 представлено содержание микроорганизмов в образцах почвы угольных отвалов.

Таблица 5. Содержание катионов кальция, магния и обменного алюминия в почве

Table 5. The content of calcium, magnesium and exchangeable aluminum cations in the soil

Зона отбора Selection zone	Содержание Ca^{2+} мг-экв. на 100 г почвы The content of Ca^{2+} mg-eq. per 100 g of soil	Содержание Mg^{2+} , мг-экв. на 100 г почвы Content of Mg^{2+} , mg-eq. per 100 g of soil	Обменный (подвижный) Al, ммоль на 100 г почвы Exchangeable (mobile) Al, mmol per 100 g of soil
M-I/M-I	<0,02	<0,02	0,04
M-II/M-II	<0,02	<0,02	0,02
M-III/M-III	<0,02	<0,02	0,03
M-IV/M-IV	<0,02	<0,02	0,02
M-V/M-V	<0,02	<0,02	0,02
B-I/B-I	<0,01	<0,01	0,06
B-II/B-II	<0,01	<0,01	0,07
B-III/B-III	<0,01	<0,01	0,07
B-IV/B-IV	<0,01	<0,01	0,02
B-V/B-V	<0,01	<0,01	0,03
K-I/K-I	н/о	н/о	<0,05
K-II/K-II	н/о	н/о	<0,05
K-III/K-III	н/о	н/о	<0,05
K-IV/K-IV	н/о	н/о	<0,05
K-V/K-V	н/о	н/о	<0,05

Таблица 6. Содержание микроорганизмов в почвах угольных отвалов

Table 6. The content of microorganisms in the soils of coal dumps

Количество выделенных штаммов / Number of isolated strains				
Моховский отвал / Mokhovsky dump				
M-I/M-I	M-II/M-II	M-III/M-III	M-IV/M-IV	M-V/M-V
8	10	8	8	7
Барзасский отвал / Barzas dump				
B-I/B-I	B-II/B-II	B-III/B-III	B-IV/B-IV	B-V/B-V
0	0	0	6	6
Корчакольский отвал / Korchakol dump				
K-I/K-I	K-II/K-II	K-III/K-III	K-IV/K-IV	K-V/K-V
0	0	2	0	4

Проанализировав результаты таблицы 6, сделали вывод о том, что наиболее развитая микробиота наблюдается у Моховского отвала. Это говорит о том, что отвал находится несколько лет и начал естественную рекультивацию почвы. Об этом также свидетельствует накопление соединений циркония. Угольные отвалы Барзасского и Корчакольского разрезов были образованы после Моховского. Микроорганизмы в образцах Корчакольского отвала обнаружены в местах произрастания сосен, которые, в свою очередь, являются аккумуляторами кремнезема. Отсутствие микробиоты в большинстве образцов Барзасского отвала, позволяет сделать вывод, о высокой остаточной концентрации флотационных реагентов и низкой степени их разложения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была проанализирована почва с Моховского, Барзасского и Корчакольского отвалов. Химический состав образцов зависит от времени существования отвала. Высокая точность определения содержания веществ была достигнута благодаря

использованию такого метода, как рентгеноструктурный анализ. Также изучена микробиота почв угольных отвалов. Наиболее развитая наблюдается у Моховского отвала. Исследованные почвы, содержащие большое количество химических (минеральных) соединений можно охарактеризовать как неблагоприятные для рекультивации почвы. Эта проблема может быть решена методом биоремедиации с использованием биопрепаратов на основе микроорганизмов. Дальнейшие исследования будут направлены на создание консорциумов микроорганизмов, выделенных из угольных отвалов, для очистки земель.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа ведется в рамках Распоряжения Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. №1144-р, комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения

промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения) («Чистый уголь – зеленый Кузбасс»), мероприятие 3.1 «Экополигон мирового уровня технологий рекультивации и ремедиации». При поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2022-1200 от 28.09.2022 г.)

ACKNOWLEDGMENT

The work is carried out within the framework of the Decree of the Government of the Russian Federation dated 11.05.2022 No. 1144-r, a comprehensive scientific and technical program of the complete innovation cycle "Development and implementation of a complex of technologies in the areas of exploration and extraction of solid minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new products of deep processing from coal raw materials with a consistent reduction of the environmental impact and risks to the population" ("Clean Coal - Green Kuzbass"), event 3.1 "Eco-park of world-class technologies of reclamation and remediation". With the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement No. 075-15-2022-1200 dated 28.09.2022).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Atuchin V.V., Asyakina L.K., Serazetdinova Y.R., Frolova A.S., Velichkovich N.S., Prosekov A.Yu. Microorganisms for Bioremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals // *Microorganisms*. 2023. N 11. P. 864. DOI: 10.3390/microorganisms11040864
- Banerjee L., Chawla S., Kumar Dash S. Performance Evaluation of Coal Mine Overburden as a Potential Subballast Material in Railways with Additional Improvement Using Geocell // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020. N 32(8). Article ID: 04020200. DOI:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003269
- Фролова А.С., Переверзева М.К., Асякина Л.К., Голубцова Ю.В., Осинцева М.А. Ферментативная активность техногенных поверхностных образований Кузбасса // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2022. N 4. С. 538–547. DOI: 10.30766/2072-9081.2022.23.4.538-547
- Welch C., Lee Barbour S., Jim Hendry M. The geochemistry and hydrology of coal waste rock dumps: A systematic global review // *Science of The Total Environment*. 2021. N 795. Article ID: 148798. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.148798
- Серазетдинова Ю.Р., Дышлок Л.С., Фотина Н.В., Осинцева М.А., Голубцова Ю.В. Агрехимические и микробиологические свойства породного отвала Барзасской обогатительной фабрики // *Вестник Камчатского государственного технического университета*. 2022. N 61. С. 93–104.
- Легощина О.М., Уфимцев В.И. Особенности микобиоты искусственных насаждений *Pinus sylvestris* L. на отвалах Кедровского угольного разреза (Кемеровская область) // *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. 2020. N 12. С. 27–34.
- Abramowicz A., Rahmonov O., Chybiors R. Environmental Management and Landscape Transformation on Self-Heating Coal-Waste Dumps in the Upper Silesian Coal Basin // *Land*. 2020. N 10(1). P. 23. DOI: 10.3390/land10010023
- Lei K., Pan H., Lin C. A landscape approach towards ecological restoration and sustainable development of mining areas // *Ecol. Eng.* 2016. N 90. P. 320–325. DOI:10.1016/j.ecoleng.2016.01.080
- Mi J., Yang Y., Zhang S., An S., Hou H., Hua Y., Chen F. Tracking the Land Use/Land Cover Change in an Area with Underground Mining and Reforestation via Continuous Landsat Classification // *Remote Sens.* 2019. N 11. Article ID: 1719. DOI:10.3390/rs11141719
- Фотина Н.В., Емельяненко В.П., Воробьева Е.Е., Бурова Н.В., Остапова Е.В. Современные биологические методы восстановления и очистки нарушенных угледобычей земель в условиях Кемеровской области – Кузбасса // *Техника и технология пищевых производств*. 2021. N 51(4). С. 869–882.
- Яковченко М.А., Ермолаев В.А., Косолапова А.А., Аланкина Д.Н. Исследование почвенно-агрехимических характеристик угледобывающий предприятий Кемеровской области // *Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития*. 2016. N 1. С. 40–43.
- Marcisz M., Gawor L., Probiez K. Valorization of coal mining waste dumps from the mines of Jastrzębska Spółka Węglowa SA for the needs of recovery of coal and further reclamation and management // *Gospodarka surowcami mineralnymi – mineral resources management*. 2018. N 34(4). P. 97–114. DOI:10.24425/122592
- Cheskidov V.I., Bobyl'sky A.S. Technology and Ecology of Dumping at Open Pit Mines in Kuzbass // *Journal of Mining Science*. 2017. N 53(5). P. 882–889. DOI:10.1134/S106273911705291X
- Bragina P.S., Tsibart A.S., Zavadskaya M.P., Sharapova A.V. Soils on overburden dumps in the forest-steppe and mountain taiga zones of the Kuzbass // *Eurasian Soil Science*. 2014. N 47(7). P. 723–733. DOI:10.1134/s1064229314050032
- Костенков Н.М., Комачкова И.В., Пуртова Л.Н. Почвы техногенных ландшафтов приморья (Лучегорский и Павловский угольные разрезы) // *Почвоведение*. 2013. N 11. Article ID: 1238.
- He H., Hong F.F., Tao X.X., Huang G.H., Leng Y.W., Shao J.F., Zhao Y.D. A study on soil basic characteristics, main microbial flora and typical metal fraction surrounding coal gangue dump in Xiangtan Hunan Province, south of China // *Environmental Earth Sciences*. 2016. N 75(6). P. 488. DOI:10.1007/s12665-016-5340-z
- Пироговская Г.В., Хмелевский С.С. Содержание натрия, хлоридов и сульфатов в почвах г. Минска // *Почвоведение и агрохимия*. 2010. N 1(44). С. 243–254.
- Воробьева Е.Е., Фотина Н.В., Асякина Л.К., Осинцева М.А., Просеков А.Ю. Оценка химических и санитарных показателей грунтов угольных отвалов юга Кузнецкой котловины // *Трансформация экосистем*. 2022. N 4. С. 83–97. DOI: 10.23859/estr-220603
- Полохин О.В., Калышевская С.В. Особенности микроэлементного состава почв техногенных ландшафтов в районах добычи бурого угля (Приморский край) // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. 2015. N 2(180). С. 25–32.
- Li W., Chen B., Ding X. Environment and reproductive health in China: challenges and opportunities *Environ Health Perspectives*. 2012. N 120(5). P. 184–185. DOI:10.1289/ehp.1205117

21. Сакалова А.Н., Бибарцева Е.В., Башкатова В.С. Анализ химического состава почвы Новоорского района Оренбургской области // Оренбургские горизонты: прошлое, настоящее, будущее. 2019. N 54. С. 372–375.
22. Chen C., Dong D., Li Z., Wang X. A novel soil nutrient detection method based on combined ATR and DRIFT mid-infrared spectra // *Analytical Methods*. 2017. N 10. P. 528–533. DOI:10.1039/c6ay02904c
23. Margenot A.J., Parikh S.J., Calderon F.J. Improving Infrared Spectroscopy Characterization of Soil Organic Matter with Spectral Subtractions // *Environment*. 2019. N 143. Article ID: 1719. DOI:10.3791/57464
24. Шапченкова О.А., Краснощекова Ю.Н., Лоскутов С.Р. Использование методов термического анализа для оценки органического вещества почв, пройденных пожарами // Почвоведение. 2011. N 6. С. 738–747.
25. Марыганова В.В., Шайдак Л., Цынкалова Н.Ю. Термический анализ гуминовых кислот почв под лесополосами различного возраста в агроландшафте // Природопользование. 2010. N 18. С. 185–191.
26. Водяницкий Ю.Н., Шоба С.А. Современные методы анализа биогеохимии почв // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2013. N 4. С. 21–31.
27. Weindorf D.C., Bark N., Zhu Y. Advances in Portable X-ray Fluorescence (PXRF) for Environmental, Pedological, and Agronomic Applications // *Advances in Agronomy*. 2014. N 38. P. 1–45. DOI:10.1016/B978-0-12-802139-2.00001-9
28. Tankersley K.B., Balantyne M.R. X-ray powder diffraction analysis of Late Holocene reservoir sediments // *Journal of Archaeological Science*. 2010. N 37(1). P. 133–138. DOI:10.1016/j.jas.2009.09.023
- REFERENCES**
1. Atuchin V.V., Asyakina L.K., Serazetdinova Y.R., Frolova A.S., Velichkovich N.S., Prosekov A.Yu. Microorganisms for Bioremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals. *Microorganisms*, 2023, no. 11, p. 864. DOI: 10.3390/microorganisms11040864
2. Banerjee L., Chawla S., Kumar Dash S. Performance Evaluation of Coal Mine Overburden as a Potential Subballast Material in Railways with Additional Improvement Using Geocell. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, no. 32(8), article id: 04020200. DOI:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003269
3. Frolova A.S., Pereverzeva M.K., Asyakina L.K., Golubcova Yu.V., Osinceva M.A. Enzymatic activity of technogenic surface formations of Kuzbass. *Agricultural science of the Euro-North-East*, 2022, no. 4, pp. 538–547. (In Russian) DOI: 10.30766/2072-9081.2022.23.4.538-547
4. Welch C., Lee Barbour S., Jim Hendry M. The geochemistry and hydrology of coal waste rock dumps: A systematic global review. *Science of The Total Environment*, 2021, no. 795, article id: 148798. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.148798
5. Serazetdinova Yu.R., Dyshlyuk L.S., Fotina N.V., Osintseva M.A., Golubtsova Yu.V. Agrochemical and microbiological properties of the rock dump of the Barzass processing plant. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Kamchatka State Technical University]*. 2022, no. 61, pp. 93–104. (In Russian)
6. Legoshchina O.M., Ufimtsev V.I. Features of the mycobiota of artificial plantations of *Pinus sylvestris* L. on the dumps of the Kedrovsky coal mine (Kemerovo region). In: *Trudy Karelskogo nauchnogo centra Rossiiskoi akademii nauk [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]*. 2020, no. 12, pp. 27–34. (In Russian)
7. Abramowicz A., Rahmonov O., Chybiors R. Environmental Management and Landscape Transformation on Self-Heating Coal-Waste Dumps in the Upper Silesian Coal Basin. *Land*, 2020, no. 10(1), p. 23. DOI:10.3390/land10010023
8. Lei K., Pan H., Lin C. A landscape approach towards ecological restoration and sustainable development of mining areas. *Ecological Engineering*, 2016, no. 90, pp. 320–325. DOI:10.1016/j.ecoleng.2016.01.080
9. Mi J., Yang Y., Zhang S., An S., Hou H., Hua Y., Chen F. Tracking the Land Use/Land Cover Change in an Area with Underground Mining and Reforestation via Continuous Landsat Classification. *Remote Sensing*, 2019, no. 11, article id: 1719. DOI:10.3390/rs11141719
10. Fotina N.V., Emelyanenko V.P., Vorobyeva E.E., Burova N.V., Ostapova E.V. Modern biological methods of restoration and purification of disturbed coal mining lands in the conditions of the Kemerovo region – Kuzbass. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv [Equipment and technology of food production]*. 2021, no. 51(4), pp. 869–882. (In Russian)
11. Yakovcheno M.A., Ermolavev V.A., Kosolapova A.A., Alankina D.N. Research of soil-agrochemical characteristics of coal-mining enterprises of the Kemerovo region. *Nauka i obrazovanie: opyt, problemy, perspektivy razvitiya [Science and education: experience, problems, development prospects]*. 2016, no. 1, pp. 40–43. (In Russian)
12. Marcisz M., Gawor L., Probiez K. Valorization of coal mining waste dumps from the mines of Jastrzębska Spółka Węglowa SA for the needs of recovery of coal and further reclamation and management. *Gospodarka surowcami mineralnymi – mineral resources management*, 2018, no. 34(4), pp. 97–114. DOI:10.24425/122592
13. Cheskidov V.I., Bobyl'sky A.S. Technology and Ecology of Dumping at Open Pit Mines in Kuzbass. *Journal of Mining Science*, 2017, no. 53(5), pp. 882–889. DOI:10.1134/S106273911705291X
14. Bragina P.S., Tsibart A.S., Zavadsкая M.P., Sharapova A.V. Soils on overburden dumps in the forest-steppe and mountain taiga zones of the Kuzbass. *Eurasian Soil Science*, 2014, no. 47(7), pp. 723–733. DOI:10.1134/s1064229314050032
15. Kostenkov N.M., Komachkova I.V., Purtova L.N. Soils of technogenic landscapes of Primorye (Luchegorsky and Pavlovsky coal mines). *Pochvovedenie [Soil science]*. 2013, no. 11, article id: 1238. (In Russian)
16. He H., Hong F.F., Tao X.X., Huang G.H., Leng Y.W., Shao J.F., Zhao Y.D. A study on soil basic characteristics, main microbial flora and typical metal fraction surrounding coal gangue dump in Xiangtan Hunan Province, south of China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, no. 75(6), p. 488. DOI:10.1007/s12665-016-5340-z
17. Pirogovskaya G.V., Khmelevskii S.S. The content of sodium, chlorides and sulfates in the soils of Minsk. *Pochvovedenie i agrokhimiya [Soil Science and Agrochemistry]*. 2010, no. 1(44), pp. 243–254. (In Russian)
18. Vorob'eva E.E., Fotina N.V., Asyakina L.K., Osintseva M.A., Prosekov A.Yu. Assessment of chemical and sanitary indicators of soils of coal dumps in the south of the Kuznetsk Basin. *Transformaciya ekosistem [Transformation of ecosystems]*. 2022, no. 4, pp. 83–97. (In Russian) DOI: 10.23859/estr-220603

19. Polokhin O.V., Kalyshevskaya S.V. Features of the microelement composition of soils in technogenic landscapes in the areas of brown coal mining (Primorsky Krai). *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk [Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences]*. 2015, no. 2(180), pp. 25–32. (In Russian)
20. Li W., Chen B., Ding X. Environment and reproductive health in China: challenges and opportunities *Environ. Health Perspectives*, 2012, no. 120(5), pp. 184–185. DOI:10.1289/ehp.1205117
21. Sakalova A.N., Bibartseva E.V., Bashkatova V.S. Analysis of the chemical composition of the soil of the Novoorsky district of the Orenburg region. *Orenburgskie gorizonty: proshloe, nastoyashchee, budushchee [Orenburg horizons: past, present, future]*. 2019, no. 54, pp. 372–375. (In Russian)
22. Chen C., Dong D., Li Z., Wang X. A novel soil nutrient detection method based on combined ATR and DRIFT mid-infrared spectra. *Analytical Methods*, 2017, no. 10, pp. 528–533. DOI:10.1039/c6ay02904c
23. Margenot A.J., Parikh S.J., Calderon F.J. Improving Infrared Spectroscopy Characterization of Soil Organic Matter with Spectral Subtractions. *Environment*, 2019, no. 143, article id: 1719. DOI:10.3791/57464
24. Shapchenkova O.A., Krasnoshchekova Yu.N., Loskutov S.R. The use of thermal analysis methods to assess the organic matter of soils affected by fires. *Pochvovedenie [Soil Science]*. 2011, no. 6, pp. 738–747. (In Russian)
25. Maryganova V.V., Shaidak L., Tsynkalova N.Yu. Thermal analysis of humic acids in soils under forest belts of different ages in the agrolandscape. *Prirodopol'zovanie [Nature management]*. 2010, no. 18, pp. 185–191. (In Russian)
26. Vodyanitskii Yu.N., Shoba S.A. Modern methods of analysis of soil biogeochemistry. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie [Bulletin of Moscow University. Series 17: Soil science]*. 2013, no. 4, pp. 21–31. (In Russian)
27. Weindorf D.C., Bark N., Zhu Y. Advances in Portable X-ray Fluorescence (PXRF) for Environmental, Pedological, and Agronomic Applications. *Advances in Agronomy*, 2014, no. 38, pp. 1–45. DOI:10.1016/B978-0-12-802139-2.00001-9
28. Tankersley K.B., Balantyne M.R. X-ray powder diffraction analysis of Late Holocene reservoir sediments. *Journal of Archaeological Science*, 2010, no. 37(1), pp. 133–138. DOI:10.1016/j.jas.2009.09.023

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

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

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

Дарья Е. Колпакова / Daria E. Kolpakova <https://orcid.org/0000-0002-8508-3372>

Ирина С. Милентьева / Irina S. Milentjeva <https://orcid.org/0000-0002-3536-562X>

Людмила К. Асякина / Lyudmila K. Asyakina <https://orcid.org/0000-0003-4988-8197>

Наталья В. Фотина / Natalya V. Fotina <https://orcid.org/0000-0002-7655-0258>

Александр Ю. Просеков / Alexander Yu. Prosekov <https://orcid.org/0000-0002-5630-3196>

Оригинальная статья / Original article

УДК 332.142.6

DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-10



Анализ современного состояния и тенденции развития туристической сферы в регионах Северного Кавказа

Лейла Ш. Ахмедова¹, Зарема И. Солтанмурадова¹, Рената Г. Дандамаева², Гаджимурад И. Идзиев²¹Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия²Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, Махачкала, Россия

Контактное лицо

Гаджимурад И. Идзиев, доктор экономических наук, Институт социально-экономических исследований, Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН; 367000 Россия, г. Махачкала, ул. Ярагского, 75.
Тел. +79894473858
Email textima@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0109-3048>

Формат цитирования

Ахмедова Л.Ш., Солтанмурадова З.И., Дандамаева Р.Г., Идзиев Г.И. Анализ современного состояния и тенденции развития туристической сферы в регионах Северного Кавказа // Юг России: экология, развитие. 2024. Т.19, N 2. С. 104-116. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-10

Получена 22 января 2024 г.

Прошла рецензирование 29 марта 2024 г.

Принята 26 апреля 2024 г.

Резюме

Территория юга России, в пределах которой расположен Северо-Кавказский федеральный округ, по своим природно-климатическим и географическим составляющим является одной из наиболее пригодных зон для развития туризма и рекреации. В связи с этим выявление потенциала туристической сферы на территории СКФО как одного из перспективных направлений является актуальной задачей в современных геополитических условиях.

Для анализа уровня насыщенности туристской инфраструктуры проживания и востребованности ее услуг в СКФО были рассчитаны следующие индексы: число мест для размещения туристов в расчете на 1000 постоянных жителей; число туристов, остановившихся в средствах размещения, в расчете на 1 кв. км территории; число туристов, остановившихся в средствах размещения, в расчете на 1000 постоянных жителей; число мест для размещения туристов в расчете на 1 кв. км территории.

На основе проведенного анализа состояния и развития туристической сферы, а также рассчитанных значений туристских инфраструктурных индексов выявлены основные тенденции развития сферы туризма и проблемы ее функционирования, что позволит более эффективно распорядиться имеющимся уникальным туристско-рекреационным и этнокультурным потенциалом территории.

Положительная динамика основных показателей последних лет свидетельствует о повышении привлекательности и конкурентоспособности СКФО как туристского направления. Проведенный анализ статистических данных позволяет сделать вывод о переориентации туристских потоков из центральных районов России в регионы Северного Кавказа.

Ключевые слова

Туризм, Северный Кавказ, потенциал туристической сферы региона, туристская инфраструктура, устойчивое развитие.

Analysis of current state and development trends of the tourism sector in the regions of the North Caucasus, Russia

Leila Sh. Akhmedova¹, Zarema I. Soltanmuradova¹, Renata G. Dandamaeva² and Gadzhimurad I. Idziev²

¹Dagestan State University, Makhachkala, Russia

²Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia

Principal contact

Gadzhimurad I. Idziev, Doctor of Economic Sciences, Institute of Socio-Economic Research, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences; 75 Yaragsky St, Makhachkala, Russia 367000
Tel. +79894473858
Email textima@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0109-3048>

How to cite this article

Akhmedova L.Sh., Soltanmuradova Z.I., Dandamaeva R.G., Idziev G.I. Analysis of current state and development trends of the tourism sector in the regions of the North Caucasus, Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2024; 19(2):104-116. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-10

Received 22 January 2024

Revised 29 March 2024

Accepted 26 April 2024

Abstract

The territory of the south of Russia, within which the North Caucasus Federal District is located, is a most suitable zone for the development of tourism and recreation due to its natural, climatic and geographical components. In this regard, identifying the potential of the tourism sector in the North Caucasian Federal District as one of the promising areas is an urgent task under modern geopolitical conditions.

To analyze the level of saturation of the tourist infrastructure of accommodation and the demand for its services in the North Caucasus Federal District, the following indices were calculated: the number of places for tourist accommodation per 1000 permanent residents; number of tourists staying in accommodation facilities per 1 sq. km of territory; number of tourists staying in accommodation facilities per 1000 permanent residents; number of places to accommodate tourists per 1 sq. km. territories.

Based on the analysis of the state and development of the tourism sector, as well as the calculated values of tourism infrastructure indices, the main trends in the development of the tourism sector and the problems of its functioning have been identified, which will make it possible to more effectively manage the existing unique tourist, recreational and ethnocultural potential of the territory.

The positive dynamics of the main indicators in recent years indicates an increase in the attractiveness and competitiveness of the North Caucasian Federal District as a tourist destination. The analysis of statistical data allows us to draw conclusions about the reorientation of tourist flows from the central regions of Russia to the regions of the North Caucasus.

Key Words

Tourism, North Caucasus, potential of the region's tourism sector, tourism infrastructure, sustainable development.

ВВЕДЕНИЕ

Мировой опыт и практика в области развития высокодоходной индустрии туризма показали, что природно-климатическое, историческое и этнокультурное наследие территорий оказывается всеобщим благом благодаря развитию туризма. Современные вызовы, связанные с общей геополитической ситуацией в России и за ее пределами, показали значимость индустрии туризма и гостеприимства для социально-экономической жизни как страны в целом, так и ее регионов в частности. И поскольку дальнейшие перспективы выездного туризма на сегодняшний день малопонятны, основное внимание акцентируется на развитии внутреннего и въездного туризма. Территория юга России, в пределах которой расположен Северо-Кавказский федеральный округ, по своим природно-климатическим и географическим составляющим является одной из наиболее пригодных зон для развития туризма и рекреации.

Северо-Кавказский федеральный округ – это южный форпост России, имеющий особое значение в геостратегическом плане и представляющий ее интересы. Указом Президента России Д. А. Медведева от 19 января 2010 года Северо-Кавказский округ был выделен из состава Южного федерального округа. Макрорегион располагается на юге европейской части страны, в центральной и восточной части Северного Кавказа. Площадь территории СКФО занимает 170,4 тыс. кв. км – это примерно 1 % от площади территории РФ. Несмотря на то, что СКФО является наименьшим округом Российской Федерации, население округа составляет 10203,8 тыс. чел., что соответствует 6,97 % от численности населения России.

Северо-Кавказский федеральный округ по своим уникальным туристским ресурсам считается одним из перспективных округов РФ для развития туризма. На фоне других территорий, туристско-рекреационный потенциал Северо-Кавказского макрорегиона выделяется следующими характеристиками: выгодное географическое положение, удобная транспортная развязка, уникальность и многообразие природно-климатических ресурсов, а также богатое культурно-историческое и этнокультурное наследие высокополиэтнического региона. В макрорегионе сложился самобытный состав населения, характеризующийся значительным этнокультурным многообразием. Перечисленные факторы послужили благоприятной основой для формирования и развития на территории округа практически всех видов туризма, и позволили региону стать одним из центров притяжения многочисленных туристов, подтверждая перспективность развития данной сферы.

В последние годы интерес российских граждан к отдыху на территории Северного Кавказа стабильно растет и позволил войти в число регионов-лидеров в сфере туризма в нашей стране. В принятой Стратегии развития туризма в Российской Федерации на период до 2035 года предусмотрена реализация программ по его развитию в большинстве субъектов Российской Федерации. Кроме того, стратегия предполагает развитие туризма, акцентируя внимание на ключевых точках притяжения, в том числе объектах культурного наследия и историко-культурных достопримечательностей. При успешной постановке дела отрасль туризма может быть высокоэффективной на всей территории

страны, а не только в отдельных ее регионах. Основные целевые параметры развития отрасли выражаются в росте к 2035 г. ее вклада в ВВП страны в 5,1 раза и увеличении более чем в 2 раза путешествий по стране, приходящихся на одного россиянина.

Важность сферы туризма для Северо-Кавказского округа подтверждается также в Стратегическом документе по развитию туризма на территории Северо-Кавказского федерального округа до 2035 года, в котором туризм признан одним из приоритетных направлений экономики округа. Данное положение свидетельствует о том, что в макрорегионе нацелены на комплексное развитие сферы туризма и повышение его значимости в социально-экономическом развитии территорий округа за счет увеличения вклада туристской индустрии в экономику округа и создания новых рабочих мест.

Однако темпы развития туристической отрасли отстают от среднероссийских показателей. Очевидно, что несмотря на поддержку со стороны государства в сфере туризма, а также проведение общей политики органов государственной власти внутри макрорегиона, возможности для развития туристической отрасли в субъектах СКФО используются недостаточно.

С этой позиции дальнейшее развитие туризма в Северо-Кавказском федеральном округе должно быть направлено на создание высокоэффективного туристско-рекреационного комплекса, отвечающего современным мировым стандартам, способствующего продвижению качественного и конкурентоспособного туристического продукта, как на внутреннем, так и международном туристских рынках.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исследуемых объектов анализа выступают основные индикаторы оценки состояния сферы туризма в регионе, включая: динамику изменения туристских потоков, текущее состояние туристской инфраструктуры региона, объем платных услуг отрасли туризма и гостеприимства в регионе и др.

Туристская привлекательность территорий определяется рядом показателей, одним из которых является показатель объемов притока туристов в регион. Туристский поток отражает то, насколько востребована и популярна территория с точки зрения туризма, а также уровень и факторы развития туризма в данной местности. В связи с отсутствием до 2022 года официальных методик подсчета статистического учета количества туристов, прибывших в регион, о ее величине судят исходя из численности лиц зарегистрированных в коллективных и аналогичных им средствах размещения. Объектом анализа динамики состояния сферы туризма в регионе выступает также туристская инфраструктура объектов размещения.

Для анализа уровня насыщенности туристской инфраструктуры проживания и востребованности ее услуг в Северо-Кавказском федеральном округе были рассчитаны следующие индексы: число мест для размещения туристов в расчете на 1000 постоянных жителей (индекс Беретже-Деферта); число туристов, остановившихся в средствах размещения, в расчете на 1 кв. км территории (индекс Деферта); число туристов, остановившихся в средствах размещения, в расчете на 1000 постоянных жителей (индекс Шнайдера); число

мест для размещения туристов в расчете 1 кв. км. территории.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В структуре туристического потока в субъектах Северного Кавказа основными сегментами внутреннего туризма являются оздоровительный туризм, активный, культурно-познавательный и пляжный туризм. Помимо основных сегментов, перспективными направлениями

являются: этнографический туризм, этно-экологический, событийный, гастрономический, деловой и прочие виды, рисунок 1. Развитию этнокультурных направлений туризма способствует как рост этнического самосознания россиян, так и возрастающий интерес со стороны туристов к подлинной самобытной жизни северокавказских народов, их традициям, аутентичной культуре и национальной кухне и др.

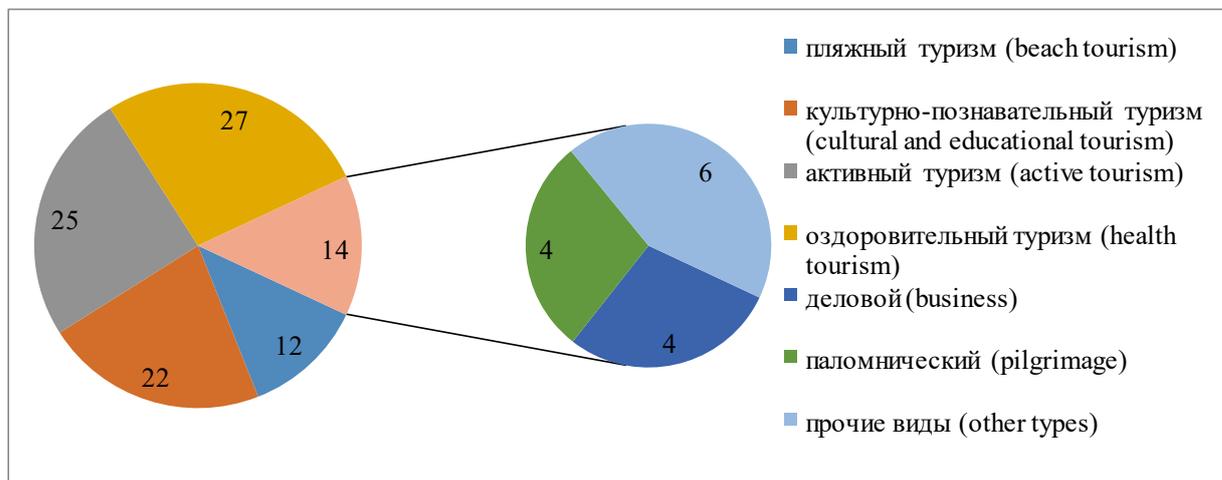


Рисунок 1. Основные сегменты внутреннего туризма Северного Кавказа, в % [1]
Figure 1. Main segments of domestic tourism in the North Caucasus, in % [1]

Внутренний туристический поток, судя по официальным данным статистики о численности туристов в коллективных средствах размещения (КСР), в целом по территории России, ежегодно увеличивался. Основная часть общего туристского потока России была сосредоточена в ЦФО (29,3 %) и ЮФО (19,9 %). Доля туристического потока регионов Северо-Кавказского федерального округа в общем турпотоке РФ не превышала 3,5 %.

Как показывают данные статистики, рисунок 2, в различных регионах России наблюдается неравномерность развития туристской инфраструктуры размещения. Территориями, лидирующими по числу коллективных мест размещения, являются Центральный, Южный, Приволжский и Северо-Западный федеральные округа.

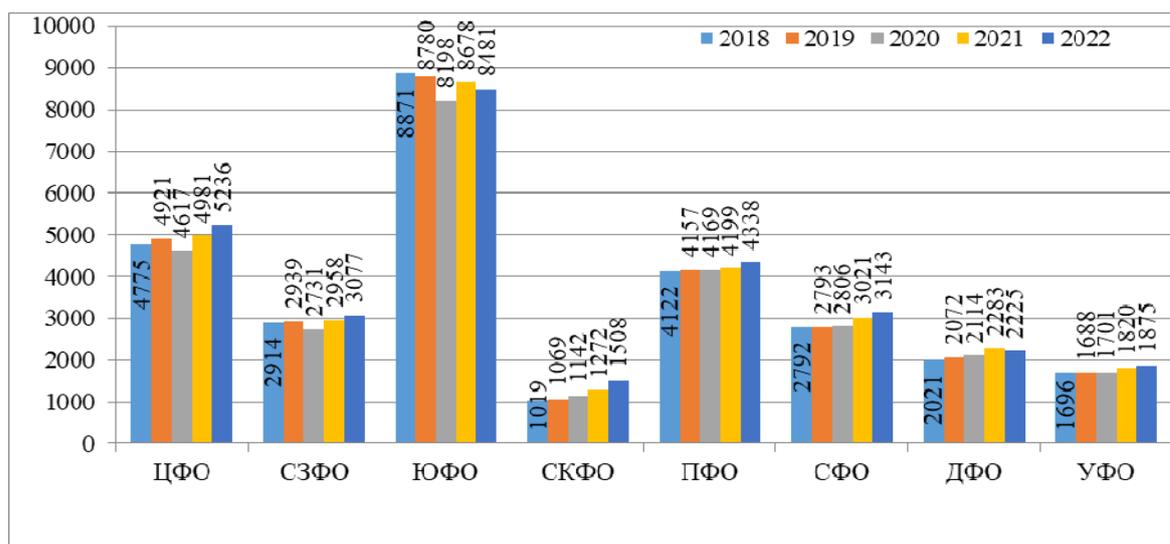


Рисунок 2. Число коллективных средств размещения в РФ по округам [2]
Figure 2. Number of collective accommodation facilities in the Russian Federation by district [2]

Подобные диспропорции количества объектов туристской инфраструктуры размещения объясняются, в первую очередь тем, что сфера туризма в данных округах наиболее развита и представлена в основном

культурно-познавательным, а также деловым направлениями. Кроме того, сложившаяся ситуация объясняется высокой долей численности населения, проживающего в Центральном федеральном округе, а

также наибольшим количеством широко известных и востребованных достопримечательностей и других точек притяжения туристов. Что касается ЮФО – Черноморское побережье Юга России всегда было излюбленным местом отдыха россиян, предпочитающих пляжный туризм, что также способствует притоку туристов в указанный регион. СКФО является отстающим макрорегионом по числу объектов КСР и аналогичных им, что в большей степени было связано с имеющимися уникальными природными ресурсами и приоритетным развитием на их основе санаторно-курортной базы и лечебно-оздоровительного направления.

Как известно, 2020 год внес глобальные перемены в индустрию туризма. В связи с ограничительными мероприятиями, связанными с пандемией COVID-19 положительная тенденция ежегодного роста объемов туристического потока внутри РФ была прервана. Несмотря на ряд предпринятых государством мер поддержки туротрасли, наблюдается общее снижение числа поездок внутри страны на 35–40 % по сравнению с 2019 годом, соответственно количество отдыхающих, размещенных в коллективных средствах размещения, также сократилось, рисунок 3.

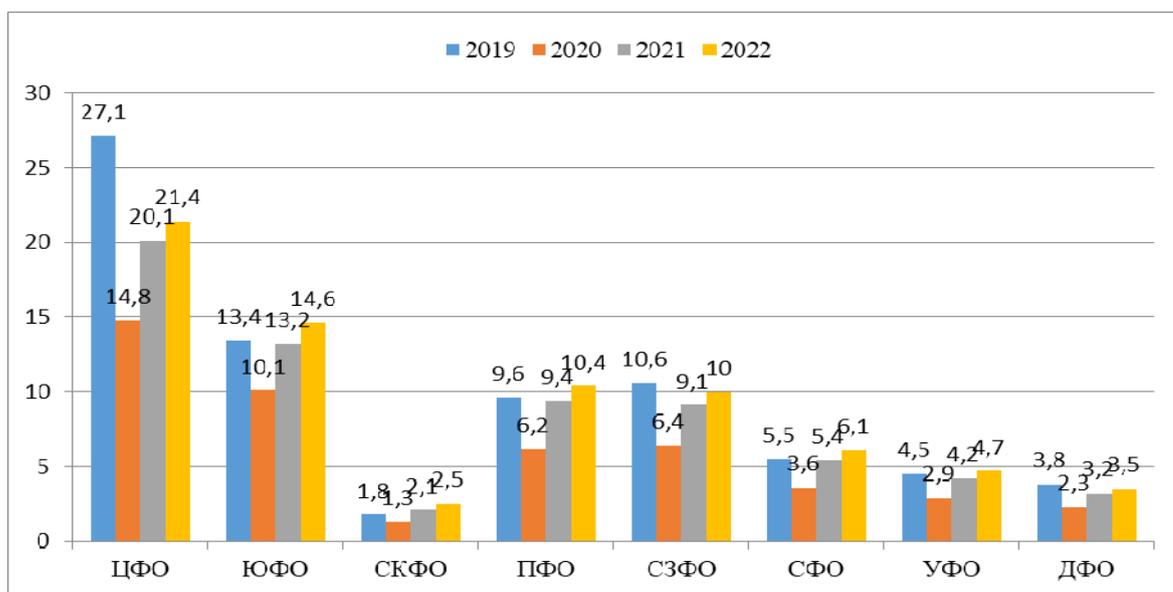


Рисунок 3. Динамика численности лиц, размещенных в КСР, по федеральным округам, млн. чел. [2]

Figure 3. Dynamics of the number of persons placed in collective accommodation facilities, by federal district, million people [2]

2021 год характеризуется восстановлением объемов туристического потока в большинстве регионов и началом его роста. В отдельных регионах России, к ним относятся и субъекты СКФО, численность туристов в коллективных и аналогичных средствах размещения, в 2021 году увеличилась, превзойдя допандемийный уровень 2019 года. Исключением стали регионы Центрального, Приволжского и Дальневосточного федерального округов. Сложившаяся ситуация указывает на появление новых географических «открытий» и туристских предпочтений при выборе места отдыха россиян.

Кроме того, как показывает статистическая информация, рисунок 4, в 2021 году субъекты СКФО лидируют по показателю средней продолжительности пребывания туристов в коллективных средствах размещения в РФ по округам. Таким образом, можно предположить, что за прошедшие после пандемии COVID-19 два-три года произошла перенаправленность внутренних туристических потоков из Центральных регионов России в южные регионы Северо-Кавказского федерального округа. Пандемия закрыла внешние границы, и открыла для российских туристов новые туристические направления внутри страны и особенно популярными среди них стали поездки в регионы Северного Кавказа.

В субъектах СКФО, согласно данным Федеральной службы государственной статистики, в последние годы сложилась устойчивая тенденция к

росту основных показателей туристической отрасли. Общий приток туристов в Северо-Кавказский федеральный округ ежегодно увеличивался в среднем на 6 % в год. Динамика численности лиц, размещенных в КСР, показывает, что доля туристического потока Северо-Кавказского федерального округа, рисунок 5, в общей структуре турпотока страны в среднем составляет всего лишь 3,5 %.

Вместе с тем, в 2020 году, несмотря на ограничения в связи с пандемией коронавируса, очевиден прирост туристического потока в субъекты СКФО при общем снижении количества туристов в целом по России, рисунок 6. Это также свидетельствует о перераспределении туристических потоков и смещении их в регионы Северного Кавказа.

Данный факт, на наш взгляд, объясняется вводом новых объектов размещения в период подготовки к новому туристическому сезону. Интерес к отдыху в горах Северного Кавказа, стремление туристов познать и приобщиться к самобытной жизни, традициям и этнической культуре его народов создал спрос на размещение в неотельных объектах проживания, коттеджах или гостевых домах.

Последствиями жесткого локдауна из-за пандемии COVID-19 в 2020 году произошло понижение объемов туристического потока в указанные регионы на 23 % по сравнению с предыдущим годом и составило 2609,4 тыс. человек. Правительством России в целях поддержки индустрии туризма и гостеприимства были

выделены средства из бюджета страны и скорректирована программа поддержки и развития туристической сферы в условиях пандемии. В результате принятых мер в 2021 году приток туристов в регионы СКФО восстановился, превысив допандемийный уровень на 15,8 % и достиг количества 3975,7 тыс. чел. Появление новых внесезонных направлений туризма, таких как этнографический

туризм, событийный, гастрономический и др., увеличение возможностей круглогодичного отдыха на курортах Северного Кавказа, а также активная популяризация информации о них в соцсетях Интернета привели к повышению объемов туристического потока в Северо-Кавказский регион практически в 1,5 раза, чем за аналогичный период 2020 года.

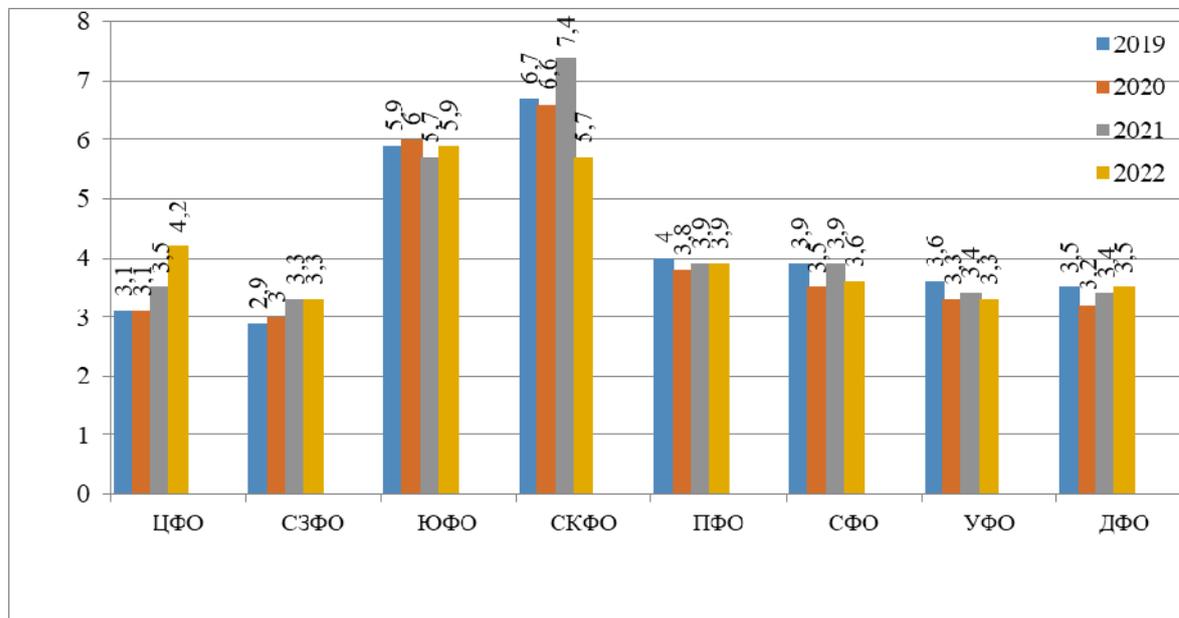


Рисунок 4. Средняя продолжительность пребывания туристов в КСР по округам РФ, дней [3]

Figure 4. Average length of stay of tourists in collective accommodation facilities by districts of the Russian Federation, days [3]

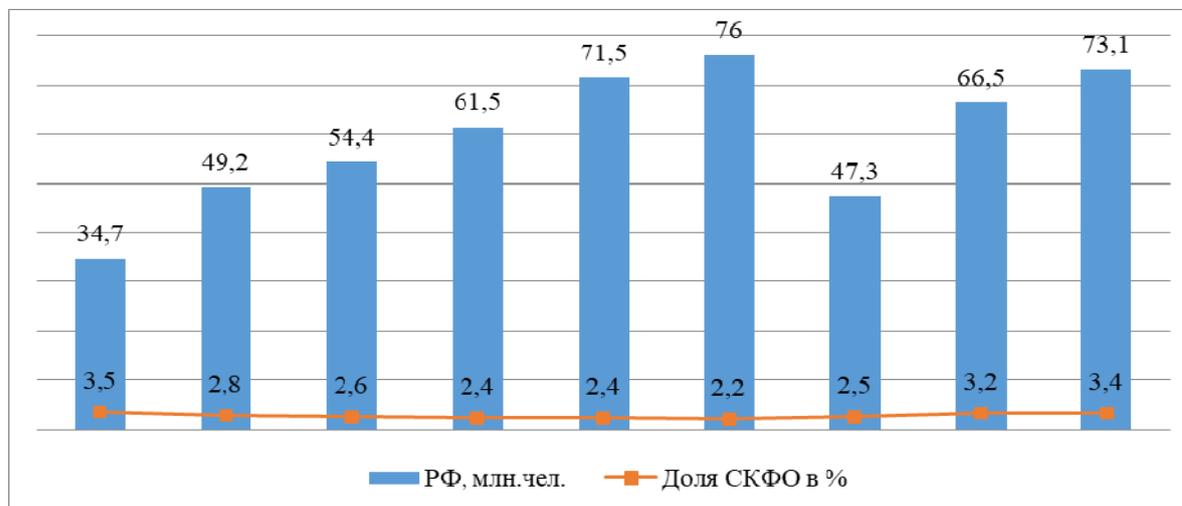


Рисунок 5. Доля туристического потока СКФО в общем турпоток РФ, млн чел. [2]

Figure 5. Share of tourist flow of the North Caucasian Federal District in the total tourist flow of the Russian Federation, million people [2]

В 2022 году тренд на туристические поездки в регионы СКФО сохранился. Рост объема туристических потоков в Северо-Кавказский федеральный округ достиг количества более 5 млн. поездок. Следует отметить, что с 2022 года Росстатом введена новая методика оценки туристического потока по числу туристических поездок и числу туристических ночевок, совершенных туристами. Рассчитывается туристический поток по числу туристических поездок, совершенных российскими

и иностранными туристами в пределах Российской Федерации или субъекта РФ.

По итогам 2022 года количество туристских прибытий в регионы СКФО составило 5125939 поездок, большая часть из них (47,2 %) пришлось на Ставропольский край. Также в тройку регионов-лидеров по турпоток среди субъектов СКФО вошли Республика Дагестан (13,4 %) и Кабардино-Балкарская Республика (16,4 %).

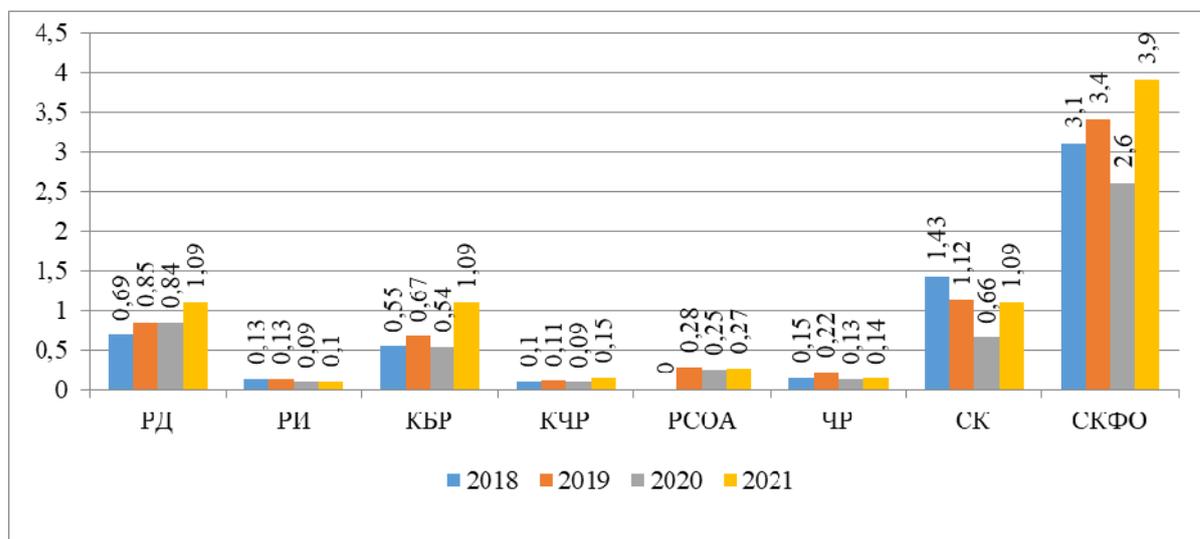


Рисунок 6. Динамика туристического потока в субъекты СКФО, млн.чел. Источник: данные Северо-Кавказстата и отчетов госведомств и министерств по туризму субъектов СКФО

Figure 6. Dynamics of tourist flow to regions of the North Caucasus Federal District, million people. Source: data from the North Caucasus State Statistics Service and reports from government departments and ministries of tourism of the North Caucasus Federal District

Вместе с тем, несмотря на устойчивый рост объемов туристского потока и оказанных туристских услуг в СКФО, экономический вклад туриндустрии в валовой региональный продукт округа остается низким.

Общий вклад туристской индустрии в экономику Северо-Кавказского федерального округа в 2021 году судя по показателю ВДС (в основных ценах) составил 133,2 млрд. рублей. По сравнению с 2020 годом валовая добавленная стоимость туриндустрии в ВРП Северокавказского макрорегиона в 2021 году увеличилась на 22 %.

Судя по данным статистики, рисунок 7, в 2021 году практически во всех субъектах СКФО (кроме Республики Ингушетии) наблюдается рост показателя валовой добавленной стоимости туриндустрии в ВРП региона. Как видно, среди субъектов СКФО наибольший вклад туриндустрия внесла в ВРП Республики Дагестан, Ставропольского края, а также Чеченской Республики.

Объекты гостеприимства и размещения являются одним из важнейших элементов туристской инфраструктуры, так как практически в каждый турпродукт обязательно входит проживание. Тенденции современной индустрии туризма диктуют необходимость модернизации имеющихся и строительства новых средств размещения как одного из основных факторов привлечения потенциальных клиентов и доведение качества оказываемых туристских услуг до международных стандартов гостеприимства.

По данным статистики в России в целом вновь наблюдается общая тенденция роста количества средств размещения. В 2022 году данный показатель на 8,8 % превысил значения предыдущего года и на 4,4 % выше уровня допандемийного периода. Доля КСР Северо-Кавказского округа в общей структуре объектов размещения по Российской Федерации составляет 5,1 %. Анализ динамики числа коллективных и аналогичных средств размещения в регионах Северного

Кавказа за период с 2010 по 2022 гг. свидетельствует об их росте в 2,6 раза в среднем на 8–9 % в год, рисунок 8.

Несмотря на различные санкции (эпидемиологические и экономические) при общем снижении количества КСР в целом по России в период пандемии 2020 года, число объектов размещения в республиках СКФО увеличилось на 6 % по сравнению с предыдущим годом и составило 1142 единиц.

Увеличение объемов туристического потока активизировало инвестиционную деятельность в секторе объектов проживания туристов. В 2021 году количество объектов размещения в Северо-Кавказском федеральном округе увеличилось на 18 %, а к 2022 году на 41 % по сравнению с доковидным периодом 2019 года и достигло 1508 единиц. Следует отметить, что рост данного показателя отмечается во всех субъектах СКФО. Развитие этнографического туризма способствовало формированию и появлению в сельской местности нового типа мини-гостиниц – этноотелей, этно-домов, глэмпингов и др. с качественным набором предоставляющих услуг [4].

Регионами-лидерами по обеспеченности инфраструктурой проживания являются Ставропольский край, Республика Дагестан и Республика Кабардино-Балкария таблица 1.

Официальные статистические данные о числе туристов, размещенных в коллективных средствах размещения, позволяют охарактеризовать организованный туризм в регионах СКФО.

В целом по Российской Федерации спрос на услуги коллективных средств размещения в 2020 году резко сократился. Число граждан, воспользовавшихся услугами КСР в 2021 году, снизилось на 12,5 %, по сравнению с 2019 годом.

Как показывают данные статистики, таблица 2, в регионах СКФО наблюдается положительная динамика туристских прибытий и численности, зарегистрированных в средствах размещения граждан.

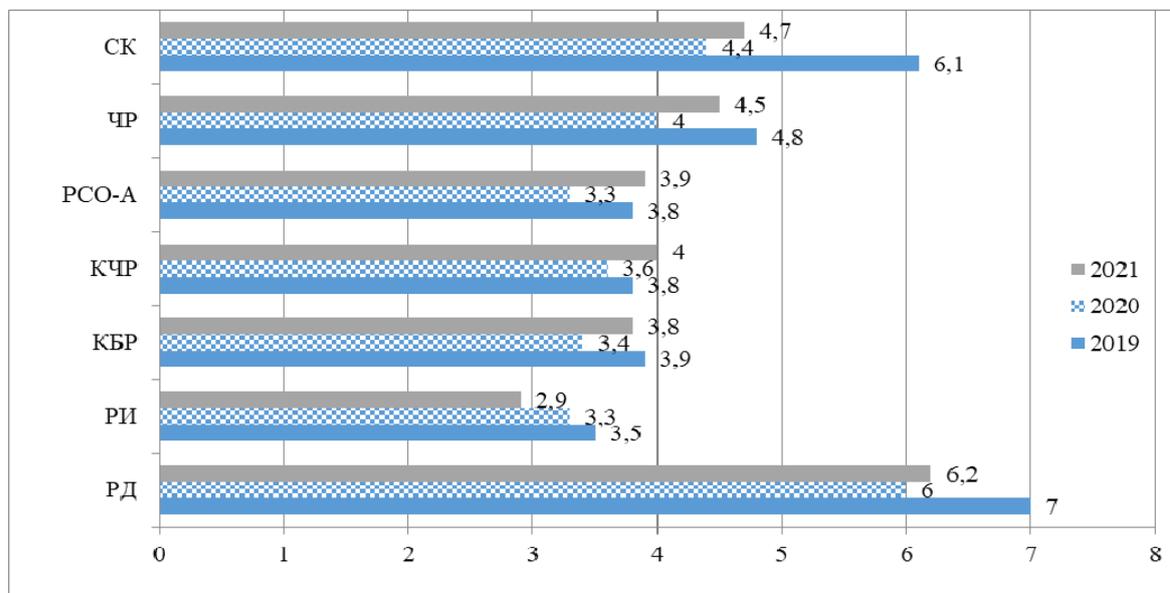


Рисунок 7. Доля валовой добавленной стоимости туриндустрии в ВРП субъекта РФ, % [2]

Figure 7. Share of gross added value of the tourism industry in the GRP of a constituent entity of the Russian Federation, % [2]

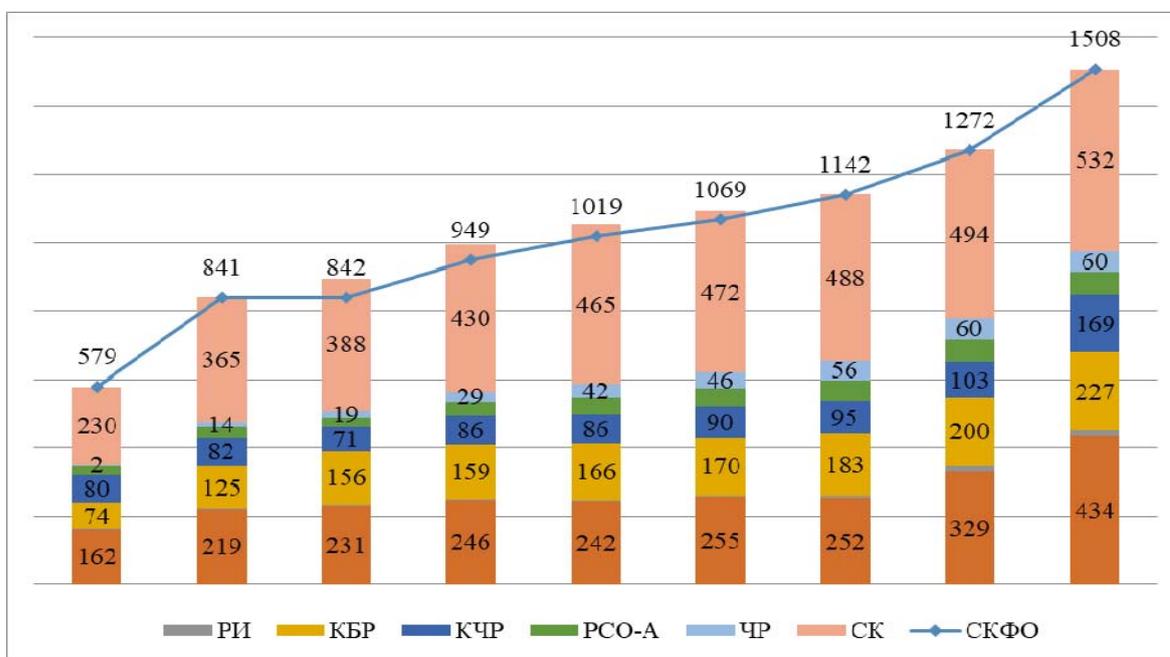


Рисунок 8. Динамика числа коллективных средств размещения в субъектах СКФО

Источник: данные материалов статистики и отчетов министерств и ведомств по туризму субъектов СКФО

Figure 8. Dynamics of the number of collective accommodation facilities in regions of the North Caucasus Federal District

Source: data from statistics and reports of ministries and tourism departments of the constituent entities of the North Caucasus Federal District

Таблица 1. Динамика числа мест в коллективных средствах размещения [2]

Table 1. Dynamics of the number of places in collective accommodation facilities

	Число мест в коллективных средствах размещения, ед. Number of places in collective accommodation facilities, units.								
	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
СКФО / SCFD	64693	69212	73862	82816	96483	98429	98079	102604	115648
РД / RD	5510	5759	6689	11191	20770	21299	17875	21100	25979
РИ / RI	244	511	435	514	534	532	820	1257	1277
КБР / KBR	12753	11913	10634	12211	13326	13770	14009	14505	15172
КЧР / KChR	7145	5749	6491	6969	6805	7053	7596	7989	11943
РСОА / RSOA	3015	3921	3489	4395	4761	5396	5634	5382	5052
ЧР / ChR	55	1646	1975	3071	4619	4771	6277	5677	5725
СК / SR	35971	39713	44149	44465	45668	45608	45868	46694	50500

Таблица 2. Динамика востребованности средств размещения в СКФО, тыс. чел. [2]**Table 2.** Dynamics of demand for accommodation facilities in the North Caucasus Federal District, thousand people [2]

	Численность лиц, размещенных в КСР, тыс. человек								
	Number of persons placed in collective accommodation facilities, thousand people								
	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
РФ / RF	34747	49284	54431	61565	71538	76042	47382	66539	73093
СКФО / SCFD	1189,5	1370,0	1368,5	1449,5	1650,3	1754,1	1246,9	2056,4	2465,7
РД / RD	98,9	137	138,3	115,9	187,4	168,4	123,0	143,4	248,2
РИ / RI	3,6	4,0	3,1	8,3	11,2	9,2	13,1	23,5	28,3
КБР / KBR	127,5	105	104,9	122,8	126,7	162,2	238,0	339,8	306,4
КЧР / KChR	144,0	193	113,7	99,9	103,2	105,2	89,5	152,0	220,2
РСОА / RSOA	40,9	45,5	40,9	52,9	69,9	86,4	90,7	176,7	220,2
ЧР / ChR	1,0	33	30,6	49,1	71,4	98,5	112,5	137,5	179,5
СК / SR	774	849	977,2	1000,6	1080,5	1124,2	661,4	1083,5	1262,9

В 2020 году из-за жесткого локдауна в связи с эпидемией коронавируса востребованность коллективными средствами размещения в отдельных субъектах СКФО снизилась. Вследствие чего динамика показателя в целом по СКФО снизилась на 28,9 % по сравнению с допандемийным периодом. Вместе с тем, в летний период 2020 года растущий интерес к этнокультурному и экотуризму на природе способствовал значительному росту количества запросов на неотельные объекты размещения: базы отдыха, гостевые дома, этно-дома, глэмпинги, аренда коттеджей, домиков в горах и т.д. Во многих субъектах СКФО, в частности в Республике Ингушетия, Кабардино-Балкарии, Чеченской Республике и Республике Северная Осетия-Алания в период пандемии тенденция роста спроса на объекты размещения сохранилась, несмотря на ограничительные меры.

Приток туристов в регион обуславливается потенциальными возможностями или вместимостью объектов гостеприимства и размещения, а также качеством предоставляемых ими услуг. С ростом количества качественной туристской инфраструктуры проживания КСР и аналогичных им, появляется больше

возможностей для массового туризма и соответственно растет число туристов, желающих провести свой отдых в региональных дестинациях Северного Кавказа [5].

Таким образом, растущая динамика числа объектов размещения и численности лиц, воспользовавшихся их услугами, свидетельствует о привлекательности региона, как для туристов, так и для предпринимателей, занятых в данном бизнесе.

Для анализа уровня насыщенности туристской инфраструктуры проживания и востребованности ее услуг в Северо-Кавказском федеральном округе на основе исходных данных, представленных в таблице 3, были рассчитаны следующие индексы:

1. Число мест для размещения туристов в расчете на 1000 постоянных жителей (индекс Беретже-Деферта);
2. Число туристов, остановившихся в средствах размещения, в расчете на 1 кв. км территории (индекс Деферта);
3. Число туристов, остановившихся в средствах размещения, в расчете на 1000 постоянных жителей (индекс Шнайдера);
4. Число мест для размещения туристов в расчете 1 кв. км. Территории [6].

Таблица 3. Показатели, характеризующие туристскую инфраструктуру объектов размещения в разрезе по регионам СКФО в 2022 году**Table 3.** Indicators characterizing the tourism infrastructure of accommodation facilities by region of the North Caucasus Federal District in 2022

	Число мест в коллективных средствах размещения, ед. Number of places in collective accommodation facilities, units	Численность размещенных лиц в коллективных средствах размещения, чел. Number of persons accommodated in collective accommodation facilities, people	Население региона, человек Population of the region, people	Площадь территории региона, кв. км Area of the region, sq. km
СКФО / SCFD	115648	2465700	10205730	170439
РД / RD	25979	248237	3209781	50270
РИ / RI	1277	28246	519078	3685
КБР / KBR	15172	306400	903266	12470
КЧР / KChR	11943	220219	468444	14277
РСОА / RSOA	5052	220146	680748	7987
ЧР / ChR	5725	179515	1533209	16171
СК / SR	50500	1262918	2891204	66160

Полученные расчетные значения туристских инфраструктурных индексов, таблица 4, свидетельствуют о неравномерности развития туристской инфраструктуры размещения в регионах СКФО.

Темпы роста числа мест в КСР за период с 2015 по 2022 годы составили в СКФО +167 %. Число мест для размещения туристов в расчете на 1000 постоянных жителей по СКФО в целом составило в 2019 г. – 10,02; в 2020 г. – 9,9; в 2021 г. – 10,05, в 2022 г. – 11,3.

Несмотря на растущую динамику данного показателя на 1000 жителей Северо-Кавказского федерального округа приходится лишь 11 мест в коллективных средствах размещения, что ниже, чем в среднем по РФ (14,7). Кроме того, по оценкам экспертов, одной из проблем индустрии гостеприимства на Северном-Кавказе является нехватка объектов проживания люкс-класса [8; 9].

По данным Росстата, рисунок 9, следует, что за период распространения пандемии коронавируса в России сформировался интерес к продолжительным путешествиям по стране вне зависимости от сезона. К

2021 году средняя продолжительность пребывания граждан в КСР свидетельствует о готовности россиян к более длительным поездкам и отдыху в регионах Северного Кавказа. Следует отметить, что доходы от развития сферы туризма для экономики округа напрямую зависят от времени нахождения на территории туристов и потраченных ими денежных сумм. Средняя продолжительность пребывания отдыхающих в округе составила в среднем 7 дней, что свидетельствует о заинтересованности в продолжительном отдыхе на территории макрорегиона.

Таблица 4. Индексы туристской инфраструктуры средств размещения

Table 4. Indices of tourist infrastructure of accommodation facilities

	Число мест для размещения туристов в расчете на 1000 постоянных жителей. Индекс Беретже-Деферта Number of tourist accommodation places per 1000 permanent residents - Beretger-Defert Index	Число туристов, остановившихся в средствах размещения, в расчете на 1 кв. км территории Индекс Деферта Number of tourists staying in accommodation facilities per 1 sq. km of territory Defert index	Число туристов, остановившихся в средствах размещения, в расчете на 1000 постоянных жителей Индекс Шнайдера Number of tourists staying in accommodation facilities per 1000 permanent residents Schneider Index	Число мест для размещения туристов в расчете на 1 кв. км Number of places to accommodate tourists per 1 sq.
СКФО / SCFD	11,33	14,47	241,59	0,678
РД / RD	8,09	4,94	77,34	0,517
РИ / RI	2,46	7,68	54,42	0,347
КБР / KBR	16,79	24,57	339,21	1,216
КЧР / KChR	25,49	15,42	470,11	0,837
РСОА / RSOA	7,42	27,57	323,39	0,632
ЧР / ChR	3,73	11,10	117,08	0,354
СК / SR	17,47	19,09	436,81	0,763
средние значения в странах ЕС [7] average values in EU countries [7]	67,8	295,60	1120,35	13,10

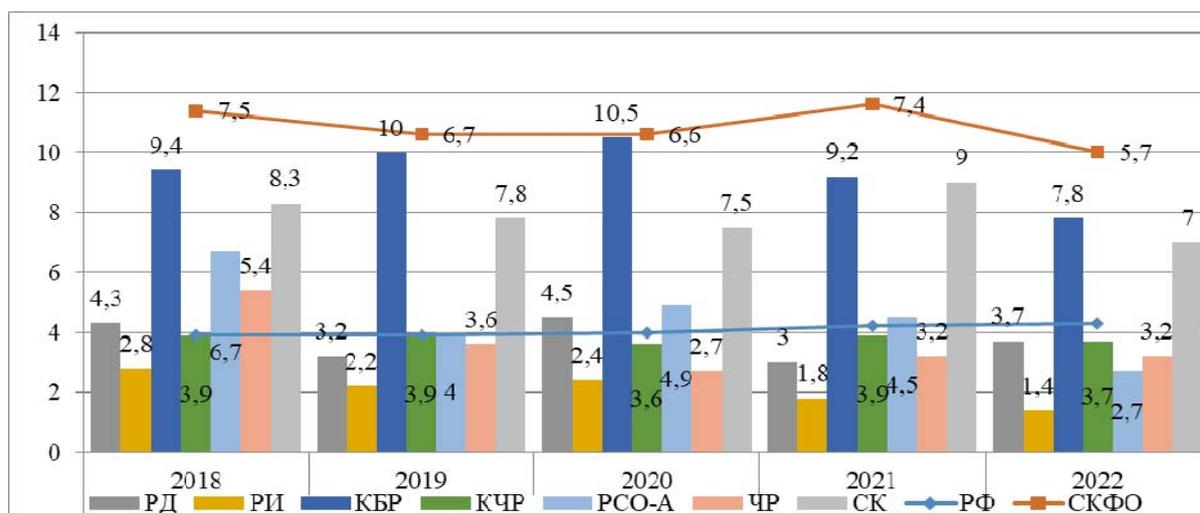


Рисунок 9. Средняя продолжительность пребывания граждан в КСР, дней [2]

Figure 9. Average length of stay of citizens in collective accommodation facilities, days [2]

Показателем, позволяющим оценить эффективность работы коллективных средств размещения и оказывающим непосредственное влияние на экономику территории туристской дестинации, является их доходность. Доходы от предоставляемых услуг коллек-

тивных средств размещения, гостиниц и аналогичных от предоставления ими платных услуг в субъектах СКФО, таблица 5, показывают тенденцию на увеличение объемов.

Таблица 5. Доходы коллективных средств размещения и гостиниц от предоставляемых услуг в субъектах СКФО, млн. руб.**Table 5.** Income of collective accommodation facilities and hotels from services provided in regions of the North Caucasian Federal District, million rubles

	Доходы коллективных средств размещения и гостиниц, млн.руб. Income of collective accommodation facilities and hotels, million rubles.			
	2019	2020	2021	2022
СКФО / SCFD	30636,7	25911,9	34183,1	43862,4
РД / RD	2458,8	2022,4	3319,5	5674,4
РИ / RI	14,03	11,31	12,8	138,4
КБР / KBR	1114,1	732,5	1232,1	1618,1
КЧР / KChR	631,2	594,5	807,4	1026,7
РСОА / RSOA	573,7	339,9	485,8	785,7
ЧР / ChR	764,3	770,1	929,4	1343,0
СК / SR	25081,8	21441,2	27396,2	33276,1

Таким образом, можно сделать промежуточный вывод, что вследствие увеличения числа размещенных туристов, доходов коллективных средств размещения и практически стабильного состояния продолжительности пребывания за отчетные периоды можно говорить о том, что российский внутренний туризм сместился в сторону набирающего популярность Северного Кавказа. Данное направление по тем же показателям имеет положительную динамику и его следует развивать.

Положительная динамика основных статистических показателей последних лет свидетельствует о повышении привлекательности и конкурентоспособности СКФО как туристского направления. Мониторинг состояния сферы туризма требует дальнейшего совершенствования статистики туризма. Проведенный анализ статистических данных позволяет сделать вывод о переориентации туристских потоков из центральных районов России в регионы Северного Кавказа. Это приобретает особое значение в связи с возможностью диверсификации экономики субъектов СКФО за счет развития туризма. Значимость сферы туризма с позиции социально-экономического развития Северо-Кавказского округа подтверждается в принятой «Стратегии развития туризма на территории СКФО до 2035 года» [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статистика последних лет отражает устойчивый спрос и востребованность туров на Северный Кавказ, в связи с этим перед руководством национальных республик возникает необходимость принятия программных мероприятий и мер поддержки, направленных на популяризацию интереса к макрорегиону как туристической дестинации и как следствие увеличение притока туристов.

Анализ динамики числа коллективных и аналогичных средств размещения в регионах Северного Кавказа за период с 2010 по 2022 гг. свидетельствует об их росте в 2,6 раза. Несмотря на различные санкции, увеличение объемов туристического потока активизировало инвестиционную деятельность в секторе индустрии гостеприимства. В 2022 году положительная динамика роста числа объектов размещения и востребованности средств размещения в Северо-Кавказском федеральном округе достигла +41 % по сравнению с доковидным периодом.

Такие быстрые темпы роста объясняются рядом причин. К ним относятся:

- популяризация и доступность внутреннего туризма и путешествий с использованием в качестве объектов размещения КСР и аналогичных им объекты проживания;

- перенаправленность основной части выездных туристических потоков на внутрироссийское направление;

- оживление системы санаторно-курортного отдыха на фоне активизации внутреннего туризма;

- появление и активное развитие неотельных средств размещения, а также малых форм и эконом-класса. По данным Яндекса в летний сезон на 12 % выросли запросы бронирования на неотельные средства размещения, что свидетельствует о том, что у данного сегмента есть свои потребители и свой потенциал.

Таким образом, растущая динамика числа объектов размещения и численности лиц, воспользовавшихся их услугами, свидетельствует о привлекательности региона, как для потенциальных туристов, так и для занятых в туристическом бизнесе.

Несмотря на имеющийся огромный потенциал и уникальность туристско-рекреационных ресурсов проблемами, препятствующими развитию туристической отрасли в СКФО, все еще остаются ограниченный уровень продвижения имиджа туристских дестинаций и низкая информированность потенциальных туристов о возможностях отдыха в национальных республиках, недостаточный уровень развития туристской инфраструктуры и нехватка квалифицированного персонала в индустрии туризма и гостеприимства, и др. [11].

Вместе с тем, следует отметить, что в ближайшем будущем в связи с закрытием внешних границ устойчивый спрос россиян на отдых внутри страны будет сохранен. Регионы СКФО обладают высоким потенциалом в развитии этнографического туризма. Продвижение данного направления будет способствовать развитию народных художественных промыслов, как очагов местной этнокультуры, обеспечит рабочие места и самозанятость населения, а также будет способствовать вовлечению сельских территорий в развитие экономики региона путем стимулирования производителей местной продукции. Этнотуризм предполагает знакомство с подлинной аутентичной жизнью местных жителей в местах их традиционного обитания. Такой категории туристов хочется на себе ощутить жизнь настоящих горцев, узнать их обычаи и пожить в традиционных жилищах. А для этого в горах Кавказа нужны небольшие гостевые дома или этноотели стилизованные под традиционные

жилища горцев. Развитие этнографического туризма способствует формированию в сельской местности нового типа мини-гостиниц – этноотелей, этно-домов, глэмпингов и др. с качественным набором предоставляющих услуг. Это позволит небольшим группам туристов познакомиться с самобытной культурой, традициями и обычаями народов Северного Кавказа. Содействие развитию сферы туризма в таком направлении будет способствовать наращиванию притока туристов, стимуляции предпринимательской активности местного населения в сельских районах и созданию новых рабочих мест в сопряженных отраслях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основные сегменты внутреннего туризма Северного Кавказа в 2020 // Федеральное агентство по туризму. URL: <https://tourism.gov.ru> (дата обращения: 12.04.2023)
2. Федеральная служба государственной статистики. ЕМИСС. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/31560> (дата обращения: 05.09.2023)
3. Средняя продолжительность пребывания туристов в КСР по округам РФ. Федеральная служба государственной статистики. URL: <http://bi.gks.ru/biportal/contourbi.jsp?allsol=1&solution=Dashboard> (дата обращения: 20.10.2023)
4. Национальный туристический рейтинг России. URL: <https://russia-rating.ru/info/21283.html> (дата обращения: 17.10.2023)
5. Комлева Н.С., Солдатова Н.С. Оценка стратегического потенциала развития индустрии гостеприимства и туризма Республики Карелия // Вестник Волжского университета им. Татищева В.Н. 2015. N 9. С. 18–27.
6. Смирнов С.Н. Развитие и экономические результаты использования инфраструктуры туризма // Экономические и социальные проблемы России. 2020. N 4(44). С. 111–120. URL: <http://inion.ru/ru/publishing/prochie-nauchnye-zhurnaly/ekonomicheskie-i-sotsialnye-problemy-rossii/arkhiv/2020-4/razvitie-i-ekonomicheskie-rezultaty-ispolzovaniia-infrastruktury-turizma/> (дата обращения: 20.06.2023)
7. Murphy P. The Destination Product and its Impact on Traveller Perceptions / Murphy P., Pritchard M.P., Smith B. // *Tourism Management*. 2000. V. 21. Iss. 1. P. 43–52.
8. Туриндустрия через призму драйверов и барьеров бизнеса // Центр стратегических разработок. URL: <https://www.csr.ru/ru/publications/turindustriya-cherez-prizmu-drayverov-i-barerov-biznesa/> (дата обращения: 21.06.2023)
9. Туризм в Российской Федерации: возможности для импортозамещения / Ускова Т.В., Егоров В.К., Леонидова Е.Г. // Проблемы развития территории. 2016. N 4(84). С. 32–46.
10. Стратегия развития туризма на территории Северо-Кавказского федерального округа до 2035. URL: <https://docs.cntd.ru/document/553884081?marker/=6580IP> (дата обращения: 19.08.2023)
11. Andrades L., Dimanche F. Destination Competitiveness and Tourism Development in Russia: Issues and Challenges

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Лейла Ш. Ахмедова и Зарема И. Солтанмурадова собрали статистический материал. Рената Г. Дандамаева рассчитала значения туристских инфраструктурных

// *Tourism Management*. 2017. V. 62. P. 360–376. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2017.05.008>

REFERENCES

1. *Osnovnye segmenty vnutrennego turizma Severnogo Kavkaza v 2020* [The main segments of domestic tourism in the North Caucasus in 2020]. Available at: <https://tourism.gov.ru> (accessed 12.04.2023)
2. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki. EMISS* [Federal State Statistics Service. EMISS] Available at: <https://www.fedstat.ru/indicator/31560> (accessed 05.09.2023)
3. *Srednyaya prodolzhitel'nost' prebyvaniya turistov v KSR po okrugam RF* [Average length of stay of tourists in the collective accommodation facilities by districts of the Russian Federation]. Available at: <http://bi.gks.ru/biportal/contourbi.jsp?allsol=1&solution=Dashboard> (accessed 20.10.2023)
4. *Natsional'nyi turisticheskii reiting Rossii* [National tourist rating of Russia]. Available at: <https://russia-rating.ru/info/21283.html> (accessed 17.10.2023)
5. Komleva N.S., Soldatova N.S. Assessment of the strategic potential of development of the hospitality and tourism industry of the Republic of Karelia. *Vestnik Volzhskogo universiteta im. Tatishcheva V.N.* [Bulletin of the Volga University named after Tatishcheva V.N.]. 2015, no. 9, pp. 18–27. (In Russian)
6. Smirnov S.N. Development and economic results of using tourism infrastructure. *Ekonomicheskie i sotsial'nye problemy Rossii* [Economic and social problems of Russia]. 2020, no. 4(44), pp. 111–120. (In Russian) Available at: <http://inion.ru/ru/publishing/prochie-nauchnye-zhurnaly/ekonomicheskie-i-sotsialnye-problemy-rossii/arkhiv/2020-4/razvitie-i-ekonomicheskie-rezultaty-ispolzovaniia-infrastruktury-turizma/> (accessed 20.06.2023)
7. Murphy P., Pritchard M.P., Smith B., eds. Destination Product and its Impact on Traveler Perceptions. *Tourism Management*. 2000, vol. 21, iss. 1, pp. 43–52.
8. *Turindustriya cherez prizmu drayverov i bar'erov biznesa* [Tourism industry through the prism of business drivers and barriers]. Available at: <https://www.csr.ru/ru/publications/turindustriya-cherez-prizmu-drayverov-i-barerov-biznesa/> (accessed 21.06.2023)
9. Uskova T.V., Egorov V.K., Leonidova E.G. Tourism in the Russian Federation: opportunities for import substitution. *Problemy razvitiya territorii* [Problems of territory development]. 2016, no. 4(84), pp. 32–46. (In Russian)
10. *Strategiya razvitiya turizma na territorii Severo-Kavkazskogo federal'nogo okruga do 2035* [Strategy for the development of tourism in the North Caucasus Federal District until 2035]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/553884081?marker/=6580IP> (accessed 19.08.2023)
11. Andrades L., Dimanche F. Destination Competitiveness and Tourism Development in Russia: Issues and Challenges. *Tourism Management*, 2017, vol. 62, pp. 360–376. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2017.05.008>

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Leila Sh. Akhmedova and Zarema I. Soltanmuradova collected statistical material. Renata G. Dandamaeva calculated values of tourism infrastructure indices;

индексов. Гаджимурад И. Идзиев проанализировал данные, написал рукопись. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

Gadzhimurad I. Idziev analysed the data and wrote the manuscript. All authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Лейла Ш. Ахмедова / Leila Sh. Akhmedova <https://orcid.org/0000-0003-1347-1429>

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

Рената Г. Дандамаева / Renata G. Dandamaeva <https://orcid.org/0009-0009-6579-7579>

Гаджимурад И. Идзиев / Gadzhimurad I. Idziev <https://orcid.org/0000-0002-0109-3048>

Original article / Оригинальная статья

УДК 338.484.6

DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-11



An investigation into the effect of Coronavirus-2019 (SARS-CoV-2) on active transportation as an opportunity to develop a sustainable tourist destination in the post-pandemic era with an emphasis on the local community (Case study: Dorood City, Lorestan Province, Iran)

Somayeh S. Hossieni¹, Yones Gholami², Hengame Dolvand³ and Zagir V. Ataev^{4,5,6,7}¹University of Isfahan, Isfahan, Iran²University of Kashan, Kashan, Iran³University of Ahvaz, Ahvaz, Iran⁴Dagestan Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia⁵R. Gamzatov Dagestan State Pedagogical University, Makhachkala, Russia⁶Dagestan State Medical University, Makhachkala, Russia⁷Kabardino-Balkar Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Nalchik, Russia

Principal contact

Somayeh S. Hosseini, Ph.D. Geography (Tourism),
Assistant Professor, Faculty of Geographical
Sciences and Planning, University of Isfahan,
Azadi Square, Isfahan, Iran, 8174673441.
Tel. +989138711684

Email ss.hosseini@geo.ui.ac.irORCID <https://orcid.org/0000-0002-9043-697X>

How to cite this article

Hossieni S.S., Gholami Y., Dolvand H., Ataev Z.V. An investigation into the effect of Coronavirus-2019 (SARS-CoV-2) on active transportation as an opportunity to develop a sustainable tourist destination in the post-pandemic era with an emphasis on the local community (Case study: Dorood City, Lorestan Province, Iran). *South of Russia: ecology, development*. 2024; 19(2):117-130. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-11

Received 2 March 2024

Revised 18 April 2024

Accepted 26 April 2024

Abstract

The aim of this study is structural modeling of the impact of the coronavirus pandemic on active post-pandemic transport in Dorood City, Iran, emphasising both tourism and development of a long-term tourist market through the promotion of low-carbon travel markets.

The research tool was a researcher-made questionnaire randomly distributed among citizens of Dorood City. The impact of various factors, including economic, social, medical, and accessibility, on active transportation during the pandemic and its impact on transportation in the post-COVID-19 era has been investigated.

The social factor has the highest factor load with a weight of 0.94. In contrast, with the lowest factor load i.e., 0.60, the economic factor proved to have the least impact on the choice of active transportation. It was found that the variable of active transport use in the post-pandemic era with a factor load of 0.66 is the most influential factor, while the social consequences of the pandemic in the post-pandemic era with a factor load of 0.49 turned out to be the most significant. The least effective variable was found to occur in the post-pandemic era.

Active transport links during the pandemic in Dorood City with a regression coefficient of 0.77 had a statistically significant impact on the use of this type of transport in the post-pandemic period. This data can be incorporated in the transport development plan with an emphasis on active transfer as an effective option for the development of sustainable tourism.

Key Words

Coronavirus, pandemic, active transportation, post-pandemic, sustainable tourism, structural modelling.

Исследование влияния коронавируса на активный транспорт как возможности для устойчивого развития туристического направления в эпоху после COVID-19 с акцентом на местное сообщество (на примере города Доруд провинции Лорестан, Иран)

Сомайех С. Хоссейни¹, Йонес Голами², Хенгейм Долванд³, Загир В. Атаев^{4,5,6,7}

¹Исфаханский университет, Исфахан, Иран

²Кашанский университет, Кашан, Иран

³Ахвазский университет, Ахваз, Иран

⁴Дагестанский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Махачкала, Россия

⁵Дагестанский государственный педагогический университет им. Р. Гамзатова, Махачкала, Россия

⁶Дагестанский государственный медицинский университет, Махачкала, Россия

⁷Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Нальчик, Россия

Контактное лицо

Сомайех С. Хоссейни, кандидат географических наук (туризм), доцент, факультет географических наук и планирования, Исфаханский университет; 8174673441, Иран, Исфахан, площадь Азади. Тел. +989138711684

Email ss.hosseini@geo.ui.ac.ir

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9043-697X>

Формат цитирования

Хоссейни С.С., Голами Й., Долванд Х., Атаев З.В. Исследование влияния коронавируса на активный транспорт как возможности для устойчивого развития туристического направления в эпоху после COVID-19 с акцентом на местное сообщество (на примере города Доруд провинции Лорестан, Иран) // Юг России: экология, развитие. 2024. Т.19, N 2. С. 117-130. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-11

Получена 2 марта 2024 г.

Прошла рецензирование 18 апреля 2024 г.

Принята 26 апреля 2024 г.

Резюме

Целью данного исследования является структурное моделирование влияния коронавируса на активный транспорт в посткоронавирусный период в городе Доруд в Иране, с акцентом как на туризм, так и на развитие долгосрочного туристического рынка путем продвижения низкоуглеродных туристических рынков.

Исследование проводилось с использованием аналитико-описательного метода. Инструментом исследования была анкета, составленная исследователем и случайным образом распределенная среди жителей города Доруд. Было исследовано влияние различных факторов, включая экономические, социальные, медицинские и доступность, на активный транспорт во время этой эпидемии и его влияние на транспорт в эпоху после COVID-19. Кроме того, был разработан проект развития устойчивого туризма с акцентом на местное сообщество.

Социальный фактор имеет наибольшую факторную нагрузку с весовым показателем 0,94. Напротив, при наименьшей факторной нагрузке, т.е. 0,60, экономический фактор оказал наименьшее влияние на выбор активного вида транспорта. Было установлено, что переменная использования активного транспорта в эпоху после коронавируса с факторной нагрузкой 0,66 является наиболее влиятельным фактором, в то время как социальные последствия коронавируса с факторной нагрузкой 0,49 оказались наиболее значимыми. Наименее эффективная переменная приходится на период после коронавируса.

Активное транспортное сообщение во время эпидемии коронавируса в городе Доруд с коэффициентом регрессии 0,77 оказало статистически значимое влияние на использование этого вида транспорта в период после коронавируса. Это может быть включено в план развития транспорта с акцентом на активный трансфер как эффективный вариант развития устойчивого туризма.

Ключевые слова

Корона, активный транспорт, посткоронавирусный период, устойчивый туризм, структурное моделирование.

INTRODUCTION

COVID-19 the severe acute respiratory disease caused by the Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) [1]. Due to its high infectivity, it has affected communities and activities in a range of aspects, such as lifestyle and global travel. There has also been a sharp decrease in the demand for public transportation due to compliance with new standards of hygiene and cleanliness, accompanied by an increase in costs of construction of infrastructure. Within a few weeks, the emerging pandemic caused the biggest economic crisis in public transport services of the last few decades. On the other hand, the guidelines of the World Health Organisation encouraged active transportation for commuting during the pandemic [2], advising 'considering cycling or walking whenever possible' [3].

From the point of view of planning and transportation, walking and cycling (often called "non-motorized transportation" or "active transportation"), can be regarded as an important means of sustainability while providing various social, environmental, and economic benefits [4] for the local community. By reducing carbon emissions and congestion from the transportation sector and economic benefits such as saving fuel consumption and other costs related to transportation, walking and cycling provides a sustainable factor in destination tourism. Therefore, a focus on investment and the development of appropriate policies and programs are very important to in encouraging tourists and the local community towards active transportation [5].

Evidence shows that changing from passive to active transportation increases physical activity and reduces obesity, noise and air pollution, traffic injuries and social isolation [6]. The use of these active modes not only leads to health benefits such as higher heart and breathing fitness and other improved heart health indicators but also to other benefits including better mental health [7] for both tourists and local society. People should be encouraged to walk to strengthen health and mind [8]. Considering the social and environmental benefits of active transportation, one of the sustainable development goals of the United Nations until 2030 is to encourage this as an important element in establishing "safe, affordable, accessible and sustainable transportation systems for all" [9].

Due to the rapid spread of the pandemic and various measures to control it, transportation options changed with the use of a range of transportation modes with people becoming more inclined towards cycling and walking. Taking the above into account, the present study made an effort to investigate the effects of the coronavirus epidemic on the active transportation system in general and as an opportunity for the development of sustainable tourism in particular. On the other hand, in the case of Dorood City and environs, where the importance of development prospects in mountainous areas is a major consideration, a transportation system based on active modes can be considered the growing heart of strategic planning. On this basis, it is important to study the effects of the pandemic on active transportation in the post-pandemic era as guidance in the development of sustainable tourism strategies, with a particular focus on the mountainous environs of Dorood – an important Iranian natural attraction. Another objective is to investigate whether an active transportation system should contribute to the sustainability of active transportation in the long term or not.

LITERATURE REVIEW

Sustainable development became publicised in the late 1980s after the concept was presented at the Common Future Conference, which resulted in the Brundtland Report. Although this approach entered the tourism literature a little late, experts have paid this a lot of attention and have since acknowledged the role of sustainability factors in the tourism sector. Basic needs, improvement of living standards and better management of ecosystems are among the main goals of development [10]. Therefore, in sustainable development, the health of human and ecological systems has equal importance, which implies that both are dependent on each other [11]. In this regard, in 2016, the World Health Organization announced in the Shanghai Declaration that health is one of the most important factors and one of the most effective indicators of the successful sustainable development of any city as a tourist destination [12].

That is why focusing only on economic development has been seen to cause urban problems such as environmental pollution, traffic congestion, etc. [13], which have thus become one of the chief concerns in public health policies. In this context, sustainable urban mobility policies help considerably in the creation of healthy cities [14].

Transportation networks are one of the main components of urban communities [15]. As complex and important systems, they contribute to the proper functioning of societies and strengthen economic growth [16].

Hence, there is an inseparable relationship between transportation and tourism. Being of fundamental importance to the infrastructure of tourism, transportation always reflects the economic and spatial evolution of tourist destinations. It is also considered one of the main elements in promoting sustainability around the world [17].

Success in public transportation also depends on public understanding and support for viability in cities [18]. Globally, transportation systems are heavily dependent on private cars. Numerous studies by economists have shown that private car owners are highly dependent on their vehicles for journeys of any length [19].

Transportation activities are the second largest source of carbon dioxide emissions, thus improving sustainability in the transportation sector is crucial [20]. Proper transportation can contribute to urban residents' satisfaction with their urban environment by enabling high mobility and saving a much time for passengers [21]. With the worldwide spread of the coronavirus pandemic, transportation in small and medium cities has increasingly been drawn to active transportation.

Active transportation (AT) refers to all forms of human-powered transportation, such as walking and cycling [22]. Open-air, non-motorised transportation is inherently resistant to epidemic infectivity. Greater investment in such modes not only helps contain the spread of a virus which is aerosol-transmitted, but can also increase access to services and reduce pressure on overcrowded transportation systems in emergency scenarios [23]. To address the strategic goals of tourism destinations for the health of both tourists and residents, planners should pay attention to active transportation networks with special emphasis on cycling facilities and interconnection between existing infrastructures [24]. The promotion of active or manpower transportation through

appropriate policies, systems and environmental change is one of the main successful evidence-based strategies for increasing physical activity regardless of people's age, income, racial/ethnic background, ability or disability [25]. In particular, the potential of active transportation methods such as cycling and bicycling to reduce mortality and morbidity is now well established. However, these benefits have not yet been quantified in the context of a transition scenario articulating accurate and credible societal transitions towards carbon neutrality [26].

The movement towards "healthy cities" was first promoted in 1984 at the 2000 Toronto Health Summit. This meeting which was organised by the World Health Organization defined a healthy city as follows: a city that continuously expands popular policies and provides the physical and social environment should take steps that enable its people to mutually support each other to achieve all the goals of life and realize their potential [27]. A healthy city is, therefore, a sustainable city that interacts with its environment, economy, population, services, and space and realises prosperity and the expansion of those community resources that enable people to support each other in doing all things [28]. A healthy city is constantly creating and improving physical and social environments while expanding resources. The community enables people to support each other [29]. Healthy urban design is recognized as an essential issue that includes designing urban places to address health inequalities in society [30–32]. The agenda of healthy cities is better combined by relying on a wide spectrum of fields such as care, improvement of social inequalities and environmental justice, within the context of sustainable development [33]. The healthy city approach continuously endeavours to create or improve social and physical conditions and development of resources, and provides the possibility of correct and complete functioning for the maximum utilisation of human potential [34]. The concept of a healthy city in regard to post-epidemic city planning considers human health as the major priority. As a comprehensive issue, it depends on the increasing awareness of the impact of the global climate crisis on human destiny in the post-carbon future [35]. Active urban spaces and increased public spaces are part of the form and concept of a healthy city. Wider sidewalks and larger bicycle paths are characteristic of the need to pay more attention to the increase of public spaces by providing "green space" and "wide sidewalks" with the goal of maintaining physical distance. These are concepts that have been proposed in the theoretical literature and reliable sources [36; 37]. The idea of a healthy city in Iran was raised for the first time in November 1990 at the World Health Organisation conference in the Eastern Mediterranean region. This conference focused on the experiences of European regions and three cities, including Lahore, Alexandria, and Tehran were selected on a case-by-case basis. Finally, the idea of a healthy city which promotes health, urban planning, and decentralisation of governmental sectors towards inter-sectoral activity and social participation became transformed into the global movement of a healthy city [38].

There is prolific research documenting active transportation in combination with other forms of public transportation. In this regard, several research studies have also investigated the carbon emissions produced by tourism activities.

Glazener and Khreis [39] in their research refer to planning policies of the cities of Oslo, Paris, and Madrid directed at the reduction of the impacts of climate change. To reduce vehicle emissions and encourage walking and cycling, these cities ban cars from their city centres. In another study, Teuber and Sudeck [40] also showed the relationship between cycling and the perceived environment (for example, high traffic) as well as personal motivations and obstacles (for example, time-effort or weather conditions). In another article, Jamal et al. [41] analysed data from a survey of travelers in the city of Rajshahi, Bangladesh.

As these researchers have argued, it is important that the infrastructure of transportation services matches the convenience of people using a given type of transportation, although according to some other researchers, the expansion of active transportation requires some effort in building comprehensive monitoring systems [42]. Others believe that public resource assessment is a method for public participation in transport planning which can provide a fair scale from local and regional to multi-regional contexts using local planning evidence [43]. Some researchers have investigated the implementation and public reactions to active transportation programs in response to the coronavirus pandemic [44].

Buehler and Pucher [45] have investigated the impact of the pandemic on cycling using social, economic, and environmental indicators and have presented five reasons supporting the continued use of this type of transportation. In this regard, Nian et al. [46] also examined the impact of the pandemic on urban mobility during the post-pandemic period in large cities from the perspective of taxi travel and social vitality. The results showed that the number of taxi trips decreased drastically and that travel speed, travel time, and spatial distribution of taxi trips were significantly affected during the pandemic period.

MATERIALS AND METHODS

The present research is descriptive-analytical in terms of method and applied in terms of purpose. Data collection has been done using field research and one questionnaire which was randomly distributed in the areas of Dorood City. The statistical population of this research covers the city of Dorood, which had a population of 121,638 according to the 2015 census. The sample size was calculated using sample power software with a confidence level of 95 % and with a 5 % margin of error rate and by administering one-tailed test to 180 subjects. To explain and model the effects of structural equation modeling (SEM), which is a multivariate statistical analysis technique and a combination of factor analysis and multiple regression analysis, and to analyse structural relationships and the structural relationship between measured variables and the latent structures used, Amos software have been exploited. Cronbach's alpha test was used to measure the reliability of the research tool, which was taken separately for each main indicator.

As a measure of internal consistency, Cronbach alpha values of 0.7 or higher are considered as acceptable. In this research, in obtaining a Cronbach's alpha above 0.7, three indicators have acceptable internal consistency. In contrast, the other two indicators have a Cronbach's alpha less than 0.7 which are almost acceptable. This is because sometimes the large size of the sample decreases Cronbach's alpha value (Table 1).

Table 1. Cronbach's Alpha Reliability Test
Таблица 1. Альфа-тест надежности Кронбаха

Quest Questionnaire Reliability		
Надежность анкеты для проведения квеста надежности		
Name of variable Наименование переменной	Number of variables Количество переменных	Cronbach's alpha Альфа Кронбаха
Economical / Экономический	5	0/620
Social / Социальный	4	0/720
Health / Медицинский	4	0/664
Availability / Доступность	5	0/728
Post-corona / Посткоронавирусный период	4	0/779

Some 1,450 metres above sea level, the tourist city of Dorood is located in the Silakhor plain in the central Zagros mountain region. Dorood district lies in the east of Lorestan province with Dorood City its capital at its centre. With an area of 1326 square kilometres, the city occupies 4.7 % of the province. It is geographically located between 33°28'N 49°41'E. It is situated 86 km from Khorramabad. Dorood's population is 9.3 % of the total population of the province.

With an average annual rainfall of 670 mm, Dorood City has a temperate mountainous climate. In terms of tourism potential, this destination has unique natural attractions in its environs such as Gohar Lake and the Tut and Gorkesh recreation areas, Ty and Emarat recreation areas, the waterfall of Esper Valley and the Sarab Rudak promenade, among many other natural attractions.

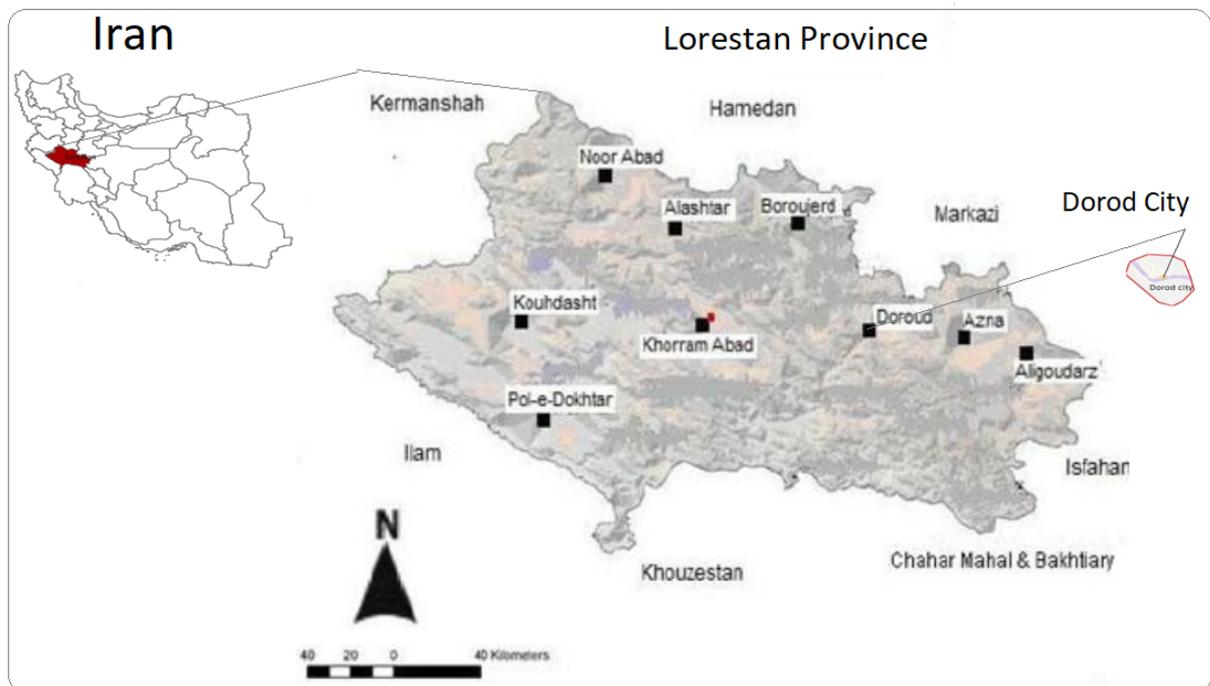


Figure 1. Geographical Map of Lorestan Province in Iran and Dorod City
Рисунок 1. Географическая карта провинции Лорестан в Иране и города Доруд

RESULTS & DISCUSSION

Based on the findings of the questionnaire, out of 180 respondents, 81 were male and 99 were female. Further, in terms of marital status, 114 respondents (i.e. 63.3 %) and 66 (i.e. 36.7 %) were married and single, respectively. By education status, a primary education up to a bachelor's degree with a frequency of 12 (i.e., 7.3 %) had the lowest frequency while a bachelor's degree with a frequency of 67 (i.e., 37.2 %) had the highest frequency. A diploma degree with a frequency percentage of 26.7 %, a bachelor's degree with a frequency percentage of 18.3 %, and a master's degree with a frequency percentage of 11.1 % occupied the next ranks, in order.

By employment or occupation, housewives with a total frequency of 61 (i.e., 33.9 %) enjoyed the first rank while retirees had the lowest rank with a frequency of 11 (i.e., 6.1 %).

A structural equation modeling has been used for the coronavirus pandemic for active transport in the post-epidemic period in Dorood. The purpose of this study was to identify the most important variables that are effective in creating a relationship between two indicators. Therefore, according to the theoretical foundations of the research, the second-order factor model of the pandemic was adjusted based on four hidden factors, including economic, social, health, access, and the first-order post-pandemic model. Fig. 2 shows the final model of the effect of the pandemic on active post-pandemic transport in Dorood neighborhoods. Findings from structural equation modeling clarified which indicator is more significant and entails more obvious effects than the other specified indicators. In the structural model of research, the pandemic as an independent variable affects post-pandemic as a dependent variable. The second-order

model of the pandemic consisted of 18 overt variables and 4 latent variables. The findings of the second-order factor model showed that with a weight of 0.94, the social factor had the highest factor load compared to other indicators. After that, the health factor with a factor loading of 0.93, the access factor with a factor loading of 0.92, and the economic factor with a factor loading of 0.60 occupied the next ranks. It has also been found that among the economic factor variables during the coronavirus epidemic, the impact of personal constraints (lack of access to a car, financial issues, etc.) on the decision to use the type of transportation had the highest factor loading with a factor loading of 0.63. Among the social variables, the impact of corona prevalence on social activities with a factor loading

of 0.60 had the highest factor weight and among the access variables, the importance of short travel routes in choosing the type of transport with a factor loading of 0.63 had the highest factor load. Finally, among the variables of health practice, the degree of avoidance of the risk of coronavirus infection through using active transport had the greatest impact on the model with a factor load of 0.71. Findings of the post-pandemic model, which were developed based on 4 variables, indicated that the variable rate of active transport use in the post-pandemic period was the most effective factor with a factor load of 0.66. With a factor loading of 0.49, the amount of the pandemic's social effects in the post-pandemic period was proved to be the least effective variable.

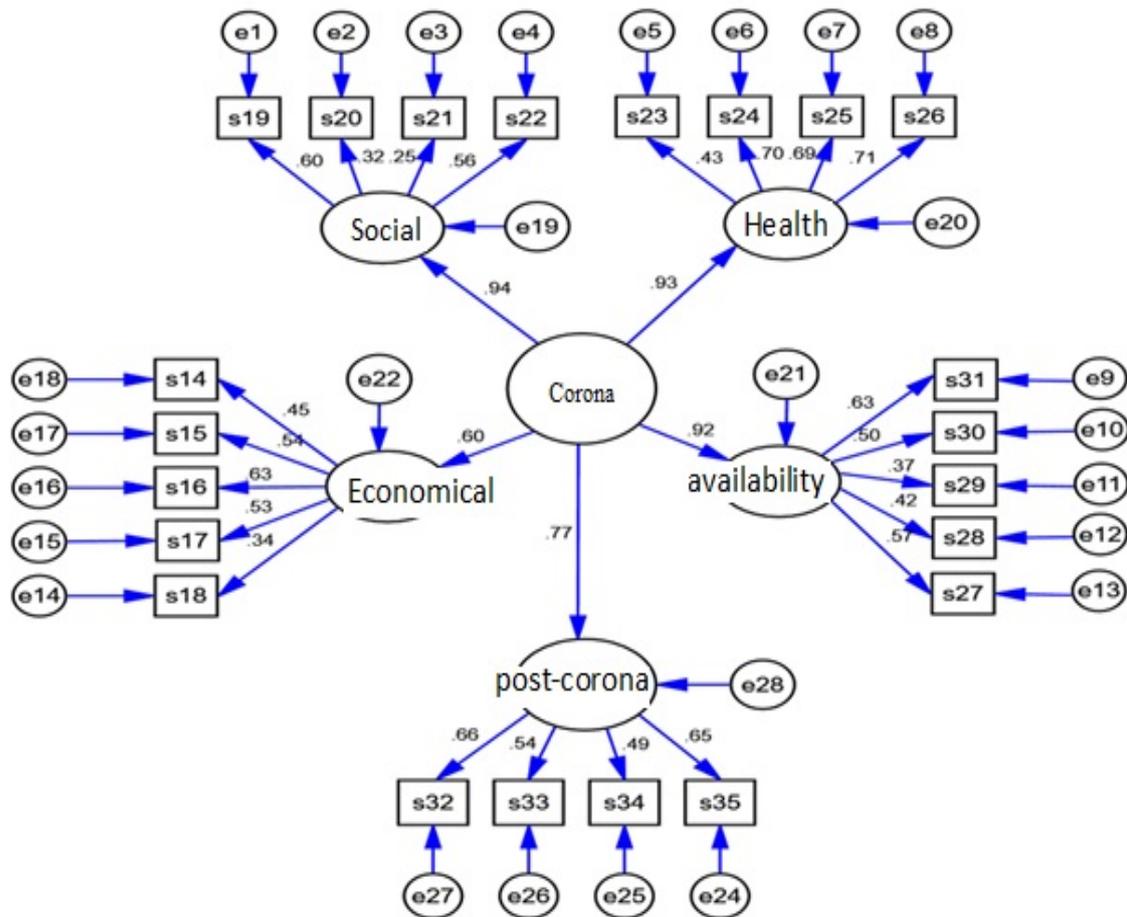


Figure 2. Structural model of the impact of the pandemic on active transport in the post-pandemic period in Dorood City
Рисунок 2. Структурная модель влияния короны на активный транспорт в посткоронавирусный период в Доруде

As per Table 2 below, the probability value in all model relationships was found to be zero. The results showed that the available parameters had a significant difference with a value of zero. The level of significance in all relationships was less than 0.05, indicating that the experimental data supported the research model. As a result, according to these two tables, the positive and significant effect of the pandemic provides positive evidence on the confirmation of the research hypothesis and the rejection of the bile hypothesis.

first indicator examined in this model was the NPAR index, whose default model was 49 which showed that the researcher did not easily spend degrees of freedom in developing the model and this situation is acceptable. The chi-square index was found to be 436.916. Due to obtaining a significance level of 0.000, the desirability of the results was confirmed. Further, as the degree of freedom was close to the independent value and away from zero, it can be considered a desirable model. The relative chi-square value, as one of the important indicators of the model, was 0.127, which indicated a good and favorable situation for the model. As the most important index in absolute fit, RMSEA index was found to be 0.079, confirming the desirability of the model.

Table 3 presents the results of the evaluation of the research model using the fit indices of structural models. The existence of an appropriate model fit index confirmed a significant and appropriate relationship between the research field data and the existing structural model. The

Table 2. Weighted regression of default model
Таблица 2. Взвешенная регрессия модели по умолчанию

Parameter Параметр	Code Код	Name of variable Название переменной	Non-standard estimation Нестандартная оценка	The standard error Стандартная ошибка	Critical ratio Критическое соотношение	The significance level Уровень значимости
Economic Экономический	14	The impact of covid on economic activities <i>Влияние covid на экономическую деятельность</i>	2/420	0/760	3/185	0/001
	15	The impact of using active transportation on the household economy <i>Влияние использования активного транспорта на экономику домашнего хозяйства</i>	3/251	0/961	3/382	***
	16	The impact of personal restrictions (lack of access to a car, financial issues, etc.) on the decision to use the type of transport <i>Влияние личных ограничений (отсутствие доступа к автомобилю, финансовые проблемы и т.д.) на решение воспользоваться данным видом транспорта</i>	3/760	1/069	3/516	
	17	The probability of using active transportation due to financial problems <i>Вероятность использования активного транспорта из-за финансовых проблем</i>	3/178	0/945	3/364	
	18	The extent to which the city has special infrastructure for active transportation <i>Степень, в которой город располагает специальной инфраструктурой для активного передвижения</i>	1/000			
Social Социальный	19	The effect of corona outbreak on social activities <i>Влияние вспышки коронавируса на социальную активность</i>	1/000			
	20	The effect of friendship and communication with neighbors in choosing the type of transportation <i>Влияние дружбы и общения с соседями на выбор вида транспорта</i>	0/643	0/177	3/624	
	21	Environmental safety in cycling or walking <i>Экологическая безопасность при езде на велосипеде или ходьбе пешком</i>	0/463	0/158	2/924	0/003

Health Медицинский	22	Increased use of active transport after the onset of the corona epidemic <i>Широкое использование активного транспорта после начала эпидемии коронавируса</i>	0/892	0/156	5/726	***
	23	The amount of help to increase health after using active transportation during the coronavirus epidemic <i>Объем помощи для укрепления здоровья после активного использования транспорта во время эпидемии коронавируса</i>	1/000			
	24	Prevention of coronary heart disease after the use of active transport during the epidemic <i>Профилактика ишемической болезни сердца после активного использования транспорта во время эпидемии</i>	1/620	0/311	5/202	***
	25	The degree of pleasant feeling after using active transport during the coronavirus epidemic <i>Степень приятных ощущений после активного использования транспорта во время эпидемии коронавируса</i>	1/738	0/336	5/181	***
	26	The risk of coronavirus infection through active transportation <i>Риск заражения коронавирусом при активной транспортировке</i>	1/600	0/306	5/232	***
Availability Доступность	27	Increase travel capacity in required locations using active transportation access <i>Увеличение пропускной способности в необходимых местах, используя активный транспортный доступ</i>	0/851	0/142	4/005	***
	28	The ability to move without having GPS technology <i>Возможность передвижения без использования ГИС-технологии</i>	0/726	0/154	4/714	***
	29	Access to hiking trails in your neighborhood <i>Доступ к пешеходным маршрутам в вашем районе</i>	0/577	0/138	4/175	***
	30	The importance of the purpose of the destination	0/759	0/140	5/427	***

		and its impact on the choice of type of transport <i>Важность цели назначения и ее влияние на выбор вида транспорта</i>				
	31	The importance of short travel commissions in choosing the type of transport <i>Важность коротких командировочных расходов при выборе вида транспорта</i>	1/000			
Post corona Посткоронавирусный период	32	The rate use of active transport in the post-corona era <i>Уровень использования активного транспорта в эпоху после коронации</i>	1/031	0/158	6/538	***
	33	The economic impact of the coronavirus in the post-corona period <i>Экономические последствия коронавируса в посткоронавирусный период</i>	0/906	0/160	5/666	***
	34	The impact of corona social effects in the post-corona period <i>Социальные последствия коронавируса в посткоронавирусный период</i>	0/761	0/144	5/284	***
	35	The importance of designing active transport routes in the post-corona era <i>Важность проектирования активных транспортных маршрутов в эпоху после коронавируса</i>	1/000			
		Corona post corona <i>Коронавирусный и посткоронавирусный периоды</i>	1/090	0/243	4/483	***

The modified fit of goodness index was found to be 0.781 that the data which meant that the data had an acceptable fit for the model. The normalized Bentler-Bonett index of 0.627 was also somewhat desirable. The standardized fitting index, which was found to be 0.555, had a favorable status. Also, the probability of fit indices and the economical adaptive fit index had an acceptable status.

The investigation of the effects of the pandemic from different aspects, especially from that of active transportation and its relationship with the sustainability of the tourist destination in the post-pandemic era, which is emphasised in this research, is a new issue. Hence, it was difficult to compare the results of the research with similar studies. However, there are good reasons for governments to promote and support the expansion and improvement

of active transportation infrastructure, programs, and policies (cycling and walking) at all levels.

In this regard, cycling is perhaps the most sustainable mode of urban travel, because it is possible not only for short trips but also for medium and very long-distance trips that cannot be covered by walking [47]. According to the results of the research, there has been an increase in active transportation during the pandemic, which will probably continue in the coming years in tourist destinations. Also, in this research, the level of safety in the environment while riding a bike or walking causes some transportation users to turn to cycling and walking as viable mobility alternatives.

As reported in the studies by Buehler and Pucher [47] and Furth [48], this increase is due to reasons such as the expansion and improvement of safer cycling

infrastructures. This increase will probably continue as facilities improve. In this research, the effect of the pandemic on tourism was investigated using four indicators (social, economic, health, and access). The obtained results were found to be similar to the results of Buehler [47] with the health index is also a main pillar in the era.

A pandemic drives society towards the use of active transportation. In the same vein, the results of this

research show that active transportation reduces pollution and improves the urban environment, which is in line with the research results. The results of this research overlap because transportation systems designed to accommodate multimodal mobility patterns can potentially improve people's health and well-being both directly (such as increased physical activity) and indirectly (such as better air quality).

Table 3. Status of goodness indicators of research model fit

Таблица 3. Состояние показателей соответствия исследовательской модели

Index name Наименование индекса	Abbreviation Сокращение	Assumption Предположение	Saturation Насыщенность	Independed Независимость
Released parameters for model development <i>Обнародованные параметры для разработки модели</i>	NPAR	49	353	22
Xi Du (Kai Square) <i>Xi Du (площадь Кай)</i>	CMIN	916/433	0/000	832/1164
Degrees of freedom <i>Степень свободы</i>	DF	204	0	231
Significance level <i>Уровень значимости</i>	P	0/000		0/000
Relative chi-square (normalized) <i>Относительный chi-квадрат (нормализованный)</i>	CMIN/DF	127/0		5/043
Fit goodness index <i>Индекс соответствия требованиям</i>	GFI	0/823	1/000	0/461
Modified fit goodness index <i>Модифицированный индекс качества подгонки</i>	AGFI	0/781		0/409
Bentler Boyte Normalized Index <i>Нормализованный индекс Bentley Boyte</i>	NFI	0/627	1/000	0/000
Adaptive Fit Index <i>Индекс адаптивной подгонки</i>	CFI	0/754	1/000	0/000
Normalized fitting index <i>Нормализованный индекс подгонки</i>	PNFI	0/554	0/000	0/000
Affordable Adaptive Fit Index <i>Доступный индекс адаптивной подгонки</i>	PCFI	0/666	0/000	0/000
The root of the mean squares of the estimation error <i>Корень из среднеквадратичной ошибки оценки</i>	RMSEA	0/079		0/150
Probability of proximity <i>Вероятность близости</i>	PCLOSE	0/000		0/000

This is mainly because of the emphasis on strategies to reduce car use for the sake of sustainable development. Therefore, clean air and active transport overlap significantly in the case of simultaneous implementation of integrated policy packages (i.e., reducing climate change, reducing vehicle emissions, and increasing walking and cycling).

CONCLUSION

With the wide ranging outbreak of the pandemic in various countries around the world, patterns of transportation use are changing. These changes have created new challenges; hence, it has drawn the attention of researchers to the field of active transportation, especially in small and medium-sized cities as one of the tourist destinations. The pandemic has raised the need for researchers to study the effects of active post-pandemic transport indicators on people's lives and thus may affect cities in the future.

In the process of concluding this research, the research hypotheses have been confirmed. In the structural equation model that examines the effect of the pandemic on active transport in the post-pandemic period, the results show that the pandemic with a factor of 0.77 will have a large impact on the post-pandemic period in the city of Dorood. Four indicators have been studied in this study with the results showing that all four indicators overlap with active transportation. The social index, which is the most effective index in this research, is of great importance. Due to the sharp decline in social activities during the pandemic, the use of active transportation became an option to reduce the negative effects of the pandemic on social behaviors. As a key element in the epidemic of society, the health index leads to the use of active transportation. The use of this transportation not only contributes to social distancing but also promotes the health of users and ultimately leads cities to healthier

cities. Support for active transport is a clarion call to the need of special dedicated routes in cities,

While creating these routes in small and medium cities without GPS technology is more successful, special transportation routes also ensure the safety of users of such routes in larger urban environments. Finally, the pandemic severely damaged the household economy of Dorood City. Thus active transportation can also be a way to reduce household costs. Support for this type of transportation is subject to decisions made for specific subsystems of this type of transportation.

REFERENCES

- Huang J., Wang H., Fan M., Zhuo A., Sun Y., Li Y. Understanding the impact of the COVID-19 pandemic on transportation-related behaviors with human mobility data. *Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, 2020, pp. 3443–3450. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.12264>
- Tirachini A., Cats O. COVID-19 and public transportation: Current assessment, prospects, and research needs. *Journal of Public Transportation*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 1–21. DOI: 10.5038/2375-0901.22.1.1
- Fische J., Winters M. COVID-19 street reallocation in mid-sized Canadian cities: socio-spatial equity patterns. *Canadian Journal of Public Health*, 2021, vol. 112, no. 3, pp. 376–390. DOI: 10.17269/s41997-020-00467-3
- Kim E.J., Kim J., Kim H. Neighborhood walkability and active transportation: a correlation study in leisure and shopping purposes. *International journal of environmental research and public health*, 2020, vol. 17, no. 7, article id: 2178. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072178>
- Jamal S., Mohiuddin H., Paez A. How do the perceptions of neighborhood conditions impact active transportation? A study in Rajshahi, Bangladesh. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, no. 87, article id:102525. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102525>
- Passi-Solar Á., Margozzini P., Cortinez-O’Ryan A., Muñoz J.C., Mindell J.S. Nutritional and metabolic benefits associated with active and public transport: Results from the Chilean National Health Survey, ENS 2016–2017. *Journal of Transport & Health*, 2020, no. 17, article id: 100819. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2019.100819>
- González S.A., Aubert S., Barnes J.D., Larouche R., Tremblay M.S. Profiles of active transportation among children and adolescents in the global matrix 3.0 initiative: A 49-country comparison. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, vol. 17, no. 16, article id: 5997. DOI: 10.3390/ijerph17165997
- Mogaji E. Impact of COVID-19 on transportation in Lagos, Nigeria. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2020, no. 6, article id: 100154. DOI: 10.1016/j.trip.2020.100154
- Aguilar-Farias N., Cortinez-O’Ryan A., Chandia-Poblete D., Heesch K.C. Prevalence and correlates of transport cycling in Chile: results from 2014 to 2015 national surveys. *Journal of Transport & Health*, 2019, no. 14, article id: 100594. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2019.100594>
- Bitaab N., Heidari F., Khadivi G.N. Investigating Strategies for Creating Healthy Cities with Sustainable Development Approach. *European Journal of Research*, 2018, no. 1, pp. 34–44. DOI: 10.26739/2521-3253-2018-1-4-4
- Darmajanti L., Tampi D.M., Fitrinitia I.S. Sustainable Urban Development: Building Healthy Cities in Indonesia. *55th ISOCARP World Planning Congress*, 2021. DOI:10.47472/MBXO5435
- Giles-Corti B., Lowe M., Arundel J. Achieving the SDGs: Evaluating indicators to be used to benchmark and monitor progress towards creating healthy and sustainable cities. *Health Policy*, 2020, vol. 124, no. 6, pp. 581–590. <https://doi.org/10.1016/j.healthpol.2019.03.001>
- Yan D., Wu S., Zhou S., Li F., Wang Y. Healthy city development for Chinese cities under dramatic imbalance: evidence from 258 cities. *Sustainable Cities and Society*, 2021, no. 74, article id: 103157. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103157>
- Louro A., Marques da Costa N., Marques da Costa E. Sustainable urban mobility policies as a path to healthy cities – The case study of LMA, Portugal. *Sustainability*, 2019, vol. 11, no. 10, article id: 2929. <https://doi.org/10.3390/su11102929>
- Ilbeigi M. Statistical process control for analyzing resilience of transportation networks. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2019, no. 33, pp. 155–161. DOI:10.1016/j.ijdrr.2018.10.002
- Vajjarapu H., Verma A., Gulzar S. Adaptation Policy Framework for Climate Change Impacts on Transportation Sector in Developing Countries. *Transportation in Developing Economies*, 2019, vol. 5, no. 1. <https://doi.org/10.1007/s40890-019-0071-y>
- Tran N.H., Yang S.H., Huang T. Comparative analysis of traffic-and-transportation-planning-related indicators in sustainable transportation infrastructure rating systems. *International journal of sustainable transportation*, 2021, vol. 15, no. 3, pp. 203–216. <https://doi.org/10.1080/15568318.2020.1722868>
- Morrison D., Shaffer A., Lewis R., Lewman H. Framing Livability: A Strategic and Creative Communication Approach to Improving Support for Public Transportation in Oregon. *PDXScholar*, 2018. DOI: 10.15760/trec.208
- Gecchelin T., Webb J. Modular dynamic ride-sharing transport systems. *Economic Analysis and Policy*, 2019, vol. 61, pp. 111–117. DOI: 10.15760/trec.208
- Shi Y., Arthanari T., Liu X., Yang B. Sustainable transportation management: Integrated modeling and support. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 212, pp. 1381–1395. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.209>
- Zhan D., Kwan M.P., Zhang W., Fan J., Yu J., Dang Y. Assessment and determinants of satisfaction with urban livability in China. *Cities*, 2018, vol. 79, pp. 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.02.025>
- Aghaabbasi M., Shah M.Z., Zainol R. Investigating the Use of Active Transportation Modes among University Employees through an Advanced Decision Tree Algorithm. *Civil and Sustainable Urban Engineering*, 2021, vol. 1, no. 1, pp. 26–49. <https://doi.org/10.53623/csue.v1i1.28>
- Sharifi A., Khavarian-Garmsir A.R. The COVID-19 pandemic: Impacts on cities and major lessons for urban planning, design, and management. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 749, article id: 142391. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142391>
- Connolly C., Livy M.R., Qiu Y., Klaiber H.A. Capitalization of interconnected active transportation infrastructure. *Landscape and Urban Planning*, 2019, vol. 182, pp. 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.09.010>
- Young D.R., Craddock A.L., Eyler A.A., Fenton M., Pedrosa M., Sallis J.F. American Heart Association Advocacy Coordinating Committee. Creating built environments that

- expand active transportation and active living across the United States: a policy statement from the American Heart Association. *Circulation*, 2020, vol. 142, no. 11, pp. e167-e183. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000878>
26. Barban P., de Nazelle A., Chatelin S., Quirion P., Jean K. Quantifying the health benefits of physical activity due to active commuting in a French transition scenario: a health impact assessment of the negaWatt scenario. *MedRxiv*, 2022. DOI: 10.1101/2022.02.17.22271146
27. World Health Organization. Implementation framework for Phase VII (2019–2024) of the WHO European Healthy Cities Network: goals, requirements and strategic approaches: final (No. WHO/EURO: 2019-3478-43237-60598). World Health Organization. Regional Office for Europe. 2019.
28. Lee A., Nakamura K. Engaging diverse community groups to promote population health through healthy city approach: Analysis of successful cases in western pacific region. *International journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, vol. 18, no. 12, article id: 6617. DOI: 10.3390/ijerph18126617
29. Ashton J., Thurston M.N. *International Encyclopedia of Public Health*, 2nd ed.; New Public Health: Oxford, Academic Press Publ., 2017, vol. 5, pp. 231–239.
30. Luo J., Chan E.H., Du J., Feng L., Jiang P., Xu Y. Developing a Health-Spatial Indicator System for a Healthy City in Small and Midsized Cities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, vol. 19, no. 6, article id: 3294. DOI: 10.3390/ijerph19063294
31. World Health Organization. Phase V (2009–2013) of the WHO European Healthy Cities Network: goals and requirements (No. WHO/EURO: 2009-4250-44009-62064). World Health Organization. Regional Office for Europe, 2009.
32. Kleinert S., Horton R. Urban design: an important future force for health and wellbeing. *The Lancet*. 2016, vol. 388, no. 10062, pp. 2848–2850. DOI: 10.1016/S0140-6736(16)31578-1
33. Triguero-Mas M., Anguelovski I., Cole H.V. Healthy cities after COVID-19 pandemic: the just ecofeminist healthy cities approach. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 2022, vol. 76, no. 4, pp. 354–359. DOI: 10.1136/jech-2021-216725
34. Ashton J.R. *Healthy Cities: Concepts and Visions*. University of Liverpool, Department of Community Health Publ., 1988.
35. Bacevic J. Unthinking knowledge production: from post-Covid to post-carbon futures. *Globalizations*, 2021, vol. 18, no. 7, pp. 1206–1218. <https://doi.org/10.1080/14747731.2020.1807855>
36. Pilechiha P. Optimization Methods and Algorithms in Architectural and Urban Design, Basic Mathematical Solutions. *Naqshejahan-Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 205–217.
37. Pilechiha P., Mahdavejad M., Rahimian F.P., Carnemolla P., Seyedzadeh S. Multi-objective optimisation framework for designing office windows: quality of view, daylight and energy efficiency. *Applied Energy*, 2020, vol. 261, article id: 114356. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114356>
38. DeLeeuw E. Evidence for Healthy Cities: reflections on practice, method and theory. *Health Promotion International*, 2009, no. 24(suppl_1), pp. i19-i36. DOI: 10.1093/heapro/dap052
39. Glazener A., Khreis H. Transforming our cities: best practices towards clean air and active transportation. *Current Environmental Health Reports*, 2019, vol. 6, no. 1, pp. 22–37. DOI:10.1007/s40572-019-0228-1
40. Teuber M., Sudeck G. Why do students walk or cycle for transportation? Perceived study environment and psychological determinants as predictors of active transportation by university students. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, vol. 18, no. 4, article id: 1390. DOI: 10.3390/ijerph18041390
41. Jamal S., Mohiuddin H. Active transportation indicators and establishing baseline in a developing country context: A study of Rajshahi, Bangladesh. *Growth and Change*, 2020, vol. 51, no. 4, pp. 1894–1920. <https://doi.org/10.1111/grow.12420>
42. Sá T.H.D., Rezende L.F.M.D., Borges M.C., Nakamura P.M., Anapolsky S., Parra D., Monteiro C.A. Prevalence of active transportation among adults in Latin America and the Caribbean: a systematic review of population-based studies. *Revista Panamericana de Salud Publica*, 2017, no. 41, article id: e35. DOI: 10.26633/RPSP.2017.35
43. Griffin G.P., Jiao J. The geography and equity of crowdsourced public participation for active transportation planning. *Transportation Research Record*, 2019, vol. 2673, no. 1, pp. 460–468. <https://doi.org/10.1177/0361198118823498>.
44. Stockton E. Active transportation policy decisions in response to COVID-19: Case studies from four North American cities. *Carolina Digital Repository*, 2021. <https://doi.org/10.17615/fc6j-ks40>
45. Buehle R., Pucher J. COVID-19 Impacts on Cycling, 2019–2020. *Transport Reviews*, 2021, vol. 41, no. 12, pp. 1–8.
46. Nian G., Peng B., Sun D.J., Ma W., Peng B., Huang T. Impact of COVID-19 on Urban Mobility during Post-Epidemic Period in Megacities: From the Perspectives of Taxi Travel and Social Vitality. *Sustainability*, 2020, vol. 12, no. 19, article id: 7954. <https://doi.org/10.3390/su12197954>
47. Buehler R., Pucher J. *Cycling for sustainable cities.*, Massachusetts, MIT Press Publ., 2021, 488 p.
48. Furth P., Buehler R., Pucher J., eds. *Bicycling infrastructure for all*. Chapter 5. In: *Cycling for sustainable cities*. Massachusetts, MIT Press Publ., 2021, pp. 81–102.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Huang J., Wang H., Fan M., Zhuo A., Sun Y., Li Y. Understanding the impact of the COVID-19 pandemic on transportation-related behaviors with human mobility data // *Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. 2020. P. 3443–3450. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.12264>
- Tirachini A., Cats O. COVID-19 and public transportation: Current assessment, prospects, and research needs // *Journal of Public Transportation*. 2020. V. 22. N 1. P. 1–21. DOI: 10.5038/2375-0901.22.1.1
- Fische J., Winters M. COVID-19 street reallocation in mid-sized Canadian cities: socio-spatial equity patterns // *Canadian Journal of Public Health*. 2021. V. 112. N 3. P. 376–390. DOI: 10.17269/s41997-020-00467-3
- Kim E.J., Kim J., Kim H. Neighborhood walkability and active transportation: a correlation study in leisure and shopping purposes // *International journal of environmental research and public health*. 2020. V. 17. N 7. P. 2178. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072178>

5. Jamal S., Mohiuddin H., Paez A. How do the perceptions of neighborhood conditions impact active transportation? A study in Rajshahi, Bangladesh // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 87, 102525. *Journal of Environmental Studies*. 2020. N 87. Article id:102525. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102525>
6. Passi-Solar Á., Margozzini P., Cortinez-O’Ryan A., Muñoz J.C., Mindell J.S. Nutritional and metabolic benefits associated with active and public transport: Results from the Chilean National Health Survey, ENS 2016–2017 // *Journal of Transport & Health*. 2020. N 17. Article ID: 100819. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2019.100819>
7. González S.A., Aubert S., Barnes J.D., Larouche R., Tremblay M.S. Profiles of active transportation among children and adolescents in the global matrix 3.0 initiative: A 49-country comparison // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. V. 17. N 16. Article ID: 5997. DOI: 10.3390/ijerph17165997
8. Mogaji E. Impact of COVID-19 on transportation in Lagos, Nigeria // *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2020. N 6. Article id: 100154. DOI: 10.1016/j.trip.2020.100154
9. Aguilar-Farias N., Cortinez-O’Ryan A., Chandia-Poblete D., Heesch K.C. Prevalence and correlates of transport cycling in Chile: results from 2014 to 2015 national surveys // *Journal of Transport & Health*. 2019. N 14. Article ID: 100594. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2019.100594>
10. Bitaab N., Heidari F., Khadivi G.N. Investigating Strategies for Creating Healthy Cities with Sustainable Development Approach // *European Journal of Research*. 2018. N 1. P. 34–44. DOI: 10.26739/2521-3253-2018-1-4-4
11. Darmajanti L., Tampi D.M., Fitrinitia I.S. Sustainable Urban Development: Building Healthy Cities in Indonesia // 55th ISOCARP World Planning Congress. 2021. DOI:10.47472/MBX05435
12. Giles-Corti B., Lowe M., Arundel J. Achieving the SDGs: Evaluating indicators to be used to benchmark and monitor progress towards creating healthy and sustainable cities // *Health Policy*. 2020. V. 124. N 6. P. 581–590. <https://doi.org/10.1016/j.healthpol.2019.03.001>
13. Yan D., Wu S., Zhou S., Li F., Wang Y. Healthy city development for Chinese cities under dramatic imbalance: evidence from 258 cities // *Sustainable Cities and Society*. 2021. N 74. Article ID: 103157. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103157>
14. Louro A., Marques da Costa N., Marques da Costa E. Sustainable urban mobility policies as a path to healthy cities – The case study of LMA, Portugal // *Sustainability*. 2019. V. 11. N 10. Article ID: 2929. <https://doi.org/10.3390/su11102929>
15. Ilbeigi M. Statistical process control for analyzing resilience of transportation networks // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2019. N 33. P. 155–161. DOI:10.1016/j.ijdrr.2018.10.002
16. Vajjarapu H., Verma A., Gulzar S. Adaptation Policy Framework for Climate Change Impacts on Transportation Sector in Developing Countries // *Transportation in Developing Economies*. 2019. V. 5. N 1. <https://doi.org/10.1007/s40890-019-0071-y>
17. Tran N.H., Yang S.H., Huang T. Comparative analysis of traffic-and-transportation-planning-related indicators in sustainable transportation infrastructure rating systems // *International Journal of Sustainable Transportation*. 2021. V. 15. N 3. P. 203–216. <https://doi.org/10.1080/15568318.2020.1722868>
18. Morrison D., Shaffer A., Lewis R., Lewman H. Framing Livability: A Strategic and Creative Communication Approach to Improving Support for Public Transportation in Oregon // *PDXScholar*. 2018. DOI: 10.15760/trec.208
19. Gecchelin T., Webb J. Modular dynamic ride-sharing transport systems // *Economic Analysis and Policy*. 2019. V. 61. P. 111–117. DOI: 10.15760/trec.208
20. Shi Y., Arthanari T., Liu X., Yang B. Sustainable transportation management: Integrated modeling and support // *Journal of Cleaner Production*. 2019. V. 212. P. 1381–1395. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.209>
21. Zhan D., Kwan M.P., Zhang W., Fan J., Yu J., Dang Y. Assessment and determinants of satisfaction with urban livability in China // *Cities*. 2018. V. 79. P. 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.02.025>
22. Aghaabbasi M., Shah M.Z., Zainol R. Investigating the Use of Active Transportation Modes among University Employees through an Advanced Decision Tree Algorithm // *Civil and Sustainable Urban Engineering*. 2021. V. 1. N 1. P. 26–49. <https://doi.org/10.53623/csue.v1i1.28>
23. Sharifi A., Khavarian-Garmsir A.R. The COVID-19 pandemic: Impacts on cities and major lessons for urban planning, design, and management // *Science of the Total Environment*. 2020. V. 749. Article ID: 142391. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142391>
24. Connolly C., Livy M.R., Qiu Y., Klaiber H.A. Capitalization of interconnected active transportation infrastructure // *Landscape and Urban Planning*. 2019. V. 182. P. 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.09.010>
25. Young D.R., Cradock A.L., Eyler A.A., Fenton M., Pedrosa M., Sallis J.F. American Heart Association Advocacy Coordinating Committee. Creating built environments that expand active transportation and active living across the United States: a policy statement from the American Heart Association // *Circulation*. 2020. V. 142. N 11. P. e167–e183. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000878>
26. Barban P., de Nazelle A., Chatelin S., Quirion P., Jean K. Quantifying the health benefits of physical activity due to active commuting in a French transition scenario: a health impact assessment of the negaWatt scenario // *MedRxiv*. 2022. DOI: 10.1101/2022.02.17.22271146
27. World Health Organization. Implementation framework for Phase VII (2019–2024) of the WHO European Healthy Cities Network: goals, requirements and strategic approaches: final (No. WHO/EURO: 2019-3478-43237-60598). World Health Organization. Regional Office for Europe. 2019.
28. Lee A., Nakamura K. Engaging diverse community groups to promote population health through healthy city approach: Analysis of successful cases in western pacific region // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. V. 18. N 12. Article ID: 6617. DOI: 10.3390/ijerph18126617
29. Ashton J., Thurston M.N. *International Encyclopedia of Public Health*, 2nd ed.; New Public Health: Oxford: Academic Press, 2017. V. 5. P. 231–239.
30. Luo J., Chan E.H., Du J., Feng L., Jiang P., Xu Y. Developing a Health-Spatial Indicator System for a Healthy City in Small and Midsized Cities // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. V. 19. N 6. Article ID: 3294. DOI: 10.3390/ijerph19063294
31. World Health Organization. Phase V (2009–2013) of the WHO European Healthy Cities Network: goals and requirements (No. WHO/EURO: 2009-4250-44009-62064). World Health Organization. Regional Office for Europe. 2009.

32. Kleinert S., Horton R. Urban design: an important future force for health and wellbeing // *The Lancet*. 2016. V. 388. N 10062. P. 2848–2850. DOI: 10.1016/S0140-6736(16)31578-1
33. Triguero-Mas M., Anguelovski I., Cole H.V. Healthy cities after COVID-19 pandemic: the just ecofeminist healthy cities approach // *Journal of Epidemiology and Community Health*. 2022. V. 76. N 4. P. 354–359. DOI: 10.1136/jech-2021-216725
34. Ashton J. R. *Healthy Cities: Concepts and Visions*. University of Liverpool: Department of Community Health, 1988.
35. Bacevic J. Unthinking knowledge production: from post-Covid to post-carbon futures // *Globalizations*. 2021. V. 18. N 7. P. 1206–1218. <https://doi.org/10.1080/14747731.2020.1807855>
36. Pilechiha P. Optimization Methods and Algorithms in Architectural and Urban Design, Basic Mathematical Solutions // *Naqshejahan-Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*. 2020. V. 10. N 3. P. 205–217.
37. Pilechiha P., Mahdavejad M., Rahimian F.P., Carnemolla P., Seyedzadeh S. Multi-objective optimisation framework for designing office windows: quality of view, daylight and energy efficiency // *Applied Energy*. 2020. V. 261. Article ID: 114356. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114356>
38. DeLeeuw E. Evidence for Healthy Cities: reflections on practice, method and theory // *Health Promotion International*. 2009. N 24(suppl_1). P. i19–i36. DOI: 10.1093/heapro/dap052
39. Glazener A., Khreis H. Transforming our cities: best practices towards clean air and active transportation // *Current Environmental Health Reports*. 2019. V. 6. N 1. P. 22–37. DOI:10.1007/s40572-019-0228-1
40. Teuber M., Sudeck G. Why do students walk or cycle for transportation? Perceived study environment and psychological determinants as predictors of active transportation by university students // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. V. 18. N 4. Article ID: 1390. DOI: 10.3390/ijerph18041390
41. Jamal S., Mohiuddin H. Active transportation indicators and establishing baseline in a developing country context: A study of Rajshahi, Bangladesh // *Growth and Change*. 2020. V. 51. N 4. P. 1894–1920. <https://doi.org/10.1111/grow.12420>
42. Sá T.H.D., Rezende L.F.M.D., Borges M.C., Nakamura P.M., Anapolsky S., Parra D., Monteiro C.A. Prevalence of active transportation among adults in Latin America and the Caribbean: a systematic review of population-based studies // *Revista Panamericana de Salud Publica*. 2017. N 41. Article ID: e35. DOI: 10.26633/RPSP.2017.35
43. Griffin G.P., Jiao J. The geography and equity of crowdsourced public participation for active transportation planning // *Transportation Research Record*. 2019. V. 2673. N 1. P. 460–468. <https://doi.org/10.1177/0361198118823498>.
44. Stockton E. Active transportation policy decisions in response to COVID-19: Case studies from four North American cities. Carolina Digital Repository. 2021. <https://doi.org/10.17615/fc6j-ks40>
45. Buehle R., Pucher J. COVID-19 Impacts on Cycling, 2019–2020 // *Transport Reviews*. 2021. V. 41. N 12. P. 1–8.
46. Nian G., Peng B., Sun D.J., Ma W., Peng B., Huang T. Impact of COVID-19 on Urban Mobility during Post-Epidemic Period in Megacities: From the Perspectives of Taxi Travel and Social Vitality // *Sustainability*. 2020. V. 12. N 19. Article ID: 7954. <https://doi.org/10.3390/su12197954>
47. Buehler R., Pucher J. *Cycling for sustainable cities*. MA: MIT Press, 2021. 488 p.
48. Furth P. Bicycling infrastructure for all. Chapter 5. In: Buehler R., Pucher J., eds. *Cycling for sustainable cities*. Massachusetts, MIT Press Publ., 2021. P. 81–102.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Somayeh S. Hosseini defined the idea of the study, built the logic of the study, participated in field research, compiled cartographic material, structured the results of the study and participated in the production of the graphic material of the article. Yones Gholami formulated the problem and defined research methods. Hengame Dolvand participated in field research, structured the text of the article in the logic of research and selected bibliographic sources. Zagir V. Ataev performed an analysis of the existing experience and formulated the conclusions of the study. 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.

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Сомайех С. Хоссейни определил идею исследования, выстроил логику исследования, участвовал в полевых исследованиях, составил картографический материал, структурировал результаты исследования, участвовал в изготовлении графического материала статьи. Йонес Голами сформулировал проблему, определил методы исследования. Хенгейм Долванд участвовал в полевых исследованиях, структурировал текст статьи в логике исследования, подбирал библиографические источники. Загир В. Атаев выполнил анализ имеющегося опыта, сформулировал выводы 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.

ORCID

Somayeh S. Hosseini / Сомайех С. Хоссейни <https://orcid.org/0000-0002-9043-697X>
 Yones Gholami / Йонес Голами <https://orcid.org/0000-0002-9043-697X>
 Hengame Dolvand / Хенгейм Долванд <https://orcid.org/0000-0003-3447-6608>
 Zagir V. Ataev / Загир В. Атаев <https://orcid.org/0000-0001-7731-5594>

Обзорная статья / Review article

УДК 574, 504.75.05:54, 543, 543.062, 543.641

DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-12



Методы анализа и мониторинга тяжелых металлов в окружающей среде

Альфия Р. Цыганкова^{1,2,3}, Сергей А. Гуляев^{1,2}, Любовь С. Адаменко⁴, Михаил А. Шестопалов^{1,4}¹Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия³Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН, Новосибирск, Россия⁴Федеральный исследовательский центр Фундаментальной и трансляционной медицины, НИИ Вирусологии, Новосибирск, Россия

Контактное лицо

Альфия Р. Цыганкова, к.х.н., с.н.с. ИНХ СО РАН, н.с. НИОХ СО РАН, доцент кафедры аналитической химии НГУ; 630090 Россия, Новосибирск, Пр. Ак. Лаврентьева 3.
Тел. +79130037744

Email alphiya@yandex.ruORCID <http://orcid.org/0000-0001-7126-276X>

Формат цитирования

Цыганкова А.Р., Гуляев С.А., Адаменко Л.С., Шестопалов М.А. Методы анализа и мониторинга тяжелых металлов в окружающей среде // Юг России: экология, развитие. 2024. Т.19, N 2. С. 131-146. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-12

Получена 16 января 2024 г.

Прошла рецензирование 14 февраля 2024 г.

Принята 26 апреля 2024 г.

Резюме

Данный обзор посвящен современным инструментальным методам анализа, которые обеспечивают низкие пределы обнаружения для широкого списка элементов. Некоторые элементы имеют свои токсичные формы присутствия, определение которых имеет особенную важность. Содержанию кадмия и свинца исследователи уделяют повышенное внимание, вследствие их высокой мгновенной и отложенной токсичности. Следует отметить, что те инструментальные методы анализа, которые применяют при определении этих важных экотоксикантов, зачастую, применяют и при определении других тяжелых металлов. Рассмотрены следующие объекты анализа – природные, речные, морские воды; рассолы; донные отложения; растения, в том числе лекарственные; осадки; почвы; а также цельная кровь и сыворотка крови; волосы и шерсть животных; органы и ткани животных. Рассмотрены и сравнены возможности современных инструментальных методов анализа при определении тяжелых металлов и важных экотоксикантов – одноэлементные (ЭТААС, ИВА и др.) и многоэлементные (АЭС ИСП, МС ИСП, РФА и др.). Данные структурированы в виде таблицы, где приведены конкретные методики анализа с указанием способа пробоподготовки и/или особенностей инструментального определения, список определяемых элементов и пределы обнаружения для них.

Отдельное внимание уделено устранению матричных влияний и снижению пределов обнаружения применением процедур концентрирования. Рассмотрены различные виды экстракции, сорбции, осаждения, химической трансформации (гидридогенерация и др.) применены для биологических объектов и объектов окружающей среды.

Ключевые слова

Тяжёлые металлы, методы анализа, элементный анализ, пределы обнаружения.

Methods for analysis and monitoring of heavy metals in the environment

Alphiya R. Tsygankova^{1,2,3}, Sergey A. Gulyaev^{1,2}, Lyubov S. Adamenko⁴ and Michael A. Shestopalov^{1,4}

¹Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

³N.N. Vorozhtsov Novosibirsk Institute of Organic Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

⁴Research Institute of Virology, Federal Research Center of Fundamental and Translational Medicine, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Principal contact

Alphiya R. Tsygankova, Ph.D., Senior Researcher, Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (SB RAS) & Researcher, Research Institute of Organic Chemistry SB RAS, Associate Professor, Department of Analytical Chemistry, Novosibirsk State University; 3 Ak. Lavrentieva Ave, Novosibirsk, Russia 630090.

Tel. +79130037744

Email alpha@yandex.ru

ORCID <http://orcid.org/0000-0001-7126-276X>

How to cite this article

Tsygankova A.R., Gulyaev S.A., Adamenko L.S., Shestopalov M.A. Methods for analysis and monitoring of heavy metals in the environment. *South of Russia: ecology, development*. 2024; 19(2):131-146. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-12

Received 16 January 2024

Revised 14 February 2024

Accepted 26 April 2024

Abstract

This review surveys capabilities of modern instrumental analytical methods that provide low limits of detection for a wide range of elements. Some elements have their own toxic forms, so their identification is of particular importance. Researchers pay increased attention to the content of cadmium and lead due to their high immediate and delayed toxicity.

It should be noted that those instrumental methods of analysis that are used to determine these important ecotoxicants are often used to determine other heavy metals. The following objects of analysis are considered – natural, river, sea waters; brines; bottom sediments; plants, including medicinal ones; precipitation; soil; as well as whole blood and blood serum; hair and animal fur; animal organs and tissues. Special attention is paid to eliminating matrix influences and reducing limits of detection using concentration procedures. Various types of extraction, sorption, precipitation, chemical transformation (hydride generation, etc.) are considered and applied to biological and environmental objects.

The capabilities of modern instrumental methods of analysis for the determination of heavy metals and important ecotoxicants are considered and compared – single-element (ETAAS, IVA, etc.) and multi-element (ICP AES, ICP MS, XRF, etc.). The data is structured in the form of a table, which shows specific analysis methods, indicating the method of sample preparation and/or features of instrumental determination, a list of elements to be determined and the limits of detection.

Key Words

Heavy metals, methods of analysis, elemental analysis, limits of detection.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие инструментальных методов аналитической химии внесло существенный вклад в общее развитие фундаментальной и прикладной науки. Сложно выделить область исследований, где использование инструментальных методов не определило направление и/или глубину научного поиска. Интенсификация научного прогресса стимулирует и совершенствует промышленное, сельскохозяйственное, пищевое, фармакологическое и другие виды производств. В настоящее время большое внимание уделяется уровню качества жизни человека, а угроза благосостоянию и здоровью человека является одной из самых актуальных проблем. Следует отметить, что загрязнение окружающей среды, в самом широком смысле этого понятия, это один из важнейших факторов, оказывающих наибольшее влияние на качество жизни населения. Одним из инструментов, который позволяет оценить уровень неблагоприятного воздействия является определение химических соединений, в частности присутствие потенциально опасных элементов – тяжёлых металлов [1]. Под термином «тяжёлые металлы» следует понимать атомы металлов и некоторых металлоидов, обладающих высокой токсичностью для живых организмов в относительно низких концентрациях, а также способность к биоаккумуляции. Иногда эту группу элементов называю «экоотоксиканты». К таковым можно отнести достаточно большой список элементов – до 40 элементов с молярной массой более 50 ат.ед. Очевидно, влияние этих элементов носит разный характер, различаются мгновенная и отсроченная токсичность, биоаккумуляция и отложенные эффекты.

Данный обзор посвящен современным инструментальным методам анализа, которые обеспечивают низкие пределы обнаружения для широкого списка элементов. Некоторые элементы имеют свои токсичные формы присутствия, определение которых имеет особую важность. В обзоре будет уделено внимание определению некоторых из них. Содержанию кадмия и свинца исследователи уделяют повышенное внимание, вследствие их высокой токсичности, оказывающей влияние как на состояние живого организма здесь и сейчас, так и на возможность размножения в будущем. Следует отметить, что те инструментальные методы анализа, которые применяют при определении этих важных экоотоксикантов, зачастую, применяют и при определении других тяжёлых металлов. Поэтому в настоящем обзоре мы ограничимся данными о кадмии и свинце.

Загрязнение окружающей среды кадмием, свинцом и их соединениями – признанная мировая проблема [2–5]. Основная причина этого явления постоянный рост антропогенного воздействия [6; 7]. Нормативный документ, действующий на территории РФ, относит эти металлы ко 2 классу опасности – «высоко опасные вещества» [8]. К основным источникам загрязнений можно отнести выбросы промышленных предприятий [1], бытовые и с/х отходы [9], транспорт [10]. При попадании в живой организм кадмий и свинец способны вызывать серьезные патологические изменения, по этой причине, определение этих экоотоксикантов является актуальной задачей сегодняшнего дня.

ОБСУЖДЕНИЕ

В обзоре уделено внимание различным объектам окружающей среды – природные, речные, морские воды; рессолы; донные отложения; растения, в том числе лекарственные; осадки; почвы; а также биологическим объектам, состав которых также может указывать на экологическую обстановку – цельная кровь и сыворотка крови; волосы и шерсть животных; органы и ткани животных.

Предварительная пробоподготовка

Особое место в анализе биологических проб и объектов окружающей среды при определении тяжелых металлов занимает пробоподготовка. В идеальном случае, в процессе пробоподготовки определяемый компонент максимально изолируют от сложного состава матрицы пробы. Как правило, наиболее важным этапом пробоподготовки является извлечение определяемых элементов из исследуемого материала и перевод в анализируемый раствор [11]. При этом для некоторых типов гомогенных жидких сред возможен вариант прямого определения, однако, невзирая на наличие и способ предварительной пробоподготовки анализируемый раствор должен удовлетворять следующим требованиям:

- отсутствие твердых или взвешенных частиц;
- минимальное влияние матричного компонента пробы;
- уровень содержания должен соответствовать диапазону определяемых концентраций методики количественного химического анализа.

Наиболее распространённым вариантом перевода проб в анализируемый раствор является кислотная минерализация с использованием концентрированных неорганических кислот и окислителей (HNO_3 , HClO_4 , H_2O_2) [12–16]. Для ряда биологических проб в целях оптимизации элементометрии применяют термическое озоление. Известно, что при температуре выше 450 °С органическая составляющая основы пробы полностью разлагается [17; 18]. Термическое озоление может быть основой для получения растворимого зольного остатка, который при последующей минерализации полностью переводят в анализируемый раствор [19]. Кроме того, озоление может быть основным и/или единственным способом трансформации органической составляющей основы пробы. При этом используют инструментальные методы, позволяющие проводить анализ порошковых проб [20; 21]. Такой подход упрощает процедуру растворения, однако увеличивает вероятность потери определяемых компонентов в летучей форме [22]. Альтернативой для разложения в открытых системах и термическому озолению является минерализация в аналитических автоклавах. Преимуществом такого подхода является возможность контролируемого нагрева в замкнутой системе, что препятствует загрязнению раствора распространёнными примесями из атмосферы воздуха и потери аналитов. Материал аналитических автоклавов инертен к воздействию большинства неорганических кислот. Нагрев таких автоклавов выполняют либо в резистивном [23], либо микроволновом режиме [24]. Причём последний вариант позволяет сократить время разложения в поле микроволнового излучения. Сегодня на рынке существуют как иностранные [25; 26], так и

отечественные производители [27; 28], предлагающие микроволновые печи различных конструкций. Простота и эффективность использования микроволновых систем разложения проб обуславливают их широкое использование для подготовки объектов различной природы.

Концентрирование – это эффективный приём для снижения матричного влияния, увеличения концентрации определяемого элемента, а, следовательно, и снижения предела его обнаружения. Содержание тяжёлых металлов в объектах окружающей среды находятся на низком уровне концентраций, поэтому применение методов концентрирования часто необходимая часть пробоподготовки. Среди методов концентрирования тяжёлых металлов встречаются сорбция с использованием сорбентов разного состава [29–33]; жидкостно-жидкостная экстракция [34–36]; осаждение и соосаждение [37; 38]; генерация химических паров [39; 40].

Атомно-абсорбционная спектрометрия

Атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС) используется во многих лабораториях, особенно при необходимости определения элементов, находящихся в следовых количествах. Зачастую определение тяжёлых металлов в биологических объектах и объектах окружающей среды сводится к определению именно низких содержаний ограниченного круга аналитов. Благодаря инструментальным возможностям ААС можно варьировать условия регистрации аналитического сигнала для каждого элемента по-отдельности и, таким образом, выбирать наилучшие условия для достижения минимальных пределов обнаружения. Различают ААС с пламенной и электротермической (ЭТ) атомизацией в графитовой кювете. В целом, для метода ЭТААС пределы обнаружения более низкие по сравнению с пламенным вариантом, что объясняется температурой источника атомизации [41].

При ЭТААС определении тяжёлых металлов в биологических материалах и объектах окружающей среды возникают несколько проблем, в основном из-за неполного распыления, а также высокий фоновый уровень и накопление углеродистых остатков внутри распылителя. Недоразложившиеся остатки проб приводят к невозможности сигнала из-за переменной скорости распыления и даже частичному перекрытию луча света. Этих недостатков можно избежать, включив кислородный или воздушный этап озоления в цикле нагрева. Однако это предполагает уменьшения срока службы пиролитического материала графитовых кювет. Избежать накопления остатков внутри распылителя можно добавлением кислот окислителей непосредственно в кювету совместно с анализируемым раствором. Другим способом является включение в программу нагрева шага озоления [42].

Метод ЭТААС успешно применён для определения тяжёлых металлов в растениях [43–45]; в морских водах [46; 47]; в объектах сельского хозяйства [48; 49]; в биологических пробах [50; 51]. Наряду со стандартным ЭТААС существует альтернативный способ атомизации – двухстадийная зондовая атомизация. Такой подход позволяет устранить часть матричных помех и проводить прямой анализ без кислотной минерализации или с минимальной пробоподготовкой [52–54].

Электрохимические методы

Среди электрохимических методов анализа, связанных с использованием электролитических ячеек, можно найти примеры наиболее точных и чувствительных определений металлов в объектах различной природы. Как и в случае ААС электрохимические методы используют в одноэлементном варианте. Природа электроактивного вещества определяет потенциал окисления или восстановления, поэтому селективность электрохимических методов может быть повышена правильным выбором потенциала электрода. Методы анализа весьма специфичны, часто отсутствует необходимость предварительного разделения компонентов, поэтому методы характеризуются высокой экспрессностью. Среди электрохимических методов можно выделить инверсионную вольтамперометрию (ИВА), которая показала высокие аналитические характеристики при определении тяжёлых металлов в природных объектах [55–57]; в растительном сырье [58–60]; в биологических пробах [61–65]. Подавляющее большинство опубликованных работ – это одноэлементные определения аналитов в специально выбранных условиях, что и обеспечивает наилучшие условия определения. В литературе также описана возможность селективного инверсионно вольтамперометрического одновременного определения нескольких элементов, что позволяет проводить многоэлементный анализ [66–69].

Многоэлементные спектральные методы

Наиболее интенсивно используемые методы элементного анализа на сегодняшний день – это атомно-эмиссионная спектрометрия (АЭС) и масс-спектрометрия (МС) с различными источниками возбуждения спектров и ионов. Методы являются многоэлементными, хотя в литературе встречаются примеры их использования для определения отдельных примесей [70–72]. Подавляющее большинство работ, в которых использованы эти методы относятся к спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП). Это обусловлено рядом причин – многоэлементность, высокие метрологические характеристики, коммерческая доступность приборов высокого класса и образцов сравнения разных составов. ИСП – универсальный источник возбуждения эмиссионных спектров и генерации ионов, характеризующийся высокой робастностью, низкими погрешностями определения аналитического сигнала как в условиях повторяемости, так и воспроизводимости [73–75]. ИСП это источник, который используют в первую очередь для анализа растворов. Абсолютная величина аналитического сигнала и его вариация будут зависеть от характеристик водного аэрозоля, поступающего в ИСП. Для создания высококачественного аэрозоля используют пневматические распылители разной конструкции [76].

Матричные эффекты в методах АЭС и МС с ИСП обусловлены различием размера капель аэрозоля образцов сравнения и анализируемых проб; процессами транспорта аэрозоля в плазму; изменением термических свойств плазмы при распылении образцов сравнения и анализируемых проб, а также через спектральные или избарные наложения [77]. Все эти факторы приводят к повышению пределов обнаружения определяемых элементов. Так, например, в работах [43; 78–80]

описано прямое инструментальное определение тяжёлых металлов методом АЭС ИСП; в работах [81–83] – прямое определение методом МС ИСП. Эти работы связывает единый подход при анализе – кислотное разложение проб различного состава и их последующий анализ с применением стандартных подходов – водные образцы сравнения, последовательное разбавление проб, внутренний стандарт для коррекции возможных несектральных влияний.

Альтернативой ИСП выступают дуга постоянного тока (ДПТ) и двухструйный дуговой плазмотрон (ДДП). Эти источники объединяет возможность анализа порошкообразных твердых образцов без перевода в раствор, что существенно сокращает время анализа и упрощает его процедуру. Порошкообразной основой, т.е. спектральным буфером для разбавления проб часто выступает высококачественный графитовый порошок, который благодаря своей инертности и малому числу собственных спектральных линий широко используют при анализе объектов различной природы. ДПТ применяли для определения широкого списка элементов в биологических пробах [21; 84; 85], в объектах окружающей среды [86; 87], в медицинских пробах [88; 89].

ДДП обладает более широкими аналитическими возможностями по сравнению с ДПТ, так как обладает более высокой мощностью, что позволяет вводить в плазму большее количество пробы, а, следовательно, обеспечивать более низкие пределы обнаружения. В цикле работ [20; 90; 91] описаны методики определения токсичных и эссенциальных элементов в органах животных, волосах и растениях.

Применение методов концентрирования позволяет устранить большую часть матричных влияний, это положительно сказывается как на параметрах плазмы, так и на метрологических характеристиках. В работах [92–94] для извлечения определяемых элементов применяли дисперсионную микро-экстракцию на твердых частицах; жидкостно-жидкостную экстракцию [95–97]; сорбцию [98–100] и другие методы концентрирования [101–103].

Другие многоэлементные методы

Существуют и другие инструментальные методы анализа, дающие количественную оценку присутствующих в образце элементов. К их числу относят рентгенофлуоресцентный анализ (РФА). Метод позволяет проводить неразрушающий анализ как твердых, так и жидких образцов. Самые низкие пределы обнаружения возможно достигнуть при определении тяжелых (по атомной массе) элементов в лёгких матрицах. Метод РФА используют для анализа горных пород, донных осадков, для экологического мониторинга различных экосистем [104–106].

Использование синхротронного излучения (СИ) для возбуждения рентгеновской флуоресценции РФА СИ позволяет существенно улучшить возможности метода РФА. СИ обладает рядом уникальных свойств – высокая яркость, малая расходимость пучка, линейная поляризация [107]. Всё это позволяет успешно применять метод РФА СИ для исследования сложных биологических [108; 109], геологических объектов [110; 111] и объектов окружающей среды [112; 113].

В эпоху развития ядерной физики появились различные методы, основанные на радиоактивности. Среди них можно выделить группу методов, основанной на радиоактивации, в том числе активации нейтронами – нейтронно-активационный анализ (НАА). Достоинствами активационного анализа являются высокая, иногда даже рекордная чувствительность. Предел обнаружения некоторых элементов достигает 10^{-11} % мас. Активационный анализ активно используют при анализе объектов различной природы [114–116].

Формы присутствия элементов

Токсичность элементов зависит от химической формы элемента, в которой он присутствует в рассматриваемой системе [117]. Понимание того, что химическая форма элемента определяет свойства, оказало значительное влияние на развитие токсикологии, медицинской химии, геохимии и химии окружающей среды. Новые разработки в области аналитического оборудования и методологии проведения измерений позволяют идентифицировать и количественно определять формы элемента, присутствующие в исследуемой системе [118]. С этой целью применяют «гибридные методы», т.е. методы химического анализа, основанные на сочетании разделения компонентов анализируемой пробы и определения (детектирования) разделенных компонентов. В настоящее время гибридные методы анализа являются основным инструментом при решении задач, связанных с идентификацией форм элементов, что во многом обусловлено возможностью использования чувствительных и селективных детекторов, достоинства которых могут быть полностью реализованы при состыковке с высокоэффективными системами разделения. В качестве методов разделения чаще всего используют высокоэффективную жидкостную хроматографию, капиллярный электрофорез и газовую хроматографию. Например, в работах [119–122] использованы гибридные методы для идентификации и количественного определения форм присутствия кадмия в воде и растениях. Следует отметить, что в виду сложности проблематики число работ, посвященных изучению форм связывания элементов в объектах окружающей среды, ограничено. Наиболее информативным методом идентификации форм элементов в растительных образцах является масс-спектрометрия с ионизацией электрораспылением, но отнесение масс-спектров представляется затруднительным из-за отсутствия соответствующих стандартов, поэтому авторы нередко ограничивают рамки исследований соединениями, для которых эти стандарты доступны [123; 124].

В таблице приведены конкретные методики анализа с указанием способа пробоподготовки или особенностей инструментального определения, список определяемых элементов и пределы обнаружения для них. Предпочтение было отдано публикациям, в которых наиболее полностью продемонстрированы возможности инструментальных методов; где описаны наилучшие метрологические характеристики, а также приведены оригинальные подходы в процессе пробоподготовки.

Таблица. Методы инструментального определения тяжелых металлов в биологических и объектах окружающей среды**Table.** Instrumental methods determination of heavy metals in biological and environmental objects

Ссылка Reference	Метод анализа Method of analysis	Объект Object	Пределы обнаружения Limits of detection	Особенности Special conditions
42	ЭТААС ETAAS	Моча, сыворотка, кровь Urine, serum, blood	Pb 13 пг/пг Cd 0,8 пг/пг	Разбавление тритоном X-100 и дигидрофосфатом аммония. Калибровка методом стандартных добавок Dilution with Triton X-100 and ammonium dihydrogen phosphate. Calibration using standard addition method
43	ЭТААС ETAAS АЭС ИСП ICP OES	Лекарственные травы Medicinal herbs	Al, Cr, Fe, V 0,05–0,3 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹ Cd, Co, Pb 0,008–0,15 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Разложение смесью кислот HNO ₃ , HClO ₄ и HF Acids decomposition by mixtures of HNO ₃ , HClO ₄ , HF
45	ЭТААС ETAAS МС ИСП ICP MS	Лекарственные травы Medicinal herbs	As, Cd, Pb 0,01–0,2 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹ As, Cd, Pb 0,008–0,01 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Ионообменная хроматография Ion exchange chromatography
46	ЭТААС ETAAS	Почвы, донные отложения, морская вода Soils, bottom sediments, sea water	Cd, Cu, Pb 0,08–0,83 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Микроволновое разложение в смеси HNO ₃ , HCl и HF Microwave acids decomposition by mixtures of HNO ₃ , HClO ₄ , HF
47	ЭТААС ETAAS	Морская вода Sea water	Pb 0,008 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹ Cd 0,005 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Концентрирование на оксиде графена Fe ₃ O ₄ @graphene Concentration on graphene oxide Fe ₃ O ₄ @graphene
48	ЭТААС ETAAS	Сельскохозяйственные культуры Agricultural crops	Pb 0,18 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹ Cd 0,02 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Концентрирование на сорбенте в УЗ поле Concentration on a sorbent in an ultrasonic field
50	ЭТААС ETAAS	Вода, кровь Water, blood	Pb 0,023 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Твердофазная экстракция Solid phase extraction
51	ЭТААС ETAAS	Кровь Blood	Cd, Co, Cr, Pb 0,2–25 нг·г ⁻¹ / ng·l ⁻¹	Кислотное разложение, модификаторы Acid decomposition, modifiers
52	ДЗА ААС ТРА ETAAS	Цельное молоко, сливки, смесь для детского питания Whole milk, cream, baby formula	Pb 0,5 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹ Cd 0,04 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Без разложения, двухстадийная зондовая атомизация No decomposition, two-stage probe atomization
53	ДЗА ААС ТРА ETAAS	Почвы Soils	Au, Cd, Pb, Se 0,002–10 мкг·кг ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Без разложения, двухстадийная зондовая атомизация No decomposition, two-stage probe atomization
57	ИВА Stripping voltamperometry	Вода Water	Cd 105 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Без применения ртути No mercury
59	ИВА Stripping voltamperometry	Лекарственные травы Medicinal herbs	Pb 0,12 мкг·кг ⁻¹ / μg·kg ⁻¹ Cd 0,010 мкг·кг ⁻¹ / μg·kg ⁻¹	Сухое озоление проб. С использованием подвешенного ртутного капельного электрода Dry ashing of samples. Using a suspended mercury drop electrode
60	Анодная вольтамперометрия Anodic voltammetry	Сигаретные фильтры, пепел, табак	Cd, Cu, Pb 0,72–43 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Микроволновое кислотное разложение Microwave acids decomposition

		Cigarette filters, ash, tobacco		
64	ИВА Stripping volamperometry	Кровь Blood	Cd 0,0004 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Ультразвук в сочетании с озонированием Ultrasound combined with ozonation
66	ИВА Stripping volamperometry	Вода Water	Cu(II), Pb(II), Cd(II), Zn(II), Ag(I), Hg(II) 10 ⁻⁷ –10 ⁻⁶ М	Одновременный многоэлементный анализ Simultaneous multi-element analysis
68	Анодная вольтамперометрия Anodic voltammetry	Цельнозерновая, пшеничная и кукурузная мука Whole grain, wheat and corn flour	Cr, Cu, Pb, Sb, Sn, Zn < 0,123 мкг·г ⁻¹ / μg·g ⁻¹	Одновременный многоэлементный анализ Simultaneous multi-element analysis
78	АЭС ИСП ICP OES	Растения Herbs	Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn 0,07–1,8 мкг·г ⁻¹ / μg·g ⁻¹	Микроволновое кислотное разложение Microwave acids decomposition
79	АЭС ИСП ICP OES	Рассолы Pickles	Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn 0,1–2,1 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Внутренний стандарт Internal standard
80	АЭС ИСП ICP OES	Речная вода, морская вода River water, sea water	Co, Cu, Mn, Fe, V, Ti, Mn 0,02–0,6 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Экстракция трёхфазным реагентом Extraction with a three-phase reagent
81	ИСП МС высокого разрешения High resolution ICP MS	Моча Urine	Cd, Cu, Pb, Zn 1,4–111 пг·г ⁻¹ / pg·g ⁻¹	Внутренний стандарт Internal standard
82	МС ИСП двойной фокусировки MS ISP dual focus	Моча, почка, речная вода, лишайники, донные отложения Urine, kidney, river water, lichens, sediments	Cd 10 пг·г ⁻¹ / pg·g ⁻¹	Изотопное разбавление Isotope dilution
83	МС ИСП ICP MS	Рис Rice	As, Cd, Pb 0,20–0,40 мкг·кг ⁻¹ / μg·kg ⁻¹	Микроволновое кислотное разложение Microwave acids decomposition
21	АЭС ДПТ DCA OES АЭС ДДП TJ OES	Волосы Hair	Ag, Al, Bi, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Si, Ti, Zn 0,01–0,8 мкг·г ⁻¹ / μg·g ⁻¹ Al, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Fe, Mg, Mn, Mo, Nb, Ni, Si, Ti, W, Zn 0,06–2 мкг·г ⁻¹ / μg·g ⁻¹	Обжиг, разбавление графитовым буфером Firing, dilution with graphite buffer
89	АЭС ДПТ DCA OES	Сыворотка крови Serum	Ca, Cu, Fe, Mg, P, Zn 30–2000 мкг·л ⁻¹ / μg·l ⁻¹	Без пробоподготовки Without sample preparation
20	АЭС ДДП TJ OES	Органы животных Animal organs	Al, B, Ca, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, P, Si, Ti, Zn 0,10–30 мкг·г ⁻¹ / μg·g ⁻¹	Обжиг лиофилизирован- ных тканей Firing of lyophilized fabrics

Примечание: пределы обнаружения представлены в единицах измерения, как приведено в литературном источнике
Note: limits of detection are presented in units of measurement as given in the literature

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сохранение безопасности окружающей среды и поддержание высокого уровня жизни населения – важная задача сегодняшнего дня. Возможности современных инструментальных методов анализа при

определении тяжелых металлов и важных экотоксикантов во многом зависят от самого объекта анализа. Очевидно, что применение многоэлементных методов даёт наиболее полную картину экологической обстановки, однако часто условия регистрации

нескольких десятков определяемых элементов носит компромиссный характер, что оказывает негативное влияние на их метрологические характеристики. Устранение матричных влияний и снижение пределов обнаружения достигнуто применением процедур концентрирования. Различные виды экстракции, сорбции, осаждения, химической трансформации (гидридогенерация и др.) применены для биологических объектов и объектов окружающей среды. Использование одноэлементных методов позволяет создать уникальные условия для отдельно взятого элемента, что в сочетании с предварительным концентрированием может обеспечивать низкие пределы обнаружения.

Методы ЭТААС, АЭС ИСП, МС ИСП в различных вариантах хорошо зарекомендовали себя при определении кадмия, свинца и других тяжёлых металлов в объектах различной природы. Пределы обнаружения кадмия могут достигать 0,005–0,08 мкг·л⁻¹ для ЭТААС; 0,0004–105 мкг·л⁻¹ для ИВА; 0,008–0,1 мкг·л⁻¹ для АЭС ИСП; и рекордные 1,4 пг·г⁻¹ для МС ИСП высокого разрешения. Пределы обнаружения свинца могут достигать 0,008–0,83 мкг·л⁻¹ для ЭТААС; 0,12–43 мкг·л⁻¹ для ИВА; 0,15–2,1 мкг·л⁻¹ для АЭС ИСП; 0,01 мкг·л⁻¹ для МС ИСП. Интересно, что при оценке экологического состояния возможность многоэлементных методов часто остаются не реализованными; методами АЭС ИСП и МС ИСП одновременно проводят определение не более 30 элементов, хотя потенциально методами определяют до 60–70 элементов.

Роль инструментальных методов для получения достоверной информации об элементном и вещественном составе биологических объектов и объектов окружающей среды неоспорима. Современные методики количественного химического анализа обеспечивают получение надежных результатов определения тяжелых металлов, однако в условиях постоянной изменчивости и появлении новых объектов исследований требуется адаптация имеющихся или разработка принципиально новых методик, что является актуальной, но сложной аналитической задачей.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 121031700315-2.

ACKNOWLEDGMENT

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. 121031700315-2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теплая Г.А. Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды (обзор литературы) // Астраханский вестник экологического образования. 2013. N 1(23). С. 182–192.
2. Flora G., Gupta D., Tiwari A. Toxicity of lead: a review with recent updates // *Interdisciplinary toxicology*. 2012. V. 5. N 2. P. 47–58. <https://doi.org/10.2478/v10102-012-0009-2>
3. Papanikolaou N.C., et al. Lead toxicity update. A brief review // *Medical science monitor*. 2005. V. 11. N 10. P. RA329–RA336.
4. Seregin I.V., Ivanov V.B. Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants // *Russian journal of plant*

5. physiology. 2001. T. 48. С. 523–544. <https://doi.org/10.1023/A:1016719901147>
5. Genchi G., et al. The effects of cadmium toxicity // *International journal of environmental research and public health*. 2020. V. 17. N 11. Article ID: 3782. <https://doi.org/10.3390%2Fijerph17113782>
6. Amin B., et al. Anthropogenic impacts on heavy metal concentrations in the coastal sediments of Dumai, Indonesia // *Environmental monitoring and assessment*. 2009. V. 148. P. 291–305. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0159-z>
7. Jigau G., et al. Heavy metals in the anthropogenic cycle of elements // *Soil as World Heritage*. 2014. P. 61–68. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6187-2_9
8. Онищенко Г.Г. СанПин 2.1. 4.1074–01 Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России. 2002.
9. Воскресенская О.Л., Воскресенский В.С., Алябьева Е.А. Накопление тяжелых металлов почвой и растениями в местах сбора и временного хранения твердых бытовых отходов // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. N 2. С. 401–401.
10. Пляскина О.В., Ладонин Д.В. Соединения тяжелых металлов в гранулометрических фракциях некоторых типов почв // *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*. 2005. N 4. С. 36–43.
11. Уланова Т.С. и др. Научно-методические основы химико-аналитического обеспечения медико-биологических исследований в экологии человека // *Вестник Пермского федерального исследовательского центра*. 2009. N 4. С. 16–21.
12. Perring L., et al. An evaluation of analytical techniques for determination of lead, cadmium, chromium, and mercury in food-packaging materials // *Fresenius' journal of analytical chemistry*. 2001. V. 370. P. 76–81. <https://doi.org/10.1007/s002160100716>
13. Bingöl M., et al. Determination of some heavy metal levels in soft drinks from Turkey using ICP-OES method // *Czech journal of food sciences*. 2010. T. 28. N 3. P. 213–216. <http://dx.doi.org/10.17221/158/2008-CJFS>
14. Wippermann D., et al. Determination of technology-critical elements in seafood reference materials by inductively coupled plasma-tandem mass spectrometry // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2023. P. 1–11. <http://dx.doi.org/10.1007/s00216-023-05081-z>
15. Shang D., et al. Direct determination of lead in foods by solid sampling electrothermal vaporization atomic fluorescence spectrometry // *Analytical Sciences*. 2016. V. 32. N 9. P. 1007–1010. <https://doi.org/10.2116/analsci.32.1007>
16. Melo J.C., et al. Sequential determination of Cd, Co, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, and Zn in powdered refreshments by FS-F AAS after a simple sample treatment // *Food Analytical Methods*. 2020. V. 13. P. 212–221. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12161-019-01589-2>
17. Бок Р., Трофимова В.А. Методы разложения в аналитической химии. М.: Химия, 1984. 432 с.
18. Онищенко Г.Г. Контроль содержания химических соединений и элементов в биологических средах. Пермь: Книжный формат, 2011. 520 с.
19. Определение массовой концентрации марганца, свинца, магния в пробах крови методом атомно-абсорбционной спектроскопии: МУК 4.1.2106-06 / Т.С. Уланова [и др.] // *Определение вредных веществ в биологических средах: сб. метод. указаний*. М.: Федеральное агентство по санитарно-эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. 62 с.
20. Zaksas N.P., Sultangazieva T.T., Korda T.M. Using a two-jet arc plasmatron for determining the trace element composition of powdered biological samples // *Journal of Analytical*

- Chemistry. 2006. V. 61. P. 582–587.
<https://doi.org/10.1134/S1061934806060128>
21. Tsygankova A.R., et al. Analysis of trace elements in the hair of farm animals by atomic emission spectrometry with DC ARC excitation sources // *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*. 2017. V. 9. N 5. P. 601.
22. Титова Е.Ф., Титов В.А., Трунов А.А., Коковин Г.А., Чернявский Л.И., Кузнецов Ф.А. Банк данных по свойствам материалов электронной техники. Опыт создания автоматизированной базы термодинамической информации. Препринт 90–16. Новосибирск: СО АН СССР, 1990. с. 44.
23. Хвостиков В.А., Карандашев В.К., Орлова В.А. Автоклавная система вскрытия образцов для элементного анализа. Патент РФ. N RU 2599526. 2016.
24. Кубракова И.В. Микроволновое излучение в аналитической химии: возможности и перспективы использования // *Успехи химии*. 2002. Т. 71. N 4. С. 327–340.
25. Микроволновые системы серии Master. URL: <https://labconcept.ru/catalog/sample-preparation/mikrovolnovye-sistemy-razlozheniya/master/> (дата обращения: 01.03.2024)
26. Система микроволнового разложения проб MARS 6. URL: <https://interanalyt.ru/shop/mikrovolnovaya-podgotovka-prob/kislotnoe-razlozhenie-mineralizatsiya/mars-6/> (дата обращения: 01.03.2024)
27. Шипков А.Г. Способ подготовки проб для химического анализа и устройство для его осуществления. Патент РФ, N RU2165608. 2000.
28. Микроволновая система пробоподготовки ПЛП-01М МЕРКУРИЙ для минерализации. URL: https://www.moslabo.ru/production/prob/pp_svch/mikrovolnovaya-laboratornaya-sistema-pech-dlya-probopodgotovki-merkuriy-plp-01m/ (дата обращения: 01.03.2024)
29. Васильева Л.А. и др. Определение свинца и кадмия в моче атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией // *Журнал аналитической химии*. 2008. Т. 63. N 7. С. 711–716.
30. Маркова М.Е. и др. Сорбция тяжелых металлов высшими грибами и хитином разного происхождения в опытах in vitro // *Вестник нижегородского университета им. Лобачевского* Н.И. 2008. N 6. С. 118–124.
31. Паршина А.Э. и др. Сорбция кадмия, свинца и хрома (vi) целлюлозными комплексами арктических бурых водорослей // *Химия растительного сырья*. 2022. N 3. С. 325–336.
32. Папуниди К.Х. и др. Сорбционные характеристики высокодисперсных минеральных адсорбентов в отношении кадмия, свинца и т-2-токсина // *Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии*. 2012. N 1. С. 97.
33. Fernández F.M., et al. Fully automatic on-line separation preconcentration system for electrothermal atomic absorption spectrometry: determination of cadmium and lead in sea-water // *Analyst*. 1997. V. 122. N 7. P. 679–684.
<https://doi.org/10.1039/a607598c>
34. Burguera J.L., Burguera M. On-line sample pre-treatment systems interfaced to electrothermal atomic absorption spectrometry // *Analyst*. 1998. V. 123. N 4. P. 561–569.
<https://doi.org/10.1039/D3AN02164E>
35. Anthemidis A.N., Zachariadis G.A., Stratis J.A. Development of an on-line solvent extraction system for electrothermal atomic absorption spectrometry utilizing a new gravitational phase separator. Determination of cadmium in natural waters and urine samples // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2003. V. 18. N 11. P. 1400–1403.
<https://doi.org/10.1039/B308325J>
36. Tao G., Fang Z. On-line flow injection solvent extraction for electrothermal atomic absorption spectrometry: determination of nickel in biological samples // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 1995. V. 50. N 14. P. 1747–1755.
[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(95\)01378-4](https://doi.org/10.1016/0584-8547(95)01378-4)
37. Yebra M.C., Enriquez M.F., Cespón R.M. Preconcentration and flame atomic absorption spectrometry determination of cadmium in mussels by an on-line continuous precipitation–dissolution flow system // *Talanta*. 2000. V. 52. N 4. P. 631–636.
[https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(00\)00367-2](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(00)00367-2)
38. Wang Y., Wang J. H., Fang Z.L. Octadecyl immobilized surface for precipitate collection with a renewable microcolumn in a lab-on-valve coupled to an electrothermal atomic absorption spectrometer for ultratrace cadmium determination // *Analytical chemistry*. 2005. V. 77. N 16. P. 5396–5401.
<https://doi.org/10.1021/ac050638z>
39. Vargas-Razo C., Tyson J.F. Determination of cadmium by flow injection-chemical vapor generation-atomic absorption spectrometry. // *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*. 2000. N 366. P. 182–190. <https://doi.org/10.1007/s002160050036>
40. Lampugnani L., Salvetti C., Tsalev D.L. Hydride generation atomic absorption spectrometry with different flow systems and in-atomizer trapping for determination of cadmium in water and urine—overview of existing data on cadmium vapour generation and evaluation of critical parameters // *Talanta*. 2003. V. 61. N 5. P. 683–698. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(03\)00324-2](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(03)00324-2)
41. Seiler H., Sigel A., Sigel H. Atomic absorption spectrometry. Handbook on metals in clinical and analytical chemistry. CRC Press, 1994. 940 p.
42. Campillo N., et al. Rapid determination of lead and cadmium in biological fluids by electrothermal atomic absorption spectrometry using Zeeman correction // *Analytica chimica acta*. 1999. V. 390. N 1–3. P. 207–215. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(99\)00166-X](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(99)00166-X)
43. Gomez M.R., et al. Determination of heavy metals for the quality control in argentinian herbal medicines by ETAAS and ICP-OES // *Food and Chemical Toxicology*. 2007. V. 45. N 6. P. 1060–1064. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2006.12.013>
44. Брянский Б.Я., Лосева А.А., Князев С.Ю. Определение цинка, кадмия, свинца в системе "почва-дождевые черви-кресс-салат" методом ЭТААС // *Естественные науки и экология*. 2019. С. 11–15.
45. Arpadjan S., et al. Arsenic, cadmium and lead in medicinal herbs and their fractionation // *Food and chemical toxicology*. 2008. V. 46. N. 8. P. 2871–2875.
<https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.05.027>
46. Acar O. Determination of cadmium, copper and lead in soils, sediments and sea water samples by ETAAS using a Sc+Pd+NH₄NO₃ chemical modifier // *Talanta*. 2005. V. 65. N 3. P. 672–677. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2004.07.035>
47. Montoro-Leal P., et al. Magnetic dispersive solid phase extraction for simultaneous enrichment of cadmium and lead in environmental water samples // *Microchemical Journal*. 2020. V. 155. Article ID: 104796.
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104796>
48. Behbahani M., et al. Ultrasonic-assisted d-μ-SPE based on amine-functionalized KCC-1 for trace detection of lead and cadmium ion by GFAAS // *Microchemical Journal*. 2022. V. 183. Article ID: 107951.
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.107951>
49. Angeleska A., et al. Determination of heavy metals and radionuclides in animal feeds of plant origin. Proceedings 3rd International Conference on Agriculture and Life Science. Campobasso-Tirana, 2021. pp. 464–465
50. Rezazadeh N., et al. Novel Graphene oxide-Polyethylene Glycol mono-4-nonylphenyl Ether adsorbent for solid phase extraction of Pb²⁺ in blood and water samples // *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2022. V. 20. N 2. P. 675–689. <https://doi.org/10.1007/s40201-022-00807-0>
51. Daftsis E.J., Zachariadis G.A. Analytical performance of ETAAS method for Cd, Co, Cr and Pb determination in blood fractions samples // *Talanta*. 2007. V. 71. N 2. P. 722–730.
<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2006.05.029>
52. Захаров Ю.А. и др. Прямое атомно-абсорбционное определение свинца и кадмия в питьевых молочных

- продуктах с помощью двухстадийной зондовой атомизации в графитовой печи // Аналитика и контроль. 2013. Т. 3. N 3. С. 275–280.
<https://journals.urfu.ru/index.php/analitika/article/view/801>
53. Захаров Ю.А. и др. Прямой атомно-абсорбционный анализ почв с помощью приставки Атзонд-1 для двухстадийной зондовой атомизации в графитовой печи // Аналитика и контроль. 2013. Т. 17. N 2. С. 159–169.
<https://journals.urfu.ru/index.php/analitika/article/view/759>
54. Volzhenin A.V., et al. Determination of gold and palladium in rocks and ores by atomic absorption spectrometry using two-stage probe atomization // *Journal of Analytical Chemistry*. 2017. V. 72. P. 156–162. <https://doi.org/10.1134/S1061934817020150>
55. Трубочева Л.В., Купцова Н.В. Определение содержания подвижных форм тяжёлых металлов (кадмия, свинца и меди) в почвах методом инверсионной вольтамперометрии // Вестник Удмуртского университета. Серия Физика и химия. 2008. N 2. С. 112–118.
56. Темерев С.В., Логинова О.Б. Экстракционно-вольтамперометрический способ определения цинка, кадмия, свинца и меди в природных водах. Патент РФ, номер патента: RU 2383014. 2010.
57. Rajawat D.S., Kumar N., Satsangee S.P. Trace determination of cadmium in water using anodic stripping voltammetry at a carbon paste electrode modified with coconut shell powder // *Journal of Analytical Science and Technology*. 2014. V. 5. P. 1–8. <https://doi.org/10.1186/s40543-014-0019-0>
58. Матвейко Н.П. и др. Инверсионно-вольтамперометрический контроль содержания тяжелых металлов в лекарственном растительном сырье и препаратах на его основе // Вестник витебского государственного технологического университета. 2016. Т. 1. N 30. С. 82–89.
59. Mamani M.C.V., et al. Simultaneous determination of cadmium and lead in medicinal plants by anodic stripping voltammetry // *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2005. V. 37. N 4. P. 709–713. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2004.11.049>
60. Lisboa T.P., et al. Simultaneous determination of cadmium, lead, and copper in the constituent parts of the illegal cigarettes by Square Wave Anodic Stripping Voltammetry // *Microchemical Journal*. 2019. V. 150. Article ID: 104183. <http://dx.doi.org/10.1016/j.microc.2019.104183>
61. Захарчук Н.Ф. и др. Прямое определение кадмия, свинца и меди в цельной крови методом инверсионной вольтамперометрии с использованием модифицированных толстопленочных графитовых электродов // Химия в интересах устойчивого развития. 2003. Т. 11. N 5. С. 725–737.
62. Алексеева Н.А. и др. Определение содержания кадмия, меди, свинца и цинка в биообъектах методом инверсионной вольтамперометрии // Клиническая лабораторная диагностика. 2004. N 9. С. 83а–83.
63. Селимов Р.Н. Накопление свинца и кадмия в организме лошадей и поиск метода их выведения // Ветеринарная практика. 2008. N 3. С. 97–99.
64. Kruusma J., et al. Sono-electroanalysis: anodic stripping voltammetric determination of cadmium in whole human blood // *Electroanalysis: An International Journal Devoted to Fundamental and Practical Aspects of Electroanalysis*. 2004. V. 16. N 5. P. 399–403. <http://dx.doi.org/10.1002/elan.200302834>
65. Kumar M.P., et al. Differential pulse anodic stripping voltammetric determination of Pb, Cd, Cu, and Zn in air, diet, and blood samples: Exposure assessment // *Analytical letters*. 2005. V. 38. N 3. P. 463–475. <http://dx.doi.org/10.1081/AL-200047792>
66. Каменев А.И. и др. Многоэлементный анализ в инверсионной вольтамперометрии // Журнал аналитической химии. 2008. Т. 63. N 11. С. 1186–1192. <https://doi.org/10.1134/S0044450219010079>
67. Barek J., et al. Polarography and voltammetry at mercury electrodes // *Critical reviews in analytical chemistry*. 2001. V. 31. N 4. P. 291–309. <http://dx.doi.org/10.1080/20014091076776>
68. Locatelli C., Torsi G. Simultaneous square wave anodic stripping voltammetric determination of Cr, Pb, Sn, Sb, Cu, Zn in presence of reciprocal interference: application to meal matrices // *Microchemical Journal*. 2004. V. 78. N 2. P. 175–180. <http://dx.doi.org/10.1016/j.microc.2004.04.003>
69. Suteerapataranon S., et al. Exploiting flow injection and sequential injection anodic stripping voltammetric systems for simultaneous determination of some metals // *Talanta*. 2002. V. 58. N 6. P. 1235–1242. [https://doi.org/10.1016/s0039-9140\(02\)00445-9](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(02)00445-9)
70. Tsygankova A.R., et al. Determination of boron by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy. Biodistribution of ¹⁰B in tumor-bearing mice // *Russian Chemical Bulletin*. 2020. V. 69. P. 601–607. <https://doi.org/10.1007/s11172-020-2805-8>
71. Szymczycha-Madeja W.M.A., Pohl P. Determination and speciation of inorganic As in homeopathic medicines by HG-ICP OES method with no or minimal sample treatment before measurements // *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2023. N 236. Article ID: 115682. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2023.115682>
72. Stürup St. Application of HR-ICP-MS for the simultaneous measurement of zinc isotope ratios and total zinc content in human samples // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2000. V. 15. N 4. P. 315–321. <https://doi.org/10.1039/A906207F>
73. Чудинов Э.Г. Атомно-эмиссионный анализ с индукционной плазмой // Итоги науки и техники. Серия: аналитическая химия. 1990. Т. 2. 255 с.
74. Dean J.R. Practical inductively coupled plasma spectrometry. John Wiley & Sons, 2019. 220 p.
75. Nölte J. ICP Emission Spectrometry: a practical guide. John Wiley & Sons, 2021. 281 p.
76. Суриков В.Т. Пневматические распылители с пересекающимися потоками для спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Аналитика и контроль. 2010. N 3. С. 108–156.
77. Todolí J.L., et al. Elemental matrix effects in ICP-AES // *Journal of analytical atomic spectrometry*. 2002. V. 17. N 2. P. 142–169. <https://doi.org/10.1039/B009570M>
78. Kos V., et al. Determination of heavy metal concentrations in plants exposed to different degrees of pollution using ICP-AES // *Fresenius' journal of analytical chemistry*. 1996. V. 354. P. 648–652. <https://doi.org/10.1007/s0021663540648>
79. Mitko K., Bebek M. ICP-OES determination of trace elements in salinated water samples // *Atomic spectroscopy-norwalk Connecticut*. 1999. V. 20. N 6. P. 217–223.
80. Li X.J., et al. Determination of trace metal ions Co, Cu, Mo, Mn, Fe, Ti, V in reference river water and reference seawater samples by inductively coupled plasma emission spectrometry combined with the third phase preconcentration // *Fresenius' journal of analytical chemistry*. 1996. V. 356. P. 52–56. <https://doi.org/10.1007/s0021663560052>
81. Townsend A.T., et al. The determination of copper, zinc, cadmium and lead in urine by high resolution ICP-MS // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 1998. V. 13. N 11. P. 1213–1219. <https://doi.org/10.1039/A805021J>
82. Mota J.P.V., et al. Determination of cadmium in environmental and biological reference materials using isotope dilution analysis with a double focusing ICP-MS: a comparison with quadrupole ICP-MS // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 1999. V. 14. N 9. pp. 1467–1473. <https://doi.org/10.1039/A901753D>
83. Mataveli L.R.V., et al. Total arsenic, cadmium, and lead determination in Brazilian rice samples using ICP-MS // *Journal of Analytical Methods in Chemistry*. 2016. V. 2016. Article ID: 3968786 <https://doi.org/10.1155/2016/3968786>

84. Cholak J., Hubbart D.M. Determination of Cadmium in Biological Material. Spectrographic, Polarographic, and Colorimetric Methods // *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*. 1944. V. 16. N 5. P. 333–336. <http://dx.doi.org/10.1021/i560129a024>
85. Bharti A.S., Sharma S., Uttam K.N. Elemental assessment of the leaf and seed of *Rauwolfia serpentina* (Sarpagandha) by direct current arc optical emission spectroscopy // *National Academy Science Letters*. 2020. V. 43. P. 361–365. <http://dx.doi.org/10.1007/s40009-019-00872-4>
86. Ma W., et al. Volatilization and leaching behavior of heavy metals in MSW incineration fly ash in a DC arc plasma furnace // *Fuel*. 2017. V. 210. P. 145–153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.091>
87. Shukla N. Trace Metal Analysis of Red Tomato by Direct Current Arc Optical Emission Spectroscopy // *Indian J. Sci. Res.* 2019. V. 18. N 2. P. 01–05.
88. Polyakova E.V., Shuvaeva O.V. Determination of Calcium, Magnesium, Iron, Copper, Zinc, and Phosphorus in Blood Serum by Arc Atomic Emission Spectrometry // *Journal of Analytical Chemistry*. 2005. V. 60. N 10. P. 937–941. <http://dx.doi.org/10.1007/s10809-005-0212-9>
89. Гладких Э.А. и др. Применение атомно-эмиссионной спектрометрии с возбуждением спектров в дуге постоянного тока для оценки средних уровней содержания макро-и микроэлементов в волосах человека // *Микроэлементы в медицине*. 2003. Т. 4. N 3. С. 20–24.
90. Закас Н.П. Возможности двухструйного дугового плазмотрона для атомно-эмиссионного спектрального анализа высокочистых веществ и биологических проб // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2012. Т. 78. N 1–2. С. 34–38.
91. Закас Н.П., Веряскин А.Ф. Двухструйная дуговая плазма: матричные влияния и способы их подавления // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2019. Т. 85. N 1(II). С. 139–144.
92. Bozorgzadeh E., Pasdaran A., Ebrahimi-Najafabadi H. Determination of toxic heavy metals in fish samples using dispersive micro solid phase extraction combined with inductively coupled plasma optical emission spectroscopy // *Food Chemistry*. 2021. V. 346. Article ID: 128916. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128916>
93. Nyaba L., et al. Speciation of inorganic selenium in environmental samples after suspended dispersive solid phase microextraction combined with inductively coupled plasma spectrometric determination // *Talanta*. 2016. V. 159. P. 174–180. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.06.023>
94. Nyaba L., Matong J.M., Nomngongo P.N. Nanoparticles consisting of magnetite and Al₂O₃ for ligandless ultrasound-assisted dispersive solid phase microextraction of Sb, Mo and V prior to their determination by ICP-OES // *Microchimica Acta*. 2016. V. 183. P. 1289–1297. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00604-016-1766-y>
95. Ranjbar L., et al. Ionic liquid based dispersive liquid-liquid microextraction combined with ICP-OES for the determination of trace quantities of cobalt, copper, manganese, nickel and zinc in environmental water samples // *Microchimica Acta*. 2012. V. 177. P. 119–127. <http://dx.doi.org/10.1007/s00604-011-0757-2>
96. Lemos V.A., dos Santos Vieira E.V. Method for the determination of cadmium, lead, nickel, cobalt and copper in seafood after dispersive liquid-liquid micro-extraction // *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2014. V. 31. N 11. P. 1872–1878. <https://doi.org/10.1080/19440049.2014.964338>
97. Dos Santos Silva E., et al. Dispersive liquid-liquid microextraction for simultaneous determination of cadmium, cobalt, lead and nickel in water samples by inductively coupled plasma optical emission spectrometry // *Microchimica Acta*. 2012. V. 178. P. 269–275. <http://dx.doi.org/10.1007/s00604-012-0836-z>
98. Castro G.R., et al. Determination of Cd (II), Cu (II) and Ni (II) in aqueous samples by ICP-OES after on-line preconcentration in column packed with silica modified with 2-aminothiazole // *Microchimica Acta*. 2008. V. 160. P. 203–209. <http://dx.doi.org/10.1007/s00604-007-0845-5>
99. Zougagh M., de Torres A.G., Pavón J.M. C. Determination of cadmium in water by ICP-AES with on-line adsorption preconcentration using DPTH-gel and TS-gel microcolumns // *Talanta*. 2002. V. 56. N 4. P. 753–761. [https://doi.org/10.1016/s0039-9140\(01\)00605-1](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(01)00605-1)
100. Ferreira S.L.C., et al. Copper determination in natural water samples by using FAAS after preconcentration onto amberlite XAD-2 loaded with calmagite // *Talanta*. 2000. V. 50. N 6. P. 1253–1259. [https://doi.org/10.1016/s0039-9140\(99\)00230-1](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(99)00230-1)
101. Bloxham, Martin J. The determination of trace metals in sea water using ICP-MS. Diss. University of Plymouth, 1994.
102. Kilbride C., Poole J., Hutchings T.R.A comparison of Cu, Pb, As, Cd, Zn, Fe, Ni and Mn determined by acid extraction/ICP-OES and ex situ field portable X-ray fluorescence analyses // *Environmental Pollution*. 2006. V. 143. N 1. P. 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.11.013>
103. Bakircioglu D., Kurtulus Y.B., Yurtsever S. Comparison of extraction induced by emulsion breaking, ultrasonic extraction and wet digestion procedures for determination of metals in edible oil samples in Turkey using ICP-OES // *Food chemistry*. 2013. V. 138. N 2–3. P. 770–775. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.10.089>
104. Демаков Ю.П. и др. Использование рентгенофлуоресцентного анализа для оценки содержания химических элементов в почве лесных биогеоценозов // *Научные труды Государственного природного заповедника «Большая Кокшага»*. 2017. N 8. С. 56–75.
105. Умаров Н.Н. Исследования содержания тяжелых металлов в почве и растениях каперса колючего (*Sarraris spinosa* L.) и полыни горкой (*Artemisia absinthium* L.) методом рентгенофлуоресцентного анализа // *Экосистемы*. 2022. N 29. С. 43–50.
106. Чернова Р.К. и др. Определение содержания свинца в почвах г. Саратова методом рентгенофлуоресцентного анализа // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Химия. Биология. Экология*. 2013. Т. 13. N 3. С. 108–113.
107. Трунова В.А., Зверева В.В. Метод рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения: объекты исследования // *Журнал структурной химии*. 2016. Т. 57. N 7. С. 1401–1407. <http://dx.doi.org/10.15372/JSC20160705>
108. Trunova V.A., Zvereva V.V. Investigation of insoluble endogenous fractions of gastrointestinal tract by SRXRF // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2005. V. 543. N 1. P. 266–270. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.nima.2005.01.238>
109. Trunova V.A., Brenner N.V., Zvereva V.V. Investigation of the content and of the distribution of chemical elements in human nails by SRXRF // *Toxicology Mechanisms and Methods*. 2009. V. 19. N 1. P. 1–18. <https://doi.org/10.1080/15376510801891310>
110. Fedotov A.P., et al. A 850-year record climate and vegetation changes in East Siberia (Russia), inferred from geochemical and biological proxies of lake sediments // *Environmental earth sciences*. 2015. V. 73. P. 7297–7314. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-014-3906-1>
111. Stepanova O.G., et al. Reconstruction of glacier fluctuations in the East Sayan, Baikalsky and Kodar Ridges (East Siberia, Russia) during the last 210 years based on high-resolution geochemical proxies from proglacial lake bottom sediments // *Environmental earth sciences*. 2015. V. 74. P. 2029–2040. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-015-4457-9>

112. Степанова О.Г. и др. Исследования донных осадков прогляциального озера Эхой (Восточный Саян) методом РФА-СИ // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2015. Т. 79. N 1. С. 132–132. <http://dx.doi.org/10.7868/S0367676515010317>
113. Сиромля Т.И., Худяев С.А., Сысо А.И. Использование метода РФА-СИ в почвенно-экологических исследованиях на территории г. Новосибирска // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2015. Т. 79. N 1. С. 101–101. <https://doi.org/10.7868/S0367676515010287>
114. Кулматов Р.А., Кист А.А., Каримов И.И. Нейтронно-активационная оценка распределения элементов в водах // Журнал аналитической химии. 1980. Т. 35. N 2. С. 254–259.
115. Музафаров А.М. и др. Методы оценки техногенного влияния хвостохранилищ промышленных предприятий на окружающую среду // Горный вестник Узбекистана. 2002. N 2. С. 85–89.
116. Музафаров А.М., Кулматов Р.А. Многоэлементный анализ химических элементов в пробах почвы с помощью инструментального нейтронно-активационного метода // Universum: технические науки. 2020. Т. 12–3. N 81. С. 100–104.
117. Shuvaeva O.V., Gustaytis M.A., Anoshin G.N. Mercury speciation in environmental solid samples using thermal release technique with atomic absorption detection // *Analytica chimica acta*. 2008. V. 621. Iss. 2. P. 148–154. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2008.05.034>
118. Kot A., Namiesnik J. The role of speciation in analytical chemistry // *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2000. V. 19. N 2–3. P. 69–79. [http://dx.doi.org/10.1016/S0165-9936\(99\)00195-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-9936(99)00195-8)
119. Shuvaeva O.V., Belchenko L.A., Romanova T.E. Studies on cadmium accumulation by some selected floating macrophytes // *International journal of phytoremediation*. 2013. V. 15. N 10. P. 979–990. <https://doi.org/10.1080/15226514.2012.751353>
120. Romanova T.E., Shuvaeva O.V., Belchenko L.A. The mesocosm study of cadmium and copper bioaccumulation by water hyacinth in one-time and sequentially contaminated system // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2015. V. 95. N 13. P. 1186–1194. <http://dx.doi.org/10.1080/03067319.2014.1002490>
121. Fujita M. The presence of two Cd-binding components in the roots of water hyacinth cultivated in a Cd²⁺-containing medium // *Plant and cell physiology*. 1985. V. 26. N 2. P. 295–300.
122. Sadi B.B.M., et al. An HPLC-ICP-MS technique for determination of cadmium–phytochelatin in genetically modified *Arabidopsis thaliana* // *Journal of Chromatography B*. 2008. V. 861. N 1. P. 123–129. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2007.11.004>
123. Yen T.Y., Villa J.A., DeWitt J.G. Analysis of phytochelatin–cadmium complexes from plant tissue culture using nano-electrospray ionization tandem mass spectrometry and capillary liquid chromatography/electrospray ionization tandem mass spectrometry // *Journal of mass spectrometry*. 1999. V. 34. N 9. P. 930–941. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9888\(199909\)34:9%3C930::aid-jms853%3E3.0.co;2-e](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9888(199909)34:9%3C930::aid-jms853%3E3.0.co;2-e)
124. Barańkiewicz D., et al. Determination of cadmium and lead species and phytochelatin in pea (*Pisum sativum*) by HPLC-ICP-MS and HPLC-ESI-MSn // *Talanta*. 2009. V. 79. N 2. P. 493–498. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2009.04.026>
3. Papanikolaou N.C., et al. Lead toxicity update. A brief review. *Medical science monitor*, 2005, vol. 11, no. 10, pp. RA329–RA336.
4. Seregin I.V., Ivanov V.B. Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants. *Russian journal of plant physiology*, 2001, vol. 48, pp. 523–544. <https://doi.org/10.1023/A:1016719901147>
5. Genchi G., et al. The effects of cadmium toxicity. *International journal of environmental research and public health*, 2020, vol. 17, no. 11, article id: 3782. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>
6. Amin B., et al. Anthropogenic impacts on heavy metal concentrations in the coastal sediments of Dumai, Indonesia. *Environmental monitoring and assessment*, 2009. vol. 148. pp. 291–305. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0159-z>
7. Jigau G., et al. Heavy metals in the anthropogenic cycle of elements. *Soil as World Heritage*, 2014, pp. 61–68. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6187-2_9
8. Onishchenko G.G. SanPin 2.1. 4.1074–01 Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control. Moscow, Federal Center for State Sanitary and Epidemiological Supervision of the Ministry of Health of Russia Publ., 2002.
9. Voskresenskaya O.L., Voskresensky V.S., Alyabysheva E.A. Accumulation of heavy metals by soil and plants in places of collection and temporary storage of solid household waste. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2013, no. 2, pp. 401–401. (In Russian)
10. Plyaskina O.V., Ladonin D.V. Compounds of heavy metals in granulometric fractions of some types of soils. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedeniye* [Bulletin of Moscow University. Episode 17. Soil Science]. 2005, no. 4, pp. 36–43. (In Russian)
11. Ulanova T.S., et al. Scientific and methodological foundations of chemical and analytical support for medical and biological research in human ecology. *Vestnik Permskogo federal'nogo issledovatel'skogo tsentra* [Bulletin of the Perm Federal Research Center]. 2009, no. 4, pp. 16–21. (In Russian)
12. Perring L., et al. An evaluation of analytical techniques for determination of lead, cadmium, chromium, and mercury in food-packaging materials. *Fresenius' journal of analytical chemistry*, 2001, vol. 370, pp. 76–81. <https://doi.org/10.1007/s002160100716>
13. Bingöl M., et al. Determination of some heavy metal levels in soft drinks from Turkey using ICP-OES method. *Czech journal of food sciences*, 2010, vol. 28, no. 3, pp. 213–216. <http://dx.doi.org/10.17221/158/2008-CJFS>
14. Wippermann D., et al. Determination of technology-critical elements in seafood reference materials by inductively coupled plasma-tandem mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2023, pp. 1–11. <http://dx.doi.org/10.1007/s00216-023-05081-z>
15. Shang D., et al. Direct determination of lead in foods by solid sampling electrothermal vaporization atomic fluorescence spectrometry. *Analytical Sciences*, 2016, vol. 32, no. 9, pp. 1007–1010. <https://doi.org/10.2116/analsci.32.1007>
16. Melo J. C. et al. Sequential determination of Cd, Co, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, and Zn in powdered refreshments by FS-F AAS after a simple sample treatment. *Food Analytical Methods*, 2020, vol. 13, pp. 212–221. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12161-019-01589-2>
17. Bok R., Trofimova V.A. *Metody razlozheniya v analiticheskoy khimii* [Decomposition methods in analytical chemistry]. Moscow, Chemistry, 1984, 432 p. (In Russian)
18. Onishchenko G.G. *Kontrol' soderzhaniya khimicheskikh soyedineniy i elementov v biologicheskikh sredakh* [Control of the content of chemical compounds and elements in biological environments]. Perm, Knizhnyi format Publ., 2011, 520 c. (In Russian)

19. Ulanova T.S., et al. Determination of the mass concentration of manganese, lead, magnesium in blood samples by atomic absorption spectrometry MUK 4.1.2106-06. *Opredeleniye vrednykh veshchestv v biologicheskikh sredakh: sb. metod. ukazanii* [Determination of harmful substances in biological environments: collection of articles. method. instructions]. Moscow, 2008, 62 p. (In Russian)
20. Zaksas N.P., Sultangazieva T.T., Korda T.M. Using a two-jet arc plasmatron for determining the trace element composition of powdered biological samples. *Journal of Analytical Chemistry*, 2006, vol. 61, pp. 582–587. <https://doi.org/10.1134/S1061934806060128>
21. Tsygankova A.R., et al. Analysis of trace elements in the hair of farm animals by atomic emission spectrometry with DC ARC excitation sources. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 2017, vol. 9, no. 5, p. 601.
22. Titova E.F., Titov V.A., Trunov A.A., Kokovin G.A., Chernyavsky L.I., Kuznetsov F.A. *Bank dannykh po svoistvam materialov elektronnoi tekhniki. Opyt sozdaniya avtomatizirovannoy bazy termodinamicheskoy informatsii* [Data bank on the properties of materials for electronic equipment. Experience in creating an automated thermodynamic information database]. Preprint 90–16. Novosibirsk, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1990, 44 p. (In Russian)
23. Khvostikov V.A., Karandashev V.K., Orlova V.A. *Avtoklavnyaya sistema vskrytiya obraztsov dlya elementnogo analiza* [Autoclave system for opening samples for elemental analysis]. Patent RF, no. RU 2599526, 2016.
24. Kubrakova I.V. Microwave radiation in analytical chemistry: possibilities and prospects for use. *Uspekhi khimii* [Advances in chemistry]. 2002, vol. 71, no. 4, pp. 327–340. (In Russian)
25. *Mikrovolnovyye sistemy serii Master* [Microwave systems Master series]. Available at: <https://labconcept.ru/catalog/sample-preparation/mikrovolnovye-sistemy-razlozheniya/master/> (accessed 01.03.2024)
26. *Sistema mikrovolnovogo razlozheniya prob MARS 6* [Microwave sample digestion system MARS 6]. Available at: <https://interanalyt.ru/shop/mikrovolnovaya-podgotovka-prob/kislotnoe-razlozhenie-mineralizatsiya/mars-6/> (accessed 01.03.2024)
27. Shipkov A.G. *Sposob podgotovki prob dlya khimicheskogo analiza i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Possibility of sample preparation for chemical analysis and devices for its implementation]. Patent RF, no. RU2165608. 2000.
28. *Mikrovolnovaya sistema probopodgotovki PLP-01M MERKURIY dlya mineralizatsii* [Microwave sample preparation system PLP-01M MERCURY for mineralization]. Available at: https://www.moslabo.ru/production/prob/pp_svch/mikrovolnovaya-laboratornaya-sistema-pech-dlya-probopodgotovki-merkuriy-plp-01m/ (accessed 01.03.2024)
29. Vasilyeva L.A., et al. Determination of lead and cadmium in urine by the atomic absorption method with electrothermal atomization. *Zhurnal analiticheskoi khimii* [Journal of Analytical Chemistry]. 2008, vol. 63, no. 7, pp. 711–716. (In Russian)
30. Markova M.E., et al. Sorption of heavy metals by higher fungi and chitin of various origins in in vitro experiments. *Vestnik nizhegorodskogo universiteta im. Lobachevskogo N.I.* [Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after Lobachevsky N.I.]. 2008, no. 6, pp. 118–124. (In Russian)
31. Parshina A.E., et al. Sorption of cadmium, lead and chromium (vi) by cellulose complexes of Arctic brown algae. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials]. 2022, no. 3, pp. 325–336. (In Russian)
32. Papunidi K.Kh., et al. Sorption characteristics of highly dispersed mineral adsorbents with respect to cadmium, lead and t-2-toxin. *Problemy veterinarnoi sanitarii, gigiyeny i ekologii* [Problems of veterinary sanitation, hygiene and ecology]. 2012, no. 1, p. 97. (In Russian)
33. Fernández F.M., et al. Fully automatic on-line separation preconcentration system for electrothermal atomic absorption spectrometry: determination of cadmium and lead in sea-water. *Analyst*, 1997, vol. 122, no. 7, pp. 679–684. <https://doi.org/10.1039/a607598c>
34. Burguera J.L., Burguera M. On-line sample pre-treatment systems interfaced to electrothermal atomic absorption spectrometry. *Analyst*, 1998, vol. 123, no. 4, pp. 561–569. <https://doi.org/10.1039/D3AN02164E>
35. Anthemidis A.N., Zachariadis G.A., Stratis J.A. Development of an on-line solvent extraction system for electrothermal atomic absorption spectrometry utilizing a new gravitational phase separator. Determination of cadmium in natural waters and urine samples. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2003, vol. 18, no. 11, pp. 1400–1403. <https://doi.org/10.1039/B308325J>
36. Tao G., Fang Z. On-line flow injection solvent extraction for electrothermal atomic absorption spectrometry: determination of nickel in biological samples // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 1995, vol. 50, no. 14, pp. 1747–1755. [https://doi.org/10.1016/0584-8547\(95\)01378-4](https://doi.org/10.1016/0584-8547(95)01378-4)
37. Yebra M.C., Enriquez M.F., Cespon R.M. Preconcentration and flame atomic absorption spectrometry determination of cadmium in mussels by an on-line continuous precipitation–dissolution flow system. *Talanta*, 2000, vol. 52, no. 4, pp. 631–636. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(00\)00367-2](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(00)00367-2)
38. Wang Y., Wang J.H., Fang Z.L. Octadecyl immobilized surface for precipitate collection with a renewable microcolumn in a lab-on-valve coupled to an electrothermal atomic absorption spectrometer for ultratrace cadmium determination. *Analytical chemistry*, 2005, vol. 77, no. 16, pp. 5396–5401. <https://doi.org/10.1021/ac050638z>
39. Vargas-Razo C., Tyson J.F. Determination of cadmium by flow injection-chemical vapor generation-atomic absorption spectrometry. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 2000, no. 366, pp. 182–190. <https://doi.org/10.1007/s002160050036>
40. Lampugnani L., Salvetti C., Tsalev D.L. Hydride generation atomic absorption spectrometry with different flow systems and in-atomizer trapping for determination of cadmium in water and urine overview of existing data on cadmium vapour generation and evaluation of critical parameters. *Talanta*, 2003, vol. 61, no. 5, pp. 683–698. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(03\)00324-2](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(03)00324-2)
41. Seiler H., Sigel A., Sigel H. Atomic absorption spectrometry. Handbook on metals in clinical and analytical chemistry. CRC Press Publ., 1994, 940 p.
42. Campillo N., et al. Rapid determination of lead and cadmium in biological fluids by electrothermal atomic absorption spectrometry using Zeeman correction. *Analytica chimica acta*, 1999, vol. 390, no. 1–3, pp. 207–215. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(99\)00166-X](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(99)00166-X)
43. Gomez M.R., et al. Determination of heavy metals for the quality control in argentinian herbal medicines by ETAAS and ICP-OES. *Food and Chemical Toxicology*, 2007, vol. 45, no. 6, pp. 1060–1064. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2006.12.013>
44. Bryanskii B.Ya., Loseva A.A., Knyazev S.Yu. Determination of zinc, cadmium, lead in the “soil-earthworms-cress” system by the ETAAS method. *Yestestvennyye nauki i ekologiya* [Natural Sciences and Ecology]. 2019, pp. 11–15. (In Russian)
45. Arpadjan S., et al. Arsenic, cadmium and lead in medicinal herbs and their fractionation. *Food and chemical toxicology*, 2008, vol. 46, no. 8, pp. 2871–2875. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.05.027>
46. Acar O. Determination of cadmium, copper and lead in soils, sediments and sea water samples by ETAAS using a Sc+Pd+NH₄NO₃ chemical modifier. *Talanta*, 2005, vol. 65, no. 3, pp. 672–677. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2004.07.035>
47. Montoro-Leal P., et al. Magnetic dispersive solid phase extraction for simultaneous enrichment of cadmium and lead in environmental water samples. *Microchemical Journal*. 2020, vol.

- 155, article id: 104796.
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104796>
48. Behbahani M., et al. Ultrasonic-assisted d- μ -SPE based on amine-functionalized KCC-1 for trace detection of lead and cadmium ion by GFAAS. *Microchemical Journal*, 2022, vol. 183, pp. 107951. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.107951>
49. Angeleska A., et al. Determination of heavy metals and radionuclides in animal feeds of plant origin. Proceedings 3rd International Conference on Agriculture and Life Science. Campobasso-Tirana, 2021, pp. 464–465.
50. Rezazadeh N., et al. Novel Graphene oxide-Polyethylene Glycol mono-4-nonylphenyl Ether adsorbent for solid phase extraction of Pb²⁺ in blood and water samples. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 2022, vol. 20, no. 2, pp. 675–689. <https://doi.org/10.1007/s40201-022-00807-0>
51. Daftsis E.J., Zachariadis G.A. Analytical performance of ETAAS method for Cd, Co, Cr and Pb determination in blood fractions samples. *Talanta*, 2007, vol. 71, no. 2, pp. 722–730. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2006.05.029>
52. Zakharov Yu.A., et al. Direct atomic absorption determination of lead and cadmium in drinking dairy products using two-stage probe atomization in a graphite furnace. *Analytics and control*, 2013, vol. 3, no. 3, pp. 275–280. (In Russian)
<https://journals.urfu.ru/index.php/analitika/article/view/801>
53. Zakharov Yu.A., et al. Direct atomic absorption analysis of soils using the Atzond-1 attachment for two-stage probe atomization in a graphite furnace. *Analytics and control*, 2013, vol. 17, no. 2, pp. 159–169. (In Russian)
<https://journals.urfu.ru/index.php/analitika/article/view/759>
54. Volzhenin A.V., et al. Determination of gold and palladium in rocks and ores by atomic absorption spectrometry using two-stage probe atomization. *Journal of Analytical Chemistry*, 2017, vol. 72, pp. 156–162.
<https://doi.org/10.1134/S1061934817020150>
55. Trubacheva L.V., Kuptsova N.V. Determination of the content of mobile forms of heavy metals (cadmium, lead and copper) in soils by stripping voltammetry. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Fizika i khimiya* [Bulletin of the Udmurt University. Physics and Chemistry Series]. 2008, no. 2, pp. 112–118. (In Russian)
56. Temerev S.V., Loginova O B. *Ekstraktsionno-voltamperometricheskii sposob opredeleniya tsinka, kadmiya, svintsa i medi v prirodnykh vodakh*. [Extraction-voltammetric method for determining zinc, cadmium, lead and copper in natural waters]. RF patent, no. RU 2383014, 2010.
57. Rajawat D.S., Kumar N., Satsangee S.P. Trace determination of cadmium in water using anodic stripping voltammetry at a carbon paste electrode modified with coconut shell powder. *Journal of Analytical Science and Technology*, 2014, vol. 5, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1186/s40543-014-0019-0>
58. Matveiko N.P., et al. Stripping voltammetric control of the content of heavy metals in medicinal plant raw materials and preparations based on them. *Vestnik vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Vitebsk State Technological University]. 2016, vol. 1, no. 30, pp. 82–89. (In Russian)
59. Mamani M.C.V., et al. Simultaneous determination of cadmium and lead in medicinal plants by anodic stripping voltammetry. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2005, vol. 37, no. 4, pp. 709–713.
<https://doi.org/10.1016/j.jpba.2004.11.049>
60. Lisboa T.P., et al. Simultaneous determination of cadmium, lead, and copper in the constituent parts of the illegal cigarettes by Square Wave Anodic Stripping Voltammetry. *Microchemical Journal*, 2019, vol. 150, article id: 104183.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.microc.2019.104183>
61. Zakharchuk N.F., et al. Direct determination of cadmium, lead and copper in whole blood by stripping voltammetry using modified thick-film graphite electrodes. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya* [Chemistry for sustainable development]. 2003, vol. 11, no. 5, pp. 725–737. (In Russian)
62. Alekseeva N.A., et al. Determination of the content of cadmium, copper, lead and zinc in biological objects by stripping voltammetry. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika* [Clinical laboratory diagnostics]. 2004, no. 9, pp. 83a–83. (In Russian)
63. Selimov R.N. Accumulation of lead and cadmium in the body of horses and the search for a method for their removal. *Veterinarnaya praktika* [Veterinary practice]. 2008, no. 3, pp. 97–99. (In Russian)
64. Kruusma J., et al. Sono-electroanalysis: anodic stripping voltammetric determination of cadmium in whole human blood. *Electroanalysis: An International Journal Devoted to Fundamental and Practical Aspects of Electroanalysis*, 2004, vol. 16, no. 5, pp. 399–403.
<http://dx.doi.org/10.1002/elan.200302834>
65. Kumar M.P., et al. Differential pulse anodic stripping voltammetric determination of Pb, Cd, Cu, and Zn in air, diet, and blood samples: Exposure assessment. *Analytical letters*, 2005, vol. 38, no. 3, pp. 463–475. <http://dx.doi.org/10.1081/AL-200047792>
66. Kamenev A.I., et al. Multielement analysis in stripping voltammetry. *Journal of Analytical Chemistry*, 2008, vol. 63, no. 11, pp. 1186–1192. (In Russian)
<https://doi.org/10.1134/S0044450219010079>
67. Berek J., et al. Polarography and voltammetry at mercury electrodes. *Critical reviews in analytical chemistry*, 2001, vol. 31, no. 4, pp. 291–309. <http://dx.doi.org/10.1080/20014091076776>
68. Locatelli C., Torsi G. Simultaneous square wave anodic stripping voltammetric determination of Cr, Pb, Sn, Sb, Cu, Zn in presence of reciprocal interference: application to meal matrices. *Microchemical Journal*, 2004, vol. 78, no. 2, pp. 175–180. <http://dx.doi.org/10.1016/j.microc.2004.04.003>
69. Suteerapataranon S., et al. Exploiting flow injection and sequential injection anodic stripping voltammetric systems for simultaneous determination of some metals. *Talanta*, 2002, vol. 58, no. 6, pp. 1235–1242. [https://doi.org/10.1016/s0039-9140\(02\)00445-9](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(02)00445-9)
70. Tsygankova A.R., et al. Determination of boron by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy. Biodistribution of ¹⁰B in tumor-bearing mice. *Russian Chemical Bulletin*, 2020, vol. 69, pp. 601–607.
<https://doi.org/10.1007/s11172-020-2805-8>
71. Szymczycha-Madeja W.M.A., Pohl P. Determination and speciation of inorganic As in homeopathic medicines by HG-ICP OES method with no or minimal sample treatment before measurements. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2023, no. 236, article id: 115682.
<https://doi.org/10.1016/j.jpba.2023.115682>
72. Stürup St. Application of HR-ICP-MS for the simultaneous measurement of zinc isotope ratios and total zinc content in human samples. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2000, vol. 15, no. 4, pp. 315–321.
<https://doi.org/10.1039/A906207F>
73. Chudinov E.G. Atomno-emissionnyy analiz s induktsionnoy plazmoy. *Itogi nauka i tekhniki* [Atomic emission analysis with induction plasma. Results of science and technology]. Series: analytical chemistry. 1990, vol. 2, 255 p.
74. Dean J.R. Practical inductively coupled plasma spectrometry. John Wiley & Sons Publ., 2019, 220 p.
75. Nölte J. ICP Emission Spectrometry: a practical guide. John Wiley & Sons Publ., 2021, 281 p.
76. Surikov V.T. Pneumatic sprayers with intersecting flows for inductively coupled plasma spectrometry. *Analitika i kontrol'* [Analytics and control]. 2010, no. 3, pp. 108–156. (In Russian)
77. Todolí J.L., et al. Elemental matrix effects in ICP-AES. *Journal of analytical atomic spectrometry*, 2002, vol. 17, no. 2, pp. 142–169. <https://doi.org/10.1039/B009570M>
78. Kos V., et al. Determination of heavy metal concentrations in plants exposed to different degrees of pollution using ICP-AES.

- Fresenius' journal of analytical chemistry*, 1996, vol. 354, pp. 648–652. <https://doi.org/10.1007/s0021663540648>
79. Mitko K., Bebek M. ICP-OES determination of trace elements in salinated water samples. *Atomic spectroscopy-norwalk Connecticut*, 1999, vol. 20, no. 6, pp. 217–223.
80. Li X.J., et al. Determination of trace metal ions Co, Cu, Mo, Mn, Fe, Ti, V in reference river water and reference seawater samples by inductively coupled plasma emission spectrometry combined with the third phase preconcentration. *Fresenius' journal of analytical chemistry*, 1996, vol. 356, pp. 52–56. <https://doi.org/10.1007/s0021663560052>
81. Townsend A.T., et al. The determination of copper, zinc, cadmium and lead in urine by high resolution ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 1998, vol. 13, no. 11, pp. 1213–1219. <https://doi.org/10.1039/A805021J>
82. Mota J.P.V., et al. Determination of cadmium in environmental and biological reference materials using isotope dilution analysis with a double focusing ICP-MS: a comparison with quadrupole ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 1999, vol. 14, no. 9, pp. 1467–1473. <https://doi.org/10.1039/A901753D>
83. Mataveli L.R.V., et al. Total arsenic, cadmium, and lead determination in Brazilian rice samples using ICP-MS. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2016, vol. 2016, article id: 3968786 <https://doi.org/10.1155/2016/3968786>
84. Cholak J., Hubbart D.M. Determination of Cadmium in Biological Material. Spectrographic, Polarographic, and Colorimetric Methods. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*, 1944, vol. 16, no. 5, pp. 333–336. <http://dx.doi.org/10.1021/i560129a024>
85. Bharti A.S., Sharma S., Uttam K.N. Elemental assessment of the leaf and seed of Rauwolfia serpentina (Sarpagandha) by direct current arc optical emission spectroscopy. *National Academy Science Letters*, 2020, vol. 43, pp. 361–365. <http://dx.doi.org/10.1007/s40009-019-00872-4>
86. Ma W., et al. Volatilization and leaching behavior of heavy metals in MSW incineration fly ash in a DC arc plasma furnace. *Fuel*, 2017, vol. 210, pp. 145–153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.091>
87. Shukla N. Trace Metal Analysis of Red Tomato by Direct Current Arc Optical Emission Spectroscopy. *Indian J. Sci. Res*, 2019, vol. 18, no. 2, pp. 01–05.
88. Polyakova E.V., Shuvaeva O.V. Determination of Calcium, Magnesium, Iron, Copper, Zinc, and Phosphorus in Blood Serum by Arc Atomic Emission Spectrometry. *Journal of Analytical Chemistry*, 2005, vol. 60, no. 10, pp. 937–941. <http://dx.doi.org/10.1007/s10809-005-0212-9>
89. Gladkikh E.A., et al. Application of atomic emission spectrometry with excitation of spectra in a direct current arc to assess the average levels of macro- and microelements in human hair. *Mikroelementy v meditsine [Microelements in Medicine]*. 2003, vol. 4, no. 3, pp. 20–24. (In Russian)
90. Zaksas N.P. Capabilities of a two-jet arc plasmatron for atomic emission spectral analysis of high-purity substances and biological samples. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Factory Laboratory. Diagnostics of materials]*. 2012, vol. 78, no. 1–2, pp. 34–38. (In Russian)
91. Zaksas N.P., Varyaskin A.F. Double-jet arc plasma: matrix influences and methods for their suppression. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Factory Laboratory. Diagnostics of materials]*. 2019, vol. 85, no. 1(II), pp. 139–144. (In Russian)
92. Bozorgzadeh E., Pasdaran A., Ebrahimi-Najafabadi H. Determination of toxic heavy metals in fish samples using dispersive micro solid phase extraction combined with inductively coupled plasma optical emission spectroscopy. *Food Chemistry*, 2021, vol. 346, article id: 128916. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128916>
93. Nyaba L., et al. Speciation of inorganic selenium in environmental samples after suspended dispersive solid phase microextraction combined with inductively coupled plasma spectrometric determination. *Talanta*, 2016, vol. 159, pp. 174–180. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.06.023>
94. Nyaba L., Matong J.M., Nomngongo P.N. Nanoparticles consisting of magnetite and Al₂O₃ for ligandless ultrasound-assisted dispersive solid phase microextraction of Sb, Mo and V prior to their determination by ICP-OES. *Microchimica Acta*, 2016, vol. 183, pp. 1289–1297. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00604-016-1766-y>
95. Ranjbar L., et al. Ionic liquid based dispersive liquid-liquid microextraction combined with ICP-OES for the determination of trace quantities of cobalt, copper, manganese, nickel and zinc in environmental water samples. *Microchimica Acta*, 2012, vol. 177, pp. 119–127. <http://dx.doi.org/10.1007/s00604-011-0757-2>
96. Lemos V.A., dos Santos Vieira E.V. Method for the determination of cadmium, lead, nickel, cobalt and copper in seafood after dispersive liquid-liquid micro-extraction. *Food Additives and Contaminants: Part A*, 2014, vol. 31, no. 11, pp. 1872–1878. <https://doi.org/10.1080/19440049.2014.964338>
97. Dos Santos Silva E., et al. Dispersive liquid-liquid microextraction for simultaneous determination of cadmium, cobalt, lead and nickel in water samples by inductively coupled plasma optical emission spectrometry. *Microchimica Acta*, 2012, vol. 178, pp. 269–275. <http://dx.doi.org/10.1007/s00604-012-0836-z>
98. Castro G.R., et al. Determination of Cd (II), Cu (II) and Ni (II) in aqueous samples by ICP-OES after on-line preconcentration in column packed with silica modified with 2-aminothiazole. *Microchimica Acta*, 2008, vol. 160, pp. 203–209. <http://dx.doi.org/10.1007/s00604-007-0845-5>
99. Zougagh M., de Torres A.G., Pavón J.M.C. Determination of cadmium in water by ICP-AES with on-line adsorption preconcentration using DPTH-gel and TS-gel microcolumns. *Talanta*, 2002, vol. 56, no. 4, pp. 753–761. [https://doi.org/10.1016/s0039-9140\(01\)00605-1](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(01)00605-1)
100. Ferreira S. L. C. et al. Copper determination in natural water samples by using FAAS after preconcentration onto amberlite XAD-2 loaded with calmagite. *Talanta*, 2000, vol. 50, no. 6, pp. 1253–1259. [https://doi.org/10.1016/s0039-9140\(99\)00230-1](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(99)00230-1)
101. Bloxham, Martin J. The determination of trace metals in sea water using ICP-MS. Diss. University of Plymouth, 1994.
102. Kilbride C., Poole J., Hutchings T.R.A comparison of Cu, Pb, As, Cd, Zn, Fe, Ni and Mn determined by acid extraction/ICP-OES and ex situ field portable X-ray fluorescence analyses. *Environmental Pollution*, 2006, vol. 143, no. 1, pp. 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.11.013>
103. Bakircioglu D., Kurtulus Y.B., Yurtsever S. Comparison of extraction induced by emulsion breaking, ultrasonic extraction and wet digestion procedures for determination of metals in edible oil samples in Turkey using ICP-OES. *Food chemistry*, 2013, vol. 138, no. 2–3, pp. 770–775. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.10.089>
104. Demakov Yu.P., et al. The use of X-ray fluorescence analysis to assess the content of chemical elements in the soil of forest biogeocenoses. In: *Nauchnyye trudy Gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika «Bol'shaya Kokshaga» [Scientific works of the State Nature Reserve "Bolshaya Kokshaga"]*. 2017, no. 8, pp. 56–75. (In Russian)
105. Umarov N.N. Study of the content of heavy metals in the soil and plants of prickly caper (*Capparis spinosa* L.) and wormwood (*Artemisia absinthium* L.) by X-ray fluorescence analysis. *Ekosistemy [Ecosystems]*. 2022, no. 29, pp. 43–50. (In Russian)
106. Chernova R.K., et al. Determination of lead content in soils of Saratov by X-ray fluorescence analysis. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Khimiya. Biologiya. Ekologiya [News of Saratov University. New episode. Chemistry series. Biology. Ecology]*. 2013, vol. 13, no. 3, pp. 108–113. (In Russian)

107. Trunova V.A., Zvereva V.V. Method of X-ray fluorescence analysis using synchrotron radiation: objects of study. *Journal of Structural Chemistry*, 2016, vol. 57, no. 7, pp. 1401–1407. (In Russian) <http://dx.doi.org/10.15372/JSC20160705>
108. Trunova V.A., Zvereva V.V. Investigation of insoluble endogenous fractions of gastrointestinal tract by SRXRF. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2005, vol. 543, no. 1, pp. 266–270. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.nima.2005.01.238>
109. Trunova V.A., Brenner N.V., Zvereva V.V. Investigation of the content and of the distribution of chemical elements in human nails by SRXRF. *Toxicology Mechanisms and Methods*, 2009, vol. 19, no. 1, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1080/15376510801891310>
110. Fedotov A.P., et al. A 850-year record climate and vegetation changes in East Siberia (Russia), inferred from geochemical and biological proxies of lake sediments. *Environmental earth sciences*, 2015, vol. 73, pp. 7297–7314. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-014-3906-1>
111. Stepanova O.G., et al. Reconstruction of glacier fluctuations in the East Sayan, Baikalsky and Kodar Ridges (East Siberia, Russia) during the last 210 years based on high-resolution geochemical proxies from proglacial lake bottom sediments. *Environmental earth sciences*, 2015, vol. 74, pp. 2029–2040. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-015-4457-9>
112. Stepanova O.G., et al. Studies of bottom sediments of the proglacial lake Ekhoj (Eastern Sayan) using the XRF-SI method. *News of the Russian Academy of Sciences. Physical series*, 2015, vol. 79, no. 1, pp. 132–132. (In Russian) <http://dx.doi.org/10.7868/S0367676515010317>
113. Siromlya T.I., Khudyaev S.A., Syso A.I. Use of the XRF-SI method in soil-ecological studies in the territory of Novosibirsk. *News of the Russian Academy of Sciences. Physical series*, 2015, vol. 79, no. 1, pp. 101–101. (In Russian) <https://doi.org/10.7868/S0367676515010287>
114. Kulmatov R.A., Kist A.A., Karimov I.I. Neutron activation assessment of the distribution of elements in waters. *Zhurnal analiticheskoi khimii [Journal of Analytical Chemistry]*, 1980, vol. 35, no. 2, pp. 254–259. (In Russian)
115. Muzafarov A.M., et al. Methods for assessing the technogenic impact of tailings of industrial enterprises on the environment. *Gornyi vestnik Uzbekistana [Mining Bulletin of Uzbekistan]*, 2002, no. 2, pp. 85–89. (In Russian)
116. Muzafarov A.M., Kulmatov R.A. Multielement analysis of chemical elements in soil samples using the instrumental neutron activation method. *Universum: tekhnicheskiye nauki [Universum: technical sciences]*, 2020, vol. 12–3, no. 81, pp. 100–104. (In Russian)
117. Shuvaeva O.V., Gustaytis M.A., Anoshin G.N. Mercury speciation in environmental solid samples using thermal release technique with atomic absorption detection. *Analytica chimica acta*, 2008, vol. 621, no. 2, pp. 148–154. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2008.05.034>
118. Kot A., Namiesnik J. The role of speciation in analytical chemistry. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2000, vol. 19, no. 2–3, pp. 69–79. [http://dx.doi.org/10.1016/S0165-9936\(99\)00195-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-9936(99)00195-8)
119. Shuvaeva O.V., Belchenko L.A., Romanova T.E. Studies on cadmium accumulation by some selected floating macrophytes. *International journal of phytoremediation*, 2013, vol. 15, no. 10, pp. 979–990. <https://doi.org/10.1080/15226514.2012.751353>
120. Romanova T.E., Shuvaeva O.V., Belchenko L.A. The mesocosm study of cadmium and copper bioaccumulation by water hyacinth in one-time and sequentially contaminated system. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2015, vol. 95, no. 13, pp. 1186–1194. <http://dx.doi.org/10.1080/03067319.2014.1002490>
121. Fujita M. The presence of two Cd-binding components in the roots of water hyacinth cultivated in a Cd²⁺-containing medium. *Plant and cell physiology*, 1985, vol. 26, no. 2, pp. 295–300.
122. Sadi B.B.M., et al. An HPLC-ICP-MS technique for determination of cadmium-phytochelatin in genetically modified *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Chromatography B*, 2008, vol. 861, no. 1, pp. 123–129. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2007.11.004>
123. Yen T. Y., Villa J. A., DeWitt J. G. Analysis of phytochelatin-cadmium complexes from plant tissue culture using nano-electrospray ionization tandem mass spectrometry and capillary liquid chromatography/electrospray ionization tandem mass spectrometry. *Journal of mass spectrometry*, 1999, vol. 34, no. 9, pp. 930–941. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9888\(199909\)34:9%3C930::aid-jms853%3E3.0.co;2-e](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9888(199909)34:9%3C930::aid-jms853%3E3.0.co;2-e)
124. Barańkiewicz D., et al. Determination of cadmium and lead species and phytochelatin in pea (*Pisum sativum*) by HPLC-ICP-MS and HPLC-ESI-MSn. *Talanta*, 2009, vol. 79, no. 2, pp. 493–498. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2009.04.026>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Альфия Р. Цыганкова, Сергей А. Гуляев, Любовь С. Адаменко и Михаил А. Шестопалов 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

Alphiya R. Tsygankova, Sergey A. Gulyaev, Lyubov S. Adamenko and Michael A. Shestopalov analysed the data and wrote the manuscript. All authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism or other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Альфия Р. Цыганкова / Alphiya R. Tsygankova <http://orcid.org/0000-0001-7126-276X>
 Сергей А. Гуляев / Sergey A. Gulyaev <https://orcid.org/0009-0006-3466-9791>
 Любовь С. Адаменко / Lyubov S. Adamenko <https://orcid.org/0000-0001-6412-3622>
 Михаил А. Шестопалов / Michael A. Shestopalov <https://orcid.org/0000-0001-9833-6060>

Оригинальная статья / Original article

УДК 551.4:631.459

DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-13



Морфометрическая характеристика рельефа и оценка эрозионной опасности бассейна р. Калаус на основе цифрового моделирования

Евгений Г. Мишвелов¹, Артем И. Корниенко¹, Надира О. Гусейнова²,
Эдуард Е. Тихонов³, Елена Н. Павленко³

¹Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия

²Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

³НТИ (филиал) Северо-Кавказский федеральный университет, Невинномысск, Россия

Контактное лицо

Евгений Г. Мишвелов, доктор биологических наук, профессор, кафедра экологии и биогеографии, Северо-Кавказский федеральный университет; 355000 Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1. Тел. +79614973994

Email mishvelov@mail.ru

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

Формат цитирования

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. 147-159. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-13

Получена 6 ноября 2023 г.

Прошла рецензирование 24 декабря 2023 г.

Принята 15 января 2024 г.

Резюме

Цель – проведение анализа эрозионной опасности в границах водосборного бассейна р. Калаус.

Использованы отраслевые и кадастровые карты, цифровая модель рельефа, космоснимки, официальные данные министерств и ведомств. Основой для проведения моделирования выступали геоинформационные системы – QGIS и SAGA GIS.

Приведены результаты ГИС-моделирования эрозионной опасности на территории бассейна р. Калаус. На основе цифровой модели рельефа (ЦМР) SRTM рассчитаны базовые морфометрические показатели рельефа: крутизну склонов, вертикальное и горизонтальное расчленение рельефа. На основе морфометрических показателей проведен интегральный расчет энергии рельефа и эрозионной опасности, создана серия соответствующих тематических карт. Полученные значения крутизны склонов в границах бассейна варьируют от 0° до 51° при средних значениях в 2,5°. Горизонтальное расчленение варьирует в интервале от 0 до 0,84 км/км², а базисы эрозии характеризуются разбросом значений от -15,0 до 248,6 м, при среднем значении в 33,0 м. Формированию эрозионного потенциала рельефа бассейна способствует расположение значительной части территории на отрогах Ставропольской возвышенности с широко развитыми уклонами. На основе рассчитанного раstra интегрального показателя энергии рельефа выделены 3 категории эрозионной опасности. Большая часть бассейна р. Калаус (58,4 %) характеризуется слабой эрозионной опасностью, еще 39,0 % территории приходится на среднюю эрозионную опасность, оставшиеся 2,9 % – к территориям с сильной эрозионной опасностью. Проведенная на основе ЦМР классификация форм поверхности рельефа по методу Ивахаши и Пайка показывает гораздо большую распространенность крутых склонов с высокой выпуклостью в юго-западной части бассейна р. Калаус.

Выявленные особенности уровня эрозионной опасности земель бассейна р. Калаус рекомендуется учитывать в прединвестиционной, предпроектной и проектной градостроительных сферах для территорий административных единиц, расположенных в границах бассейна, их ценность при планировании рационального землепользования также очевидна. Результаты работы могут быть использованы для проведения аналогичной оценки в других регионах, в первую очередь при организации сельскохозяйственного производства.

Ключевые слова

Речной бассейн, река Калаус, эрозионная опасность, Ставропольский край, ГИС-технологии, морфометрический анализ, сельскохозяйственные земли, SRTM, формы рельефа.

Morphometric characteristics of the relief and assessment of erosional hazards of the Kalaus River basin, Russia, based on digital modelling

Evgeny G. Mishvelov¹, Artem I. Kornienko¹, Nadira O. Guseynova², Edward E. Tikhonov³ and Elena N. Pavlenko³

¹North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

²Dagestan State University, Makhachkala, Russia

³NTI (branch) of the North Caucasus Federal University, 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 3550000.

Tel. +79614973994

Email mishvelov@mail.ru

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

How to cite this article

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 Kalaus River basin, Russia, based on digital modelling. *South of Russia: ecology, development*. 2024; 19(2):147-159. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-13

Received 6 November 2023

Revised 24 December 2023

Accepted 15 January 2024

Abstract

In this work, the main goal was to analyse the erosional hazards within the boundaries of the Kalaus River catchment area.

The paper analyses the erosive state of the region's lands, for which industry and cadastral maps, a digital elevation model and satellite images were used. Official data of ministries and departments were used. Geographic information systems – QGIS and SAGA GIS – served as the basis for modelling. The article presents the results of GIS modeling of erosional hazards in the territory of the Kalaus River basin. Based on the (DEM) SRTM digital elevation model, the basic morphometric indicators of the relief were calculated: steepness of the slopes and vertical and horizontal dissection of the relief. Based on morphometric indicators, an integral calculation of the energy of relief and erosion hazard was carried out and a series of relevant thematic maps was created. The values of slope steepness obtained within the boundaries of the basin range from 0° to 51° with average values of 2.5°. The horizontal dissection varies in the range from 0 to 0.84 km/km², and the erosion bases are characterized by a range of values from – 15.0 to 248.6 m, with an average value of 33.0 m. The formation of the erosional potential of the basin's relief is facilitated by the location of a significant part of the region on the spurs of the Stavropol Upland, which have widely developed slopes. Based on the calculated raster of the integral energy index of the relief, 3 categories of erosional hazard are identified. Most of the basin of the Kalaus River (58.4 %) is characterised by a low erosion hazard, another 39.0 % of the territory presents an average erosion hazard, and the remaining 2.9 % belongs to territories with a strong erosion hazard. The classification of relief surface shapes based on the Iwahashi and Pike method, which was carried out on the basis of a DEM, shows a much greater prevalence of steep slopes with high convexity in the southern part of the Kalaus River basin.

The identified features of the level of erosional hazard of the lands of the Kalaus River basin are recommended to be taken into account in pre-investment, pre-design and urban project planning of the territories of administrative units located within the boundaries of the basin. Despite the fact that the results of GIS analysis cannot completely replace field erosion surveys, their value as a tool for planning rational land use is obvious. The results of the work can be used to carry out a similar assessment in other regions, primarily in the organisation of agricultural production.

Key Words

River basin, Kalaus River, erosion hazard, Stavropol Territory, GIS technologies, morphometric analysis, agricultural lands, SRTM, landforms.

ВВЕДЕНИЕ

В Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года «пространственное развитие» трактуется как совершенствование системы расселения и территориальной организации экономики, в том числе за счет проведения эффективной государственной политики регионального развития. В документе констатируется рост концентрации производства сельскохозяйственной продукции на территориях РФ с наиболее благоприятными агроклиматическими и почвенными условиями. К таковым, безусловно, относится большая часть земель Южного федерального округа (ЮФО) и Северо-Кавказского федерального округа (СКФО).

Аграрный сектор, к примеру, Ставропольского края обеспечивает порядка 10 % валового сбора зерна в РФ, и в период с 2014 г. 9 раз превышал планку производства зерна в 8 млн т. Два года (2016 и 2017 гг.) стали рекордными – урожай превысил 10 млн т., на зерно при этом приходится 75 % стоимости всей сельскохозяйственной продукции края. Подобная нагрузка на земли сельскохозяйственного назначения, в первую очередь на пашню, обуславливает необходимость более внимательного отношения к факторам формирования почвенного плодородия и целостности почвенного покрова, даже при соблюдении необходимых технологических регламентов.

В то же время, климатические изменения последних десятилетий хотя и носили в целом положительный для растениеводства Ставропольского края характер, но при этом сопровождалось обострением проявления ряда неблагоприятных погодных явлений, увеличивающих риски для растениеводства. Например, зафиксирован значительный рост активных температур в засушливых районах при снижении количества осадков, что существенно повысило вероятность возникновения засух, действие которых усугубляется суховеями, сильными ветрами и пыльными бурями, что, в свою очередь, влияет на скорость и масштабы проявления эрозии почв. Кроме того, возросла повторяемость интенсивных осадков, приводящих к активизации экзогенных, в частности, водно-эрозионных процессов [1; 2].

В этой связи проблема сохранности почв в условиях реструктуризации и интенсификации растениеводства даже при положительных изменениях биопродуктивности климата приобретает новую остроту. Современные инструменты и технологии дистанционного зондирования Земли позволяют своевременно выявлять, оценивать и прогнозировать тренды развития динамических процессов для территорий со сложным рельефом в условиях нестабильного климата и повышенных антропогенных нагрузок. Мониторинг и оценка современного состояния в первую очередь актуальны для земель сельскохозяйственного назначения, именно по этой причине в настоящей работе объектом исследования послужил бассейн реки Калаус (доля земель сельскохозяйственного назначения более 90 %), а предметом – склоновые процессы территорий бассейна.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Применение ГИС-технологий в настоящее время становится неотъемлемой частью работ при исследовании и

оценке эрозионных процессов на территориях различного масштаба. Доступность исходных данных с достаточным для анализа пространственным разрешением в совокупности с быстрым развитием информационных технологий позволяют в сжатые сроки проводить объективную дистанционную оценку эрозионной трансформации поверхности рельефа. Подобная работа проделана отечественными и зарубежными специалистами для самых разнообразных по условиям территорий [3–8].

Вопросам региональной специфики эрозионных процессов Северо-Кавказского федерального округа России посвящено довольно большое количество работ [9–14]. Это связано, с одной стороны, с высоким сельскохозяйственным потенциалом региона, а с другой, обостряющимися, при интенсификации антропогенной деятельности, проблемами деградации земель. Кроме прочего, СКФО входит в перечень приоритетных регионов Российской Федерации для развития агропромышленного комплекса. Ставропольский край играет в этом ведущую роль, площадь земель сельскохозяйственного назначения здесь составляет более 6100 тыс. га. Эродированные земли при этом, по оценкам исследователей, составляют 914 тыс. га, что делает Ставропольский край вторым после республики Дагестан регионом СКФО по этому показателю [13].

Оценка эрозионной опасности в настоящей работе базируется на расчете базовых морфометрических показателей рельефа, используемых в большинстве работ, связанных с исследованием эрозионных процессов. Методики определения морфометрических показателей подробно изложены в работах В. А. Михайлова [15], М.А. Кондратьевой [16], Д.М. Курловича [17]. Интегральная оценка эрозионной опасности базируется на методических подходах, разработанных в трудах Е.А. Позаченюк [18], А.И. Павловой [6]. Интегральный показатель энергии рельефа рассчитывался по методике, предложенной М.А. Кондратьевой [16].

Основой для проведения расчета морфометрических показателей рельефа в настоящей работе являются данные ЦМР SRTM с разрешением 1" (30 м), распространяемые NASA. Получение и подготовка данных ЦМР для дальнейшего анализа осуществлялась с помощью инструментария QGIS 3.34.0 и SAGA GIS 7.8.2, гидрологическая коррекция и заполнение замкнутых понижений раstra осуществлялись по алгоритму Ванга-Лю [19].

Обширный набор инструментов QGIS 3.34.0 позволяет проводить все необходимые операции по расчету подготовке базовых растров, отражающих такие морфометрические характеристики территории как крутизна склонов, вертикальное и горизонтальное расчленение рельефа. Интегральная оценка эрозионной опасности рельефа выполнена в среде QGIS 3.34.0 на основе полученных показателей. Для снижения дискретности растров оценки эрозионной опасности применялся инструмент Simple Filter в SAGA GIS. Классификация форм поверхности рельефа выполнялась с помощью инструмента Terrain Surface Classification (Iwahashi and Pike) в SAGA GIS. Математический анализ полученных данных выполнен с помощью Excel 2021.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Подавляющая часть бассейна р. Калаус приурочена к территориям Ставропольской возвышенности, только в северо-восточной самой нижней части водосбор переходит на Манычскую впадину, являющуюся окраиной Прикаспийской низменности.

Представляющая собой широкое куполообразное поднятие, Ставропольская возвышенность достигает максимальных отметок высот в своей юго-западной части, постепенно понижаясь в восточном и северном направлении. Река Калаус и ее притоки расчленяют террасированными долинами высокие платообразные массивы возвышенности, формируя особый рельеф территории с водоразделами, депрессиями и равнинами.

Склонам ассиметричных речных долин территории присуще широкое развитие оползневых процессов. На севере и востоке бассейна пролегает пологонаклонная равнина, расчлененная долинами и балками водотоков, зачастую временных. Некоторые из этих притоков обводнены из Право-Егорлыкской оросительной системы (ПЕОС).

Юго-восточную окраину бассейна занимают Прикалаусские высоты, образующие водораздел между р. Кумой и р. Калаус. В этой части, подступающие к долине р. Калаус склоны, характеризуются наибольшей крутизной.

Бассейн р. Калаус располагается сразу в четырех климатических зонах, определяемых по коэффициенту увлажнения (K_v). Нижняя часть водосбора расположена в зоне незначительного увлажнения ($K_v = 0,22-0,33$), часть бассейна выше по течению до г. Светлоград, занимает очень засушливую зону – $K_v = 0,33-0,44$. Среднее течение р. Калаус относится к засушливой зоне с $K_v = 0,44-0,55$. Верхнее течение располагается в полусухой зоне с $K_v = 0,55-0,77$. Климат бассейна, таким образом, весьма неоднороден и изменяется от резко-континентального в нижнем течении р. Калаус до умеренно-континентального в верховьях. Количество осадков увеличивается с движением на юг, если в нижнем течении выпадает 300–400 мм осадков, то в верхней части бассейна этот показатель возрастает до 550–650 мм. Среднесуточные температуры в пределах водосбора изменяются незначительно и в среднем для января составляют от $-3,5$ до $-5,0^\circ\text{C}$, для июля $22-24^\circ\text{C}$ [20].

Бассейн р. Калаус занимает три почвенно-климатические зоны: полупустынную с преобладанием светло-каштановых почв, умеренно-засушливую степь с черноземами обыкновенными и южными, а также сухую степь с темно-каштановыми и каштановыми почвами [21].

Длина р. Калаус составляет 436 км, а площадь ее бассейна 9,8 тыс. км². Гидрографическая сеть водосбора р. Калаус неоднородна. В верхнем течении большее развитие получает левобережная часть бассейна, в которой сконцентрированы практически все притоки р. Калаус этой части – Большой Янкуль, Горькая, Кугутка и ряд мелких водотоков. После г. Светлограда развитие получает правобережная часть бассейна с единственным крупным притоком – р. Айгурка.

На главном водотоке бассейна в настоящее время действуют 3 гидропосты: с. Воздвиженское, г. Светлоград и с. Сергиевское. Средний многолетний модуль стока по гидропостам р. Калаус находится в пределах $0,39-0,86$ л/(с × км²). Для притоков р. Грачевка

и р. Ча характерен достаточно большой модуль стока $1,11-2,16$ л/(с × км²), тогда как для р. Айгурка это значение существенно ниже – $0,05$ л/(с × км²).

Руслу рек бассейна сильноизвилисты и глубоко врезаны в пойму. Коэффициент извилистости весьма высок и составляет в среднем $1,12-1,2$, а на отдельных участках достигает $1,25$ и выше. Коэффициент густоты речной сети в верхнем течении Калауса изменяется от $0,4$ до $0,5$ км/км², в среднем – $0,2-0,4$ км/км², в нижнем – $0,1-0,2$ км/км² [20; 22].

В естественных условиях р. Калаус – небольшая типичная для степных и полупустынных зон юга России река, режим которой в значительной степени зависит от осадков. Естественный годовой сток р. Калаус в створе с. Воздвиженского на 33 % состоит из грунтовой составляющей, на 52 % из снеговой, дождевая составляет всего 10 %.

Обводнение р. Калаус в 1968 году привело к увеличению стока на 300 % в верхнем течении и на 200 % в среднем и нижнем. Одновременно с этим вдвое увеличился сток наносов, что привело к резкому повышению мутности воды. Увеличившийся сток запустил процессы трансформации русла р. Калаус, при которых происходит усиление глубинной эрозии за счет стремления реки выработать новый продольный профиль. Такое положение дел подчеркивает важность изучения антропогенной трансформации территории и связанных с этим рисков.

В целях ГИС-анализа эрозионной опасности были созданы базовые тематические карты, отражающие такие морфометрические характеристики рельефа как крутизна склонов, вертикальное и горизонтальное расчленение, которые явились основой для последующей интегральной оценки эрозионной опасности территории бассейна р. Калаус.

Одним из важнейших базовых показателей, применяемых при анализе эрозионного состояния рельефа, выступает крутизна склонов, отражающая не что иное, как скорость перемещения потоков вдоль земной поверхности под действием гравитации. С увеличением крутизны склонов пропорционально увеличивается и скорость потока, а соответственно, вырастает и ущерб, наносимый почвам. Механизованная сельскохозяйственная обработка земель с уклонами $2-5^\circ$ требует применения противоэрозионных технологий.

Для территории Ставропольского края в целом характерны невысокие значения крутизны склонов. Практически 65 % площади края характеризуются уклонами менее 1° . В диапазоне $1-2^\circ$ находится еще 20 % территории, что в сумме делает пригодными для неограниченной механизированной обработки почвы 85 % земель. Территории с уклонами более 5° , преимущественно используемые в качестве пастбищ и сенокосов, занимают 3,8 %, из которых только 0,5 % характеризуются углами больше 10° [23; 24].

Крутизна склонов в настоящем исследовании рассчитывалась на основе раstra ЦМР с использованием инструмента «Крутизна» в модуле «Анализ рельефа» QGIS. Полученные значения в границах бассейна варьируют от 0° до 51° (рис. 1). Уклоны практически на одной трети бассейна не превышают 1° . Это характерно преимущественно для территорий нижнего течения р. Калаус, в особенности зоны Манычской впадины. В целом, уклоны на 77 % территории не превышают 5° , что меньше среднего значения

по краю. Уклоны более 5° отмечены примерно для 10 % территории, из них 2,3 % территории характеризуются значениями уклонов выше 10°. В основном они приуро-

чены к Прикалаусским высотам и южной части бассейна, наиболее расчлененной долинами (табл. 1).

Таблица 1. Распределение территории бассейна р. Калаус в зависимости от крутизны склонов

Table 1. Distribution of the territory of the Kalaus River basin according to steepness of slopes

Крутизна склонов в градусах Steepness of slopes in degrees	Площадь, га Area, hectares	Доля, в % от площади бассейна Share, as % of the river basin area
<=1	282656,6	28,7
1–3	473258,2	48,1
3–5	132547,7	13,5
5–8	56241,0	5,7
8–10	16743,3	1,7
10–15	17694,4	1,8
>15	4769,4	0,5
Итого / Total	983910,6	100
Значения крутизны склонов по бассейну, градусы / Slope steepness values for the basin, degrees		
Минимум / Minimum	Максимум / Maximum	Среднее / Average value
0,0	51,3	2,5

Важным фактором, отражающим эрозионную опасность территории, является вертикальная расчлененность рельефа (базисы эрозии). Геоморфологический смысл этого показателя заключается в определении амплитуды колебания высот в пределах участка местности. Базис эрозии отражает нижний предел развития эрозионного процесса, водный поток здесь теряет силу и становится не способен далее углубить свое ложе.

Для расчета базисов эрозии территории использовалась сетка квадратов со стороной 1 км, в ячейках которой с помощью инструмента «Зональная статистика» в QGIS рассчитывалась разность максималь-

ной и минимальной абсолютных высот. На основе созданных по каждой части сетки зональной статистики центроидов, интерполяцией по методу RST (Регуляризованный сплайн с натяжением) при помощи инструмента «v.surf.rst» модуля «GRASS» была выполнена грид-модель «Вертикальное расчленение рельефа» (рис. 1).

Две трети территории бассейна р. Калаус характеризуется отметками базисов эрозии на уровне 10–50 м. Базисы эрозии выше 200 метров практически не встречаются и занимают всего 0,1% площади (табл. 2).

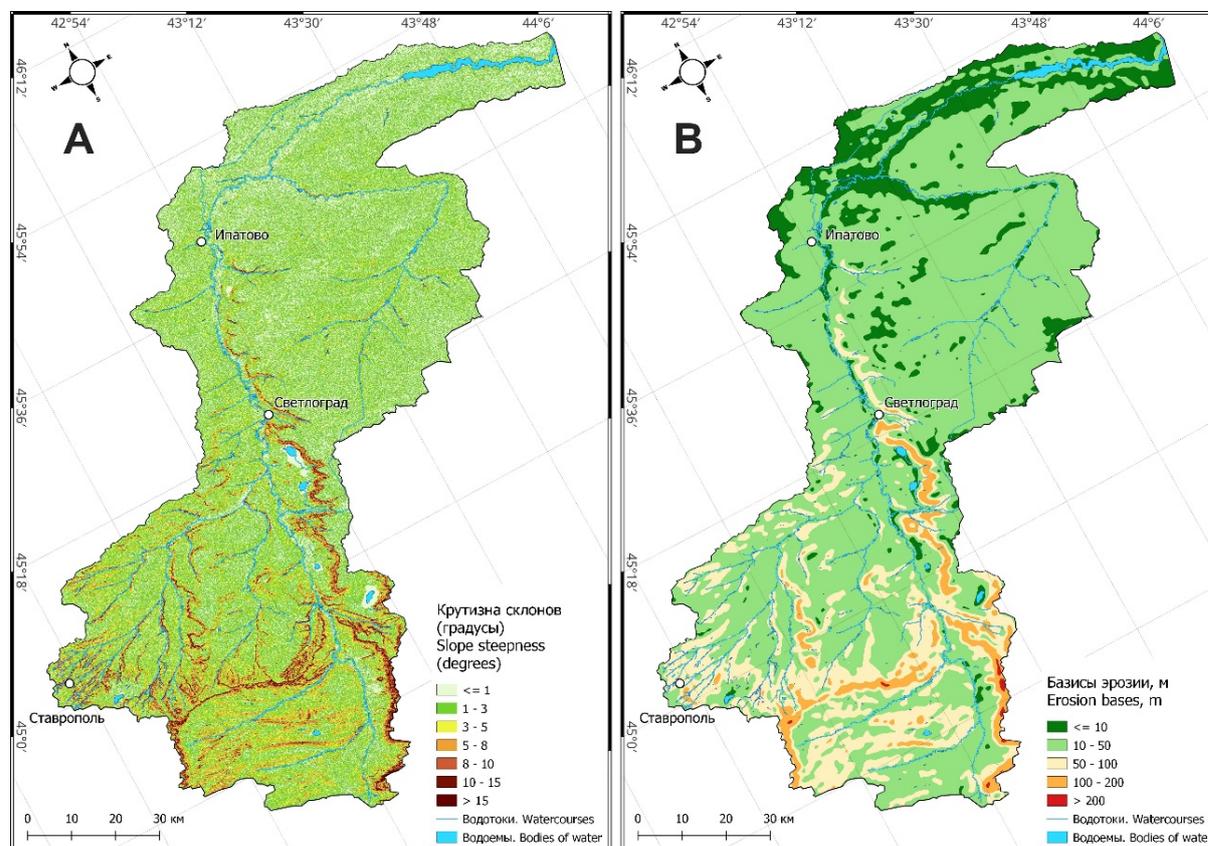


Рисунок 1. Карты крутизны склонов (А) и вертикального расчленения (В) территории бассейна р. Калаус

Figure 1. Maps of slope steepness (A) and vertical dissection (B) of the territory of the Kalaus River basin

Таблица 2. Распределение территории бассейна р. Калаус в зависимости от высоты базиса эрозии
Table 2. Distribution of the territory of the Kalaus River basin depending on the height of the erosion base

Базисы эрозии, м Erosion bases, m	Площадь, га Area, hectares	Доля, в % от площади бассейна Share, in % of the river basin area
<= 10	118475,3	12,0
10–50	664657,3	67,6
50–100	163788,1	16,6
100–200	35954,3	3,7
>200	1040,2	0,1
Итого / Total	983915,1	100,0
Значения высоты базиса эрозии по бассейну, м Values of the height of the erosion base in the basin, m		
Минимум / Minimum	Максимум / Maximum	Среднее / The average value
-15,0	248,6	33,0

Горизонтальное расчленение рельефа определяется суммой длин тальвегов, приходящихся на единицу площади территории [25]. Показано, что объемы воды, приводящие к размыву дернового склона, могут формироваться при густоте расчленения 0,4–0,8 км/км² при условии значительного перепада высот [26].

Для построения векторного слоя тальвегов использовался инструмент «Basic Terrain Analysis» в SAGA GIS. Общее количество извлеченных тальвегов всех порядков составило 72681. Водотоки территории подразделяются на 7 порядков. Водотоки 1–2 порядков наиболее многочисленны, но в то же время не

представляют интереса для дальнейшего анализа, так как практически не выражены на местности. Более того, учет водотоков этих порядков значительно искажает результаты расчета. Общее количество тальвегов 3–7 порядков – 19221.

Расчет горизонтального расчленения рельефа выполнялся для сетки квадратов со стороной 8 км. В каждой ячейке сетки была собрана статистика о суммарной длине тальвегов, после чего создан слой центроидов с соответствующей атрибутивной таблицей. Значения интерполировались с использованием метода RST (рис. 2).

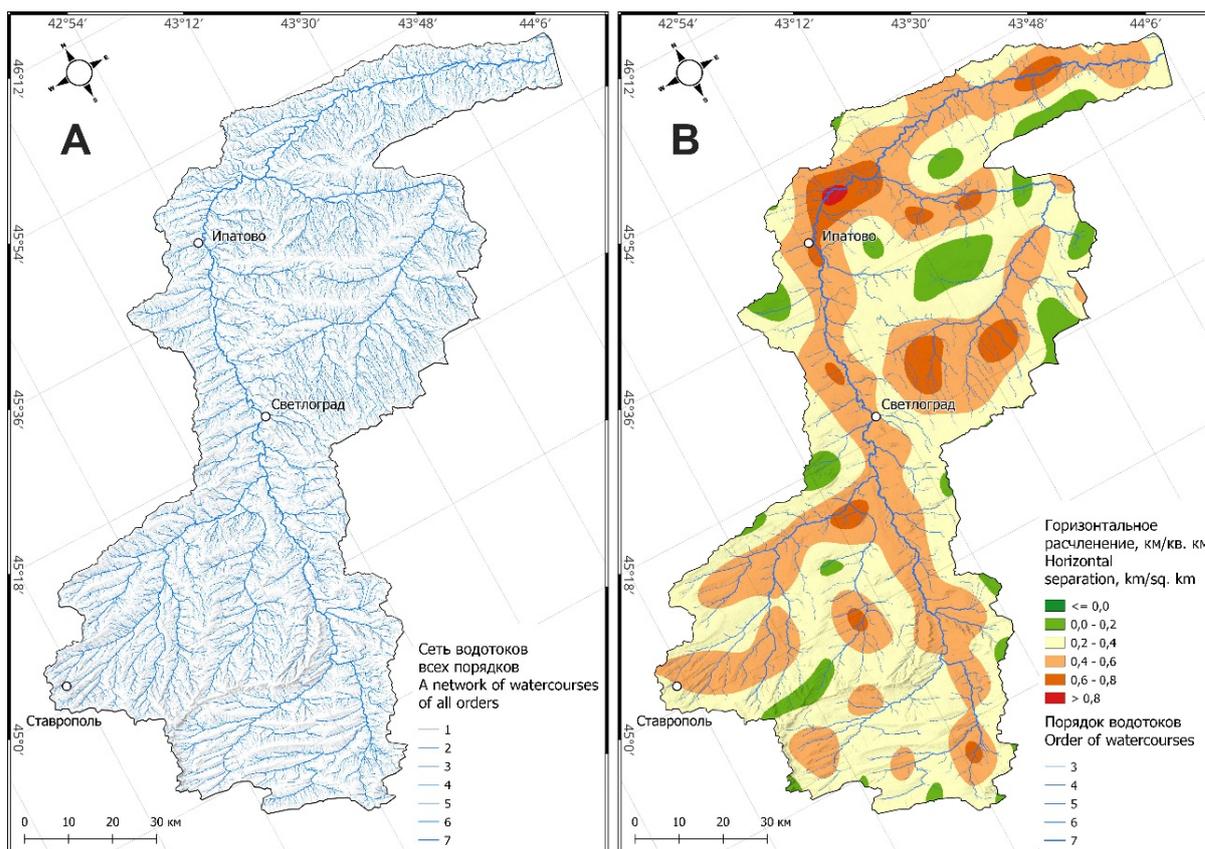


Рисунок 2. Карты сети водотоков (А) и горизонтального расчленения рельефа (В) территории бассейна р. Калаус
Figure 2. Maps of the network of watercourses (A) and the horizontal division of the relief (B) of the territory of the Kalaus River basin

Наибольшие значения коэффициента горизонтальной расчлененности рельефа закономерно приурочены к долинам крупнейших водотоков территории – р. Калаус, р. Айгурка с притоками, р. Горькая. Густота

речной сети выше 0,4 км/км² характерна практически для 45 % территории. Только на 0,2% площади бассейна густота водотоков превышает 0,8 км/км² (табл. 3).

Таблица 3. Распределение территории бассейна р. Калаус в зависимости от значения горизонтальной расчлененности рельефа**Table 3.** Distribution of the territory of the Kalaus River basin depending on the value of the horizontal division of the relief

Горизонтальное расчленение км/км ² Horizontal division into parts km/km ²	Площадь, га Square, hectares	Доля, в % от площади бассейна Share, in % of the area of the pool
0,0–0,2	74098	7,5
0,2–0,4	467065	47,5
0,4–0,6	387735	39,4
0,6–0,8	52988	5,4
> 0,8	1998	0,2
Итого / Total	983884	100
Значения горизонтальной расчлененности рельефа по бассейну, км/км² Values of the horizontal division of the relief by basin, km/km ²		
Минимум / Minimum	Максимум / Maximum	Среднее / The average value
0,0	0,84	0,14

Комплекс рассчитанных морфометрических показателей рельефа позволяет провести оценку эрозионной опасности рельефа. Для этих целей каждому значению показателя присваивался балл от 1 до 6 (табл. 4). Интегральный показатель энергии рельефа, таким образом, определяется как сумма баллов по каждому морфометрическому показателю и позволяет оценить вероятность проявления водной эрозии для территории. К примеру, минимальный балл интеграль-

ного показателя энергии рельефа, равный 3, получается если крутизна склонов на территории менее 1,5° (1 балл), вертикальное расчленение менее 10 м (1 балл), а горизонтальное менее 0,2 км/км² (1 балл). Для расчета раstra интегрального показателя энергии рельефа, исходные растры базовых показателей были проклассифицированы в соответствии с таблицей 4 при помощи инструмента «переклассификация по таблице» в QGIS.

Таблица 4. Шкала оценки морфометрических показателей рельефа территории бассейна р. Калаус**Table 4.** The scale of assessment of morphometric indicators of the relief of the territory of the Kalaus River basin

Балл Point	Крутизна склонов, градусы Slope steepness, degrees	Вертикальное расчленение, м Vertical dismemberment, m	Горизонтальное расчленение, км/км ² Horizontal separation, km/km ²
1	<1,5	<10	<0,2
2	1,5–3	10–50	0,2–0,4
3	3–6	50–100	0,4–0,6
4	6–8	100–200	0,6–0,8
5	8–12	>200	0,8–1
6	>12	-	>1

Полученный растр интегральной оценки энергии рельефа позволяет выделить несколько категорий эрозионной опасности (цит. по М. А. Кондратьевой с изменениями) [16]. Так, в соответствии с предложенной градацией, баллы 3–5 отражают слабую эрозионную опасность, 6–10 – среднюю, выше 11 – сильную (рис. 3) (табл. 5).

Данные таблицы 5 свидетельствуют о том, что доля земель со слабой эрозионной опасностью (от 3 до 5 баллов) самая высокая в бассейне – 58 % (571979 га), в то же время доля земель со средней эрозионной опасностью (6–10 баллов) весьма значительна и достигает 39 % (383799 га), при этом доля земель с высокой эрозионной опасностью (11–13 баллов) не

высока – 2,9 % (28124 га). Анализ гистограммы распределения площади территории по интегральному показателю энергии рельефа (рис. 4) выявил ее правостороннюю асимметрию, при этом модальной оказалась группа, входящая в категорию земель со средней эрозионной опасностью (6 баллов), на нее пришлось 288391 га или 29,3 % всей площади бассейна.

Полученные результаты подтверждаются и с помощью визуального дешифрирования спутниковых снимков высокого разрешения с космических аппаратов группировки компании DigitalGlobe, распространяемые Google. На территориях с категорией сильной эрозионной опасности (11–13 баллов) сравнительно чаще развиты эрозионные формы рельефа (рис. 5).

Таблица 5. Распределение территории бассейна р. Калаус по категориям эрозионной опасности рельефа**Table 5.** Distribution of the territory of the Kalaus River basin by categories of erosion hazard of the relief

Категория эрозионной опасности рельефа Category of erosion hazard of the relief	Диапазон баллов интегральной оценки The range of integral assessment scores	Площадь / area	
		га / hectare	% от общей площади of the total area
Слабая / Weak	3–5	571979	58,4
Средняя / Average	6–10	383799	39,0
Сильная / Strong	11–13	28124	2,9

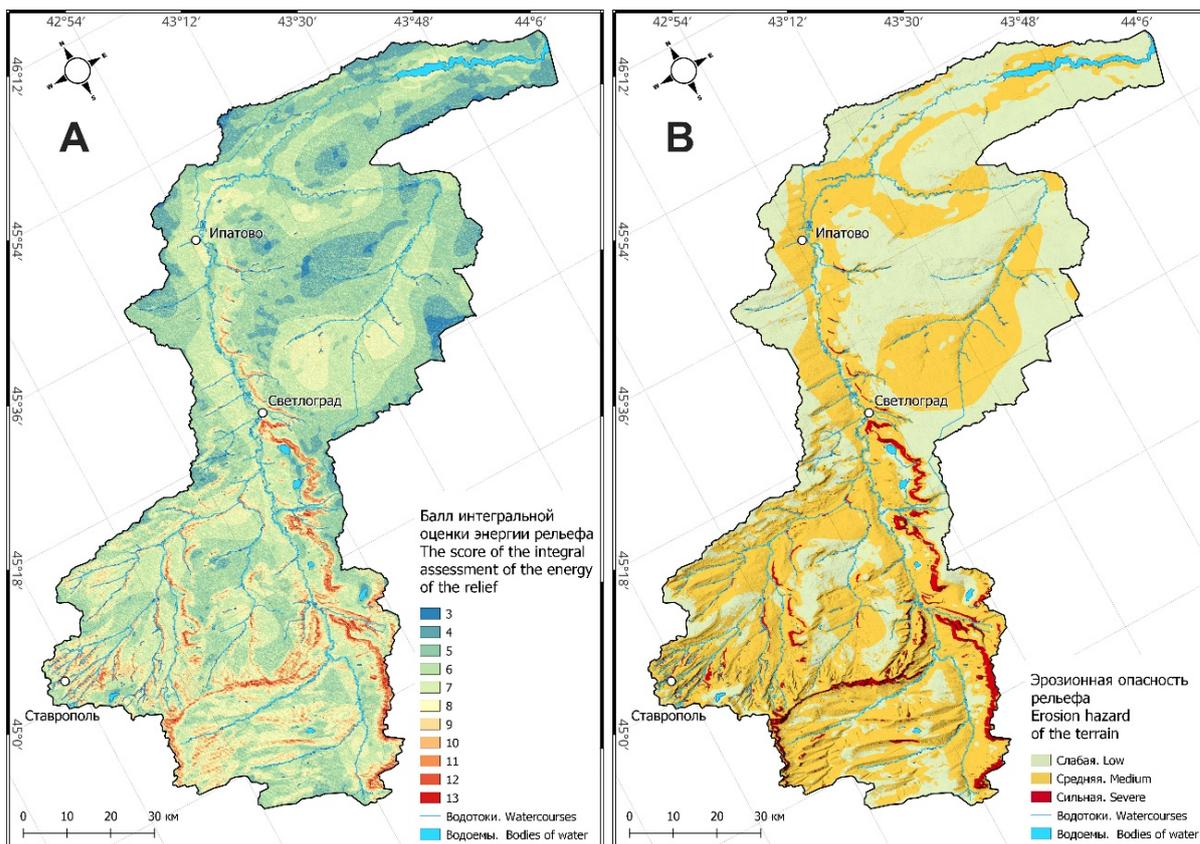


Рисунок 3. Карты оценки интегрального показателя энергии рельефа (А) и эрозионной опасности рельефа (В) территории бассейна р. Калаус

Figure 3. Maps of the assessment of the integral indicator of the energy of the relief (A) and the erosion hazard of the relief (B) of the territory of the Kalaus River basin

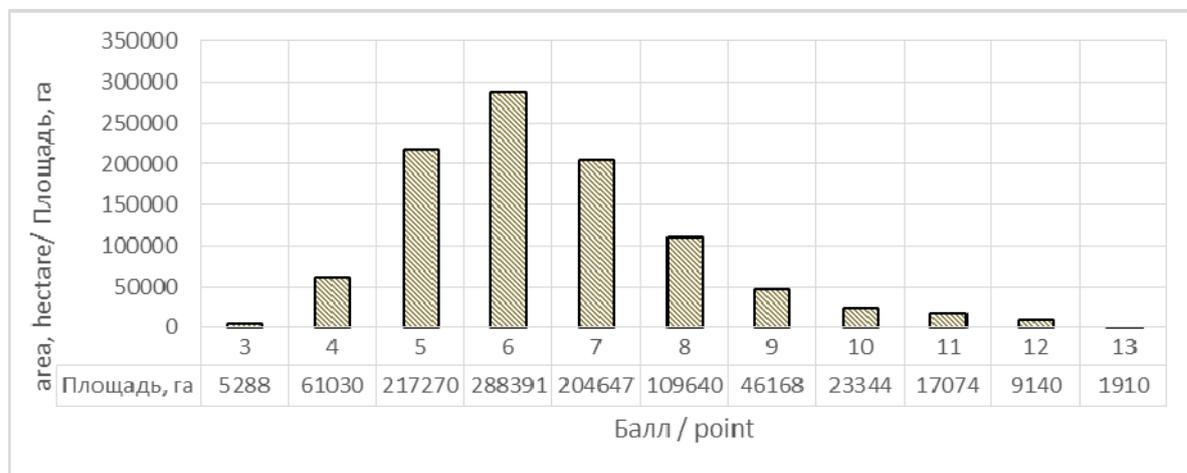


Рисунок 4. Распределение площади территории бассейна р. Калаус по интегральному показателю энергии рельефа

Figure 4. Distribution of the area of the Kalaus River basin according to the integral indicator of relief energy

Основные ареалы земель со средней эрозионной опасностью приурочены к южной части бассейна, занятой Ставропольской возвышенностью, при этом земли, для которых характерна сильная эрозионная опасность, сосредоточены в основном на склонах Прикалаусских высот. С помощью инструмента Terrain Surface Classification (Iwahashi and Pike) в SAGA GIS была выполнена неконтролируемая классификация поверхности рельефа территории на 12 классов. Присвоение форме рельефа того или иного класса по алгоритму Ивахашаи и Пайка [27] базируется на сочетании трех

показателей – выпуклости, текстуры и уклона. Полученные данные позволяют с большой точностью говорить о закономерностях распределения эрозионноопасных земель на территории бассейна (рис. 6).

Немаловажной также представляется оценка уровня эрозионной опасности в границах территорий административных единиц, расположенных в бассейне р. Калаус. С этой целью была подготовлена карта, отражающая медианные баллы интегрального показателя энергии рельефа по муниципальным образованиям (рис. 6).

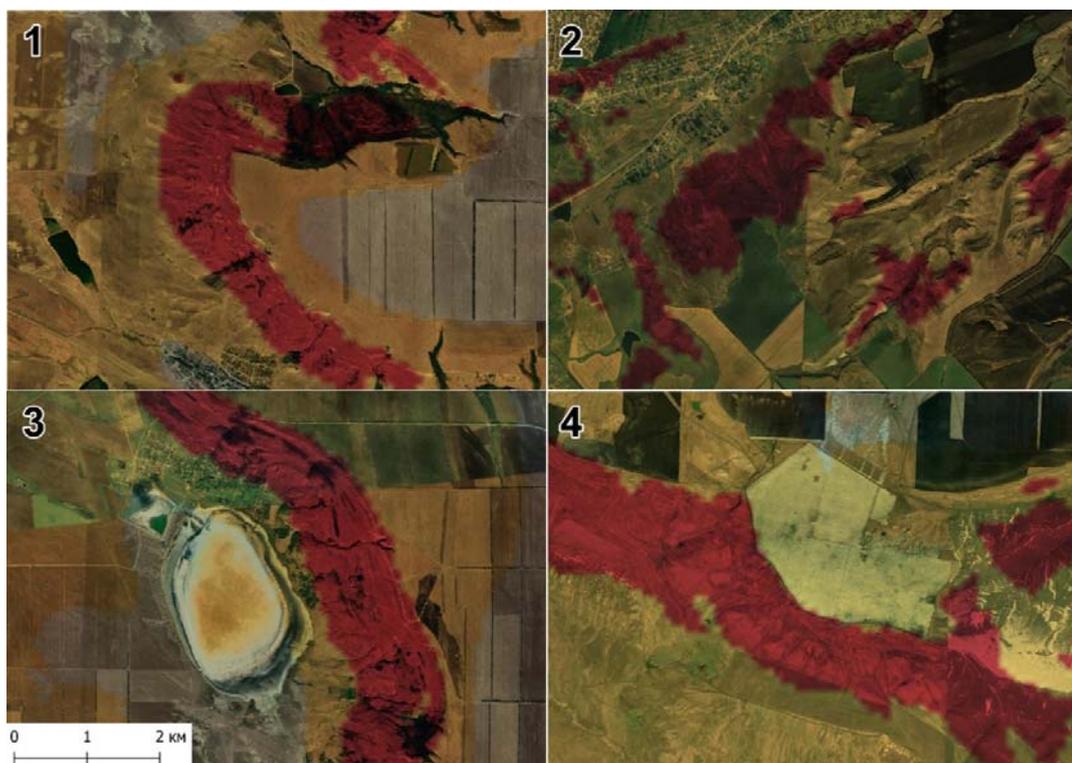


Рисунок 5. Эрозионные формы рельефа на участках с сильной эрозионной опасностью
 1 – северная окраина с. Просянка, 2 – восточная окраина с. Надежда, 3 – южная окраина хут. Солёное Озеро,
 4 – южная окраина с. Верхний Янкуль

Figure 5. Erosive landforms in areas with severe erosion hazard
 1 – the northern outskirts of Prosyanka village, 2 – the eastern outskirts of Nadezhda village,
 3 – the southern outskirts of Solenoye Ozero khutor, 4 – southern outskirts of Verkhny Yankul village

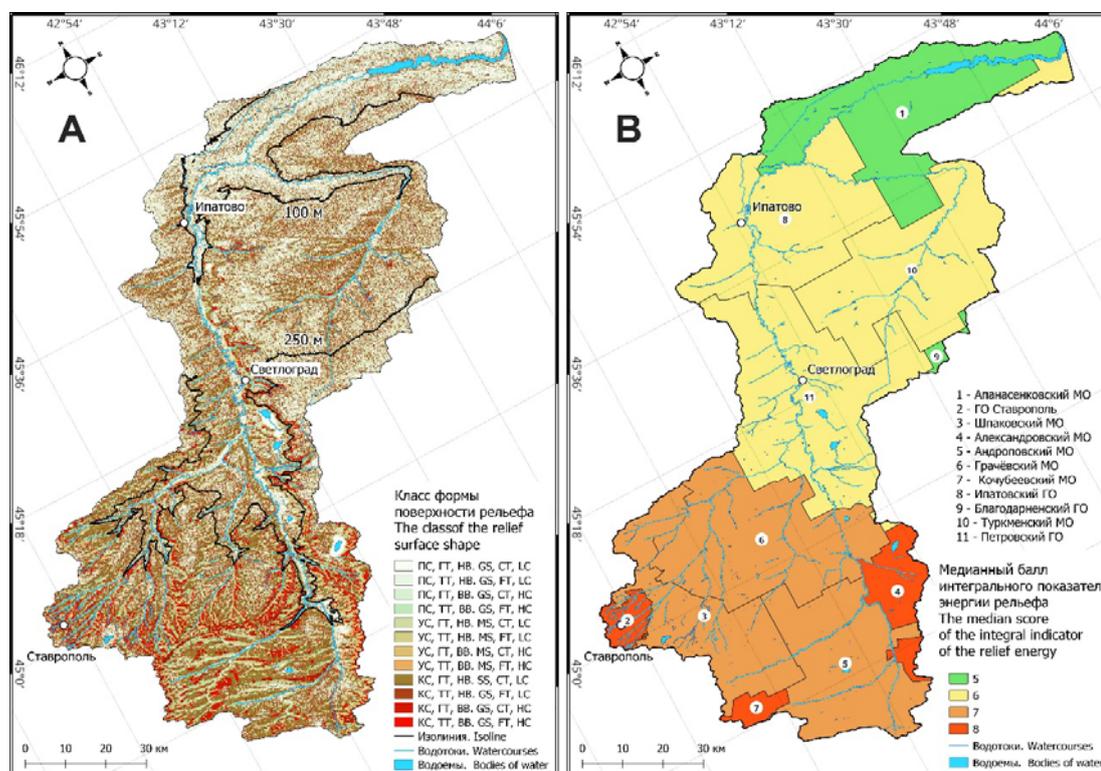


Рисунок 6. Карты классификации форм поверхности рельефа (А) (ПС – пологий склон, УС – умеренный склон, КС – крутой склон, ГТ – грубая текстура, ТТ – тонкая текстура, НВ – низкая выпуклость, ВВ – высокая выпуклость) и медианного балла интегрального показателя энергии рельефа по административным образованиям в границах бассейна р. Калаус (В)

Figure 6. Maps of the classification of relief surface shapes (A) (GS – gentle slope, MS – moderate slope, SS – steep slope, CT – coarse texture, FT – fine texture, LC – low convexity, HC – high convexity) and the median score of the integral indicator of relief energy for administrative entities within the boundaries of the Kalaus River basin (B)

Значения на карте медианного балла интегрального показателя энергии рельефа в 7–8 баллов характерны для территорий ГО Ставрополь, Шпаковского МО, Александровского МО, Андроповского МО и Грачевского МО. Медианный балл показателя энергии рельефа равный 6 отмечается для территорий Ипатовского ГО, Петровского ГО и Туркменского МО, минимальные значения в 5 баллов отмечены для Благодарненского ГО и Апанасенковского МО. Таким образом, административные районы края, занимающие Ставропольскую возвышенность и ее отроги характеризуются повышенным баллом интегрального показателя энергии рельефа.

В целом, южная часть бассейна р. Калаус характеризуется сравнительно более высокой эрозионной опасностью. Выше отметки в 250 м н. у. м. меняется характер р. Калаус, уклон водотока здесь значительно возрастает. В этой части бассейна сконцентрирована большая часть крутых склонов с высокой выпуклостью (рис. 6). На такие склоны приходится почти половина земель с высокой эрозионной опасностью (45,7 %) в границах бассейна. Следует отметить, что прослеживается умеренная положительная связь между увеличением значений класса форм поверхности рельефа (крутизна, выпуклость, текстура) (по Ивахаши и Пайку) с одной стороны и интегральным показателем энергии рельефа с другой (коэффициент корреляции $r = 0,37$). Расчет коэффициента корреляции был выполнен для сетки точек со стороной 1 км, всего было создано 9846 точек в границах бассейна. Общая площадь крутых склонов с высокой выпуклостью в границах бассейна составляет 61851 га (6,3 % от площади бассейна), при этом в южной части, с отметками высот выше 250 м, площадь таких склонов – 54273 га (87,7 % от общей площади крутых склонов с высокой выпуклостью в бассейне). Классификация форм поверхности рельефа по алгоритму Ивахаши и Пайка может служить определенным предиктором при оценке риска развития эрозионных процессов, особенно в случае ее комбинирования с другими базовыми показателями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рельеф является одной из важных специфических особенностей при планировании хозяйственной деятельности на той или иной территории. Особую актуальность исследованию эрозионных проблем землепользования на территории Ставропольского края придает его аграрная спецификация. Речные бассейны являются природными геосистемами с четкими естественными границами развивающихся там процессов, в том числе и эрозионных. По этой причине в настоящем исследовании применен бассейновый подход при ГИС-моделировании эрозионной опасности.

На основе ЦМР SRTM рассчитан ряд базовых морфометрических показателей рельефа, позволивших провести интегральную оценку энергии рельефа и его эрозионной опасности. Полученные данные свидетельствуют о том, что практически половина территории бассейна р. Калаус характеризуется средней и высокой эрозионной опасностью, 58 % территории слабоэрозионноопасны. Доля земель с нулевым эрозионным потенциалом совершенно незначительна и составляет всего 0,5 %. Формированию эрозионного потенциала рельефа бассейна способствует расположение значительной части территории на

отрогах Ставропольской возвышенности с широко развитыми уклонами, превышающими 2° и перепадами высот более 50 м. Земли с сильной эрозионной опасностью сосредоточены в основном на склонах Прикалаусских высот. Юго-западная часть бассейна р. Калаус, расположенная выше 250 м над уровнем моря, наиболее подвержена эрозионным рискам. Здесь же наибольшее развитие получают крутые склоны с высокой выпуклостью.

С 2021 года в РФ действует Государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса, предполагающая в том числе формирование достоверных и актуальных сведений о сельскохозяйственных землях, включающих и сведения о степени проявления процессов деградации. Выявленные особенности уровня эрозионной опасности земель бассейна р. Калаус рекомендуется учитывать при проектировании и реализации территориальных комплексных схем градостроительного планирования развития территорий административных единиц, расположенных в границах бассейна. Несмотря на то, что результаты ГИС-анализа не могут полностью заменить полевого эрозионного обследования, ценность их как инструмента планирования рационального землепользования очевидна. Результаты работы могут быть использованы для проведения подобной оценки в других регионах в первую очередь при организации сельскохозяйственного производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонов С.А. Тенденции изменения климата и их влияние на земледелие Ставропольского края // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. Т. 66. N 4. С. 43–46.
2. Бадахова Г.Х., Каплан Г.Л., Кравченко Н.А. Изменение климата и экологические риски в Центральном Предкавказье // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы современной науки», Москва: ISI-journal. 2016. С. 123–128.
3. Буряк Ж.А. Совершенствование подходов к оценке эрозионной опасности агроландшафтов с использованием ГИС-технологий // Региональные геосистемы. 2014. Т. 29. N 23(194). С. 140–146.
4. Гофаров М.Ю., Кутинов Ю.Г., Болотов И.Н. Оценка развития эрозионных процессов в северотаежных ландшафтах Русской равнины с применением ГИС-технологий // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2005. N 4. С. 362–369.
5. Деревенец Д.К. Применение ГИС-технологий как составной части цифровой экономики с целью повышения эффективности противоэрозионных мероприятий // Инвестиции, строительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения. 2020. С. 119–126.
6. Павлова А.И. Применение нейронной экспертной системы и ГИС для классификации эрозионных земель // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2014. N 10. С. 312–319.
7. Bilaşco Ş., et al. A GIS-based spatial analysis model approach for identification of optimal hydrotechnical solutions for gully erosion stabilization. Case Study //

- Applied Sciences. 2021. V. 11. N 11. Article ID: 4847. <https://doi.org/10.3390/app11114847>
8. Mendicino G. Sensitivity analysis on GIS procedures for the estimate of soil erosion risk // *Natural Hazards*. 1999. V. 20. N 2. P. 231–253. <https://doi.org/10.1023/A:1008120231103>
9. Атаев З.В., Братков В.В. Оценка эрозионного расчленения рельефа Северо-Восточного Кавказа методами ГИС-технологий // *Мониторинг. Наука и технологии*. 2012. N 1. С. 63–67.
10. Бакуменко И.А. Морфометрический анализ территории бассейна реки Калаус Ставропольского края по данным SRTM // *Материалы V-й ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука – региону»*, Ставрополь: ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет», 2017. С. 224–228.
11. Братков В.В. и др. Эрозионное расчленение рельефа Северо-Восточного Кавказа как фактор рекреационного освоения территории // *Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки*. 2011. N 4. С. 99–103.
12. Кирвякова А.В., Андреянов Д.Ю. Мониторинг эрозионных процессов юго-западной части Ставропольской возвышенности и прилегающих территорий Прикубанской равнины // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2011. N 16. С. 151–153.
13. Мусаев М.Р., Шаповалов Д.А., Широкова В.А., Ключин П.В., Хуторова А.О., Савинова С.В. Экологические проблемы сельскохозяйственного землепользования в Северо-Кавказском федеральном округе // *Юг России: экология, развитие*. 2016. Т. 11. N 3. С. 181–192. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2016-3-181-192>
14. Шаповалов Д.А., Ключин П.В., Савинова С.В. Экологические проблемы сельскохозяйственного землепользования в Ставропольском крае // *Аридные экосистемы*. 2020. Т. 26. N 2. С. 57–62. <https://doi.org/10.24411/1993-3916-2020-10096>
15. Михайлов В.А. Комплексный морфометрический анализ Тарханкутского полуострова с помощью ГИС // *Современные научные исследования и инновации*. 2015. N 2. Ч. 4. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/02/46640> (дата обращения: 17.03.2024)
16. Кондратьева М.А., Чащин А.Н. Оценка эрозионной опасности рельефа на основе цифрового моделирования // *ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции*. Москва: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. С. 241–252. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-241-252>
17. Курлович Д.М. Морфометрический ГИС-анализ рельефа Беларуси // *Земля Беларуси*. 2013. N 4. С. 42–48. URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/92323> (дата обращения: 18.03.2024)
18. Позаченюк Е.А., Петлюкова Е.А. ГИС-анализ морфометрических показателей рельефа Центрального предгорья главной гряды Крымских гор для целей ландшафтного планирования // *Учёные записки Крымского федерального университета имени Вернадского В.И. География. Геология*. 2016. Т. 2. N 2. С. 95–111.
19. Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling // *International Journal of Geographical Information Science*. 2006. V. 20. N 2. P. 193–213. <http://doi.org/10.1080/13658810500433453>
20. Батова В.М. *Агроклиматические ресурсы Северного Кавказа*. Ленинград: Гидрометеиздат, 1966. 252 с.
21. Антыков А.Я., Стоморев А.Я. *Почвы Ставрополя и их плодородие*. Ставрополь: Ставропольское книжное издательство, 1970. 413 с.
22. Геращенко И.Н. Особенности гидрографии и гидрологии Северного Кавказа // *Таврический научный обозреватель*. 2017. N 3. С. 106–113.
23. Лошаков А.В. Охрана агроландшафтов на основе адаптивных проектов землеустройства с учетом зональных особенностей в крайне засушливой зоне Ставропольского края // *Московский экономический журнал*. 2023. N 2. URL: <https://qje.su/nauki-o-zemle/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-2-2023-31/> (дата обращения: 19.03.2024)
24. Письменная Е.В., Стукало В., Лошаков А.В., Савинова С.В. Мониторинг состояния земель сельскохозяйственного назначения Центрального Предкавказья // *Вестник АПК Ставрополя*. 2016. Т. 21. N 1. С. 123–126.
25. Лабанов Г.А. *Эрозия и дефляция почв*. Москва: Изд-во МГУ, 1993. 200 с.
26. Путилин А.Ф. *Оврагообразование на юго-востоке Западной Сибири*. Новосибирск, 1988. 81 с.
27. Iwahashi J., Pike R.J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature // *Geomorphology*. 2007. V. 86. N 3–4. P. 409–440. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012>

REFERENCES

- Antonov S.A. Trends in climate change and their impact on agriculture in the Stavropol Territory. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Proceedings of the Orenburg State Agrarian University]*. 2017, vol. 66, no. 4, pp. 43–46. (In Russian)
- Badakhova G.Kh., Kaplan G.L., Kravchenko N.A. *Izmenenie klimata i ekologicheskie riski v Tsentral'nom Predkavkaz'e [Climate change and environmental risks in the Central Caucasus]. Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy i perspektivy sovremennoi nauki», Moskva, ISI-journal, 2016 [Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference "Problems and prospects of modern Science", Moscow: ISI-journal, 2016]. Moscow, pp. 123–128. (In Russian)*
- Buryak Zh.A. Improving approaches to assessing the erosion hazard of agricultural landscapes using GIS technologies. *Regional'nye geosistemy [Regional geosystems]*. 2014, vol. 29, no. 23(194), pp. 140–146. (In Russian)
- Gofarov M.Yu., Kutinov Yu.G., Bolotov I.N. Assessment of the development of erosion processes in the North taiga landscapes of the Russian plain using GIS technologies. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya [Geocology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology]*. 2005, no. 4, pp. 362–369. (In Russian)
- Derevenets D.K. The use of GIS technologies as an integral part of the digital economy in order to increase the effectiveness of anti-erosion measures. *Investitsii, stroitel'stvo, nedvizhimost' kak draivery sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya territorii i povysheniya*

- kachestva zhizni naseleniya [Investments, construction, real estate as drivers of socio-economic development of the territory and improvement of the quality of life of the population]. 2020, pp. 119–126. (In Russian)
6. Pavlova A.I. Application of the neural expert system and GIS for the classification of erosive lands. *Sovremennyye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie* [Modern information technologies and IT-education]. 2014, no. 10, pp. 312–319. (In Russian)
 7. Bilaşco Ş., et al. A GIS-based spatial analysis model approach for identification of optimal hydrotechnical solutions for gully erosion stabilization. Case Study. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 11, article id: 4847. <https://doi.org/10.3390/app11114847>
 8. Mendicino G. Sensitivity analysis on GIS procedures for the estimate of soil erosion risk. *Natural Hazards*, 1999, vol. 20, no. 2, pp. 231–253. <https://doi.org/10.1023/A:1008120231103>
 9. Ataev Z.V., Bratkov V.V. Estimation of erosion relief partition of the North-Eastern Caucasus by GIS methods. Monitoring. *Nauka i tekhnologii* [Monitoring. Science and technology]. 2012, no. 1, pp. 63–67. (In Russian)
 10. Bakumenko I.A. Morfometricheskii analiz territorii basseina reki Kalavus Stavropol'skogo kraya po dannym SRTM [Morphometric analysis of the territory of the Kalavus river basin of the Stavropol Territory according to SRTM data]. *Materialy V ezhegodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta «Universitetskaya nauka – regionu», Stavropol', FGAOU VPO «Severo-Kavkazskii federal'nyi universitet», 2017* [Materials of the V Annual scientific and practical conference of the North Caucasus Federal University "University Science for the Region", Stavropol: Federal State Educational Institution of Higher Education "North Caucasus Federal University", 2017]. Stavropol, 2017, pp. 224–228. (In Russian)
 11. Bratkov V.V., et al. Erosive dismemberment of the relief of the North-Eastern Caucasus as a factor of recreational development of the territory. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki* [Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and exact sciences]. 2011, no. 4, pp. 99–103. (In Russian)
 12. Kirvyakova A.V., Andreyanov D.Y. Monitoring of erosion processes in Southwestern Stavropol upland and Prikubanskaya plain. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Orenburg State University]. 2011, no. 16, pp. 151–153. (In Russian)
 13. Musayev M.R., Shapovalov D.A., Shirokova V.A., Klyushin P.V., Khutorova A.O., Savinova S.V. Environmental problems of agricultural land management in the North Caucasian Federal District. *South of Russia: ecology, development*, 2016, vol. 11, no. 3, pp. 181–192. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2016-3-181-192>
 14. Shapovalov D.A., Klyushin P.V., Savinova S.V. Ecological problems of agricultural land use in the Stavropol Territory. *Arid ecosystems*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 57–62. (In Russian) <https://doi.org/10.24411/1993-3916-2020-10096>
 15. Mikhailov V.A. [Complex morphometric analysis of the Tarkhankut peninsula using GIS]. *Sovremennyye nauchnye issledovaniya i innovatsii*, 2015, no. 2. (In Russian) Available at: <https://web.snauka.ru/issues/2015/02/46640> (accessed 17.03.2024)
 16. Kondrat'eva M.A., Chashchin A.N. Otsenka erozionnoi opasnosti rel'efa na osnove tsifrovogo modelirovaniya [Assessment of the erosion hazard of the relief based on digital modeling]. *InterGIS. Geoinformatsionnoe obespechenie ustoichivogo razvitiya territorii: Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii. Moskva: Geograficheskii fakul'tet MGU, 2021* [InterGIS. Geoinformation support for sustainable development of territories: Materials of the International Conference. Moscow: Faculty of Geography, Moscow State University, 2021]. Moscow, 2021, vol. 27, pp. 241–252. (In Russian). <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-241-252>
 17. Kurlovich D.M. Morphometric GIS analysis of the relief of Belarus. *Zemlya Belarusi*, 2013, no. 4, pp. 42–48. (In Russian) Available at: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/92323> (accessed 18.03.2024)
 18. Pozachenyuk E.A., Petlyukova E.A. GIS-analysis of morphometric relief indicators of the Central foothills of the main ridge of the Crimean Mountains for the purposes of landscape planning. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni Vernadskogo V.I. Geografiya. Geologiya* [Scientific notes of the Vernadsky V.I. Crimean Federal University. Geography. Geology]. 2016, vol. 2, no. 2, pp. 95–111. (In Russian)
 19. Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 2006, vol. 20, no. 2, pp. 193–213. <http://doi.org/10.1080/13658810500433453>
 20. Batova V.M. *Agroklimaticheskie resursy Severnogo Kavkaza* [Agro-climatic resources of the North Caucasus]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1966, 252 p. (In Russian)
 21. Antykov A.Ya., Stomorev A.Ya. *Pochvy Stavropol'ya i ikh plodorodie* [Stavropol soils and their fertility]. Stavropol, Stavropol Book Publ., 1970, 413 p. (In Russian)
 22. Gerashchenko I.N. Features of hydrography and hydrology of the North Caucasus. *Tavricheskii nauchnyi obozrevatel'* [The Tauride scientific observer]. 2017, no. 3, pp. 106–113. (In Russian)
 23. Loshakov A.V. [Protection of agricultural landscapes based on adaptive land management projects taking into account zonal features in the extremely arid zone of the Stavropol Territory]. *Moskovskii ekonomicheskii zhurnal*, 2023, no. 2. (In Russian) Available at: <https://qje.su/nauki-o-zemle/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-2-2023-31/> (accessed 19.03.2024)
 24. Pis'mennaya E.V., Stukalo V., Loshakov A.V., Savinova S.V. Monitoring of the state of agricultural lands in the Central Caucasus. *Vestnik APK Stavropol'ya* [Bulletin of the agroindustrial complex of Stavropol]. 2016, vol. 21, no. 1, pp. 123–126. (In Russian)
 25. Labanov G.A. *Eroziya i deflyatsiya pochv* [Erosion and deflation of soils]. Moscow, MSU Publ., 1993, 200 p. (In Russian)
 26. Putilin A.F. *Ovragoobrazovanie na yugo-vostoke Zapadnoi Sibiri* [Ravine formation in the south-east of Western Siberia]. Novosibirsk, 1988, 81 p. (In Russian)
 27. Iwahashi J., Pike R.J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology*, 2007, vol. 86, no. 3–4, pp. 409–440. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Евгений Г. Мишвелов определил идею исследования, выстроил логику исследования, участвовал в полевых исследованиях, структурировал текст статьи в логике исследования, подобрал библиографические источники. Артем И. Корниенко участвовал в полевых исследованиях, составил картографический материал, участвовал в изготовлении графического материала, сформулировал выводы исследования. Надира О. Гусейнова структурировала результаты исследования, участвовала в изготовлении графического материала, сформулировала выводы исследования. Эдуард Е. Тихонов структурировал текст статьи в логике исследования, участвовал в изготовлении графического материала. Елена Н. Павленко выстроила логику исследования, структурировала текст статьи в логике исследования, подобрала библиографические источники. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Evgeny G. Mishvelov defined the idea of the study, built the logic of the study, participated in field research, structured the text of the article in the logic of the study, selected bibliographic sources. Artem I. Kornienko participated in field research, compiled cartographic material, participated in the production of graphic material, and formulated the conclusions of the study. Nadira O. Guseynova structured the results of the study, participated in the production of graphic material, and formulated the conclusions of the study. Edward E. Tikhonov structured the text of the article in the logic of the research, participated in the production of graphic material. Elena N. Pavlenko built the logic of the research, structured the text of the article in the logic of the research, selected bibliographic sources. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

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

Артем И. Корниенко / Artem I. Kornienko <https://orcid.org/0000-0001-9670-7219>

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

Эдуард Е. Тихонов / Edward E. Tikhonov <https://orcid.org/0000-0003-0028-582X>

Елена Н. Павленко / Elena N. Pavlenko <https://orcid.org/0000-003-4049-7341>

Оригинальная статья / Original article

УДК 551.4:551.506

DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-14



Возможности ГИС-технологий для оценки и мониторинга климатических условий Макажойской котловины (Чеченская Республика)

Виталий В. Братков^{1,2}, Рашия Х. Бекмурзаева², Луиза Р. Бекмурзаева³¹Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия²Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова, Грозный, Россия³Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия**Контактное лицо**

Рашия Х. Бекмурзаева, кандидат экономических наук, доцент, кафедра экологии и природопользования, ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова»; 364024, г. Грозный, ул. А. Шерипова, 32.

Тел. +79290005504

Email raya.bek@mail.ruORCID <https://orcid.org/0000-0001-5936-7235>**Формат цитирования**

Братков В.В., Бекмурзаева Р.Х., Бекмурзаева Л.Р. Возможности ГИС-технологий для оценки и мониторинга климатических условий Макажойской котловины (Чеченская Республика) // Юг России: экология, развитие. 2024. Т.19, N 2. С. 160-169. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-14

Получена 12 февраля 2024 г.

Прошла рецензирование 22 марта 2024 г.

Принята 26 апреля 2024 г.

Резюме

Моделирование на основе цифровой модели рельефа пространственно-временного изменения величины суммарной солнечной радиации и оценки вклада местоположений в распределение метеорологических элементов.

Анализ ЦМР в среде ГИС для оценки пространственного временного распределения суммарной солнечной радиации. Статистический анализ ретроспективных климатических и актуальных (2023 г.) метеорологических данных.

На основе цифровой модели рельефа среднего пространственного разрешения в среде ГИС оценены изменения пространственно-временной величины солнечной радиации. Ретроспективный анализ климатических условий позволил оценить общие черты климата Макажойской котловины. Полевые наблюдения позволили охарактеризовать современные климатические условия, а также рассчитать градиенты.

В зависимости от местоположений величина суммарной солнечной радиации по территории Макажойской котловины изменяется почти в 3 раза. В пределах одинаковых высотных интервалов разница между склонами южной и северной экспозиции достигает до 50 %. Наименьшие различия в величина радиации отмечаются в дни летнего солнцестояния, а наибольшие – в дни зимнего. Средняя годовая температура воздуха в интервале высот 1960–2264 мм в 2023 г. изменялась от 8,6 до 5,8°, а количество осадков – от 481 до 525 мм соответственно. Выявлен внутригодовой ход метеорологических параметров (температуры воздуха и листовой поверхности, количества осадков и относительной влажности воздуха) в пределах метеорологической трансекты. Полученные данные позволяют перейти к формированию ГИС для мониторинга климатических условий карбонового полигона ЧГУ им. А.А. Кадырова.

Ключевые слова

Карбоновый полигон, цифровая модель рельефа, солнечная радиация, ГИС-технологии, мониторинг климатических условий.

The possibilities of GIS technologies for assessing and monitoring the climatic conditions of the Makazhoy Fepression (Chechen Republic, Russia)

Vitaly V. Bratkov^{1,2}, Rashia H. Bekmurzaeva² and Luiza R. Bekmurzaeva³

¹Moscow State University of Geodesy and Cartography

²A.A. Kadyrov Chechen State University

³Academician M.D. Millionshchikov Grozny State Petroleum Technical University

Principal contact

Rashia H. Bekmurzaeva, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Department of Ecology and Nature Management, A.A. Kadyrov Chechen State University; 32a Sheripova St, Grozny, Russia 364024.

Tel. +79290005504

Email raya.bek@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5936-7235>

How to cite this article

Bratkov V.V., Bekmurzaeva R.H., Bekmurzaeva L.R. The possibilities of GIS technologies for assessing and monitoring the climatic conditions of the Makazhoy Fepression (Chechen Republic, Russia). *South of Russia: ecology, development*. 2024; 19(2):160-169. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-14

Received 12 February 2024

Revised 22 March 2024

Accepted 26 April 2024

Abstract

Modeling based on a digital relief model of the spatiotemporal change in the amount of total solar radiation and the assessment of the contribution of locations to the distribution of meteorological elements.

DEM analysis was conducted in a GIS environment to assess the spatial and temporal distribution of total solar radiation, and statistical analysis of retrospective climatic and actual (2023) meteorological data was conducted.

Based on a digital model of the relief of average spatial resolution in a GIS environment, changes in the spatial and temporal magnitude of solar radiation were estimated. A prospective analysis of climatic conditions made it possible to assess the general features of the climate of the Makazhoy basin. Field observations made it possible to characterise modern climatic conditions, as well as to calculate gradients.

Depending on the locations, it was determined that the amount of total solar radiation in the Makazhoy basin varies by almost 3 times. Within the same altitude intervals, the difference between the slopes of the southern and northern exposures reaches up to 50 %. The smallest differences in the amount of radiation were observed on the days of the summer solstice, and the largest on the days of the winter solstice. The average annual air temperature in the altitude range of 1960–2264 m in 2023 varied from 8.6 to 5.8°, and the amount of precipitation – from 481 to 525 mm, respectively. The intra-annual course of meteorological parameters (air temperature and leaf surface, precipitation and relative humidity) within the meteorological transect has been revealed. The data obtained make it possible to proceed to the formation of a GIS system for monitoring the climatic conditions of the carbon landfill of the Kadyrov Chechen State University.

Key Words

Carbon landfill, digital terrain model, solar radiation, GIS technologies, monitoring of climatic conditions.

ВВЕДЕНИЕ

Климат, как известно, формируется под влиянием климатообразующих факторов и процессов. В результате их взаимодействия в пределах той или иной территории складываются территориальные сочетания климатических условий, которые принято называть типами климата. Помимо самостоятельной значимости, связанной со значением атмосферы, климат прямо или косвенно оказывает огромное влияние на формирование, динамику и функционирование природных компонентов (прежде всего гидросферы) и комплексов. Что касается последних, то для их наиболее низкого иерархического уровня, ландшафтов, Н.А. Солнцев [1] ранжировал их по силе. Гидроклиматические факторы (климат, воды) занимают

второе после литогенной основы место с точки зрения силы влияния на формирование ландшафтов.

На формирование климата наиболее сильное воздействие оказывает географическое положение (географическая широта), от которого зависит величина приходящей солнечной энергии и особенности общей циркуляции атмосферы. Территориальное распределение приходящей энергии обусловлено рельефом. Последнее наиболее актуально для горных территорий со сложным и контрастным рельефом. Оценка влияния рельефа на местное распределение инсоляции ранее опиралась на полевые исследования с применением соответствующей приборной базы. Для 42° с.ш. рассчитали относительные значения суточных сумм солнечной радиации поверхностей склонов различной ориентации и крутизны [2] (табл. 1).

Таблица 1. Относительные значения суточных сумм солнечной радиации поверхностей склонов различной ориентации и крутизны для 42° с.ш. при безоблачном небе

Table 1. Relative values of the daily sums of sunshine of surfaces of slopes of various orientation and the steepness for 42° north latitude during a clear sky

	Уклон, экспозиция / Slope, exposure									
	10°		20°		30°		40°		50°	
	Ю / S	С / N	Ю / S	С / N	Ю / S	С / N	Ю / S	С / N	Ю / S	С / N
I	1,27	0,71	1,49	0,44	1,72	0,20	1,81	0,17	1,92	0,17
II	1,19	0,77	1,35	0,56	1,46	0,30	1,56	0,20	1,61	0,18
III	1,13	0,82	1,23	0,67	1,30	0,49	1,34	0,29	1,34	0,22
IV	1,08	0,86	1,13	0,75	1,14	0,66	1,14	0,46	1,10	0,32
V	1,05	0,89	1,08	0,82	1,05	0,73	1,03	0,57	0,98	0,42
VI	1,03	0,91	1,04	0,86	0,99	0,78	0,98	0,64	0,91	0,48
VII	1,04	0,90	1,05	0,82	1,02	0,73	0,98	0,59	0,95	0,43
VIII	1,07	0,88	1,10	0,79	1,10	0,67	1,07	0,49	1,03	0,34
IX	1,11	0,84	1,19	0,72	1,22	0,57	1,25	0,36	1,23	0,22
X	1,18	0,78	1,30	0,60	1,41	0,40	1,49	0,24	1,50	0,18
XI	1,25	0,71	1,46	0,45	1,63	0,24	1,76	0,18	1,83	0,17
XII	1,31	0,66	1,57	0,34	1,80	0,17	1,98	0,16	2,09	0,15

Примечание: значения приведены для 15 числа каждого месяца
Note: The values are given for the 15th of each month

Различия в облученности склонов северной и южной экспозиции возрастают по мере увеличения их крутизны. Эти различия максимальны в зимние месяцы и минимальны летом. Для склонов крутизной 20–40° отмечается 5–10-кратное превышение южного склона над северным по приходу солнечной радиации зимой и 1,2–1,5 раза летом. В месяцы, составляющие вегетационный период, южные склоны получают солнечной радиации в 1,2–1,3 раза больше, чем северные.

Аналогичные данные приводит Г.И. Юренков [3] для более высоких широт (56° с.ш.). Им предлагается следующая ранжировка склонов по величине приходящей радиации (прямой и суммарной) в сравнении с горизонтальной поверхностью: северные — северо-восточные и северо-западные — восточные и западные — юго-восточные и юго-западные — южные. Данные различия объясняют причины, по которым на разных склонах даже в пределах одной высоты формируются отличные друг от друга природные комплексы.

Инсоляционные факторы играют ведущую роль в формировании термического режим местоположений. Еще одним довольно существенным фактором в горных условиях является стекание холодного воздуха

по склонам и его застаивание в локальных понижениях, особенно в холодное время года.

Что касается пространственного распределения атмосферных осадков, то на него также оказывает влияние рельеф. Оно обусловлено положением территории по отношению к основным глобальным атмосферным переносам воздушных масс, а также к наличию ветров, связанных с местной циркуляцией атмосферы. В умеренных широтах, где в течение всего года господствует западный перенос большее количество осадков будут получать склоны западных румбов. Стеkanie атмосферных осадков по склонам является причиной разнообразия увлажнения различных местообитаний. Величина склонового стока и ее соотношение с той частью атмосферных осадков, которая впитывается в почву, зависит от многих причин: крутизна, форма (вогнутая, выпуклая, прямая) и протяженность склона, интенсивность осадков, механического состава, фильтрационной способности и влагосодержания почво-грунтов [4].

Режим увлажнения территории, как интегральный показатель, складывается в результате взаимодействия и взаимовлияния пространственно-временного распределения соляных факторов, температуры воздуха и выпадающих осадков. Опять же, в горных условиях есть некоторые общие сочетания

условий, детерминированные рельефом. Например, западные склоны являются относительно теплыми и наиболее влажными; южные – максимально теплыми и наиболее сухими в результате большой величины испарения и т.п.

Итог локальных гидротермических условий находят четкое отражение в растительном покрове. У сообществ одного и того же зонального типа при достаточном увлажнении на южных склонах, как правило, выше продуктивность, у лесной растительности выше прирост и запасы древесины. Наибольшие локальные контрасты растительного покрова связаны с пестротой условий увлажнения; соседство сообществ, относящихся к разным типам растительности (например, лесных и луговых) на смежных местоположениях обычно. Помимо качественных различий видового состава растительности, на южных склонах все фазы развития растений начинаются раньше, чем на северных, и весь годовой цикл развития происходит в более короткие сроки.

Отмеченные факторы и процессы довольно удобно спроецировать на Макажойскую котловину, которая располагается на юго-востоке Чеченской Республики, на границе с Республикой Дагестан. Природа котловины представляет интерес также в связи с тем, что здесь располагается карбоновый полигон Чеченского государственного университета им.А.А.Кадырова, на котором отрабатываются технологии регенеративного животноводства. В этой связи необходим анализ природных условий, в

результате которых формируются природные комплексы с характерным для них ресурсным потенциалом.

Макажойская котловина приурочена к тектонической депрессии, которая имеет несколько большие размеры. С орографической точки зрения котловина ограничена рядом хребтов. На севере границе протягивается хребет Кашекрлам, одноименна вершина которого (2805 м), является высшей точкой котловины. На северо-востоке этот хребет упирается в озеро Кезеной-Ам. Далее на восток граница проходит по отрогам хребта Гаготытлюры, заходя на территорию Республики Дагестан. Часть южной границы совпадает с границей между ЧР и РД, поскольку последняя проходит практически по водоразделу, на котором находится г. Абдалзабизуль (2604 м). В районе каньона р.Ансалта граница уходит строго на юг по хребту Хиндой-лам, который протягивается практически широтно и является крайней южной границей котловины и одновременно границей между ЧР и РД. Здесь отметки высот достигают 2342 м. В крайней западной части этого хребта, от безымянной вершины с отметкой в 2658 м водораздел поворачивает на север, северо-восток и северо-запад, по которому. Именно здесь проходит водораздел между бассейном р.Ахкте, которая является притоком Ансалты за пределами котловины, и Келой-ахк, являющейся притоком Шаро-Аргун. Здесь водораздел выражен не столь отчетливо, а преобладающие высоты хребта не достигают 2000 м. площадь котловины в указанных границах составляет 144 км² (рис. 1).

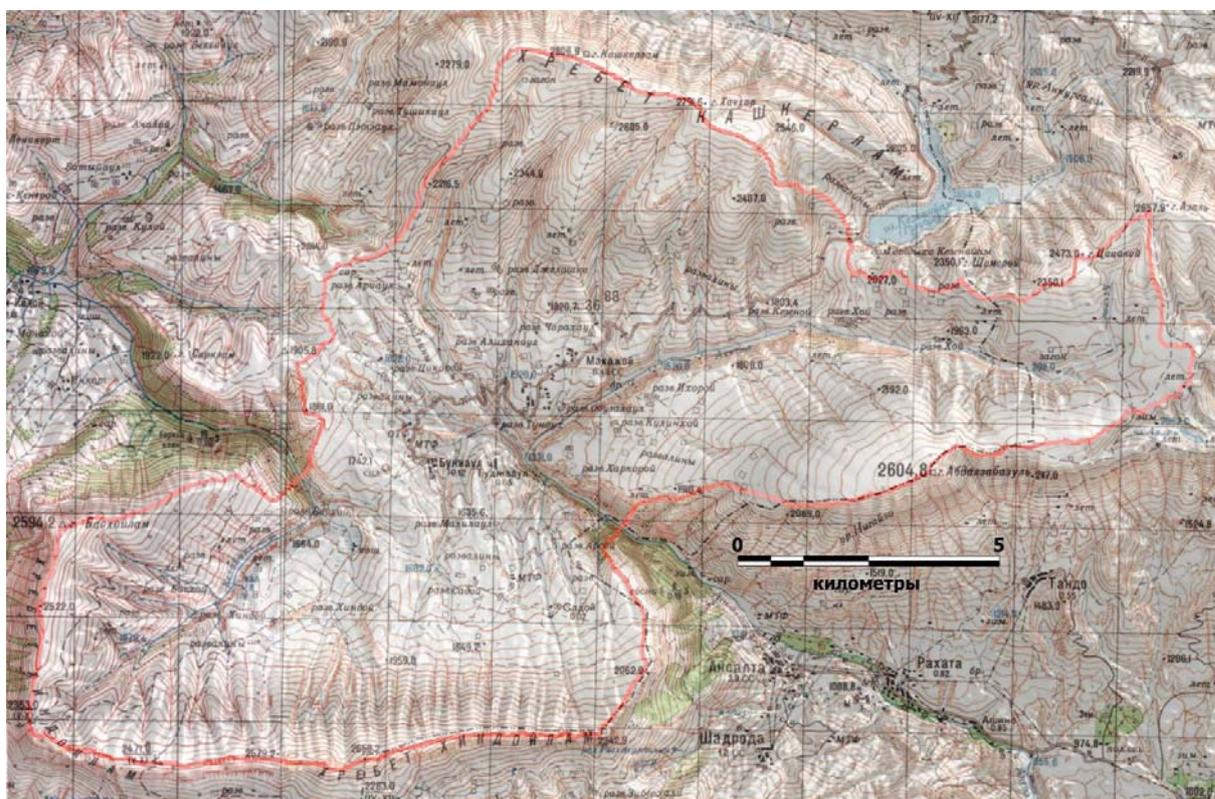


Рисунок 1. Географическое положение и границы Макажойской котловины

Figure 1. Geographical location and borders of the Makazhoysky basin

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время для количественной оценки влияния рельефа на климат удобно применять цифровые модели рельефа (ЦМР), для обработки

которых в среде ГИС имеется соответствующий инструментарий.

В открытом доступе имеются разнообразные цифровые модели рельефа. Они отличаются

разрешением, но в целом для умеренных широт оно составляет около 30 м. Второе отличие связано с траекторией полета и особенностями съемочной аппаратуры, в результате чего имеются отличия в горизонтальной и вертикальной точности. Наконец, они отличаются временем съемки. В этой связи была выбрана последняя по времени съемки из имеющихся в открытом доступе моделей, которая имеется на сайте Европейского Космического Агентства [5]. В частности, использовалась цифровая модель рельефа FABDEM V1-0 с разрешением в этой части около 27 м, с которой удалены древесная растительность и застройка [6]. Для изучаемой территории была создана мозаика. Для перевода угловых единиц в линейные исходная ЦМР была перепроецирована в систему координат WGS 84 UTM38N с разрешением 30 м.

Обработка цифровой модели рельефа на указанную территорию осуществлялась с применением ПО ArcGis, где имеется инструмент Spatial Analyst Tools с большим количеством возможностей для обработки исходных данных и получения необходимых изображений. В части, для оценки величины солнечного излучения использовался инструмент Solar Radiation, который извлекает поступающее солнечное излучение с растровой поверхности в ватт-часах на квадратный метр (ВтЧ/м²). Как отмечается в руководстве пользователя данной программой, анализ предназначен только для локальных (ландшафтных) масштабов, поэтому допустимо использовать одно значение широты для всей ЦМР. При использовании больших наборов данных, характеризующих значительные по площади территории, результаты измерения инсоляции будут значительно отличаться на разных широтах. В этой связи для получения корректных данных рекомендуется анализировать территории, не превышающую более чем на 1 градус. С учетом того, что максимальная протяженность котловины с севера на юг не превышает 14 км, полученные результаты удовлетворяют оговоренным условиям.

Климат Макажойской котловины складывается под влиянием глобальных, региональных и местных факторов и процессов. Основным фактором является географическое положение в южной части умеренного климатического пояса, с чем связаны значительные величины поступающей суммарной солнечной радиации. Вторым фактором является рельеф: основным климаторазделом является Главный Кавказский хребет, который препятствует проникновению холодного воздуха с севера и теплого с юга. Климаторазделом второго порядка является Ставропольская возвышенность, которая препятствует проникновению влажного воздуха со стороны Черного моря и способствует его трансформации из морского в континентальный. Наконец, влияние рельефа обусловлено еще и тем, что он влияет не только на пространственное распределение метеорологических параметров, но также и формирует вертикальную зональность.

Влияние морей проявляется неодинаково. Так, по мере удаления от Черного моря происходит трансформация воздушных масс, переносимых с его акватории западным переносом, особенно при пересечении Ставропольской возвышенности. Каспийское море не оказывает никакого воздействия на режим увлажнения региона и изучаемой территории: в

теплое время года господствует западный перенос, а в холодное, при формировании восточного переноса, воздух, проходя над холодной поверхностью моря, не насыщается влагой.

Что касается климатообразующих процессов, то они также отражают их глобальные и региональные особенности. Годовой ход температуры воздуха связан с зенитальным положением Солнца, а также с особенностями хода температур в пределах континентального сектора. В этой связи наиболее холодным месяцем является январь, а наиболее теплым – июль. В связи с географическим положением в течение года господствующим направлением ветра западный перенос. В холодное время года над Азией формируется крупный максимум, в результате чего формируются выносы холодного континентального воздуха, достигающие Кавказа, которые приводят к резкому снижению температуры воздуха. В весеннее время восточный перенос приводит к формированию суховея. Особенности горной местности является то, что здесь на фоне ветров, обусловленных общей циркуляцией атмосферы, представлены также местные ветры, такие как фён и горно-долинный. Первый типичен преимущественно в переходные сезоны года, когда происходит перестройка глобальных полей давления, но может наблюдаться также и зимой. Что касается горно-долинных ветров, то они связаны преимущественно с теплым временем года.

Под влиянием циркуляции атмосферы формируется пространственно-временное распределение осадков. В связи с зональными условиями основная часть осадков выпадает в теплое время года, при этом их максимум отмечается в конце весны – начале лета. В середине лета и второй половине лета количество осадков сокращается как в связи с ростом температуры воздуха, так и в связи с тем, что район находится под защитой Андийского хребта, перехватывающего основной западный перенос. На пространственное распределение осадков основное влияние оказывает рельеф местности. В этой связи в пределах горных котловин принято выделять две категории склонов: южных румбов (солярные), и западных румбов (циркуляционные). Первые характеризуются наибольшими величинами солнечной радиации, и, соответственно, наиболее теплые; на вторых величина радиации существенно ниже, но зато здесь выпадает большое количество осадков.

Пространственное распределение годовой величины солнечного излучения по территории Макажойской котловины иллюстрирует рис.2. В целом хорошо заметен рост величины радиации по мере увеличения высоты над уровнем моря. Минимальные величины излучения отмечаются в наиболее низких и затененных частях котловины и приурочены к ущельям основных водотоков, которые получают 750–900 тыс. ВтЧ/м². Сопоставимые величины солнечной радиации получают также северные макросклоны котловины, приуроченные к склонам хребта Хиндойлам. По мере роста высоты увеличивается и солнечная радиация. Средние ее количества (1050–1500 тыс. ВтЧ/м²) получают относительно пологие склоны на высотах до 1800 м. Также хорошо выражены макроэпозиционные различия: на сопоставимых абсолютных высотах величина солнечной радиации выше на южном макросклоне по сравнению с северным. Что касается максимальных величин

солнечной радиации, то они типичны для наиболее высоких частей котловины, приуроченных к южным склонам хребта Кошкерлам и его отрогам. Здесь величина радиации доходит до 1800 тыс. ВтЧ/м². То есть, наибольшее количество радиации получает юго-восточный макросклон (правый борт котловины), тогда

как северо-западный склон получает ее существенно меньше. На южном макросклоне ее величина нарастает от наименьших высотных отметок к наибольшим, то есть к наиболее высоким частям хребтов, к водоразделам. Аналогичная закономерность отмечается и на северном макросклоне.

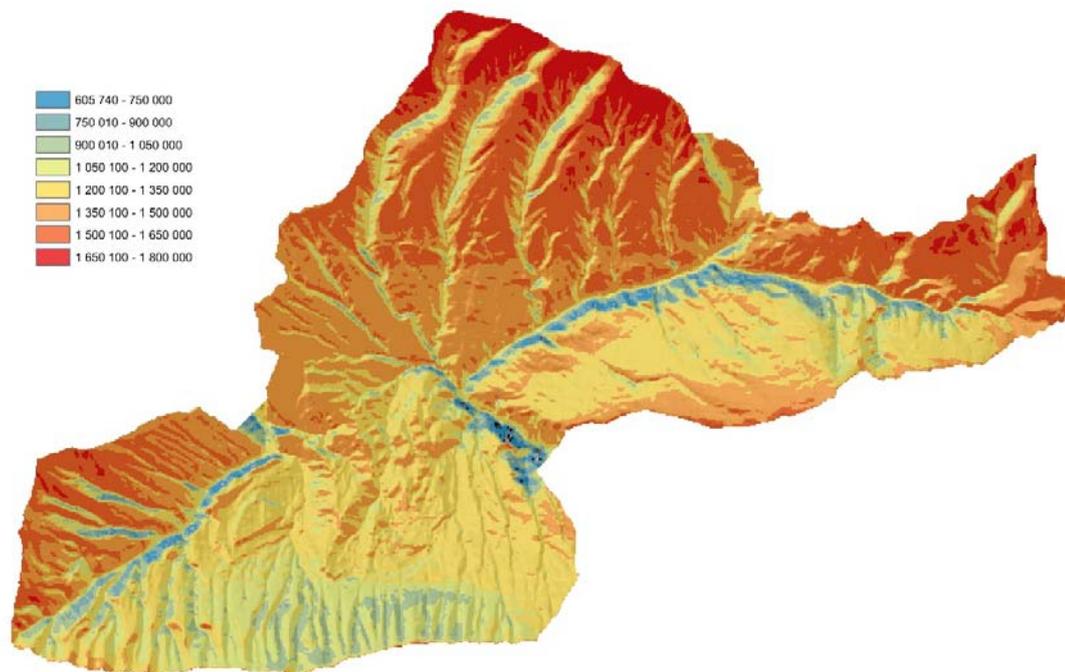
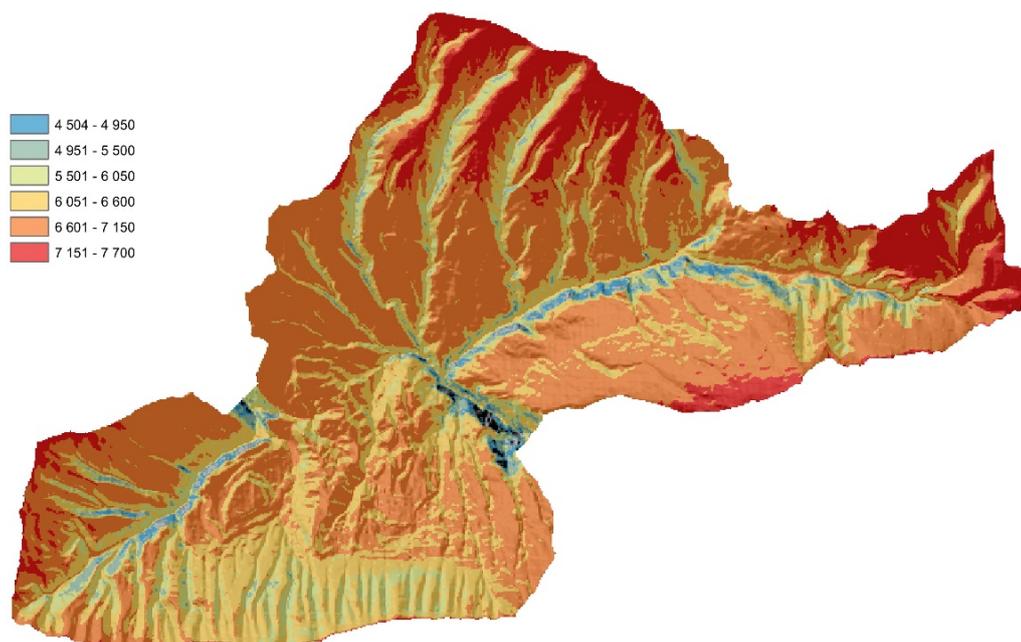


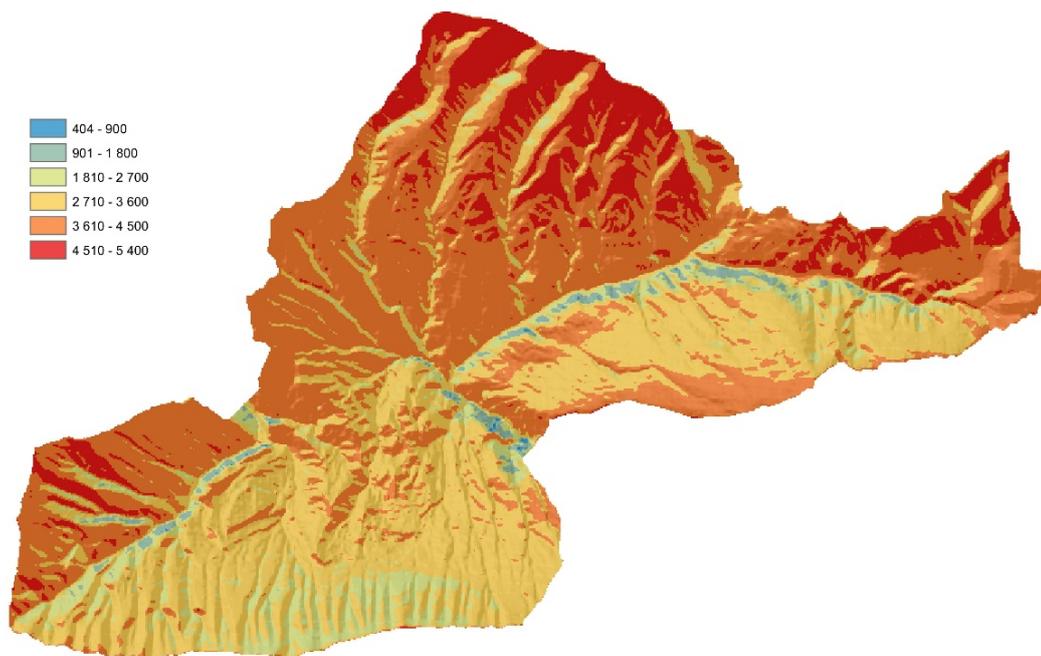
Рисунок 2. Пространственное распределение годовой солнечной радиации по территории Макажойской котловины
Figure 2. Spatial distribution of annual solar radiation over the Makazhoysky basin

Помимо распределения годовой величины суммарной радиации, из ЦМР были извлечены величины радиации в дни летнего и зимнего солнцестояний, а также в дни равноденствий (рис. 3). В целом описанная выше картина существенно не меняется, однако хорошо выражена поляризация местоположений. Так, в день зимнего солнцестояния даже территории, имеющие

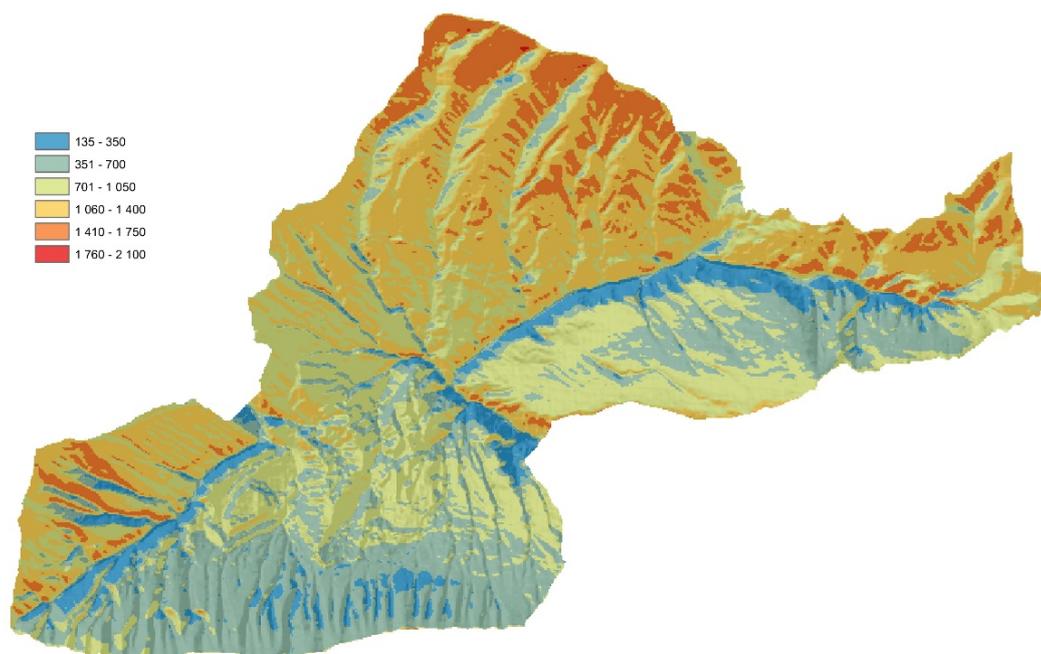
довольно значительную высоту (северные склоны хребта Хиндойлам), получают примерно столько же солнечной радиации, сколько и наиболее затененные глубокие ущелья, где протекают постоянные водотоки. На противоположном, южном макросклоне, низкие значения радиации связаны с глубокими эрозионными врезками.



a/a



б/б



в/с

Рисунок 3. Пространственное распределение солнечной радиации в день летнего солнцестояния (а), равноденствий (б) и зимнего солнцестояния (в)

Figure 3. Spatial distribution of solar radiation on the days of the summer solstice (a), equinoxes (b) and winter solstice (c)

На территории котловины и в непосредственной близости от нее метеостанции отсутствуют. Ближайшей является метеостанция «Ботлих», расположенная во Внутригорном Дагестане. Несколько дальше располагается метеостанция «Шатой». Обе эти метеостанции располагаются в котловинах, но между ними есть отличия. Во-первых, днище Шатойской котловины располагается ниже, на высотах около 500 м, тогда как Ботлихская котловина располагается на высотах около 1000 м. Во-вторых, Шатой закрывают

наиболее низкие Лесистый и Пастбищный хребты, тогда как Ботлих находится под прикрытием более высокого Скалистого хребта и его отрогов. И, наконец, третья отличия связано с тем, что Шатойская котловина хорошо вентилируется за счет потока по ущелью р.Аргун, тогда как котловинность Ботлиха выражена гораздо лучше. С точки зрения географического положения данные метеостанции «Ботлих» ближе к Макажойской котловине, поскольку обе располагаются в дождевой тени Андийского хребта (табл. 2).

Таблица 2. Метеорологические параметры окрестностей Макажойской котловины на 1961–1990 гг.
Table 2. Meteorological parameters of the surroundings of the Makazhoysky basin for 1961–1990

Метеостанция Weather station	Высота (м) Height (m)	Температура воздуха Air temperature			Осадки Precipitation	Кэф. увл. Moisture coefficient
		Январь January	Июль July	Год Year		
Ботлих / Botlich	979	-1,9	20,6	9,8	389	0,42
Шатой / Shatoy	528	-2,5	20,5	8,6	603	0,71
Сулак, в/г / Sulak	2923	-9,9	8,5	-0,8	1092	-

Как видно из представленные в таблице данных, температура января в Ботлихе выше, чем в Шатой даже несмотря на то, что она располагается почти на 450 м выше, то есть наблюдается хорошо выраженная термическая инверсия. Июльские температуры практически одинаковы, хотя в Шатое она должна быть выше в связи с более низким высотным положением. Что касается годовой температуры воздуха, то в Ботлихе она также выше, чем в Шатое. Годовое количество осадков в Ботлих составляло 389 мм, а в Шатое – 603 мм, то есть котловинность выражена гораздо сильнее.

Сравнение данных указанных метеостанций позволяет сделать предположение о том, что средняя годовая температура воздуха в Макажойской котловине, нижняя часть которой приурочена к высотным отметкам 1400–1600 м, на период 1961–1990 гг. могла составлять 7–8°, а количество выпадающих осадков 400–500 мм. Однако метеостанция «Ботлих» была закрыта в 1990-е годы, поэтому для определения современных климатических условий мы будем опираться на данные метеостанции «Шатой». За 2008–2012 гг. средняя годовая температура воздуха составила 9,7°, при этом в январе она достигает -2,3°, а в июле – 21,6° [7]. Годовое количество осадков 668 мм, с минимумом в январе (21 мм) и максимум в июне (109 мм). По сравнению с данными таблицы 2, средняя годовая температура воздуха возросла на 1,1° за счет ее роста во все месяцы и сезоны года. Прирост осадков составил 65 мм, но при этом коэффициент увлажнения снизился до 0,50.

Таким образом, современная средняя годовая температура воздуха в Макажойской котловине может составлять на нижних высотных отметках (1400–1600 м) 7,5–8,6°, достигая зимой величин немногим менее 0°, а летние температуры могут подниматься до +20° и выше за счет высокой инсоляции. Количество осадков может составлять 450–550 мм в год с зимним минимумом и летним максимумом.

Что касается наиболее высокогорной части котловины, то, как известно, с высоты 2000 м начинается «свободная атмосфера», где на воздушные течения подстилающая поверхность оказывает минимальное значение. В результате высокогорные части разных районов Кавказа гораздо более однородны, чем средне- и низкогорные. Наиболее близкой является метеостанция «Сулак, высокогорная» (2923 м). С учетом тенденций, охарактеризованными для метеостанции «Шатой», здесь также отмечается повышение температуры воздуха в сочетании с разнонаправленными изменением количества выпадающих осадков. В этой связи можно

предположить, что температуры в наиболее возвышенной части Макажойской котловины также возросли, однако характер увлажнения не претерпел существенных изменений.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как отмечалось выше, в Макажойской котловине располагается один из участков карбонового полигона Чеченского государственного университета им. А.А. Кадырова, где обрабатываются технологии регенеративного животноводства. Основой животноводства является кормовая база, которая зависит от фитомассы и продуктивности природных комплексов. Запасы фитомассы связаны с местоположением природных комплексов и обусловлены локальными топографическими и микроклиматическими факторами, которые в горных условиях детерминированы рельефом и его составляющими (абсолютная высота, крутизна и экспозиция склонов). Что касается продуктивности, то она обусловлена метеорологическими условиями конкретных лет. В этой связи для оценки влияния метеорологических условий на продуктивность пастбищ в 2022 г. на карбоновом полигоне, который располагается на северном макросклоне хребта Хиндой в Макажойской котловине были размещены агрометеостанции (рис. 4), которые в автоматическом режиме снимали такие параметры, как, температура воздуха и почвы (Т), количество осадков (R), атмосферное давление (P), влажность воздуха и почвы (W) и др. Они охватывали период со второй декады января до второй декады декабря 2023 г. Результаты наблюдений приведены в таблице 3.

Как видно из приведенных данных, разница абсолютных высот составляет 304 м, что позволяет рассчитать градиенты изменения метеорологических параметров. Так, для температуры воздуха в этих высотных интервалах он составляет 0,93°, что близко к сухоадиабатическому градиенту. Данный показатель к тому же позволяет подтвердить тот факт, что климат котловины характеризуется сухостью. Количество осадков сокращается на 14 мм на каждые 100 м абсолютной высоты. Увеличение скорости ветра в 2 раза способствует иссушению почвы и охлаждения листовой поверхности.

Наряду с годовыми величинами представляет интерес также ход метеорологических параметров в течение года и сезонов (рис.5). Он позволяет оценить синхронность хода метеопараметров, а также рассчитать не только годовые, но и месячные градиенты для них.

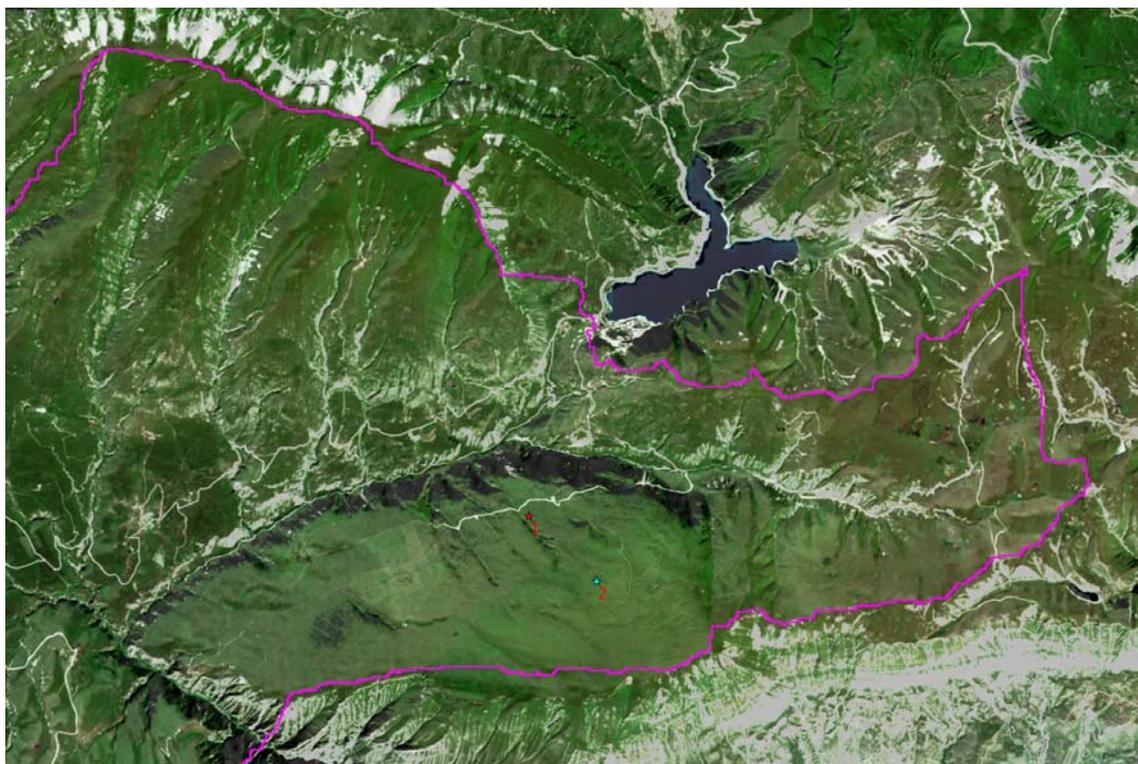


Рисунок 4. Расположение агрометеостанций карбонового полигона ЧГУ им. А.А. Кадырова
Figure 4. Location of agrometeorostations of the carbon landfill of the A.A. Kadyrov ChSU

Таблица 3. Основные метеорологические параметры по агрометеостанциям карбонового полигона ЧГУ им. А.А. Кадырова за 2023 г.

Table 3. Main meteorological parameters for the agrometeorological station of the carbon landfill of the A.A. Kadyrov ChSU for 2023

Площадка Place	Высота, м Height, m	Тгод Annual air temperature	Ргод Annual precipitation	Р Atmospheric pressure	Ввозд. Air humidity	Впочв Soil moisture	V Wind speed	Тлиста Tlist
1	1960	8,6	481	821	69	45,7	1,9	10,9
2	2264	5,8	525	773	71	33,8	3,8	6,2

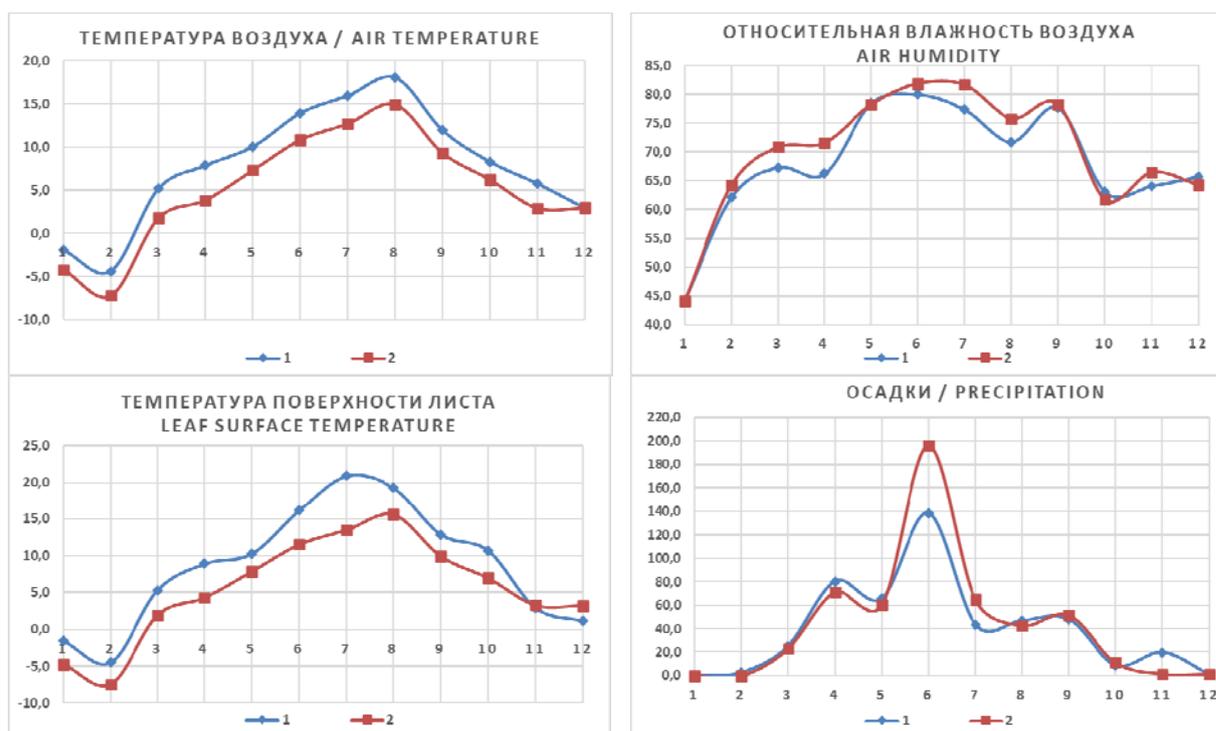


Рисунок 5. Ход метеорологических элементов в 2023 г.
Figure 5. Course of meteorological elements in 2023

ВЫВОДЫ

1. Применение цифровой модели рельефа среднего пространственного разрешения с использованием ГИС-технологий позволяет количественно оценить вклад рельефа в формирование климатического фона на локальном уровне. Для Макажойской котловины выявлены различия в величине солнечной радиации, обусловленные горным рельефом. Для годовой величины они различаются в 3 раза в зависимости от местоположений при увеличении солнечной радиации с увеличением абсолютной высоты. На сопоставимых высотах величина радиации больше на южных склонах по сравнению с северными, а разница может достигать 50%. Наименьшие различия в величине радиации отмечаются в дни летнего солнцестояния, а наибольшие – в дни зимнего.

2. Проведен ретроспективный анализ климатических условий Макажойской котловины по данным наиболее близко расположенных метеорологических станций (Ботлих, Шатой, Сулак высокогорная). Он позволил оценить климатические условия в пределах котловины как за период 1960–1991 гг., а также на основе имеющихся трендов оценить современные климатические условия на изучаемой территории.

3. Собранные за 2023 г. метеорологические параметры суточного разрешения позволяют оценить современные климатические условия в пределах средне- и высокогорной части котловины и вычислить градиенты изменения параметров. Последние являются основой для создания ГИС, которая позволит проводить оперативный мониторинг пространственно-временного распределения метеорологических параметров на основе ЦМР высокого разрешения.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках госзадания ЧГУ им. А.А. Кадырова FEGS-2023-0008

ACKNOWLEDGMENT

The work was carried out within the framework of the state tasks A.A. Kadyrov ChSU FEGS-2023-0008

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Солнцев Н.А. О взаимоотношении «живой» и «мертвой» природы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. География. 1960. N 6. С. 7–11.

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Виталий В. Братков осуществил поиск и обработку данных и литературный обзор, принимал участие в обработке ЦМР. Рашия Х. Бекмурзаева провела все полевые исследования, подготовила рукопись. Луиза Р. Бекмурзаева провела статистическую обработку данных и интерпретировала результаты исследований. 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.

2. Кондратьев К.Я., Пивоварова З.И., Федоров М.П. Радиационный режим наклонных поверхностей. Л.: Гидрометиздат, 1978. 215 с.
3. Юренков Г.И. Основные проблемы физической географии и ландшафтоведения: Учеб. пособие для географ. спец. пед. ин-тов. М.: Высшая школа, 1982. 216 с.
4. Романова Е.Н. Микроклиматическая изменчивость основных элементов климата. Л.: Гидрометиздат, 1977.
5. AIRBUS 2020. Copernicus DEM: Copernicus digital elevation model product handbook Report AO/1-9422/18/I-LG (European Space Agency) (дата обращения: 25.06.2020)
6. Neal J., Hawker L. FABDEM V1-2. 2023 <https://doi.org/10.5523/bris.s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn>
7. Погода и климат. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 28.01.2024)

REFERENCES

1. Solntsev N.A. Relationships between “living” and “dead” nature. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya Geografiya [Bulletin of Moscow University. Geography Series]. 1960, no. 6, pp. 7–11. (In Russian)
2. Kondrat'ev K.Ya., Pivovarova Z.I., Fedorov M.P. *Radiatsionnyi rezhim naklonnykh poverkhnostei* [Radiation regime of inclined surfaces]. Leningrad, Gidrometizdat Publ., 1978, 215 p. (In Russian)
3. Yurenkov G.I. *Osnovnye problemy fizicheskoi geografii i landshaftovedeniya: Uchebnoe posobie dlya geograficheskikh spetsial'nostei pedagogicheskikh institutov* [Basic problems of physical geography and landscape science: Proc. manual for geographical specialties of pedagogical institutes]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982, 216 p. (In Russian)
4. Romanova E.N. *Mikroklimatechskaya izmenchivost' osnovnykh elementov klimata* [Microclimatic variability of the main climate elements]. Leningrad, Gidrometizdat Publ., 1977. (In Russian)
5. AIRBUS 2020. Copernicus DEM: Copernicus digital elevation model product handbook Report AO/1-9422/18/I-LG (European Space Agency) (accessed 25.06.2020)
6. Neal J., Hawker L. 2023 FABDEM V1-2. <https://doi.org/10.5523/bris.s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn>
7. *Pogoda i klimat* [Weather and climate]. Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (accessed 28.01.2024)

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Vitaly V. Bratkov carried out the searching and processing of data and a literary review and took part in the processing of the DEM. RASHIA H. Bekmurzaeva completed all the field research and prepared the manuscript.

Luiza R. Bekmurzaeva conducted statistical data processing and interpreted the research results. 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

Виталий В. Братков / Vitaly V. Bratkov <https://orcid.org/0000-0001-5072-1859>

Рашия Х. Бекмурзаева / RASHIA H. Bekmurzaeva <https://orcid.org/0000-0001-5936-7235>

Луиза Р. Бекмурзаева / Luiza R. Bekmurzaeva <https://orcid.org/0000-0002-4904-0463>

Оригинальная статья / Original article

УДК 556

DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-15



Гидроэкологические ограничения использования водных ресурсов трансграничных рек Урала и Тобола в пределах степной зоны

Жанна Т. Сивохип¹, Владимир М. Павлейчик¹, Александр А. Чибилёв¹,
Юрий А. Падалко¹, Мария А. Козлова², Ольга Б. Попова³

¹Институт степи УрО РАН, Оренбург, Россия

²Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

³Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

Контактное лицо

Жанна Т. Сивохип, к.г.н., доцент, отдел ландшафтной экологии, Институт степи УрО РАН; 460000, Россия, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11. Тел. +79225591567

Email sivohip@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5704-0554>

Формат цитирования

Сивохип Ж.Т., Павлейчик В.М., Чибилёв А.А., Падалко Ю.А., Козлова М.А., Попова О.Б. Гидроэкологические ограничения использования водных ресурсов трансграничных рек Урала и Тобола в пределах степной зоны // Юг России: экология, развитие. 2024. Т.19, N 2. С. 170-180. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-15

Получена 1 октября 2023 г.

Прошла рецензирование 14 декабря 2023 г.

Принята 15 января 2024 г.

Резюме

Цель – выявить основные типы гидроэкологических ограничений использования водных ресурсов и их пространственные закономерности в бассейнах рр. Урал и Тобол в пределах степной зоны.

Комплексная оценка водно-экологической ситуации в регионах исследуемых бассейнов проведена на основе расчета водно-экологического стресса – соотношение объемов забора воды и свободного стока (средний многолетний сток минус экологический). Для оценки экологических ограничений водопользования использованы данные Государственных докладов «О состоянии и об охране окружающей среды». Риск затопления населенных пунктов оценивался по сведениям из реестров населённых пунктов подверженных угрозе затоплений (подтоплений). Анализ динамики русловых процессов проводился на основе использования спутниковых изображений Landsat. Для рек бассейна р. Тобол использован подход, основанный на учете характера русловых трансформаций на участке государственной границы (РФ и РК).

Установлены основные типы гидроэкологических ограничений в трансграничных бассейнах рр. Урал и Тобол. В частности, ключевым фактором, лимитирующим водопользование, является наличие гарантированного объема водных ресурсов надлежащего качества. К гидроэкологическим ограничениям, связанным с негативным воздействием вод, относятся риски затопления (подтопления) населенных пунктов во время прохождения весенних или летних паводков, а также интенсивные русловые трансформации (в бассейне р. Урал).

Для бассейнов рр. Урал и Тобол (в пределах степной зоны) характерно развитие достаточно сложной гидроэкологической ситуации на отдельных участках. С учетом длительного цикла низкой водности рек общая гидроэкологическая обстановка обострилась в последние десятилетия (прежде всего проблема гарантированного обеспечения водными ресурсами нормативного качества). В итоге, актуальной задачей является разработка алгоритма интегральной оценки гидроэкологических ограничений водопользования и их последствий для населения и экономики регионов степной зоны.

Ключевые слова

Речной сток, водный стресс, качество воды, русловые трансформации, наводнение.

Hydroecological limitations of the use of water resources of transboundary rivers of the steppe zone (through the example of the Ural and Tobol Rivers, Russia)

Zhanna T. Sivohip¹, Vladimir M. Pavleichik¹, Alexander A. Chibilev¹, Yuri A. Padalko¹, Maria A. Kozlova² and Olga B. Popova³

¹Institute of Steppe, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

²Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Orenburg State University, Orenburg, Russia

Principal contact

Zhanna T. Sivohip, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Landscape Ecology, Institute of Steppe, Ural Branch, Russian Academy of Sciences; 11 Pionerskay St, Orenburg, Russia 460000. Tel. +79225591567
Email sivohip@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5704-0554>

How to cite this article

Sivohip Zh.T., Pavleichik V.M., Chibilev A.A., Padalko Yu.A., Kozlova M.A., Popova O.B. Hydroecological limitations of the use of water resources of transboundary rivers of the steppe zone (through the example of the Ural and Tobol Rivers, Russia). *South of Russia: ecology, development*. 2024; 19(2):170-180. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-15

Received 1 October 2023

Revised 14 December 2023

Accepted 15 January 2024

Abstract

To identify the main types of hydroecological restriction on the use of water resources and their spatial patterns in the Ural and Tobol river basins within the steppe zone.

A comprehensive assessment of the water-environmental situation in the regions of the studied basins studied was carried out on the basis of the calculation of water-environmental stress – the ratio of water intake and free flow (average long-term flow minus ecological). To assess the environmental restrictions on water use, data from the State reports, “On the State and Protection of the Environment” were used. Exposure to the risk of flooding of settlements was analysed according to information from the registers of settlements at risk of flooding (flooding). Analysis of the dynamics of channel processes was carried out using Landsat satellite images. For the rivers of the Tobol River basin, an approach based on taking into account the nature of channel transformations in the sectors of the state border of the Russian Federation and the Republic of Kazakhstan was used.

As a result of the research, the main types of hydroecological restriction in the transboundary basins of the Ural and Tobol were identified. In particular, the key factor limiting water use is the availability of a guaranteed volume and adequate quality of water resources. Hydrological restrictions associated with the negative impact of water include the risks of flooding of settlements during the passage of spring or summer floods, as well as intensive riverbed transformations (in the Ural River basin).

The Ural and Tobol river basins (within the steppe zone) are characterised by the development of a rather complex hydroecological situation in some areas. Taking into account the long cycle of low water content in these rivers, the general hydroecological situation has aggravated in recent decades, the primary problem being that of guaranteed provision of water resources of standard quality. As a result, an urgent task is to develop an algorithm for a comprehensive assessment of hydroecological restrictions on water use and their consequences for the population and economy of the regions of the steppe zone.

Key Words

River flow, water stress, water quality, transformation of riverbed, flood.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной проблемой современности является снижение риска негативных последствий антропогенного воздействия на природную среду. В настоящее время, антропогенная трансформация отдельных природных экосистем достигла значительных масштабов, что обуславливает развитие экстремальных гидроэкологических ситуаций для населения и экономики. К подобным экосистемам относится степная зона, природные ресурсы которой на протяжении длительного времени активно осваиваются разными видами природопользования.

Лимитирующий фактор социально-экономического развития для многих регионов степной зоны – наличие гарантированного объема ресурсов речного стока, в связи чем одной актуальных задач является достижение экономически эффективного и экологически безопасного использования водных ресурсов [1]. В настоящее время, гидроэкологическая ситуация в регионах осложняется проблемами, связанными с качеством мониторинга и прогнозирования состояния водных

объектов, несовершенством водного законодательства и экономических механизмов природо- и водопользования [2]. Необходимо отметить, что в зависимости от сочетания природных и антропогенных факторов изменяются масштабы влияния гидрологических ограничений на реализацию задач по достижению экологически безопасного использования ресурсов водных объектов [3].

Особую актуальность представляют вопросы обеспечения гидроэкологической безопасности в трансграничных бассейнах рек, которые представляют собой пространственно интегрированную систему, где решение задач по достижению экономически эффективного и экологически безопасного водопользования осложняется водохозяйственными, институциональными и управленческими противоречиями государств-водопользователей [4]. В данной статье представлены результаты пространственного анализа гидроэкологических ограничений в смежных трансграничных речных бассейнах рек Урал и Тобол (в пределах степной зоны) (рис. 1).

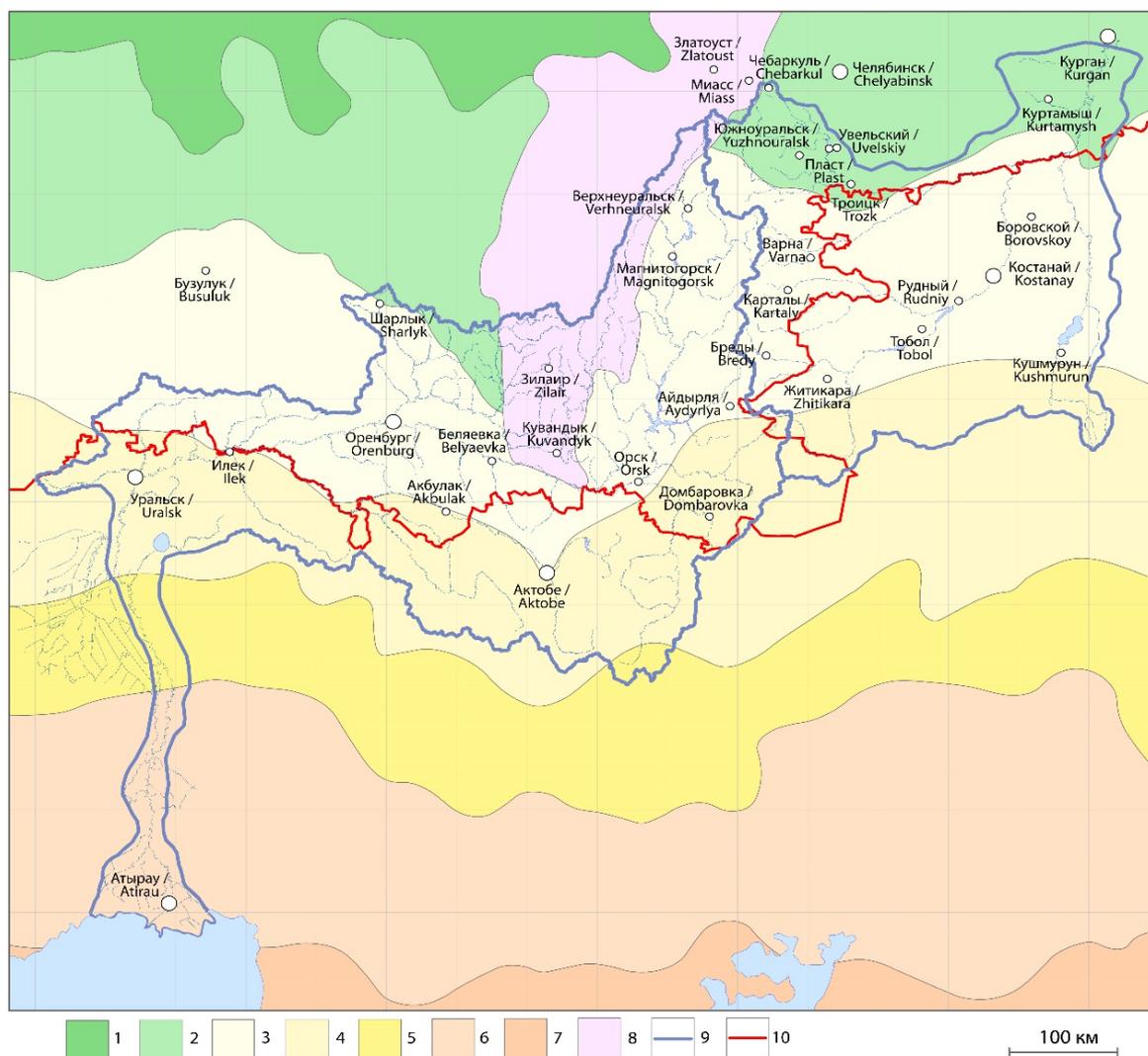


Рисунок 1. Трансграничные бассейны рр. Урал и Тобол на схеме широтной зональности, по: [5]

Природные зоны: 1 – зона широколиственных лесов; 2 – зона лесостепи; 3–5 – степная зона (3 – северные, 4 – средние, 5 – южные степи); 6–7 – зона пустынь (6 – северные, 7 – средние); 8 – горная область Южного Урала (азональные лесостепные и таежные ландшафты). 9 – границы водосборных рр. Урал и Тобол (до г. Курган), 10 – государственная граница Российской Федерации и Республики Казахстан

Figure 1. Transboundary Ural and Tobol rivers basins per the latitudinal zonality scheme, according to: [5]

Natural zones: 1 – zone of broad-leaf forests; 2 – forest-steppe zone; 3–5 – steppe zone (3 – arid, 4 – dry, 5 – deserted steppes); 6–7 – desert zone (6 – northern, 7 – middle); 8 – mountainous region of the Southern Urals (azonal forest-steppe and taiga landscapes); 9 – the boundaries of the catchment areas of the Ural and Tobol rivers (to the city of Kurgan); 10 – state border of the Russian Federation and the Republic of Kazakhstan

Водосборная территория трансграничного бассейна р. Урал практически полностью совпадает с зональным распространением степных ландшафтов (более 70 %). Основная доля стока формируется в верхней и средней части бассейна, в пределах Российской Федерации. Казахстанский участок реки, ниже г. Уральск, характеризуется отсутствием боковой приточности и значительными потерями на непродуктивное испарением с поверхности широкой поймы. В регионах трансграничного бассейна р. Урал проживает более 4 млн человек, в том числе и в долинно-приречных ландшафтах, что, несомненно, усугубляет эколого-гидрологическую обстановку на отдельных гидрографических участках. Регионы бассейна р. Урал характеризуются развитием многоотраслевой экономики с доминированием горнодобывающей, топливно-энергетической и металлургической промышленности, а также сельскохозяйственного производства.

Верховья трансграничного бассейна р. Тобол, расположены в пределах Республики Казахстан. Формирование речного стока р. Тобол в пределах степной зоны происходит в условиях недостаточного увлажнения и значительной антропогенной трансформации водосборных территорий. Степная часть исследуемого бассейна характеризуются преобладающим развитием горнодобывающей, обрабатывающей, пищевой промышленности. В аграрном секторе приоритетное развитие получили растениеводство (зерновые, масличные, кормовые культуры) и крупноотоварное животноводство.

С учетом физико-географических и антропогенных факторов формирования речного стока, для трансграничных бассейнов рр. Урал и Тобол наиболее острые проблемы гидроэкологической безопасности обусловлены нарастанием экстремальности изменений характерных параметров водности (расходы, уровни), трансформации качественного состава речных вод, активизации русловых процессов, затоплением (подтоплением) селитебных территорий и др. В связи с этим, целью исследования стало выявление основных типов опасных гидроэкологических ситуаций и их пространственных закономерностей в бассейнах рр. Урал и Тобол в пределах степной зоны.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Детализированная оценка возобновляемых водных ресурсов бассейнов рр. Урал и Тобол получена на основе обработки и анализа данных о наличии, использовании и охране водных ресурсов в регионах Российской Федерации и Республики Казахстан [6; 7]. Комплексная оценка водно-экологической ситуации в регионах исследуемых бассейнов проведена на основе расчета водно-экологического стресса – соотношение объемов забора воды и свободного стока (средний многолетний сток минус экологический). Экологический и свободный сток (допустимое изъятие) рассчитаны на основе нормы стока (50 %) за период исследования и стока 75 и 95 % обеспеченности за этот же период. Оценки экологического стока получены методом пропорционального стока [8], в соответствии с которым экологический сток определяется с помощью переходных коэффициентов для стока разной обеспеченности – для 50% – 0,7; для 75% – 0,8; для 95% – 0,9.

Оценка экологических ограничений водопользования проведена для российских участков

исследуемых бассейнов на основе данных Государственных докладов «О состоянии и об охране окружающей среды» [9–12]. Традиционно экологические ограничения водопользования рассматриваются на основе индекса загрязнения вод (ИЗВ) или удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ). УКИЗВ учитывает частоту и кратность превышения ПДК по нескольким показателям и может варьировать в водах различной степени загрязненности от 1 до 16 (для чистой воды 0). Большому значению индекса соответствует худшее качество воды. Классификация качества воды, проведенная на основе значений УКИЗВ, позволяет разделять поверхностные воды на 5 классов в зависимости от степени их загрязненности. Помимо этого, были проанализированы среднегодовые концентрации химических веществ в речной воде, приведенные к рыбохозяйственным ПДК.

Риск затопления населенных пунктов оценивался по сведениям, полученным по запросам в службы по чрезвычайным ситуациям, постановлениям региональных правительств РФ, включающих реестры населенных пунктов подверженных угрозе затоплений (подтоплений) исследуемой территории [13; 14]. По Республике Казахстан аналогичный анализ проведен на основе официальных сведений Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан [15].

Анализ динамики русловых процессов проводился на основе использования спутниковых изображений Landsat за период 1985–2022 годы, а также набора топографических и исторических карт. Маловодность большинства рек бассейна р. Тобол в пределах степной зоны не позволяет достоверно использовать спутниковые данные среднего пространственного разрешения для изучения процессов боковой эрозии и пространственных смещений положения русла. В связи с этим, нами использован подход, основанный на учете характера русловых трансформаций на участке государственной границы (РФ и РК), проведенной по руслам рек Тобол и Уй. В качестве источника сведений о положении государственной границы России и Казахстана использованы схемы карты ГосГисЦентра масштаба 1:25000 и 1:500000. Современное положение русла и средняя скорость развития излучин фиксировались по спутниковым изображениям высокого разрешения сервиса Google Earth.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

К основным лимитирующим факторам водопользования в регионах степной зоны относится наличие гарантированного объема и надлежащего качества водных ресурсов.

Для детализированной оценки возобновляемых водных ресурсов исследуемых бассейнов необходимо иметь представление о соотношении ресурсов общего и местного стока, и в первую очередь для регионов, расположенных в среднем и нижнем течениях трансграничных рек. В частности, суммарный приток с территории Российской Федерации на территорию Республики Казахстан оценивается как сумма стока рр. Урал и Сакмара – 7,8 км³/год. Местные ресурсы речного стока нижнего участка определяются как сумма стока рек, не впадающих в р. Урал (1,1 км³/год) и притоков, сток которых формируется в пределах Республики Казахстан – Илек (1,3 км³/год), Орь (0,12 км³/год), Утва (0,14 км³/год) и др. [16]. Таким образом, регионы

нижнего течения р. Урал находятся в значительной зависимости от объемов поступления речного стока с сопредельной территории Российской Федерации. Например, в Западно-Казахстанской области доля местного стока не превышает 40 %; Атырауская область характеризуется практически полным отсутствием местного стока (менее 1 %). Для бассейна р. Тобол в пределах степной зоны характерно развитие противоположной ситуации, когда российские регионы (Курганская область) находятся в значительной зависимости от поступления ресурсов речного стока с территории Республики Казахстан.

Актуальным для оценки современного состояния ресурсов речного стока в исследуемом бассейне является сопоставление величин общего и местного

стока с объемами экологического и свободного стока. Согласно полученным данным, регионы со значительной долей транзитного стока характеризуются достаточно низкими величинами свободного стока в маловодные годы (75–95 %). Например, в Оренбургской, Западно-Казахстанской и Атырауской областях в маловодные годы (P=95 %) величина свободного стока с учетом только местных ресурсов речного стока не превышает 0,2 км³/год.

На основе расчетов величин свободного стока проведена оценка водно-экологической напряженности (водно-экологический стресс) в регионах исследуемого бассейна – соотношение забора пресной воды и свободного стока с учетом местных и общих водных ресурсов (рис. 2).

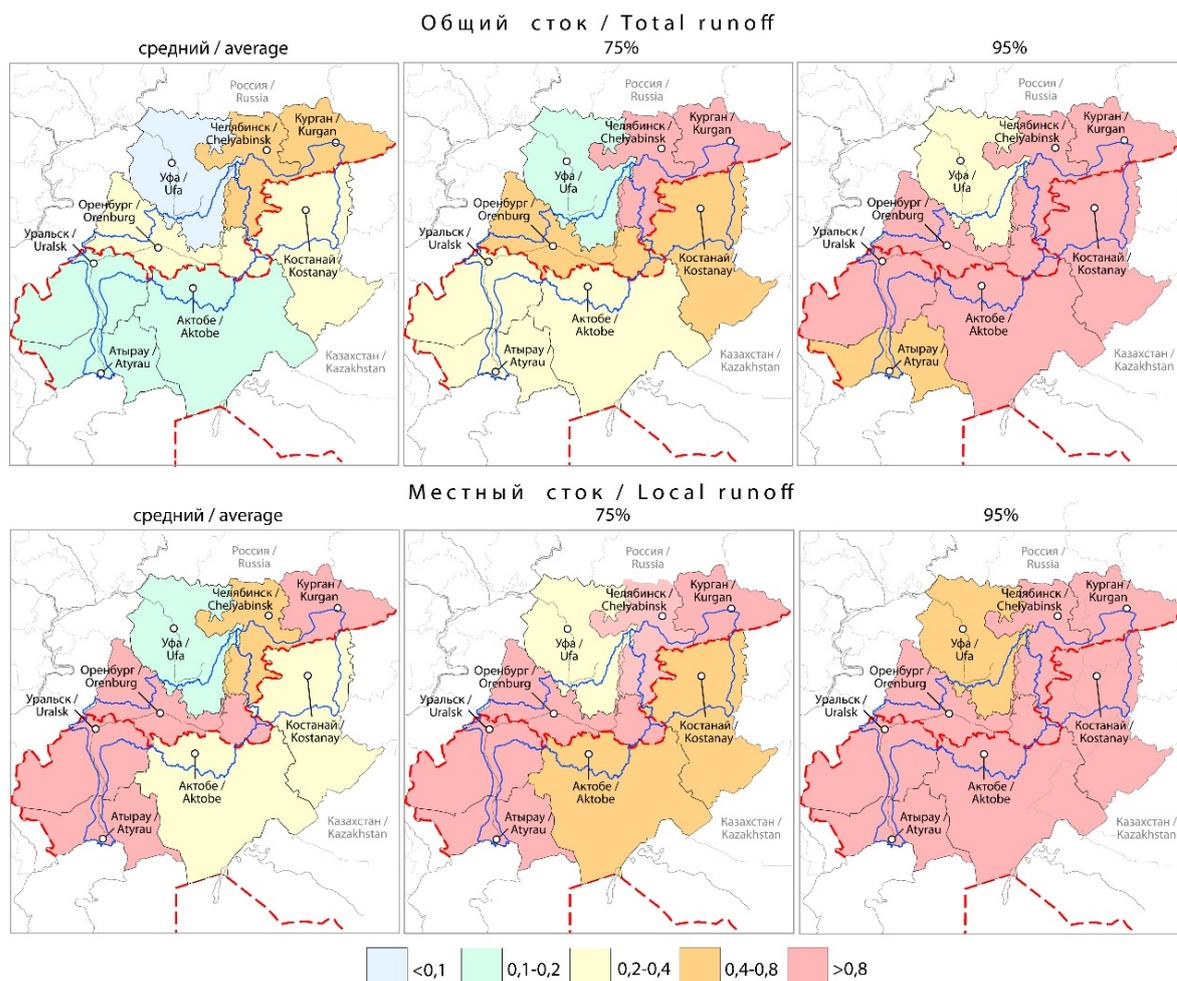


Рисунок 2. Водно-экологический стресс в регионах трансграничных бассейнов рр. Урал и Тобол
 Индекс стресса: <0,1 – незначительный; 0,1–0,2 – низкий; 0,2–0,4 – средний; 0,4–0,8 – высокий; >0,8 – очень высокий
Figure 2. Water stress within the regions of the transboundary Ural and Tobol river basins
 Stress index: <0.1 – insignificant; 0.1–0.2 – low; 0.2–0.4 – medium; 0.4–0.8 – high; >0.8 – very high

Отношение водозабора к свободному стоку (индекс стресса) изменяется в средний по водности год с учетом общих ресурсов от 7 % в Республике Башкортостан до 52 % в Челябинской области; в маловодный год 75 % обеспеченности в большинстве регионов индекс стресса превышает 30 % (в Челябинской области ресурсы свободного стока отсутствуют), а в год 95 % обеспеченности водно-экологическая напряженность наблюдается в большинстве регионов. Еще более напряженная водно-экологическая ситуация наблюдается при расчете индекса стресса с учетом ресурсов местного стока – отсутствие свободного стока для

отдельных регионов отмечается уже в средний по водности год (Оренбургская область), а в маловодные годы водно-экологический стресс характерен для всех регионов, кроме Республики Башкортостан.

Как было отмечено выше, кроме проблемы обеспечения гарантированным объемом ресурсов речного стока, для регионов трансграничных рек степной зоны актуальной задачей является обеспечение водными ресурсами нормативного качества. Примером экологических ограничений использования водных ресурсов в бассейнах рр. Урал и Тобол является трансформация качественного состава речной воды,

ухудшение которого связано с природными или антропогенными факторами [17]. Критически высокое химическое загрязнение возникает из-за сильной антропогенной нагрузки вследствие аварийных сбросов химических соединений.

Гидрохимический анализ речных вод в российской части исследуемого бассейна за период

2007–2021 гг. показывает, что качество воды главной реки и притоков не соответствуют требованиям, предъявляемым к рыбохозяйственным водоемам. Класс качества воды в пределах исследуемого бассейна варьирует в пределах от 2 до 4 класса, но может достигать и 5 класса (рис. 3).

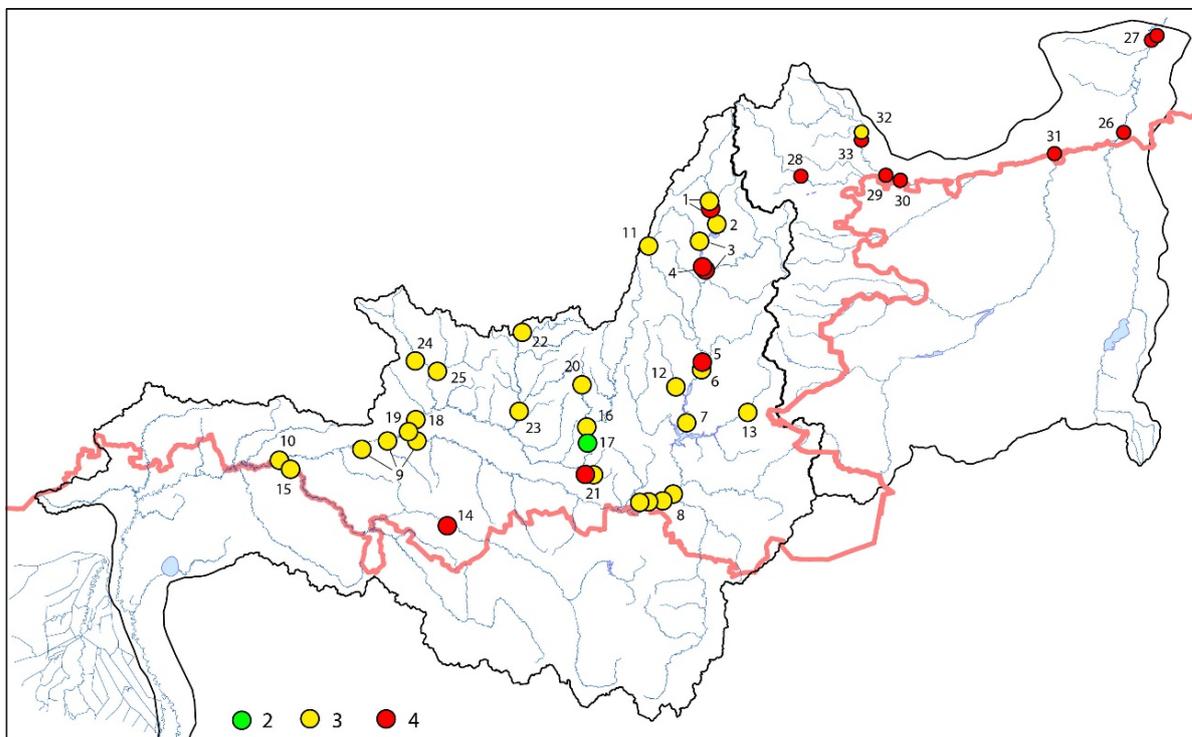


Рисунок 3. Усредненные значения класса качества воды в бассейнах рр. Урал и Тобол (в пределах Российской Федерации) за период 2007–2021 гг. [9–12]

1 – Урал – Верхнеуральск; 2 – Верхнеуральское вдхр. – Спасский; 3 – Урал – Магнитогорск; 4 – Магнитогорское вдхр.; 5 – Урал – Богдановское; 6 – Урал – Березовка; 7 – Ириклинское вдхр.; 8 – Урал – Орск; 9 – Урал – Оренбург; 10 – Урал – Илек; 11 – Бол. Кизил – Бурангулово; 12 – Бол. Уртазымка – Сосновка; 13 – Суундук – Майский; 14 – Илек – Веселый; 15 – Илек – Илек; 16 – Сакмара – Акьюлово; 17 – Сакмара – Юмагузино; 18 – Сакмара – Тат. Каргала; 19 – Сакмара – Оренбург; 20 – Зилаир – Зилаир; 21 – Блява – Медногорск; 22 – Бол. Ик – Мраково; 23 – Бол. Ик – Спасское; 24 – Салмыш – Буланово; 25 – Юшатырь – Октябрьское; 26 – Тобол – Звериноголовское; 27 – Тобол – Курган; 28 – Уй – Степное; 29 – Троицкое вдхр. – Троицк; 30 – Уй – Бобровский; 31 – Уй – Усть-Уйское; 32 – Увелька – Южноуральск; 33 – Увелька – Троицк

Figure 3. Average values of water quality class in the transboundary Ural and Tobol river basins (within the Russian Federation) for the period 2007–2021 [9–12]

1 – Ural – Verhneural'sk; 2 – Verhneural'sk res. – Spasskiy; 3 – Ural – Magnitogorsk; 4 – Magnitogorsk res. – Magnitogorsk; 5 – Ural – Bogdanovskoe; 6 – Ural – Berezovka; 7 – Iriclinskiy res.; 8 – Ural – Orsk; 9 – Ural – Orenburg; 10 – Ural – Ilek; 11 – Bol.Kizil – Burangulovo; 12 – Bol.Urtazimka – Sosnovka; 13 – Suunduk – Mayskiy; 14 – Ilek – Vesyolyi; 15 – Ilek – Ilek; 16 – Sakmara – Akyulovo; 17 – Sakmara – Yumagusino; 18 – Sakmara – Tat.Kargala; 19 – Sakmara – Orenburg; 20 – Zilair – Zilair; 21 – Blyava – Mednogorsk; 22 – Bol.Ik – Mrakovo; 23 – Bol.Ik – Spasskoe; 24 – Salmyshe – Bulanovo; 25 – Yushatyir – Oktyabrskoe; 26 – Tobol – Zverinogolovskoe; 27 – Tobol – Kurgan; 28 – Uy – Stepnoe; 29 – Troizk res. – Troizk; 30 – Uy – Bobrovskiy; 31 – Uy – Ust-Uyskoe; 32 – Uvelka – Yuzhnouralsk; 33 – Uvelka – Troizk

К основным загрязняющим веществам, оказывающим максимальное воздействие на качество воды, можно отнести медь, цинк, марганец, железо, биогенные элементы, нефтепродукты, органические вещества (по БПК₅ и ХПК). Наиболее длительно действующими источниками техногенной метаморфизации речных вод в верховье бассейна р. Урал являются отвалы вскрышных пород и шламохранилищ, образующие обширные ареалы загрязнения поверхностного и подземного стока. Вместе с тем, наличие в Южном Зауралье природных геохимических аномалий, обусловленных крупными рудными полями и их длительным промышленным освоением, обусловило формирование повышенного фонового содержания ионов меди, цинка и других сопутствующих металлов [18]. Концентрация железа достигает до 8–10 ПДК,

меди – до 6 ПДК, марганца – до 8 ПДК. Отдельной проблемой является экстремально высокое загрязнение притоков р. Урал – рр. Блява, Таналык и Худолоз. Например, содержание меди в р. Блява (ниже г. Медногорск) зачастую превышает ПДК в 80–100 раз и достигает в отдельные годы (2012–2014 гг.) значений 200–230 ПДК, а содержание цинка – 60–75 ПДК (2018–2022 гг.).

Напряженная гидроэкологическая ситуация на отдельных гидрографических участках обусловлена поступлением высокотоксичных загрязняющих веществ, в том числе относящихся к I классу опасности. В частности, острой проблемой в верхнем течении р. Илек (левый приток р.Урал) остается локализация очага загрязнения Cr (6+) и В подземных вод аллювиальных отложений в гг. Алга и Актобе

Актюбинской области. По данным ежегодника «Охрана окружающей среды и устойчивое развитие Республики Казахстан», в р. Илек кратность превышения ПДК по бору составила 15,8, а по шестивалентному хрому 4,9 в

2018 году. Согласно данным таблицы 1, высокие значения превышения ПДК по бору отмечаются преимущественно в осенний сезон с максимальными значениями превышения ПДК – 58–74 в 2009 году.

Таблица 1. Сезонная динамика превышения ПДК бора (В) в створах р. Илек в пределах Республики Казахстан (по данным: [19])

Table 1. Seasonal dynamics of exceeding the MAC of boron (B) in the sections of the Ilek River within the Republic of Kazakhstan (according to: [19])

Годы Years	Алга Alga			Георгиевка Georgievka			Целинный Tselinny		
	Апрель April	Июль July	Октябрь October	Апрель April	Июль July	Октябрь October	Апрель April	Июль July	Октябрь October
2009	21,2	32,9	74,1	17,1	11,2	57,6	10,6	12,9	72,9
2011	13,2	13,0	40,5	14,1	11,3	14,2	11,2	19,5	12,7
2012	35,9	20,6	27,1	81,8	10,0	22,2	-	10,6	-
2013	10,6	14,7	33,5	11,2	11,2	-	-	-	-
2014	-	14,7	18,8	12,9	-	10,6	-	-	-
2015	11,2	12,9	16,8	17,1	13,5	-	11,2	15,9	-
2016	10,3	-	48,9	10,6	-	10,3	13,2	-	28,2
2017	12,7	24,1	-	18,6	-	-	12,1	-	-
2018	22,3	40,2	54,2	15,5	-	-	15,8	-	-

Проблема загрязнения р. Илек усугубляется трансграничным переносом высокотоксичных элементов на территорию Российской Федерации. По данным Оренбургской специализированной инспекции государственного экологического мониторинга и анализа в течение 2008–2020 гг. максимальные превышения хрома во входном створе п. Веселый в среднем составляли 2,4 ПДК – с минимумом 1,1 ПДК в 2019 г. и максимумом 3,3 ПДК в 2008 г. Концентрация данного загрязняющего вещества в створе п. Веселый, увеличивается в осенний период и достигает максимума в зимний период. Также отметим, что формированию геохимических аномалий хрома способствуют и природные факторы, поскольку хром является элементом, характерным для водоносных горизонтов мелового возраста (долина р. Илек). Таким образом, наряду с техногенным загрязнением присутствуют и естественные аномалии по хрому.

Неоднозначная гидроэкологическая ситуация наблюдается в бассейне р. Тобол, где вклад в загрязнения речных вод также вносят как природный, так и антропогенный факторы. Воды бассейна р. Тобол в пределах степной зоны отнесены преимущественно к 4-му классу (рис. 3). В створах р. Тобол выявлены регулярные превышения ПДК по таким показателям как органические вещества (ХПК и БПК₅), азот нитрит., железо общ., медь, цинк, сульфаты, нефтепродукты. Критическим показателем загрязненности как в казахстанской, так и в российской части бассейна является марганец. Причиной высокого содержания марганца в поверхностных водах региона является природный фактор – в меженные периоды основным питанием рек являются подземные воды, богатые содержанием данного соединения. Сильно загрязненными являются реки Уй и Увелька, воды которых характеризуются как «очень загрязненные» или «грязные». К примеру, качественный состав воды р. Уй формируется под влиянием поверхностного стока и правобережного притока – р. Кидыш – водоприемника сточных вод ОАО «Учалинский ГОК». В створе с. Степное наблюдается значительное превышение по марганцу (35–40 ПДК), цинку (до 8 и даже 12 ПДК (в 2015 г.)), меди (до 5–6 ПДК) и пр.

Из гидроэкологических ограничений, определяемых негативным воздействием речных вод в первую очередь необходимо отметить риски для населения и хозяйства, обусловленных прохождением высоких волн весеннего половодья или дождевых паводков. В бассейне р. Урал около 200 населённых пунктов, в том числе 7 городов (Верхнеуральск, Магнитогорск, Орск, Оренбург, Актобе, Уральск и Атырау) расположены в зоне подтопления (рис. 4). Общая ориентировочная численность населения, проживающая в пределах данной зоны, составляет свыше 300 тыс. человек. Из российских регионов максимальная численность населения в зоне затопления отмечается для Оренбургской (14,8 тыс. чел.) и Челябинской областей (16,3 тыс. чел.). В нижнем течении р. Урал, особую опасность представляют сооружения и гидроузлы водохранилищ Урало-Кушумской оросительно-обводнительной системы. В случае развития аварийной ситуации в зону затопления попадут 34 населенных пункта с населением 30 тыс. человек в пределах Западно-Казахстанской области.

В бассейне р. Тобол более 100 населённых пунктов находятся в зоне затопления и подтопления. В отличие от бассейна р. Урал здесь чаще отмечаются подтопления, связанные с подъёмом грунтовых вод, повышением уровня многочисленных бессточных озёр и котловин, особенно в Костанайской области. Отмечены случаи затопления прибрежной части населённых пунктов Троицким и Южно-Уральским водохранилищами.

Важно отметить, что статистика по подтоплениям не указывает, с какого направления наблюдался приток воды. Довольно часто их причина связана не с поднятием уровня близлежащей реки или озера, а с притоком талых вод в условиях активного нарастания температур в период снеготаяния. Особенно это характерно для бассейна р. Тобол в пределах степной зоны ввиду неразвитости эрозивно-речной сети. Таким образом, подтопления часто лишь косвенно относятся к гидрологическим явлениям, а по сути – суммарный результат сочетания ряда метеорологических явлений.

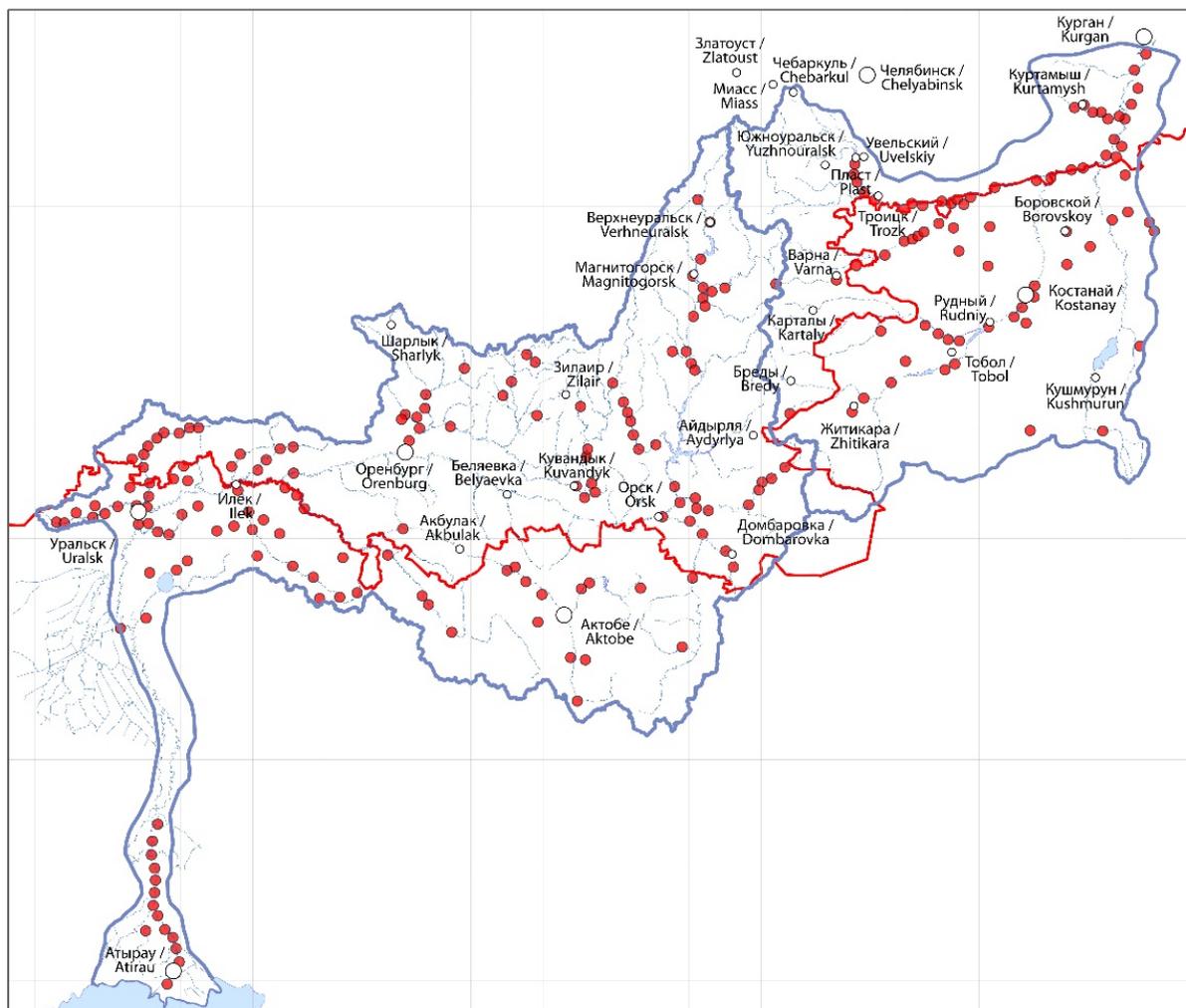


Рисунок 4. Риск затопления (подтопления) населённых пунктов в бассейнах рек Урал и Tobol:
 1 – населённые пункты подверженные угрозе затопления (подтопления); 2 – государственная граница;
 3 – бассейн р. Tobol; 4 – бассейн р. Урал

Figure 4. Risk of flooding of settlements in the Ural and Tobol river basins:
 1 – settlements at risk of flooding; 2 – state border; 3 – Tobol River basin; 4 – Ural River basin

Еще одним примером гидроэкологических ограничений, связанных с негативным воздействием вод являются горизонтальные русловые деформации (размыв, смещение в пространстве и др.). Русловые преобразования в пределах речных долин являются одним из наиболее динамичных и повсеместно развитых экзогенных процессов. Интенсивность и направленность данных процессов закономерно изменяются во времени и тесно связаны с изменениями ряда факторов [20]. Интенсивность русловых преобразований обусловлена саморазвитием речных систем, а также воздействием изменяющихся климатических и гидрологических условий, антропогенных факторов. Наиболее интенсивные русловые деформации зафиксированы в бассейне р. Урал – р. Урал (Пехотное, Донское, Благодословенка, Илек, Жарсуат, Облавка), р. Сакмара (Рамазаново, Желтое), р. Большой Юшатырь (Биккулово) и др.

В пределах бассейна р. Tobol ключевой участок исследования русловых трансформаций имеет совокупную протяженность 314,7 км (рис. 5). Для рек выбранного участка характерна достаточно высокий коэффициент извилистости русла – 1,72. Ширина поймы

р. Уй, в пределах которой и отмечается большинство эрозийных и русловых трансформаций, находится в пределах 1,0–1,5 км, достигая максимума в низовьях, до 2,5 км. Долина р. Tobol более развита, в местах расширения достигает 7,5 км.

В итоге, результаты проведенных исследований русловых трансформаций в бассейне р. Tobol позволяют сделать следующие выводы:

- характер положения русла представляет собой чередование свободно-меандрирующих и адаптированных типов русла, при этом русло реки, в большей части течения прижато к правому борту долины, соответственно и подавляющее количество смещений его положения было направлено к этому же борту;
- основными типами русловых трансформаций является перенаправление русла реки в староречья и срезание основания меандр, сопровождающееся спрямлением русла;
- некоторые из участков развития меандр представляют собой значимую угрозу для целостности важных инфраструктурных объектов и требуют проведения работ по берегоукреплению, либо переносу объектов.

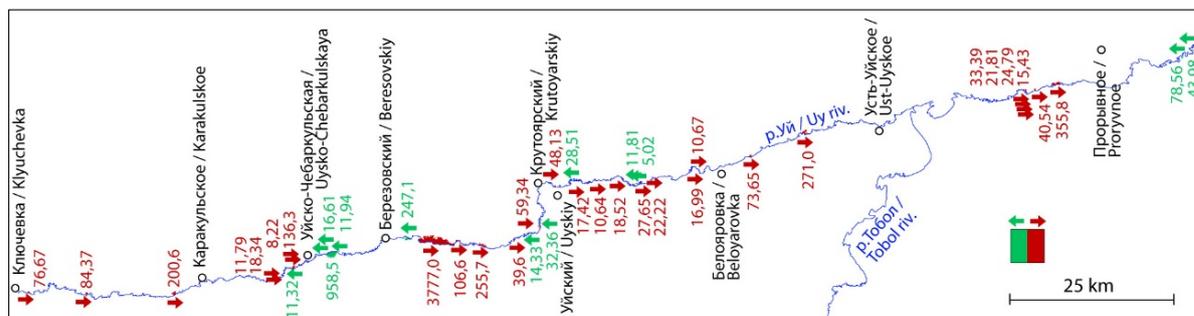


Рисунок 5. Распределение русловых трансформаций в бассейне р. Тобол (направления и площадь смещений, м²)
Figure 5. Distribution of riverbed transformations in the basin of the Tobol River (directions and displacement area, m²)

ВЫВОДЫ

В заключении необходимо отметить следующее:

1. Развитие напряженной водно-экологической ситуации в бассейнах рр. Урал и Тобол (в пределах степной зоны) обусловлено пространственно-временной изменчивостью ресурсов речного стока, формирование которых происходит в условиях недостаточного увлажнения и интенсивного антропогенного воздействия. Обращает внимание, что для отдельных регионов ситуация усугубляется в связи со значительной зависимостью от поступления транзитного стока с сопредельных территорий и государств. Необходимо учесть, что в современных условиях климатической неопределенности скорость возобновления ресурсов речного стока может снижаться, а экстремальность проявления гидрологических рисков увеличиваться.
2. Экологические ограничения водопользования, связанные с недостаточным объемом водных ресурсов нормативного качества, обусловлены в первую очередь значительной антропогенной нагрузкой на водные объекты трансграничных рр. Урал и Тобол. Основными загрязняющими веществами являются соединения тяжелых металлов (медь, цинк, марганец), поступающие в реку с импактных территорий техногенных ландшафтов (отработанные карьеры, шламохранилища и др.). Вместе с тем, источником высокого содержания отдельных элементов (например, марганец) в поверхностных водах исследуемой территории могут быть природные экосистемы степной зоны. Напряженная гидроэкологическая ситуация на отдельных гидрографических участках исследуемых бассейнов обусловлена трансграничным переносом загрязняющих веществ с территорий сопредельных государств, что в свою очередь подразумевает разработку межгосударственной системы гидрохимического мониторинга трансграничных водных объектов.
3. Риски затопления (подтопления) населенных пунктов, в первую очередь связаны со стихийным освоением долинно-приречных пространств бассейнов рр. Урал и Тобол, осуществляемое без учета современной и перспективной эколого-гидрологической обстановки. В большинстве случаев подобные гидрологические ситуации, обусловлены элементарным несоблюдением гидрологических условий местности при формировании территориальной структуры расселения. В последние десятилетия на фоне длительных маловодных периодов решение о застройке долинно-приречных пространств принимаются в пределах урбанизированных территорий без учета возможных высоких уровней половодья.

4. Максимальное развитие русловых трансформаций отмечается в трансграничном бассейне р. Урал. Наиболее распространены трансформации связанные с циклами развития меандр, в ходе которых наблюдаются смещения русла под действием боковой эрозии (особенно в вершинах излучин) и спрямления русла в результате разрушения основания излучины. Некоторые из участков развития меандр представляют собой серьезную угрозу для целостности важных инфраструктурных объектов и требуют подготовки инженерных решений о вариантах берегоукрепления, либо о переносе объектов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 22-27-00239.

ACKNOWLEDGMENT

The study was supported by the Russian Science Foundation No. 22-27-00239.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фролова Н.Л., Воробьевский И.Б. Гидроэкологические ограничения водопользования в бассейне Иртыша // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2011. N 6. С. 34–42.
2. Фролова Н.Л. Гидрологические ограничения природопользования // Географо-гидрологические исследования. Вопросы географии. 2012. N 133. С. 456–478.
3. Алексеевский Н.И., Анисимова Л.А., Фролова Н.Л. Современные и ожидаемые ограничения природопользования // Природообустройство. 2009. N 1. С. 50–57.
4. Сивохиц Ж.Т. Устойчивое водопользование как фактор гидроэкологической безопасности в трансграничном бассейне р. Урал // Вестник Оренбургского государственного университета. 2016. Т. 195. N 7. С. 78–84.
5. Зоны и типы растительности России и сопредельных территорий. Карта масштаба 1:8000000 / отв. ред. Огуреева Г.Н.; Геогр. факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Бот. Ин-т им. В.Л. Комарова. М., 1999.
6. Водные ресурсы и водное хозяйство России в 2017 году: стат. сборник / под ред. Рыбальского Н.Г., Омеляненко В.А., Думнова А.Д. М.: НИА-Природа, 2018. 230 с.
7. Охрана окружающей среды и устойчивое развитие Казахстана в 2013–2017 гг.: стат. сборник / под ред. Н.С. Айдапкелова. Астана, 2018. 123 с.

8. Маркин В.Н. Определение экологически допустимого воздействия на малые реки // Мелиорация и водное хозяйство. 2005. N 4. С. 8–11.
9. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Оренбургской области». Оренбург: Правительство Оренбургской области. 2007–2021.
10. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Курганской области». Курган: Правительство Оренбургской области. 2007–2021.
11. Государственный доклад «О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан». Уфа: Министерство природопользования и экологии Республики Башкортостан. 2007–2021 гг.
12. Доклад «Об экологической ситуации в Челябинской области». Челябинск: Министерство экологии Челябинской области. 2007–2021.
13. МЧС России. Главное управление по Курганской области. URL: <https://45.mchs.gov.ru/> (дата обращения: 25.01.2023)
14. Наводнения в России: оперативные данные МЧС о затоплениях за 2013–2020. Набор данных. URL: <https://www.data-in.ru/> (дата обращения: 15.04.2022)
15. Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан. URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/emer> (дата обращения: 25.01.2023)
16. Давлетгалиев С.К. Оценка водных ресурсов Жайык-Каспийского бассейна по водохозяйственным участкам // Гидрометеорология и экология. 2011. N 1. С. 56–65.
17. Козлова М.А, Сивохип Ж.Т. Оценка динамики качества воды трансграничного бассейна р. Урал // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. N 6. С. 107–119. https://doi.org/10.35567/19994508_2022_6_7
18. Павлейчик В.М., Сивохип Ж.Т. Эколого-гидрологическая ситуация в бассейне р. Таналык в условиях техногенной трансформации природной среды в Южном Зауралье // Известия Самарского научного центра. 2013. T. 15. N 3(3). С. 945–948.
19. Ежемесячный информационный бюллетень о состоянии окружающей среды / Казгидромет. URL: <https://www.kazhydromet.kz/ru/ecology/ezhemesyachnyy-informacionnyy-byulleten-o-sostoyanii-okruzhayuschey-sredy> (дата обращения: 25.01.2023)
20. Павлейчик В.М., Сивохип Ж.Т., Падалко Ю.А. Динамика русловых процессов в среднем течении реки Урал и риски природопользования // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2018. N 5. С. 36–44. <https://doi.org/10.1134/S2587556618050126>
21. Priodoobustroistvo [Nature management]. 2009, no. 1, pp. 50–57. (In Russian)
22. Sivohip Zh.T. Sustainable water use as a factor of hydroecological safety in the transboundary basin of the Ural river. Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Orenburg State University]. 2016, vol. 195, no. 7, pp. 78–84. (In Russian)
23. Ogureeva G.N., ed. *Zony i tipy rastitel'nosti Rossii i sopredel'nykh territorii. Karta masshtaba 1:8000000* [Zones and types of vegetation in Russia and adjacent territories. Map scale 1:8000000]. Moscow, Geographical Faculty of Lomonosov Moscow State University, St. Petersburg: V.L. Komarov Botanical Institute Publ., 1999. (In Russian)
24. Rybalsky N.G., Omelianenko V.A., Dumnova A.D., eds. *Vodnye resursy i vodnoe khozyaistvo Rossii v 2017 godu: stat. sbornik* [Water resources and water management of Russia in 2017: statistical collection]. Moscow, NIA-Nature Publ., 2018, 230 p. (In Russian)
25. Aidapkelov N.S., ed. *Okhrana okruzhayushchei sredy i ustoichivoe razvitie Kazakhstana v 2013–2017 gg.: stat. sbornik* [Environmental protection and sustainable development of Kazakhstan in 2013–2017: statistical collection]. Astana, 2018, 123 p. (In Russian)
26. Markin V.N. Determination of the environmentally acceptable impact on small rivers. Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo [Melioration and water management]. 2005, no. 4, pp. 8–11. (In Russian)
27. Gosudarstvennyi doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Orenburgskoi oblasti» [State Report «On the state and environmental protection of the Orenburg Region»]. Orenburg, Government of the Orenburg region, 2007–2021. (In Russian)
28. Gosudarstvennyi doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Kurganskoi oblasti» [State Report «On the state and environmental protection of the Kurgan region»]. Kurgan, Government of the Orenburg region, 2007–2021. (In Russian)
29. Gosudarstvennyi doklad «O sostoyanii prirodnkh resursov i okruzhayushchei sredy Respubliki Bashkortostan» [State report «On the state of natural resources and the environment of the Republic of Bashkortostan»]. Ufa, Ministry of Nature Management and Ecology of the Republic of Bashkortostan, 2007–2021. (In Russian)
30. Doklad «Ob ekologicheskoi situatsii v Chelyabinskoi oblasti» [Report «On the environmental situation in the Chelyabinsk region»]. Chelyabinsk, Ministry of Ecology of the Chelyabinsk region, 2007–2021. (In Russian)
31. MChS Rossii. Glavnoe upravlenie po Kurganskoi oblasti [Ministry of Emergency Situations of Russia. The Main Directorate for the Kurgan region]. Available at: <https://45.mchs.gov.ru/> (accessed 25.01.2023)
32. Navodneniya v Rossii: operativnye dannye MChS o zatopleniyakh za 2013–2020. Nabor dannykh [Floods in Russia: operational data of the Ministry of Emergency Situations on flooding for 2013–2020. A data set]. Available at: <https://www.data-in.ru/> (accessed 04.15.2022)
33. Ministerstvo po chrezvychainym situatsiyam Respubliki Kazakhstan [Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan]. Available at: <https://www.gov.kz/memleket/entities/emer> (accessed 01.25.2023)
34. Davletgaliev S.K. Assessment of water resources of the Zhaiyk-Caspian basin by water management sites. Gidrometeorologiya i ekologiya [Hydrometeorology and Ecology]. 2011, no. 1, pp. 56–65. (In Russian)

REFERENCES

1. Frolova N.L., Vorob'evskii I.B. Hydroecological restrictions of water use in the Irtysh basin. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya [Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography]. 2011, no. 6, pp. 34–42. (In Russian)
2. Frolova N.L. Hydrological restrictions of nature management. Geografo-gidrologicheskie issledovaniya. Voprosy geografii [Geographic and hydrological research. Questions of geography]. 2012, no. 133, pp. 456–478. (In Russian)
3. Alekseevskii N.I., Anisimova L.A., Frolova N.L. Modern and expected limitations of nature management.

17. Kozlova M.A., Sivokhip Zh.T. Assessment of water quality dynamics in the transboundary basin of the Ural River. *Water economy of Russia: problems, technologies, management*, 2022, no. 6, pp. 107–119. (In Russian) https://doi.org/10.35567/19994508_2022_6_7

18. Pavleichik V.M., Sivokhip Zh.T. Ecological and hydrological situation in the basin of the Tanalyk river in the conditions of technogenic transformation of the natural environment in the Southern Trans-Urals. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra* [News of the Samara Scientific Center]. 2013, vol. 15, no. 3(3), pp. 945–948. (In Russian)

19. *Ezhemesyachnyi informatsionnyi byulleten' o sostoyanii okruzhayushchei sredy* [Monthly newsletter on the state of the environment]. Kazhydromet. Available at: <https://www.kazhydromet.kz/ru/ecology/ezhemesyachnyy-informacionnyy-byulleten-o-sostoyanii-okruzhayushchey-sredy> (accessed 25.01.2023)

20. Pavleichik V.M., Sivokhip Zh.T., Padalko Yu.A. Dynamics of riverbed evolution in the middle Ural River and natural management risks. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*, 2018, no. 5, pp. 36–44. (In Russian) <https://doi.org/10.1134/S2587556618050126>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Жанна Т. Сивохип написала введение, заключение и проведен расчет водно-экологического стресса. Владимир М. Павлейчик проанализировал основные русловые трансформации в бассейнах рр. Урал и Тобол и подготовил картографический материал к статье. Александр А. Чибилёв осуществлял общее руководство подготовки статьи. Юрий А. Падалко проанализировал данные о подверженности риска затопления населенных пунктов в бассейнах рр. Урал и Тобол. Мария А. Козлова проанализировала данные о качественном составе речных вод в исследуемых бассейнах. Ольгой Б. Поповой подготовлена характеристика загрязнения р. Илек хром (6+) и бором. 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.

AUTHORS CONTRIBUTION

Zhanna T. Sivokhip wrote the introduction, conclusion and calculation of water and environmental stress. Vladimir M. Pavleichik analysed the main riverbed transformations in the basins of the Ural and Tobol rivers of the Russian Federation and prepared the cartographic material for the article. Alexander A. Chibilev provided general guidance in the preparation of the article. Yuri A. Padalko analysed data on the exposure to the risk of flooding of settlements in the Ural and Tobol river basins of the Russian Federation. Maria A. Kozlova analysed data on the qualitative composition of river waters in the basins studied. Olga B. Popova prepared the description of chrome (6+) and boron pollution of the Ilek River. 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

Жанна Т. Сивохип / Zhanna T. Sivokhip <https://orcid.org/0000-0001-5704-0554>

Владимир М. Павлейчик / Vladimir M. Pavleichik <https://orcid.org/0000-0002-2846-0442>

Александр А. Чибилёв / Alexander A. Chibilev <https://orcid.org/0000-0002-6214-1437>

Юрий А. Падалко / Yuri A. Padalko <https://orcid.org/0000-0003-1149-7887>

Мария А. Козлова / Maria A. Kozlova <https://orcid.org/0000-0002-7860-4643>

Ольга Б. Попова / Olga B. Popova <https://orcid.org/0009-0009-3839-6577>

Оригинальная статья / Original article

УДК: 911.6 + 528.942

DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-16



Гексагональная геопространственная модель ландшафтного разнообразия северного подрайона дельты реки Волга

Виктор В. Занозин¹, Александр Н. Бармин¹, Валерий В. Занозин¹, Станислав А. Ямашкин²,
Виктория А. Корень¹, Елена В. Занозина¹

¹Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева, Астрахань, Россия

²Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия

Контактное лицо

Занозин Виктор Валерьевич, кандидат географических наук, доцент; кафедра экологии, природопользования, землеустройства и безопасности жизнедеятельности; ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева», 414056, Южный федеральный округ, Астраханская область, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а.
Тел. +79885916078
Email victor_z94@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1854-516X>

Формат цитирования

Занозин В.В., Бармин А.Н., Занозин В.В., Ямашкин С.А., Корень В.А., Занозина Е.В. Гексагональная геопространственная модель ландшафтного разнообразия северного подрайона дельты реки Волга // Юг России: экология, развитие. 2024. Т.19, N 2. С. 181-196. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-16

Получена 17 февраля 2024 г.

Прошла рецензирование 14 апреля 2024 г.

Принята 26 апреля 2024 г.

Резюме

Цель: проанализировать ландшафтное разнообразие (ЛР) северного подрайона дельты реки Волга с помощью ряда математических операций.

Работа основана на камеральных и полевых ландшафтных исследований. В работе использовались такие методы как описательный, геоинформационный, анализ данных дистанционного зондирования Земли.

Для северного подрайона ландшафта дельты Волги на основе математического аппарата был рассчитан набор индексов ландшафтного разнообразия, а также была оценена энтропийная сложность ландшафтного рисунка (или индекс разнообразия Шеннона) исследуемого региона. Результаты анализа позволили выявить на данной территории два ареала с достаточно высокими показателями ландшафтного разнообразия.

ЛР является одной из важнейших физико-географических характеристик территории, позволяет оценить устойчивость геосистем к антропогенным нагрузкам, отразить характер хозяйственного освоения и использования геосистем, их природоохранный потенциал. Сопоставление показателей ЛР и ретроспективного анализа хозяйственного освоения дельты Волги показало, что территории с низким показателем ландшафтного разнообразия чаще использовались в сельском хозяйстве, так как одно большое урочище легче адаптировать под хозяйственные нужды. Участки со сложной морфологической структурой, и, соответственно, высоким уровнем ландшафтного разнообразия, сильному антропогенному влиянию не подвержены.

Ключевые слова

дельта Волги, ландшафтное разнообразие, геосистема, урочище, гексагон, ландшафтный выдел, ландшафтный контур, ландшафтный рисунок, разнообразие.

Hexagonal geospatial model of landscape diversity in the northern sub-area of the Volga River Delta landscape, Russia

Victor V. Zanozin¹, Alexander N. Barmin¹, Valery V. Zanozin¹, Stanislav A. Yamashkin², Viktoriya A. Koren¹ and Elena V. Zanozina¹

¹Tatishchev Astrakhan State University, Astrakhan, Russia

²Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Principal contact

Zanozin Victor Valerievich, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Chair of Ecology, Nature Management, Land Management and Life Safety, Tatishchev Astrakhan State University; 20a Tatishchev St, Astrakhan, Astrakhan Region, Russia 414056.
Tel. +79885916078
Email victor_z94@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1854-516X>

How to cite this article

Zanozin V.V., Barmin A.N., Zanozin V.V., Yamashkin S.A., Koren V.A., Zanozina E.V. Hexagonal geospatial model of landscape diversity in the northern sub-area of the Volga River Delta landscape, Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2024; 19(2):181-196. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-16

Received 17 February 2024

Revised 14 April 2024

Accepted 26 April 2024

Abstract

The aim is to analyse the landscape diversity (LD) of the northern sub-area of the Volga River delta landscape using a series of mathematical operations.

The work is based on full-stack landscape works including field experiments. Descriptive method, GIS-analysis and remote sensing data were used in the work.

A set of landscape diversity indices was calculated for the northern sub-area of the Volga Delta landscape on the basis of mathematical apparatus and the entropic complexity of landscape pattern (or Shannon diversity index) of the studied region was estimated. The results of the analysis made it possible to identify two habitats with rather high landscape diversity indices in this region

LD is one of the most important geographical characteristics of the region and allows assessment of the stability of geosystems to anthropogenic loads, reflection on the nature of economic development and use of geosystems and their conservation potential. By comparing HR indicators and retrospective analysis of economic development of the Volga River Delta, it was found that areas with low landscape diversity index were more often used for agriculture, as single large tracts are easier to adapt to economic needs. Areas with a complex morphological structure and, accordingly, a high level of landscape diversity are generally not subject to most types of economic impact.

Key Words

Volga River Delta, landscape diversity, geosystem, landscape unit, hexagon, landscape allotment, landscape contour, landscape pattern, diversity.

ВВЕДЕНИЕ

Сохранение как биологического, так и ландшафтного разнообразия имеет в настоящее время важное теоретическое и прикладное значение в области устойчивого развития регионов. Высокие показатели разнообразия помогают стабилизировать экологическую ситуацию, уменьшить влияние негативного антропогенного воздействия на геосистемы.

Формирование ландшафтно-экологического каркаса является актуальной задачей в связи с принятием Стратегии развития сети ООПТ в России до 2030 года. Территории, обладающие высокими показателями ландшафтного разнообразия, признаны стать ядерными объектами экологического каркаса. Такие территории должны сконцентрировать в себе все природные эталоны физико-географических провинций [1].

Ландшафтная структура территории имеет большое значение, так как определяет ландшафтное разнообразие и влияет на устойчивость гео- и экосистем. Эти факторы сильно влияют на многие экологические процессы и являются важными для сохранения природной среды [2; 3].

Актуальность анализа ландшафтного разнообразия подтверждается и в последних теоретических ландшафтных исследованиях [4]. Оценка ландшафтного разнообразия (далее – ЛР) является неотъемлемой частью изучения экологических проблем и составления планов устойчивого развития регионов [5].

В последнее время, несмотря на широкий спектр исследований, посвящённых как пространственно-временной организации геосистем для реализации стратегии устойчивого развития, так и по анализу ландшафтного разнообразия [6–8], само “ландшафтное разнообразие” (landscape diversity) как термин, по утверждениям исследователей [9; 10], не имеет чёткого общепринятого определения.

Анализируя работы зарубежных исследователей, исследователей советского и постсоветского пространства, можно проследить несколько подходов к определению разнообразия (в том числе и ландшафтного).

Согласно [11] существует три типа разнообразия: георазнообразие, биоразнообразие и разнообразие человеческой деятельности. Георазнообразие – это разнообразие абиотических систем, таких как рельеф или тип почвы. Согласно [12] георазнообразие выражается пятью различными показателями: геоморфологией, почвой, гидрологией, литологией и наличием минералов/полезных ископаемых. Оценка георазнообразия же зависит от цели анализа, типа ландшафта на исследуемой территории и его пространственном измерении, и, прежде всего, наличия пространственных данных в соответствующем масштабе, в том числе и в цифровой форме [13].

Ряд авторов выделяют прямые и косвенные методы анализа георазнообразия [14]. Прямые методы предполагают проведение полевых работ для расчёта ценности георазнообразия для конкретных компонентов природной среды, таких как почвы, горные породы, типы рельефа и т.д. При использовании косвенных методов производят расчёты по растровым или векторным данным в среде ГИС. Преимуществом использования косвенных методов

является экономия времени и средств за счёт сокращения полевых работ до минимума.

Особый подход для описания ландшафтного разнообразия, отмечаемый у западных исследователей, связан с представлением о трёх фундаментальных типах элементов для описания ландшафтной структуры: *patches* – патчи, *corridors* – коридоры и *matrix* – матрицы [15], когда исследователи для оценки разнообразия опираются на анализ дешифрирования данных дистанционного зондирования и применяют метрики ландшафтной экологии [16]. Понятие разнообразия и его оценка является одной из ключевых концепций экологии вообще и ландшафтной экологии в частности.

Другой подход заключается в том, что в понятие биоразнообразия уже включено определение ландшафтного разнообразия. Ландшафт здесь – симбиоз элементов, таких как виды растений, животные, типы использования земель. Разнообразие ландшафтов представляется здесь как их – ландшафтов – число в изучаемой географической области [17].

У других авторов видим несколько показателей для оценки морфологической структуры ландшафтов: сложность, как проявление количества морфологических единиц в ландшафте; разнообразие, как проявление количества различных одноранговых геосистем в пределах одного ландшафта; дробность, как проявление количества обособленных геосистем в пределах ландшафта и характер рисунка – характер распределения более дробных геосистем в пространстве [18].

В свою очередь, ландшафтный рисунок – “пространственная мозаика, которую образуют на земной поверхности участки, соответствующие развитым на этой территории природным территориальным комплексам или микрообразованиям комплексного характера” [19].

Одно из первых официальных определений ландшафтного разнообразия даётся в Пан-европейской стратегии сохранения биологического и ландшафтного разнообразия от 25 октября 1995 г.: «Ландшафтное разнообразие – это внешняя форма выражения многочисленных взаимоотношений, существующих в определённый период между индивидуумами или социумом и топографически обозначенной территорией, появление (состояние) которой через какое-то время является результатом действия природного и человеческого факторов и их комбинаций» [20].

ЛР может стать сложным интегральным показателем в оценке иерархической организации ландшафтной структуры [21; 22]. В аналитической работе [10] выделяется четыре значения ЛР: структурно-функциональное или системное, геокомпонентное, геоэволюционное и социально-экономическое. Такой подход к пониманию ЛР затрагивает как структуру, иерархичность и функционирование ландшафта, эволюционные процессы в природе, так и особенности отношения человека к окружающей среде.

Вышеизложенное подтверждает актуальность проведения анализа ландшафтного разнообразия в современных исследованиях в сфере природопользования и охраны окружающей среды. В свете различных тенденций освоения ресурсного потенциала ландшафтов, их сохранения и защиты от

антропогенного воздействия, становится необходимым разработать специальный набор региональных экологических критериев для устойчивого развития. В этой связи, важным компонентом таких критериев является сохранение ЛР [23].

Итого выделяется два основных подхода к изучению ЛР. При первом варианте в работе используются преимущественно данные дистанционного зондирования Земли, когда на основе отражательных свойств ландшафта при анализе ЛР учитываются «размеры, форма и связанность различных экосистем на протяжении большой территории» [17]. При втором подходе ЛР анализируется как количественно (ведётся учёт каждой геосистемы с использованием математического аппарата и статистики), так и качественно, когда оперируют геосистемами разного иерархического уровня (фация, подурочище, урочище) или видами ландшафтов в пределах рода или ландшафтного района. В первом случае говорят о морфологическом аспекте, при втором – таксономическом. Также ЛР рассматривают в рамках элементов геометрической сетки (территориальный аспект) [24].

В рамках настоящего исследования ландшафтное разнообразие рассчитано через ряд математических операций, позволяющих оценить разнообразие природных территориальных комплексов (геосистем) уровня урочищ, слагающих пространственную структуру комплекса более высокого ранга – подрайона ландшафта дельты Волги, что представляет своего рода симбиоз морфологического и территориального аспектов. В ходе естественного развития, в дельте Волги сформировался неповторимый ландшафт со специфическим набором локальных геосистем, которые и создают ландшафтное разнообразие дельте Волги. В данной работе представлены результаты впервые выполненного анализа ландшафтного разнообразия северного подрайона ландшафта дельты Волги.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка ЛР проводилась на территорию северного подрайона ландшафта дельты реки Волга. Работа по анализу границ дельты Волги продолжает ранее проводимые исследования [25], и в настоящей работе северный подрайон ландшафта дельты реки Волга имеет следующие границы (рисунок 1а).

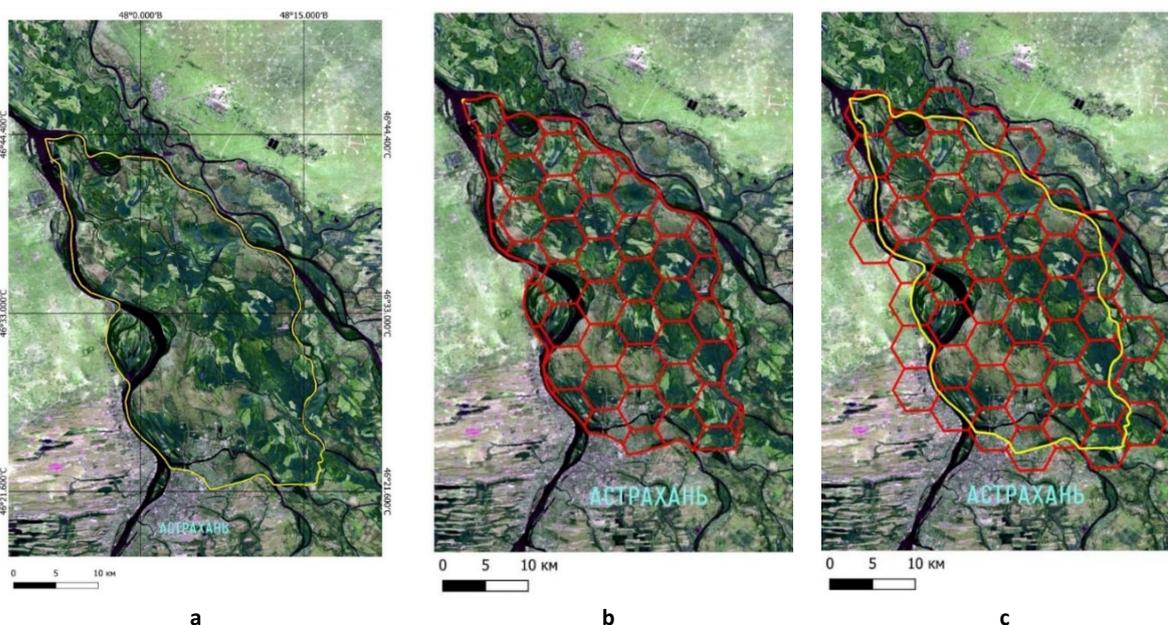


Рисунок 1. Снимок аппарата Sentinel 2A от 15.07.2022. *a – территория северного подрайона ландшафта дельты реки Волга. Покрытие территории исследования сеткой операционной территориальной единицы: b – дробным гексагоном, c – полноразмерным гексагоном. Граница северного подрайона указана жёлтой линией*
Figure 1. Sentinel 2A image from 15.07.2022. *a – Territory of the northern sub-area of the Volga River Delta landscape. Coverage of the study area by the grid of the hexagon-operational-territorial-unit (b – fractional hexagon, c – full-size hexagon). The boundary of the northern area is indicated within the yellow line*

Северный подрайон ландшафта дельты Волги начинается с приверха речного острова к юго-востоку от н.п. Верхнелебяжье, где по северо-восточной границе района, огибая о. Большой Осередок, от Волги отделяется рукав Бузан. Далее граница района идёт по правому берегу Бузана, параллельно Ахтубе. В районе острова Чистый Яр начинается восточная часть границы северного подрайона дельты по р. Шмагина до её впадения в р. Белый Ильмень. У села Раздор, где р. Быстрая впадает в Белый Ильмень, начинается юго-восточная граница северного подрайона, которая проходит по рукавам Быстрая и Бушма. Южная граница подрайона проходит по левобережью рукава Прямая

Болда. Началом западного рубежа можно считать место отделения от русла Волги рукава Кривая Болда. Здесь западная граница северного подрайона поднимается вверх по течению Волги, вдоль левого берега до приверха речного острова к юго-востоку от н.п. Верхнелебяжье.

Для выявления коренных природных территориальных комплексов северного подрайона ландшафта дельты реки Волга были проанализированы архивные картографические данные. Отдельно были проведены комплексные полевые маршрутные исследования, последовавшие после начальных камеральных исследований. Изучение ПТК

проводилось также и с применением геоинформационного метода, геоинформационных технологий (ГИС) и с привлечением данных дистанционного зондирования Земли.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

До начала анализа ландшафтного разнообразия северного района ландшафта дельты Волги были проведены расчёты количества ландшафтных контуров или ландшафтных выделов (здесь и далее под «ландшафтным контуром»/«ландшафтным выделом» понимается одно обособленное урочище) и их площади внутри исследуемого региона.

Площадь северного подрайона (включая реки, водотоки, протоки) составила 789,588 км². Морфологически подрайон представлен только одной группой урочищ – русловых, но в эту группу входит несколько видов урочищ: русловые пологоволнистые, русловые гривистые, русловые плоские, русловые мелкогривистые, прирусловые валы [26].

При общей площади урочищ в 722,105 км² (без учёта рек, водотоков, протоков) количество ландшафтных выделов в границах северного подрайона ландшафта дельты реки Волга составило 115, из них 11 русловых урочищ высокого уровня (39,21 км²), 11 русловых гривистых урочищ среднего уровня (43,10 км²), 6 русловых гривистых урочищ низкого уровня (30,12 км²), 7 русловых пологоволнистых урочищ высокого уровня (31,77 км²), 9 русловых пологоволнистых урочищ среднего уровня (106,6 км²), 8 русловых пологоволнистых урочищ низкого уровня (78,88 км²), 9 русловых пологовогнутых урочищ низкого уровня (46,721 км²), 8 мелкогривистых русловых урочищ высокого уровня (42,42 км²), 6 мелкогривистых русловых урочищ среднего уровня (65,709 км²), 23 мелкогривистых русловых урочища низкого уровня (124,312 км²), 11 русловых плоских урочищ низкого уровня (102,783 км²), 2 русловых плоских урочища среднего уровня (7,47 км²), 1 русловое плоское урочище высокого уровня (1 км²) и 3 прирусловых вала (2 км²). По итогам работы над выявлением основных ПТК в среде ГИС был построен векторный слой, содержащий в себе пространственную и атрибутивную информацию о каждом урочище в пределах исследуемого региона.

Как было описано выше, в качестве областей, внутри которых может производиться анализ и оценка ЛР, могут быть административно-территориальные единицы (районы и области, сельские администрации), ландшафтные единицы (ландшафтные районы и провинции) [27]. Также применяются речные бассейны разного ранга, границы особо охраняемых природных территорий. Одна из последних работ по анализу ЛР была проведена внутри охранных зон островных территорий [28]. Также успешно применяют иной способ пространственного анализа, когда на территорию исследования накладывают элементы (ячейки) правильной геометрической сетки [29; 30] или, ОТЕ (операционных территориальных единиц). При таком способе достигается простота, удобство и экономичность анализа данных. При проведении пространственного анализа сеть правильных ячеек должна быть наложена на территорию так, чтобы каждый взаимодействующий между собой объект находился в границах одной определённой ячейки. Как показали исследования, такой подход может быть с

успешностью реализован в гексагональных ячейках геометрической сетки или эквиклеточных ОТЕ (от латинского «aequus» – «равный»), так как такие ячейки оптимальны и при автоматизации вычислительных работ, и при учёте точности и достоверности разрабатываемых на их основе ГИС-моделей [31].

Размер ячейки гексагональной сети в настоящем исследовании, как и в случае с анализом ландшафтного разнообразия в центральном подрайоне ландшафта дельты реки Волга [32], подбирался экспериментальным путём. Необходимо было не допустить, во-первых, сопоставления наименьшего по размеру урочища с размером гексагональной ячейки, и, во-вторых, не использовать слишком большие размеры ячеек, так как в них может войти множество урочищ. Исходя из этого, площадь целой ячейки гексагональной сети составила 21,65 км² (рисунок 1с). При анализе были исключены лишние ячейки, которые не легли на границы северного подрайона дельты Волги. Также были созданы дробные части ячеек гексагональной сети для последующего геопространственного анализа (рисунок 1b). В работе использовались как операционная территориальная единица в виде дробного гексагона, так и в виде целого гексагона.

Для того, чтобы можно было приступить к расчетам ландшафтного разнообразия, в среде ГИС были совершены операции оверлея, по итогам которых данные по пространственному положению урочищ вошли в слой операционных территориальных единиц в виде гексагона. Далее были произведены сами расчеты по ландшафтному разнообразию и визуализации полученных данных. Для удобства восприятия была применена классификация естественных границ (оптимизация по Дженксу). Разрывы в полученных данных определялись через выбор границ классов, которые наилучшим образом создали группы схожих показателей и максимизировали разницу между значениями расчётов ЛР. Результаты были поделены на классы, границы которых устанавливались там, где встречались относительно большие различия между значениями данных в расчётах ЛР.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сам расчёт ЛР был произведён на основе простых ландшафтных показателей исследуемой территории. Показатели (индексы) ЛР можно разбить на несколько групп. В первую группу включены показатели, которые зависят как от площади, так и от количества (ландшафтных выделов и территории исследования). В такую группу входят индекс ландшафтной дробности, индекс ландшафтной сложности и оценка ЛР по индексу Менхиника. Во вторую группу относятся индексы, зависящие только от площадных показателей. К таким индексам можно отнести, например, коэффициент ландшафтной раздробленности. В третью группу относятся индексы, которые опираются только на показатели количества ландшафтных выделов. К такой группе можно отнести, например, индекс относительного богатства.

Индекс ландшафтной дробности (или индекс дробности ландшафтных контуров) показывает число ландшафтных контуров (выделов) на определённую площадь, в случае настоящего исследования – на одну операционную территориальную единицу в виде гексагона. Опираясь на ранее выполненные работы

[33; 34], формула, применяемая для расчётов, имела вид:

$$L_{dr} = \frac{n}{S}, \quad (1)$$

где n – количество ландшафтных контуров (выделов) внутри одной ячейки гексагональной сети, S – площадь одной ячейки гексагональной сети. Результаты анализа ландшафтной дробности северного подрайона ландшафта дельты реки Волга показаны на рисунке 2.

Индекс ландшафтной сложности означает отношение количества ландшафтных выделов (контуров) на среднюю площадь ландшафтных выделов внутри гексагона. С учётом ранее выполненных исследований [33; 35], математическая интерпретация индекса, применяемая в настоящей работе, может быть представлена следующей формулой:

$$L_{sl} = \frac{n}{S_{ncp}}, \quad (2)$$

где n – количество ландшафтных контуров (выделов) внутри одной ячейки гексагональной сети, S_{ncp} – средняя площадь ландшафтных выделов.

Средняя площадь ландшафтных выделов представляет собой отношение общей площади исследуемой территории к количеству ландшафтных выделов в ней и, на основе работы [35], может быть представлена формулой:

$$L_{ncp} = \frac{S}{n}. \quad (3)$$

Результаты анализа ландшафтной сложности северного района ландшафта дельты реки Волга показаны на рисунке 3.

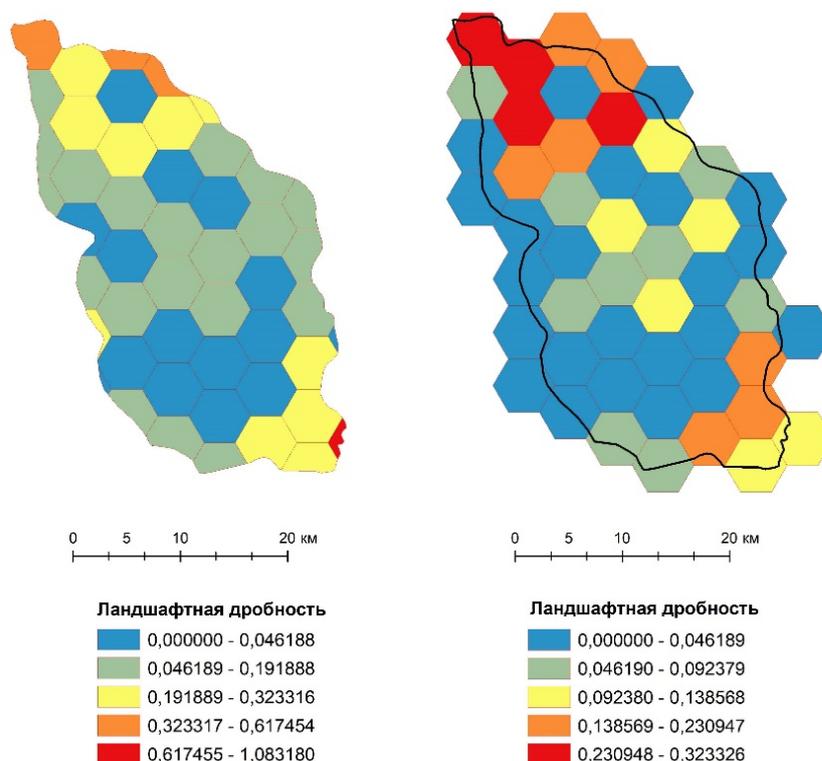


Рисунок 2. Схема показателей ландшафтной дробности северного района ландшафта дельты реки Волга Слева – применение ОТЕ в виде дробного гексагона, справа – полноразмерное применение ОТЕ в виде целого гексагона (чёрной линией указана граница северного района)

Figure 2. Scheme of landscape fractionality indicators for the northern sub-area of the Volga River Delta landscape. On the left – application of the operational territorial unit (OTU) in the form of a fractional hexagon, on the right – full-size application of the OTU in the form of a whole hexagon (the black line indicates the border of the northern region)

Индекс ландшафтной раздробленности позволяет оценить средний размер площади конкретного природного территориального комплекса к площади исследуемой территории (гексагональной ячейки). Опираясь на исследования [35; 36], математическая интерпретация индекса, применяемая в настоящей работе, может быть представлена следующей формулой:

$$L_{rd} = \frac{S_{ncp}}{S}. \quad (4)$$

Этот индекс хоть и рассчитывается на основе площадных показателей, но мера дифферен-

цированности все же главным образом зависит от количества ландшафтов, или, как в случае настоящего исследования, количества ландшафтных выделов. Если допустить, что в ячейке гексагональной сети всего один ландшафтный выдел, средняя площадь которого близка к площади территории исследования, то коэффициент превращается в единицу, и ландшафтная раздробленность отсутствует. Когда же количество выделов в исследуемом районе возрастает, то средняя площадь ландшафтных выделов становится все более и более малой величиной, и, следовательно, исходя из формулы, коэффициент раздробленности идёт по индексу к минимуму, но, в целом, – в пространстве –

идёт к своему максимуму. Чтобы увеличение ЛР по данному индексу сопровождалось увеличением значения показателя, начальную формулу (4) можно преобразовать в вид:

$$L_{rd} = 1 - \frac{S_{ncp}}{S} \quad (5)$$

Результаты анализа ландшафтной раздробленности северного подрайона ландшафта дельты реки Волга по математической интерпретации (5) показаны на рисунке 4.

Индекс ландшафтной мозаичности отражает отношение количества видов природно-территориальных комплексов выделов на количество ландшафтных контуров внутри исследуемой территории. Математическая интерпретация данного индекса, на основе работ [37; 38], имеет вид:

$$L_m = \frac{m}{n} \quad (6)$$

где m – количество видов природно-территориальных комплексов внутри гексагональной ячейки, n – количество ландшафтных контуров (выделов) внутри гексагональной ячейки.

По аналогии с преобразованием формулы ландшафтной раздробленности, исходную математическую запись ландшафтной мозаичности можно преобразовать в следующем виде:

$$L_m = 1 - \frac{m}{n} \quad (7)$$

Значение показателя внутри ячейки гексагональной сети, таким образом, увеличивается, так как при использовании данной формулы результат отнимается от единицы. Вероятность появления количества ландшафтных контуров при высоком уровне их видового состава возрастает в том случае, если фиксируется повышение значения показателей в ячейке гексагональной сети, а при снижении значения – видовой состав и плотность контуров в ячейке ниже. Результаты анализа ландшафтной мозаичности северного подрайона ландшафта дельты реки Волга показаны на рисунке 5.

Индекс относительного богатства в данном исследовании показывает долю числа видов ПТК в пределах ячейки-гексагона от числа видов ПТК на территории северного подрайона ландшафта дельты реки Волга. На основе работ [37; 38], математическая интерпретация индекса в данной работе имеет вид:

$$L_b = \frac{m}{M} \quad (8)$$

где m – количество видов природно-территориальных комплексов внутри гексагональной ячейки, M – общее количество видов природно-территориальных комплексов внутри северного подрайона ландшафта дельты реки Волга. Визуализацию результатов анализа по расчетам относительного богатства можно наблюдать на рисунке 6.

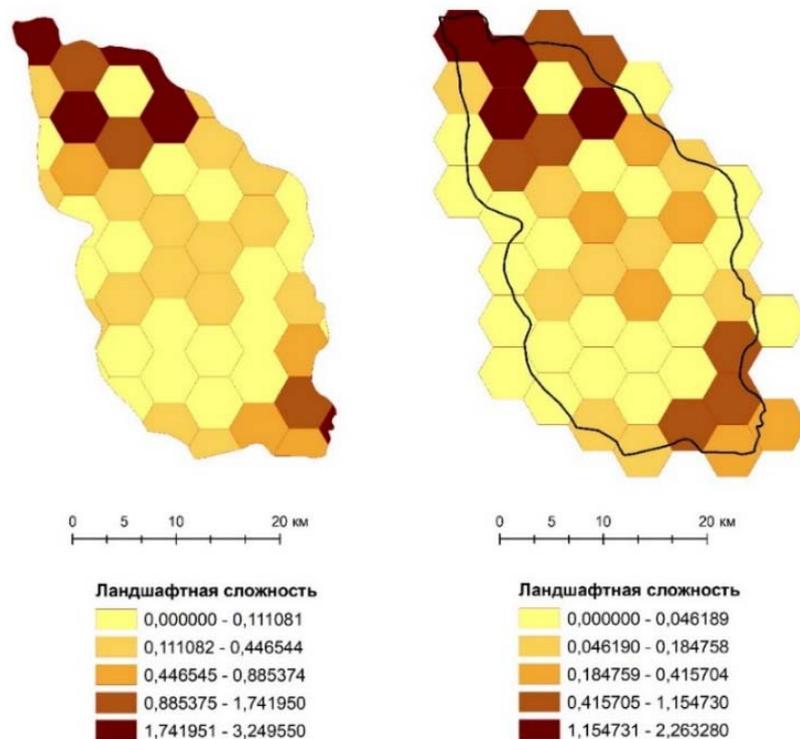


Рисунок 3. Схема показателей ландшафтной сложности северного района ландшафта дельты реки Волга Слева – применение ОТЕ в виде дробного гексагона, справа – полноразмерное применение ОТЕ в виде целого гексагона (чёрной линией указана граница северного подрайона)

Figure 3. Scheme of landscape complexity indicators for the northern sub-area of the Volga River Delta landscape On the left – application of the OTU as a fractional hexagon, on the right – full-size application of the OTU as a whole hexagon (the black line indicates the border of the northern region)

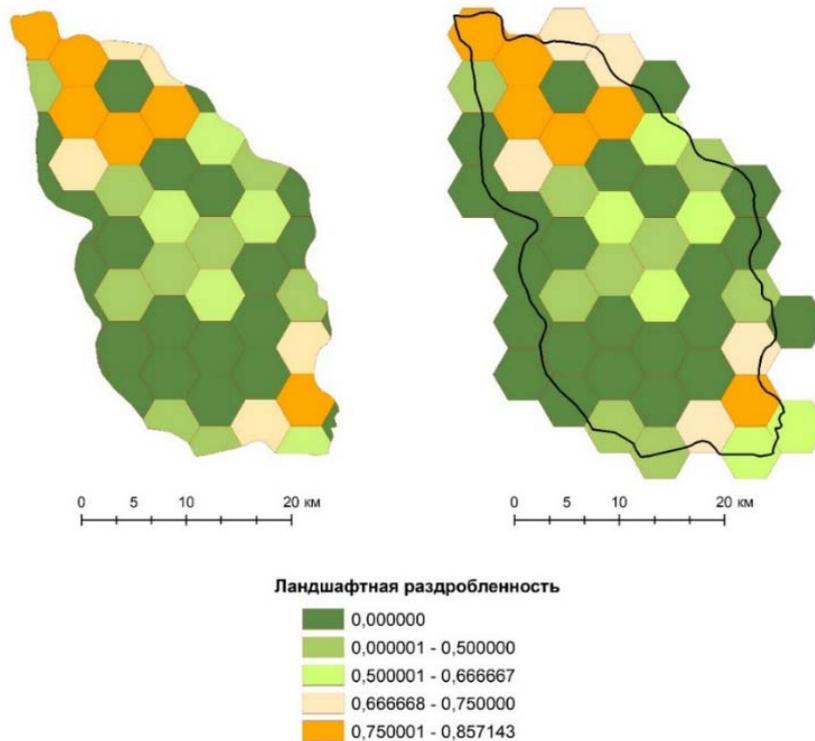


Рисунок 4. Схема показателей ландшафтной раздробленности северного подрайона ландшафта дельты реки Волга
 Слева – применение ОТЕ в виде дробного гексагона, справа – полноразмерное применение ОТЕ в виде целого гексагона
 (чёрной линией указана граница северного подрайона)

Figure 4. Scheme of landscape fragmentation indicators for the northern area of the Volga River Delta landscape
 On the left – application of the OTU as a fractional hexagon, on the right – full-size application of the OTU as a whole hexagon
 (the black line indicates the border of the northern region)

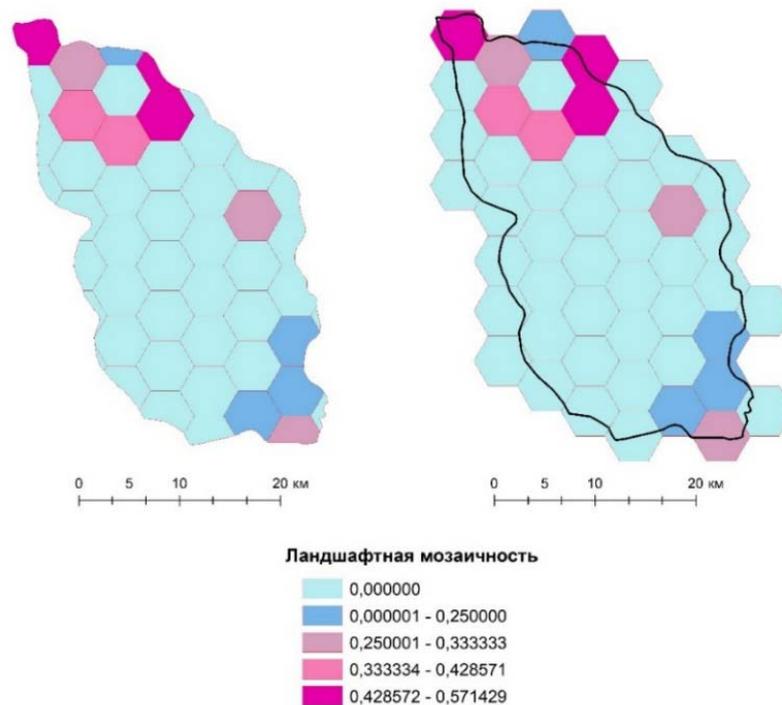


Рисунок 5. Схема показателей ландшафтной мозаичности северного подрайона ландшафта дельты реки Волга
 Слева – применение ОТЕ в виде дробного гексагона, справа – полноразмерное применение ОТЕ в виде целого гексагона
 (чёрной линией указана граница северного подрайона)

Figure 5. Scheme of landscape mosaic indicators for the northern sub-area of the Volga River Delta landscape
 On the left – application of the OTU as a fractional hexagon, on the right – full-size application of the OTU as a whole hexagon
 (the black line indicates the border of the northern region)

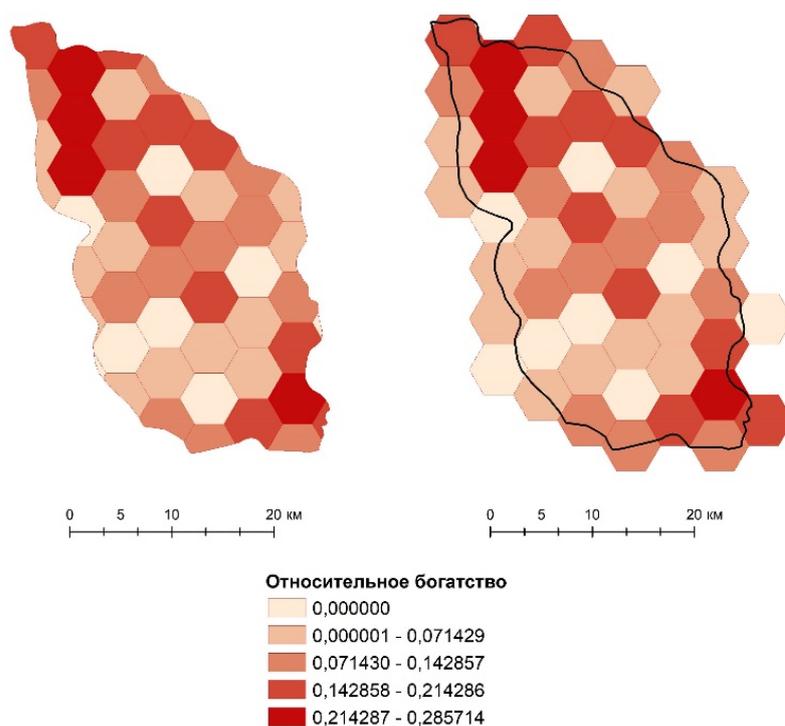


Рисунок 6. Схема показателей ЛР по индексу относительного богатства северного подрайона ландшафта дельты реки Волга

Слева – применение ОТЕ в виде дробного гексагона, справа – полноразмерное применение ОТЕ в виде целого гексагона (чёрной линией указана граница северного подрайона)

Figure 6. Scheme of indicators according to the relative landscape richness index of the northern sub-area of the Volga River Delta landscape

On the left – application of OTU in the form of fractional hexagon, on the right – full-size application of OTU in the form of whole hexagon (black line indicates the border of the northern area)

В экологии при оценке биоразнообразия определённое место отведено видовому богатству. Считается, что, если изучаемое сообщество нетрудно ограничить в пространстве и времени, а составляющие его виды определены и подсчитаны, то видовое богатство может стать чрезвычайно важной мерой разнообразия. При анализе числа выявленных видов и общим числом особей всех видов в анализе численности видов применяют достаточно простые индексы оценки видового богатства, например Индекс Менхиника [39]. Из экологии применение данного индекса плавно перешло и в ландшафтоведение. В призме оценки ЛР северного района ландшафта дельты реки Волга, индекс Менхиника показывает взаимосвязь количества видового разнообразия урочищ на заданной территории исследования (на одну операционную территориальную единицу в виде гексагона).

Опираясь на работы [21; 40; 41; 42], формула оценки ЛР по индексу Менхиника имеет вид:

$$L_{mh} = \frac{m}{\sqrt{S}}, \quad (9)$$

где m – количество видов природно-территориальных комплексов внутри ячейки гексагональной ячейки, S – площадь одной ОТЕ используемой при расчётах.

Результаты анализа ЛР северного подрайона ландшафта дельты реки Волга по индексу Менхиника показаны на рисунке 7. Отдельно стоит подчеркнуть, что количество видов ландшафтных контуров учитывалось в группе русловых урочищ.

Возникнув в недрах термодинамики и став базисным понятием теории информации, энтропия также вошла и в физическую географию [43; 44]. В оценке ЛР также есть математический аппарат для анализа энтропийной сложности ландшафтного рисунка. Такой термин в основном встречается в отечественной литературе [19], а в зарубежных научных исследованиях обычно используют трактовку “Индекс разнообразия Шеннона” [45; 46].

Измеряя ландшафтное разнообразие, индекс разнообразия Шеннона зависит как и от числа ландшафтных выделов, так и, в значительной степени, от равномерности их распределения в пространстве. Если индекс равняется нулю, то в таком случае идёт увеличение доминирования отдельных геосистем, индекс Шеннона (энтропийная сложность) уменьшается – уменьшается и ЛР в целом. Возрастание значения индекса связано с пропорциональным увеличением числа контуров или их распределения.

Основываясь на работы [7; 38; 47], в настоящем исследовании формула оценки энтропийной сложности ландшафтного рисунка северного района ландшафта дельты реки Волга имеет следующую интерпретацию:

$$L_{entropy} = - \sum \frac{m_i}{n} \ln \frac{m_i}{n}, \quad (10)$$

где m_i – доля количества ландшафтных контуров (выделов) i -го вида внутри гексагональной ячейки, n – количество зафиксированных ландшафтных контуров (выделов) внутри гексагональной ячейки, \ln – натуральный логарифм.

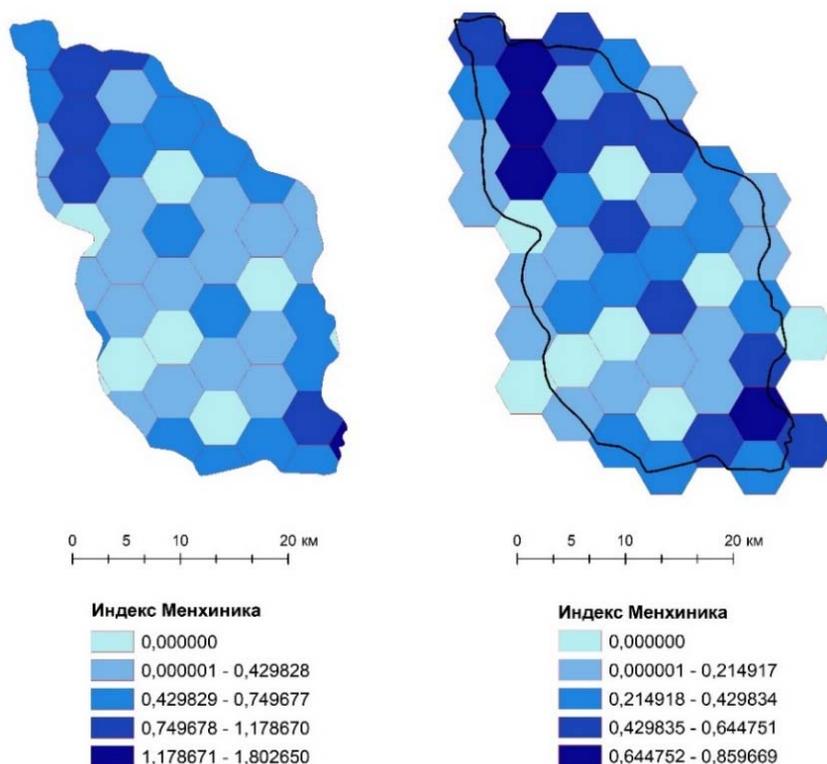


Рисунок 7. Схема показателей ландшафтного разнообразия северного подрайона ландшафта дельты реки Волга по индексу Менчиника

Слева – применение ОТЕ в виде дробного гексагона, справа – полноразмерное применение ОТЕ в виде целого гексагона (чёрной линией указана граница северного подрайона)

Figure 7. Scheme of landscape diversity indicators of the northern sub-area of the Volga River Delta landscape according to the Menchinik index

On the left – application of OTU in the form of a fractional hexagon, on the right – full-size application of OTU in the form of a whole hexagon (the black line indicates the border of the northern region)

Результаты анализа энтропийной сложности ландшафтного рисунка северного района ландшафта дельты реки Волга показаны на рисунке 8.

По сравнению с ландшафтными показателями центрального подрайона ландшафта дельты Волги [32], где было выделено более двух с половиной тысяч ландшафтных выделов при их 31 виде, северный подрайон достаточно скуден. В северном подрайоне ландшафта дельты Волги широкое распространение получила только лишь группа русловых урочищ, чей генезис тесно связан с действием многочисленных дельтовых водотоков. Относительно меженного уровня воды в водотоках рассматриваемые русловые урочища можно разделить на три высотных уровня: низкий, средний и высокий, что откладывает большой отпечаток на внешнем облике формирующихся ПТК. Разница относительных высот колеблется от 1–1,5 метров у урочищ низкого уровня до 2,5–3 метров у высокого уровня.

Пространственно-статистический анализ ЛР показал, что в северном подрайоне ландшафта дельты реки Волга можно выделить только две характерные зоны с высокими показателями ЛР. Физическая интерпретация этого вполне объяснима.

На самом севере подрайона – приверха речного острова к юго-востоку от н.п. Верхнелебяжье, – в ячейке гексагональной сети, содержащей о. Большой Осередок и о. Малый Осередок (рисунок 9, ячейка 1), начинается территория с высокими показателями ЛР, которая спускается южнее на две ячейки гексагональной сети. Высокие показатели ЛР здесь связаны с концентрацией

здесь мелкогривистых и гривистых урочищ высокого и среднего уровня, а также пологоволнистых русловых урочищ высокого уровня. Учитывая, что генезис русловых урочищ связан с рельефообразующей деятельностью водотоков, здесь ландшафтные выделы минимальны по размеру, часто сменяются по уровневой иерархии. Они могут располагаться параллельно друг другу или хаотично, что отражает динамичный характер мелких и средних водотоков, их формирующих. Здесь фиксируются высокие показатели ландшафтной дробности и ландшафтной сложности (рисунок 2 и 3). При высоких показателях ЛР здесь зависит от частоты смены ландшафтных выделов.

Так продолжается южнее (рисунок 9, ячейка 3), и такая тенденция переходит на восток, формируя своего рода один обособленный участок внутри выделенных ячеек с высоким показателем ЛР. На этом участке господство делают два больших ландшафтных выдела – русловое урочище низкого уровня, пологоволнистое и мелкогривистое русловое урочище низкого уровня. Аналогичная картина и в других гексагональных ОТЕ с относительно высокими показателями ЛР, особенно в юго-восточной части северного подрайона ландшафта дельты Волги (рисунок 2–8).

Фактически на всей территории с низкими показателями ЛР преобладают пологоволнистые и плоские русловые урочища среднего и низкого уровней. Такие урочища представлены крупными, вытянутыми вдоль водотоков массивами с достаточно плавными очертаниями. Такие ПТК являются

результатом деятельности как современных, так и древних крупных водотоков, что и нашло отражение в их морфологических особенностях. Также здесь

встречаются большие по размеру плоские русловые урочища низкого уровня.

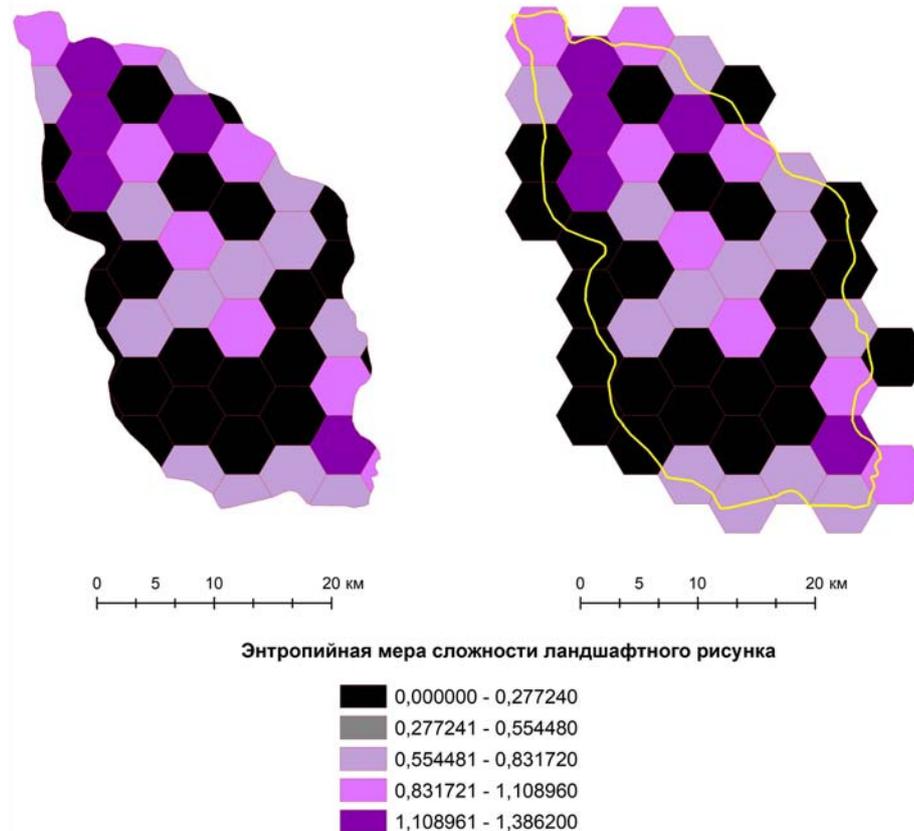


Рисунок 8. Схема показателей энтропийной сложности ландшафтного рисунка (индекса разнообразия Шеннона) северного подрайона ландшафта дельты реки Волга

Слева – применение ОТЕ в виде дробного гексагона, справа – полноразмерное применение ОТЕ в виде целого гексагона (жёлтой линией указана граница северного подрайона)

Figure 8. Scheme of entropic complexity indicators of landscape pattern (Shannon diversity index) of the northern sub-region of the Volga River Delta landscape

On the left – application of OTU in the form of fractional hexagon, on the right – full-size application of OTU in the form of whole hexagon (the yellow line indicates the border of the northern region)

Коэффициенты ландшафтной раздробленности также коррелируются с показателями индексов ландшафтной дробности и ландшафтной сложности. Ландшафтная раздробленность напрямую зависит от отношения средней площади выдела к площади исследуемой ячейки ОТЕ: показатель коэффициента тем больше, чем больше и средняя площадь ландшафтных выделов. Иными словами, если средняя площадь ландшафтных выделов стремится занять всю площадь ячейки, то значение коэффициента растёт, и наоборот.

Корреляция показателей ландшафтной дробности, ландшафтной сложности и ландшафтной раздробленности достигается тем, что в данных индексах используются почти одинаковый набор переменных. Иное же представление о пространственном расположении ландшафтных выделов в северном подрайоне ландшафта дельты реки Волга и, следовательно, о ЛР, дают индекс относительного богатства и индекс Менхиника. Это связано с тем, что при расчёте индекса относительного богатства основным фактором является именно количество видов ландшафтных выделов. Показатели индекса по Менхинику зависят от количества видового

разнообразия урочищ на территории ячейки гексагональной сети.

Совершенно иная картина ЛР, представляется по индексу ландшафтной мозаичности (рисунок 5). Здесь фиксируются только два ареала, описанных ранее (рисунок 9), с высокими показателями ЛР. Низкие показатели фактически по всей площади напрямую связаны с “бедностью” видов природно-территориальных комплексов в северном подрайоне ландшафта дельты Волги и их зафиксированном количестве в гексагональной ОТЕ.

Оценка показателей энтропийной сложности ландшафтного рисунка является своего рода финальным штрихом в оценке ЛР северного подрайона ландшафта дельты Волги. Энтропийная сложность, в целом, схожа по результатам оценки ландшафтной дробности, ландшафтной сложности и ландшафтной раздробленности, также можно проследить схожие результаты по итогам визуализации данных индекса Менхиника, особенно при использовании дробной ОТЕ.

Дополнительно для сопоставления результатов расчётов ЛР была составлена корреляционная матрица показателей ландшафтного разнообразия (рисунок 10). Необходимо отметить, что в работе использовались

индексы, в расчёт которых входили показатели площади одной используемой гексагональной ОТЕ,

поэтому необходимо было сопоставить результаты целой и дробной ячеек ОТЕ.



Рисунок 9. Ячейки гексагональной сети с высокими показателями ЛР (выделены голубой заливкой) В ячейке 1 расположены о. Большой Осередок и о. Малый Осередок. Снимок аппарата Sentinel 2A от 15.07.2022 г.
Figure 9. Cells of the hexagonal grid with high landscape diversity indices (highlighted in blue fill) Cell 1 contains the islands of Bolshoy Oseredok and Maly Oseredok. Sentinel 2A image from 15.07.2022

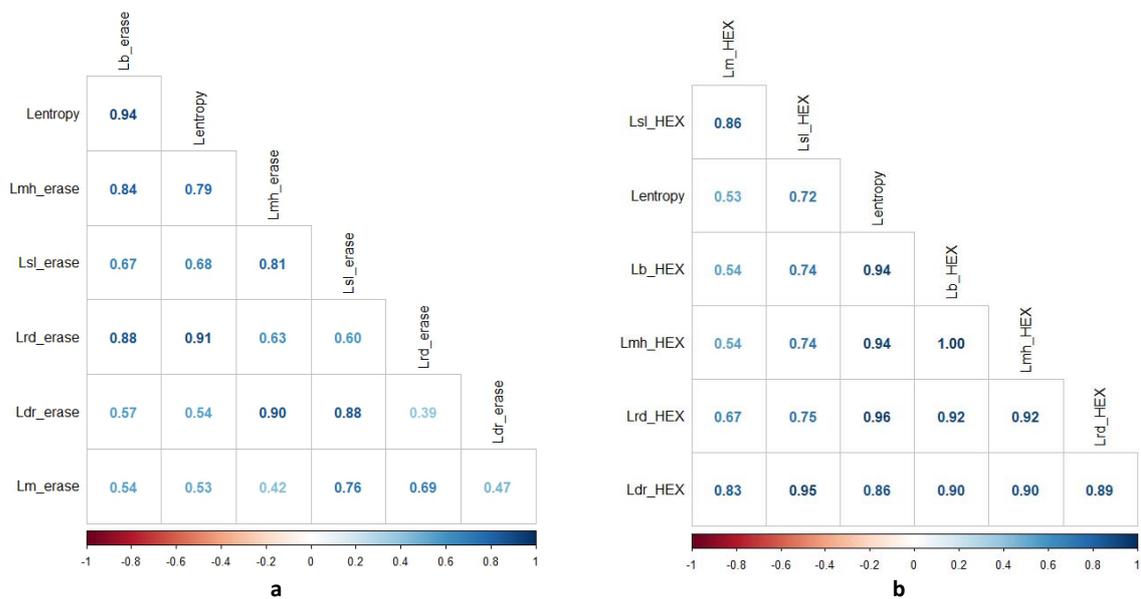


Рисунок 10. Корреляционная матрица показателей ландшафтного разнообразия северного подрайона ландшафта дельты реки Волга
a – матрица при применении операционной территориальной единицы в виде дробного гексагона, *b* – при полноразмерном применении операционной территориальной единицы в виде целого гексагона, где Lentropy – энтропийная сложность ландшафтного рисунка, Lmh – индекс Менхиника, Lsl – индекс ландшафтной сложности, Lrd – индекс ландшафтной раздробленности, Ldr – индекс ландшафтной дробности, Lm – индекс ландшафтной мозаичности
Figure 10. Correlation matrix of landscape diversity indicators of the northern sub-area of the Volga River Delta landscape
a – matrix when the operational territorial unit is applied as a fractional hexagon, *b* – when the full-size operational territorial unit is applied as a whole hexagon, where Lentropy – entropic complexity of landscape pattern, Lmh – Menkhinik index, Lsl – landscape complexity index, Lrd – landscape fragmentation index, Ldr – landscape fragmentation index, Lm – landscape mosaic index

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показала проведённая работа, лучшим способом анализа и визуализации ЛР достигается путём применения гексагональной сетки. Анализ схем ЛР и сопоставление полученных данных с тематическими материалами о природе и хозяйственном освоении исследуемого региона позволяет дать характеристику пространственной изменчивости ландшафтной дифференциации территории и факторах, её обуславливающих.

Так, например, территории с низким разнообразием при прочих равных условиях благоприятны для эффективного монофункционального хозяйства. В данном случае, сопоставляя ОТЕ с низкими показатели ЛР и ретроспективный анализ хозяйственного освоения дельты, видно, что такие территории чаще использовались в сельском хозяйстве, так как одно большое урочище легче адаптировать под хозяйственные нужды. Участки со сложной морфологической структурой ПТК, и, соответственно, высоким уровнем ландшафтного разнообразия, практически не подвергаются большинству видов хозяйственного воздействия.

Отдельно стоит подчеркнуть, что проведённая работа есть результат анализа показателей исключительно для и внутри территории северного подрайона ландшафта дельты реки Волга. С учетом сложности морфологической структуры всего ландшафта дельты Волги, масштабируя анализ ЛР до двух и более подрайонов дельты, необходимо будет учитывать ПТК всех этих территорий, что приведёт, соответственно, к изменению показателей. Такое исследование планируется провести после детального исследования морфологической структуры данного ландшафта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чибилев А.А. Ландшафтно-экологический каркас как территориальная основа устойчивого развития сельскохозяйственных 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>
2. Turner M. Landscape ecology: The Effect of Pattern on process // Annual Review of Ecology and Systematic. 1989. V. 20. P. 171–197.
3. Wu J. Ecological Dynamics in Fragmented Landscapes // Princeton Guide to Ecology. 2009. P. 438–444.
4. Хорошев А.В., Авессаломова И.А., Дьяконов К.Н., Иванов А.Н., Калуцков В.Н., Матасов В.М., Низовцев В.А., Сысуев В.В., Харитонов Т.И., Чижова В.П., Эрман Н.М., Лощинская Е.С. Теория и методология ландшафтного планирования. Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2019. 444 с.
5. Витченко А.Н., Власов Б.П., Марцинкевич Г.И. Ландшафтно-экологические исследования как реализация стратегии устойчивого развития Беларуси // Вестник БГУ. 2009. N 1. Сер. 2. С. 81–88.
6. Осипов А.Г., Дмитриев В.В., Ковязин В.Ф. Методика анализа экосистемного разнообразия ландшафтов региона по материалам дистанционного зондирования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. N 10. С. 49–57.
7. Соколов А.С. Количественная оценка ландшафтной репрезентативности охраняемых природных территорий регионов // Псковский регионологический журнал. 2021. Т. 17. N 4. С. 123–137. <https://doi.org/10.37490/S221979310017159-7>
8. Озгелдинова Ж., Бектемирова А., Мукаев Ж., Берденов Ж., Асылбеков К., Оспан Г. Ландшафтное разнообразие территории бассейна реки Тобол в пределах Костанайской области // Вестник КазНУ. Серия географическая. 2022. Т. 67. N 4. С. 20–27. <https://doi.org/10.26577/JGEM.2022.v67.i4.02>
9. Ганзей К.С., Иванов А.Н. Ландшафтное разнообразие Курильских островов // География и природные ресурсы. 2012. N 2. С. 87–94.
10. Соколов А.С. Ландшафтное разнообразие: теоретические основы, подходы и методы изучения // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10. Вып. 1. С. 208–213.
11. Leser H., Nagel P. Landscape Diversity – A Holistic Approach // Biodiversity: A Challenge for Development Research and Policy. Germany: Springer, 2001, pp. 129–143.
12. Dias M., Domingos J., dos Santos Costa S.S., Nascimento M., Silva M., Granjeiro L., Miranda R. Geodiversity Index Map of Rio Grande do Norte State, Northeast Brazil // Cartography and Quantitative Assessment. Geoheritage. 2021. V. 13. <https://doi.org/doi:10.1007/s12371-021-00532-4>
13. Zwoliński Z., Najwer A., Giardino M. Methods for Assessing Geodiversity // Geoheritage. 2018. P. 27–52. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00002-2>
14. Pellitero R., Manosso F.C., Serrano E. Mid- and large-scale geodiversity calculation in Fuentes Carrionas (NW Spain) and Serra do Cadeado (Parana, Brazil): methodology and application for land management // Geografiska Annaler: Series A, Phys. Geogr. 2014. V. 97. P. 219–235.
15. Forman R.T.T., Godron M. Landscape ecology. New York: John Wiley&Sons, 1986. 619 p.
16. Leitro A.B., Miller J., Ahern J., McGarigal K. Measuring Landscape. Washington. Covelo. London: Island Press, 2009. 247 p.
17. Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н., Алещенко Г.М. Разнообразие ландшафта и методы его измерения // География и мониторинг биоразнообразия. М.: Изд-во НУМЦ, 2002. С. 76–178.
18. Беручашвили Н.Л., Жучкова В.К. Методы комплексных физико-географических исследований. М.: Изд-во МГУ, 1997. 320 с.
19. Викторов А.С. Рисунок ландшафта. М.: Мысль, 1986. 179 с.
20. Гафина Л.М. Правовая охрана ландшафтного разнообразия в Российской Федерации // Проблемы экономики и юридической практики. 2007. N 4. С. 279–282.
21. Марцинкевич Г.И., Счастливая И.И. Оценка ландшафтного разнообразия природных и природно-антропогенных комплексов Беларуси // Природопользование. 2005. Вып. 11. С. 98–105.
22. Марцинкевич Г.И. Ландшафтоведение Беларуси: основные достижения и направления дальнейшего развития // Фокус. 2007. N 2. С. 12–19.
23. Мирзеханова З.Г., Климина Е.М. Оценка ландшафтного разнообразия для разработки программ устойчивого развития Хабаровского края // Известия РАН. Серия географическая. 2017. N 4. С. 88–96. <https://doi.org/10.7868/S0373244417040089>
24. Марцинкевич Г.И. Ландшафтоведение. Минск: Изд-во Белорус. ун-та, 2007. 206 с.
25. Занозин В.В., Бармин А.Н. Особенности районирования дельтовых ландшафтов // Геология,

- география и глобальная энергия. 2018. Т. 70. N 3. С. 134–142.
26. Занозин В.В., Бармин А.Н., Занозин В.В. Особенности морфологической структуры северного подрайона ландшафта дельты Волги // Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии. VII Мильковские чтения: материалы XIV Международной ландшафтной конференции, Воронеж, 2023. С. 105–107.
27. Матушкин А.С., Чепурнов Р.Р., Прокашев А.М. Структура древнеэоловых долинно-зандровых ландшафтов нижней Вятки // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». 2018. N 2. С. 172–181.
28. Борисов Р.В. Оценка сложности ландшафтной организации охранных зон острова Русский // Географические и геоэкологические исследования на Дальнем Востоке. 2019. Т. 1. С. 23–31. <https://doi.org/10.35735/tig.2019.93.88.002>
29. Михайлов В.А. Оценка антропогенной преобразованности ландшафтов с помощью ГИС (на примере Крымского Присивашья) // Современные научные исследования и инновации. 2012. N 10. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2012/10/17103/> (дата обращения: 09.01.2024)
30. Бодрова В.Н. Картографирование лесистости острова Сарпинский Волгоградской области // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2018. N 3. С. 47–54.
31. Крупочкин Е.П., Дишин Д.А., Дунец А.Н., Рыгалов Е.В. Количественное обоснование параметров регулярно-ячеистых моделей как метода численной оценки и ГИС-картографирования территорий // Ползуновский вестник. 2016. N 4. С. 70–79.
32. Занозин В.В., Бармин А.Н., Ямашкин С.А., Ямашкин А.А. Методы и алгоритмы оценки ландшафтного разнообразия в морфологическом аспекте на примере центральной части дельты реки Волги // Материалы Междунар. конф. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий, М: Издательство Московского университета, 2020. Т. 26. Ч. 4. С. 114–130. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-4-26-114-130>.
33. Ганзей К.С. Оценка ландшафтного разнообразия вулканически активных островов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2014. N 2. С. 61–70. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2014-2-61-70>
34. Борисов Р.В. Оценка сложности ландшафтной организации и устойчивости ландшафтов охранных зон островов архипелага Императрицы Евгении (залив Петра Великого, Японское море) // Региональные геосистемы. 2021. N 2. С. 144–154.
35. Позаченюк Е.А., Агиенко А.А. Оценка ландшафтного разнообразия Алуштинского амфитеатра // Учёные записки Крымского федерального университета имени Вернадского В.И. География. Геология. 2017. Т. 3. N 2. С. 102–116.
36. Юдина Ю.В. Морфологический и морфометрический анализ ландшафтной структуры Белгородской области // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2019. Т. 43. N 3. С. 307–318. <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2019-43-3-307-318>
37. Усова И.П., Токарчук С.М. Ландшафтное разнообразие природных комплексов Брестской и Могилевской областей // Весн. Брэсц. ун-та. Сер. 5, Хімія. Біялогія. Навуки аб Зямлі. 2010. N 2. С. 120–127.
38. Соколов А.С. Картографический анализ региональных особенностей ландшафтного разнообразия Белоруссии // Псковский регионологический журнал. 2016. Т. 28. N 4. С. 59–70.
39. Мэгарран Э. Экологическое разнообразие и его измерение. М.: Мир, 1992. 184 с.
40. Menhinick E.F. Estimations of insect populations density in herbaceous vegetation with emphasis on removal sweeping // Ecology. 1963. N 44. P. 617–622.
41. Whittaker R.H. Evolution of species diversity in land communities // Evol. Biol. 1977. N 10. P. 1–67.
42. Черных Д.В. Количественная оценка сложности и разнообразия ландшафтного покрова Русского Алтая // Изв. Алтайского гос. ун-та. 2011. N 3–2. С. 60–65.
43. Рулев А.С., Рулева О.В., Юферев В.Г., Рулев Г.А. Термодинамика экотонных ландшафтов // Вестник Воронежского государственного университета. Научный журнал. Серия: География. Геоэкология. 2017. N 4. С. 5–14.
44. Пузаченко Ю.Г. Термостатические основания географии // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2016. N 5. С. 21–37. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-21-37>
45. Harini N. Opposite trends in response for the Shannon and Simpson indices of landscape diversity // Applied Geography. 2002. V. 22. Iss. 2. P. 175–186. [https://doi.org/10.1016/S0143-6228\(02\)00002-4](https://doi.org/10.1016/S0143-6228(02)00002-4)
46. Dušek R., Popelková R. Theoretical view of the Shannon index in the evaluation of landscape diversity // AUC Geographica. 2017. N 47. P. 5–13. <https://doi.org/10.14712/23361980.2015.12>
47. Wolff S., Hüttel S., Nendel C., et al. Agricultural Landscapes in Brandenburg, Germany: An Analysis of Characteristics and Spatial Patterns // Int. J. Environ. Res. 2021. V. 15. P. 487–507. <https://doi.org/10.1007/s41742-021-00328-y>

REFERENCES

- Chibilev A.A. The landscape and ecological framework as a territorial basis for stable development in Russia's agricultural regions. *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>
- Turner M. Landscape ecology: The Effect of Pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematic*. 1989, vol. 20, pp. 171–197.
- Wu J. *Ecological Dynamics in Fragmented Landscapes*. Princeton Guide to Ecology. 2009, pp. 438–444.
- Khoroshev A.V., Avessalomova I.A., D'yakonov K.N., Ivanov A.N., Kalutskov V.N., Matasov V.M., Nizovtsev V.A., Sysuev V.V., Kharitonova T.I., Chizhova V.P., Erman N.M., Loshchinskaya E.S. *Teoriya i metodologiya landshaftnogo planirovaniya* [Theory and methodology of landscape planning]. Moscow, KMK Scientific Press Publ., 2019, 444 p. (In Russian)
- Vitchenko A.N., Vlasov B.P., Martsinkevich G.I. Landscape-ecological research as the implementation of the strategy of sustainable development of Belarus. *Vestnik BGU [Bulletin of BSU]*. 2009, no. 1, ser. 2, pp. 81–88. (In Russian)
- Osipov A.G., Dmitriev V.V., Kovyzin V.F. Methods of analyzing landscape ecosystem diversity of a region based on remote sensing. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurosov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]. 2020, vol. 331, no. 10, pp. 49–57. (In Russian)

7. Sokolov A. Quantitative assessment of landscape representativity of regional protected natural areas. *Pskov Journal of Regional Studies*, 2021, vol. 17, no. 4, pp. 123–137. (In Russian) <https://doi.org/10.37490/S221979310017159-7>
8. Ozgeldinova Zh., Bektemirova A., Mukayev Zh., Yerkanova N.N., Berdenov Zh., Assylbekov Q., Ospan G.T. Landscape diversity of the territory of the Tobol river basin within the Kostanay region. *Bulletin of KazNU. Geographical Series*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 20–27. (In Russian) <https://doi.org/10.26577/JGEM.2022.v67.i4.02>
9. Ganzei K.S., Ivanov A.N. Landscape diversity of the Kuril Islands. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources]. 2012, no. 2, pp. 87–94. (In Russian)
10. Sokolov A.S. Landscape diversity: theoretical foundations, approaches and methods of study. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov* [Geopolitics and ecogeodynamics of regions]. 2014, vol. 10, iss. 1, pp. 208–213. (In Russian)
11. Leser H., Nagel P. Landscape Diversity – A Holistic Approach. *Biodiversity: A Challenge for Development Research and Policy*. Germany, Springer Publ., 2001, pp. 129–143.
12. Dias M., Domingos J., dos Santos Costa S.S., Nascimento M., Silva M., Granjeiro L., Miranda R. Geodiversity Index Map of Rio Grande do Norte State, Northeast Brazil. *Cartography and Quantitative Assessment. Geoheritage*, 2021, vol. 13. <https://doi.org/doi:10.1007/s12371-021-00532-4>
13. Zwoliński Z., Najwer A., Giardino M. Methods for Assessing Geodiversity. *Geoheritage*, 2018, pp. 27–52. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00002-2>
14. Pellitero R., Manosso F.C., Serrano E. Mid- and large-scale geodiversity calculation in Fuentes Carrionas (NW Spain) and Serra do Cadeado (Parana, Brazil): methodology and application for land management. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. 2014, vol. 97, pp. 219–235.
15. Forman R.T.T., Godron M. *Landscape ecology*. New York, John Wiley&Sons Publ., 1986, 619 p.
16. Leitro A.B., Miller J., Ahern J., McGarigal K. *Measuring Landscape*. Washington. Covelo. London. Island Press Publ., 2009, 247 p.
17. Puzachenko Yu.G., D'yakonov K.N., Aleshchenko G.M. Landscape diversity and methods of its measurement. *Geografiya i monitoring bioraznoobraziya* [Geography and biodiversity monitoring]. Moscow, NUMC Publishing House, 2002, pp. 76–178. (In Russian)
18. Beruchashvili N.L., Zhuchkova V.K. *Metody kompleksnykh fiziko-geograficheskikh issledovaniy* [Methods of physiographic studies]. Moscow, MSU Publ., 1997, 320 p. (In Russian)
19. Viktorov A.S. *Risunok landshafta* [The Picture of Landscape]. Moscow, Mysl' Pybl., 1986, 179 p. (In Russian)
20. Gafina L.M. Legal protection of landscape diversity in the Russian Federation. *Problemy ekonomiki i yuridicheskoi praktiki* [Problems of economics and legal practice]. 2007, no. 4, pp. 279–282. (In Russian)
21. Martsinkevich G.I., Schastnaya I.I. Assessment of landscape diversity of natural and natural-anthropogenic complexes of Belarus. *Prirodopol'zovanie* [Nature Management]. 2005, vol. 11, pp. 98–105. (In Russian)
22. Martsinkevich G.I. Landscape science of Belarus: main achievements and directions of further development. *Fokus* [Focus]. 2007, no. 2, pp. 12–19. (In Russian)
23. Mirzekhanova Z.G., Klimina E.M. Assessment of landscape diversity to develop programs of sustainable development of Khabarovsk Krai. *News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*, 2017, no. 4, pp. 88–96. (In Russian) <https://doi.org/10.7868/S0373244417040089>
24. Martsinkevich G.I. *Landshaftovedenie* [Landscape science]. Minsk, Belarusian State University Publ., 2007, 206 p. (In Russian)
25. Zanozin V.V., Barmin A.N. Features of division into districts of deltoid landscapes. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya* [Geology, Geography and Global Energy]. 2018, vol. 70, no. 3, pp. 134–142. (In Russian)
26. Zanozin V.V., Barmin A.N., Zanozin V.V. Osobennosti morfologicheskoi struktury severnogo podraiona landshafta del'ty Volgi [Features of the morphological structure of the northern sub-area of the Volga Delta landscape]. *Teoreticheskie i prikladnye problemy landshaftnoi geografii. VII Mil'kovskie chteniya: materialy XIV Mezhdunarodnoi landshaftnoi konferentsii Voronezh, 2023* [Proceedings of the XIV International Landscape Conference VII Milkovskie readings: Theoretical and applied problems of landscape geography Voronezh, 2023]. Voronezh, 2023, pp. 105–107. (In Russian)
27. Matushkin A.S., Chepurnov R.R., Prokashev A.M. The structure of ancient eolian landscapes of the outwash terrain of the lower Vyatka basin. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya «Biologiya. Nauki o Zemle»* [Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences]. 2018, no. 2, pp. 172–181. (In Russian)
28. Borisov R.V. Estimation of the complexity of the landscape organization of protection areas of the Rusky Island. *Geographical and geocological investigations in the Far East*, 2019, vol. 1, pp. 23–31. (In Russian) <https://doi.org/10.35735/tig.2019.93.88.002>
29. Mihailov V.A. Evaluation of anthropogenic transformation of the landscape using GIS (on the example of the Crimean Sivash). *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii* [Modern scientific research and innovation]. 2012, no. 10. (In Russian) Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2012/10/17103/> (accessed 09.01.2024)
30. Bodrova V.N. Mapping of forest coverage of the Sarpinsky island (Volgograd oblast). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya* [Bulletin of Moscow University. Episode 5. Geography]. 2018, no. 3, pp. 47–54. (In Russian)
31. Krupochkin E.P., Dirin D.A., Dunets A.N., Rygalov E.V. Quantitative substantiation of the parameters of regular-cell models as a method of numerical evaluation and GIS-mapping of territories. *Polzunovskii vestnik* [Polzunov Bulletin]. 2016, no. 4, pp. 70–79. (In Russian)
32. Zanozin V.V., Barmin A.N., Yamashkin S.A., Yamashkin A.A. Metody i algoritmy otsenki landshaftnogo raznoobraziya v morfologicheskoi aspekte na primere tsentral'noi chasti del'ty reki Volgi [Methods and algorithms for landscape diversity assessment in morphological aspect on the example of the central part of the Volga River delta]. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii InterKarto. InterGIS. Geoinformatsionnoe obespechenie ustoychivogo razvitiya territorii* [Proceedings of the International conference InterKarto. InterGIS. Geoinformation support of sustainable development of territories]. Moscow, Moscow University Press Publ., 2020, pp. 114–130. (In Russian) <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-4-26-114-130>
33. Ganzei K.S. Assessment of Landscape Diversity of Islands with Volcanic Activity. *News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*, 2014, no. 2, pp. 61–70. (In Russian) <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2014-2-61-70>

34. Borisov R.V. Estimation of complexity of the landscape organization and the sustainability of landscapes of the protected zones of islands of the Eugenie Archipelago (Peter the Great Gulf, Sea of Japan). *Regional'nye geosistemy* [Regional geosystems]. 2021, no. 2, pp. 144–154. (In Russian)
35. Pozachenyuk E.A., Agienko A.A., Assessment of landscape diversity of Alushta Amphitheater. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni Vernadskogo V.I. Geografiya. Geologiya* [Scientific Notes of the Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology]. 2017, vol. 3, no. 2, pp. 102–116. (In Russian)
36. Yudina Y.V. Morphological and morphometric analysis of landscape structure Belgorod region. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences Series*, 2019, vol. 43, no. 3, pp. 307–318. (In Russian) <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2019-43-3-307-318>
37. Usova I.P., Tokarchuk S.M. Landscape Diversity of Natural Complexes of Brest and Mahilew Regions. *Bulletin of Brest University. Series 5. Chemistry. Biology. Sciences about Earth*. 2010, no. 2, pp. 120–127. (In Russian)
38. Sokolov A.S. Cartographic analysis of regional features of landscape diversity in Belarus. *Pskovskii regionologicheskii zhurnal* [Pskov Regional Journal]. 2016, vol. 28, no. 4, pp. 59–70. (In Russian)
39. Megarran E. *Ekologicheskoe raznoobrazie i ego izmerenie* [Ecological diversity and its measurement]. Moscow, Mir Publ., 1992, 184 p. (In Russian)
40. Menhinick E.F. Estimations of insect populations density in herbaceous vegetation with emphasis on removal sweeping. *Ecology*. 1963, no. 44, pp. 617–622.
41. Whittaker R.H. Evolution of species diversity in land communities. *Evolutionary Biology*. 1977, no. 10, pp. 1–67.
42. Chernykh D.V. Quantitative Assessment of complexity and landscape diversity of the Russian Altai. *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta* [News of Altai State University]. 2011, no. 3–2, pp. 60–65. (In Russian)
43. Rulev A.S., Ruleva O.V., Yuferev V.G., Rulev G.A. Thermodynamics of ecotone landscapes. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauchnyi zhurnal. Seriya: Geografiya. Geoekologiya* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology]. 2017, no. 4, pp. 5–14. (In Russian)
44. Puzachenko I.G. Thermostatical foundations of geography. *News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*, 2016, no. 5, pp. 21–37. (In Russian) <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-21-37>
45. Harini N. Opposite trends in response for the Shannon and Simpson indices of landscape diversity. *Applied Geography*, 2002, vol. 22, iss. 2, pp. 175–186. [https://doi.org/10.1016/S0143-6228\(02\)00002-4](https://doi.org/10.1016/S0143-6228(02)00002-4)
46. Dušek R., Popelková R. Theoretical view of the Shannon index in the evaluation of landscape diversity. *AUC Geographica*, 2017, no. 47, pp. 5–13. <https://doi.org/10.14712/23361980.2015.12>
47. Wolff S., Hüttel S., Nendel C., et al. Agricultural Landscapes in Brandenburg, Germany: An Analysis of Characteristics and Spatial Patterns. *International Journal of Environmental Research*, 2021, vol. 15, pp. 487–507. <https://doi.org/10.1007/s41742-021-00328-y>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Виктор В. Занозин руководил общим научным исследованием, участвовал в полевых исследованиях, ГИС-анализе и визуализации данных, проведении расчётов ландшафтного разнообразия и написании текста рукописи. Александр Н. Бармин участвовал в статистической обработке данных, написании текста рукописи и редактировании текста рукописи. Валерий В. Занозин участвовал в полевых исследованиях, классификации природно-территориальных комплексов и написании текста рукописи. Станислав А. Ямашкин участвовал в статистической обработке данных, анализе полученных расчётов, написании и редактировании текста рукописи. Виктория А. Корень участвовала в картографировании выявленных урочищ в среде ГИС и статистической обработке данных. Елена В. Занозина участвовала в ГИС-анализе данных и статистической обработке данных. 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

Victor V. Zanozin supervised the scientific study, took part in field surveys, GIS-analysis and data visualisation, landscape diversity calculations and manuscript writing. Alexander N. Barmin participated in statistical data processing, writing and editing the manuscript text. Valery V. Zanozin participated in field studies, classification of natural territorial complexes and manuscript writing. Stanislav A. Yamashkin participated in statistical data processing, analysis of the obtained calculations, writing and editing of the manuscript. Viktoriya A. Koren participated in mapping of the identified geosystems in GIS and statistical data processing. Elena V. Zanozina participated in GIS-analysis and statistical processing of data. All authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Виктор В. Занозин / Victor V. Zanozin <http://orcid.org/0000-0002-1854-516X>
 Александр Н. Бармин / Alexander N. Barmin <http://orcid.org/0000-0002-6705-1553>
 Валерий В. Занозин / Valery V. Zanozin <http://orcid.org/0009-0006-6431-2283>
 Станислав А. Ямашкин / Stanislav A. Yamashkin <https://orcid.org/0000-0002-7574-0981>
 Виктория А. Корень / Viktoriya A. Koren <http://orcid.org/0009-0008-6124-2069>
 Елена В. Занозина / Elena V. Zanozina <http://orcid.org/0009-0002-4893-2141>

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 08.07.2024 г.
Объем 197 стр. Тираж 100. Заказ № 29.
Формат 70x90%. Печать офсетная.
Бумага офсетная № 1.
Тиражировано в типографии издательства ДГУ
по адресу: г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 59е