

ГЕОСФЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

GEOSPHERE RESEARCH

Научный журнал

2025

№ 2

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
(свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-66443 от 14 июля 2016 г.)

Журнал индексируется в Web of Science Core Collection's Emerging Sources Citation Index и SCOPUS.

The Journal is indexed in the Web of Science Core Collection's Emerging Sources Citation Index and SCOPUS.



Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» 94288

Томский государственный университет
2025

Учредитель – Томский государственный университет

Адрес редакции и издателя: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Национальный исследовательский Томский государственный университет, геолого-географический факультет, ауд. 242. Сайт: <http://journals.tsu.ru/geo/>

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор: **Изох А.Э.**, д-р геол.-минерал. наук, чл.-кор. РАН, Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия

Заместитель главного редактора: **Шпанский А.В.**, д-р геол.-минерал. наук, профессор Томского государственного университета, Томск, Россия

E-mail: shpansky@ggf.tsu.ru

Ответственный секретарь: **Асочакова Е.М.**, канд. геол.-минерал. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: gsr_tsu@mail.ru

Гордиенко И.В., д-р геол.-минерал. наук, чл.-кор. РАН, Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

Гутак Я.М., д-р геол.-минерал. наук, профессор, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Дорошевич А.Г., д-р геол.-минерал. наук, заведующая лабораторией, Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия

Евсеева Н.С., д-р геогр. наук, профессор, Томский государственный университет, Томск, Россия

Земцов В.А., д-р геогр. наук, профессор, Томский государственный университет, Томск, Россия

Крук Н.Н., д-р геол.-минерал. наук, чл.-кор. РАН, директор, Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия

Парначев В.П., д-р геол.-минерал. наук, профессор, Томский государственный университет, Томск, Россия

Поздняков А.В., д-р геогр. наук, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

Ревердатто В.В., д-р геол.-минерал. наук, академик РАН, Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия

Савичев О.Г., д-р геогр. наук, профессор, Томский политехнический университет, Томск, Россия

Сазонов А.М., д-р геол.-минерал. наук, профессор, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Скляров Е.В., д-р геол.-минерал. наук, чл.-кор. РАН, Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Соломина О.Н., д-р геогр. наук, чл.-кор. РАН, директор, Институт географии РАН, Москва, Россия

Худолей А.К., д-р геол.-минерал. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Цыганков А.А., д-р геол.-минерал. наук, Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

Чернышов А.И., д-р геол.-минерал. наук, профессор, Томский государственный университет, Томск, Россия

Ярмолюк В.В., д-р геол.-минерал. наук, академик РАН, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

Бэнкс Давид, CGeol, компания Holymoor Consultansy, Честерфилд, Университета Глазго, Великобритания

Гутиеррес-Алонсо Г., профессор Университета Саламанки, Саламанка, Испания

Покровский О.С., ведущий научный сотрудник, обсерватория Миди-Пиренейз Национального центра научных исследований, Тулуса, Франция

Чамберлайн К.Р., профессор, Университет Вайоминг, Ларами, США

Чан Чонг Хоа, Геологический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Вьетнам

Эрнст А.А., профессор, Гамбургский университет, Гамбург, Германия

Эрнст Р.Э., профессор, Карлтонский университет, Оттава, Канада

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Гертнер И.Ф., канд. геол.-минерал. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Горбатенко В.П.**, д-р геогр. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Гринев О.М.**, канд. геол.-минерал. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Квасникова З.Н.**, канд. геогр. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Краснова Т.С.**, канд. геол.-минерал. наук, начальник научного управления, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Кужевская И.В.**, канд. геогр. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Лещинский С.В.**, д-р геол.-минерал. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Лычагин Д.В.**, д-р физ.-мат. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Подобина В.М.**, д-р геол.-минерал. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Ромашова Т.В.**, канд. геогр. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Севастьянов В.В.**, д-р геогр. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Татьянин Г.М.**, канд. геол.-минерал. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия

Founder – Tomsk State University**“Geosphere Research”****International standard serial edition number: 2542-1379****Languages:** Russian, English**Publication are non-commercial basis (FREE)****Open access****Contacts:** 36 Lenin Avenue, Tomsk, Russia, 634050. Tomsk State University. Faculty of Geology and Geography; <http://journals.tsu.ru/geo>**EDITORIAL BOARD**

Editor-in-Chief: **Andrey E. Izokh**, Corresponding Member of RAS, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

Deputy Editor-in-Chief: **Andrey V. Shpansky**, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor of the Tomsk State University, Tomsk, Russia
E-mail: shpansky@ggf.tsu.ru

Executive Editor: **Evgeniya M. Asochakova**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Assistant Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia
E-mail: gsr_tsu@mail.ru

Gordienko I.V., Corresponding Member of RAS, Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Gutak Ya.M., Professor, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Doroshkevich A.G., Head of Laboratory, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

Evseeva N.S., Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia

Zemtsov V.A., Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia

Kruk N.N., Corresponding Member of RAS, Director, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

Parnachov V.P., Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia

Pozdnyakov A.V., Professor, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

Reverdatto V.V., Member of RAS, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

Savichev O.G., Professor, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Sazonov A.M., Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Sklyarov E.V., Corresponding Member of RAS, Institute of the Earth Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Solomina O.N., Corresponding Member of RAS, Director of the Geography Institute RAS, Moscow, Russia

Khudoley A.K., Professor, St. Petersburg University, St. Petersburg, Russia

Tsygankov A.A., Director, Geological Institute of SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Chernyshov A.I., Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia

Yarmolyuk V.V., Member of RAS, Institute of the Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, Russia

David Banks, CGeol, Holymoor Consultancy, Chesterfield, UK

Gabriel Gutierrez-Alonso, Professor, Salamanca University, Salamanca, Spain

Pokrovsky O.S., Leading Scientist, the Observatory Midi-Pyrénées of CNRS, Toulouse, France

Tran Trong Hoa, Chief Scientist, Geological Institute of the Vietnam Academy of Sciences and Technologies, Hanoi, Vietnam

Chamberlain K.R., Research Professor, Department of Geology & Geophysics, University of Wyoming, Laramie, USA

Ernst A.A., Professor, Hamburg University, Hamburg, Germany

Richard E. Ernst, Professor, Carleton University, Ottawa, Canada

EDITORIAL COUNCIL

Gertner I.F., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Gorbatenko V.P.**, Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Grinev O.M.**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Kvasnikova Z.N.**, Cand. Sci. (Geogr.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Krasnova T.S.**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Kuzhevskaia I.V.**, Cand. Sci. (Geogr.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Leshchinskiy S.V.**, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Lychagin D.V.**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Podobina V.M.**, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Romashova T.V.**, Cand. Sci. (Geogr.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Sevast'yanov V.V.**, Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Tat'yanin G.M.**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Tishin P.A.**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Tomsk State University, Tomsk, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Драчев С.С., Кац В.Е., Шитов А.В., Дутова Е.М., Покровский В.Д. Анализ влияния землетрясений и промышленных взрывов на температуру подземных вод (Горный Алтай)	6
Плюснин А.В., Мотова З.Л., Валеев Р.Р., Томилина Е.М., Фомин В.А. Состав и условия формирования терригенных пород непской свиты вендинского возраста центральной части Непско-Ботуобинской антеклизы (по результатам изучения керна скважины ВЧ-3Х)	19

ПЕТРОЛОГИЯ

Алымова Н.В., Воронцов А.А., Лыхин Д.А., Никифоров А.В., Андреева О.А., Бычков А.Ю., Белозерова О.Ю., Посохов В.Ф., Сотникова И.А. Амфиболсодержащие граниты Зашихинского месторождения (Восточный Саян)	34
Гатауллин Р.А., Савельев Д.Е., Киселева Д.В. Ультрамафиты и мафиты массива Северный Крака (Южный Урал): петрография, минералогия и геохимия	47

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Редин Ю.О., Малютина А.В., Дульцев В.Ф. Геохимический состав циркона из различных магматических пород, ассоциирующих с разными типами оруденения (Восточное Забайкалье): разработка инновационных методов прогноза и поисков месторождений металлов	61
---	----

ГЛЯЦИОЛОГИЯ

Ананичева М.Д., Кононов Ю.М. Изменения ледников Корякского нагорья в период с 1972 по 2019 г.	72
--	----

ГИДРОЛОГИЯ

Харанжевская Ю.А., Синюткина А.А. Влияние микрорельефа и степени выгорания поверхности на водно-физические свойства торфяной залежи и характеристики химического состава вод постприогенных болот Западной Сибири	89
---	----

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Абрамов Б.Н., Цыренов Т.Г. Техноземы хвостохранилищ вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья: геохимические особенности, воздействие на окружающую среду	101
--	-----

Buryak Zh.A., Narozhnyaya A.G., Poletaev A.O. River basins of the Crimean Peninsula: Spatial differentiation in agroecological state and risks of soil degradation	114
--	-----

Косова Е.А., Филандышева Л.Б., Макаренко Е.П. Анализ динамики временных характеристик сезонов года в арктической тундре Западно-Сибирской равнины в условиях глобального изменения климата	126
--	-----

Майсюк Е.П., Иванова И.Ю., Санеев Б.Г. Структура выбросов парниковых газов от объектов добычи топливно-энергетических ресурсов в регионах России	139
--	-----

Стручкова Г.П., Капитонова Т.А., Крупнова Т.Г., Тихонова С.А., Тарская Л.Е., Ракова О.В. Картографирование потенциальной опасности лесных пожаров с использованием статистических методов, ГИС и спутниковых снимков	154
--	-----

Чебыкин Е.П., Куликова Н.Н., Лихошвай Е.В., Сутурин А.Н. Загрязнение поверхностных вод лitorали оз. Байкал в зоне влияния сточных вод канализационных очистных сооружений г. Байкальска: оценка геохимическим методом	165
---	-----

Исправление в статье Подобина В.М. Стратиграфический потенциал атаксофрагмий (фораминиферы) для меловых отложений Западной Сибири	183
---	-----

CONTENTS

REGIONAL GEOLOGY

Drachev S.S., Kats V.E., Shitov A.V., Dutova E.M., Pokrovskiy V.D. Analysis of the impact of earthquakes and industrial explosions on groundwater temperature (Gorny Altai)	6
Plyusnin A.V., Motova Z.L., Valeev R.R., Tomilina E.M., Fomin V.A. Composition and formation conditions of the terrigenous rocks of the Nepa Formation of the Vendian age in the central part of the Nepa-Botuoba antecline (based on the results of studying the core of the VCh-3Kh well)	19

PETROLOGY

Alyanova N.V., Vorontsov A.A., Lykhin D.A., Nikiforov A.V., Andreeva O.A., Bychkov A.Y., Belozerova O.Y., Posokhov V.F., Sotnikova I.A. Amphibole-bearing granites of the Zashikhinsky deposit (East Sayan)	34
Gataullin R.A., Saveliev D.E., Kiseleva D.V. Ultramafic and mafic rocks of the Northern Kraka massif (Southern Urals): petrography, mineralogy and geochemistry	47

GEOLOGY OF DEPOSITS

Redin Yu.O., Malyutina A.V., Dultsev V.F. Geochemical composition of zircon from various igneous rocks associated with different types of mineralization (Eastern Transbaikalia): development of innovative methods forecasting and searching for metal deposits	61
---	----

GLACIOLOGY

Ananicheva M.D., Kononov Yu.M. Glacier change on the Koryak Highlands, North-East Asia, between 1972 and 2019	72
--	----

HYDROLOGY

Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A. Microtopography and surface burning effects on peat hydrophysical properties and water chemistry of mires in Western Siberia	89
--	----

GEOECOLOGY

Abramov B.N., Tsyrenov T.G. Technozems of tungsten deposit tailings dumps of the Eastern Transbaikalia: geochemical features, environmental impact	101
---	-----

Buryak Zh.A., Narozhnyaya A.G., Poletaev A.O. River basins of the Crimean Peninsula: spatial differentiation in agroecological state and risks of soil degradation	114
---	-----

Kosova E.A., Filandysheva L.B., Makarenko E.P. Analysis of the dynamics of temporal characteristics of the seasons of the year in the arctic tundra of the West Siberian plain under the conditions of global climate change	126
---	-----

Maysyuk E.P., Ivanova I.Yu., Saneev B.G. Structure of greenhouse gas emissions from fossil fuel production facilities in Russian regions	139
---	-----

Struchkova G.P., Kapitonova T.A., Krupnova T.G., Tikhonova S.A., L.E. Tarskaya, Rakova O.V. Mapping the potential danger of forest fires using statistical methods, GIS and satellite images	154
---	-----

Chebykin E.P., Kulikova N.N., Likhoshway Ye.V., Suturin A.N. Pollution of Lake Baikal littoral surface waters in the zone of influence of wastewater from the Baikalsk town wastewater treatment facilities: assessment by geochemical method	165
--	-----

Erratum to article Podobina V.M. “Stratigraphic potential of Ataxophragmiida (Foraminifera) for Cretaceous sediments of Western Siberia”	183
---	-----

РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 556

doi: 10.17223/25421379/35/1

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВОВ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОДЗЕМНЫХ ВОД (ГОРНЫЙ АЛТАЙ)

Сергей Сергеевич Драчев¹, Валентина Елизаровна Кац², Александр Викторович Шитов³, Екатерина Матвеевна Дутова⁴, Виталий Дмитриевич Покровский⁵



^{1, 4} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

² АО «Геологическое предприятие «Алтай-Гео», с. Майма, Россия

³ Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск, Россия

^{4, 5} Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

¹ oldwolf07@yandex.ru

² altai.geo@yandex.ru

³ sav103@yandex.ru

⁴ dutova@tpu.ru

⁵ pokrovskiy.v@gmail.com

Аннотация. Рассмотрено влияние сейсмических событий на температуру подземных вод на примере участка недр с повышенной тензочувствительностью (наблюдательная скважина на пункте ГОНС «Северная», ул. Северная, 16). Выполнен анализ обширного массива мониторинговых данных; выявлена корреляционная связь между суммарной сейсмической энергией, высвобожденной при землетрясениях и промышленных взрывах, и температурой подземных вод. Показано, что даже отдаленные землетрясения и техногенные сейсмические воздействия способны вызывать заметные изменения температуры подземных вод в рассматриваемой точке наблюдений.

Ключевые слова: Горный Алтай, подземные воды, температура, землетрясения, промышленные взрывы

Для цитирования: Драчев С.С., Кац В.Е., Шитов А.В., Дутова Е.М., Покровский В.Д. Анализ влияния землетрясений и промышленных взрывов на температуру подземных вод (Горный Алтай) // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 6–18. doi: 10.17223/25421379/35/1

Original article

doi: 10.17223/25421379/35/1

ANALYSIS OF THE IMPACT OF EARTHQUAKES AND INDUSTRIAL EXPLOSIONS ON GROUNDWATER TEMPERATURE (GORNY ALTAI)

Sergey S. Dravchev¹, Valentina E. Kats², Alexander V. Shitov³, Ekaterina M. Dutova⁴, Vitaliy D. Pokrovskiy⁵

^{1, 4} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

² Open Joint-Stock Company "Geological Enterprise Altai-Geo", Mayma, Russia

³ Gorno-Altaisk State University, Gorno-Altaisk, Russia

^{4, 5} National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

¹ oldwolf07@yandex.ru

² altai.geo@yandex.ru

³ sav103@yandex.ru

⁴ dutova@tpu.ru

⁵ pokrovskiy.v@gmail.com

Abstract. This study was prompted by the major Chuya earthquake, which altered the chemical composition of groundwater in many springs across the Altai Republic. Several springs within the city of Gorno-Altaysk exhibited a significant rise in groundwater temperature. At one of these springs, a long-term monitoring station was established to record groundwater quality. The paper assesses the impact of seismic events on groundwater temperature at a highly tensio-sensitive subsurface site (observation borehole at the State Reference Observation Network (SRON) station "Severnaya", 16 Severnaya St.), located within the mountain-fold structures of the Altai-Sayan orogenic region. An extensive monitoring dataset was analysed, revealing a correlation between the cumulative seismic energy released by earthquakes and industrial blasts and the temperature of the groundwater. The results demonstrate that even distant earthquakes and anthropogenic seismic impacts can induce noticeable temperature variations at the observation point. Possible mechanisms governing the influence of seismic events on groundwater temperature are discussed, including the periodically reversing correlation sign – from positive to negative – between spring temperature and the seismic

energy released. Seismic energy values were derived by recalculating event magnitudes using a refined Gutenberg–Richter relationship. The findings indicate a direct link between groundwater temperature at the SRON (State Reference Observation Network) "Severnaya" station and seismic events of both natural and technogenic origin within the region. The abrupt reversal of the correlation sign 50–60 days after an event is attributed to the migration of deep fluids followed by infiltration of relatively cold groundwater. The influence of industrial explosions on the spring's parameters, despite their considerably lower energy, is explained by induced seismicity manifested as an increase in the magnitude of recorded events. This work continues a series of investigations aimed at identifying hydrogeological and hydrogeochemical precursors of hazardous geodynamic events, a task made urgent by the very low predictive accuracy of current earthquake-forecasting methods.

Keywords: Gorny Altai, groundwater, temperature, earthquakes, industrial explosions

For citation: Drachev S.S., Kats V.E., Shitov A.V., Dutova E.M., Pokrovskiy V.D. (2025) Analysis of the impact of earthquakes and industrial explosions on groundwater temperature (Gorny Altai). *Geofernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2. pp. 6–18. doi: 10.17223/25421379/35/1

Введение

Изучение состава и режима подземных вод неразрывно связано с факторами, оказывающими на них влияние, одним из них выступают процессы, сопровождающиеся сейсмическими событиями. При этом необходимо иметь в виду, что массивы горных пород разделены сетью разломов и имеют различные физические свойства, а также насыщены различными флюидами. По разломной сети, в результате напряженного состояния блоков, осуществляется транспортировка флюидов, как из глубин к поверхности, так из соседних регионов, что в свою очередь сказывается на изменении химического состава грунтовых вод [Уткин, Юрков, 1997; Claesson, Skelton et al., 2007; Киссин, 2009; Skelton, Andren et al., 2014; Копылова, Болдина, 2019; Вартанян, 2024].

Данная работа продолжает выполненные ранее нами исследования по поиску гидрогеологических, гидрохимических предвестников землетрясений [Кац и др., 2010; Шитов, Кац и др., 2016; Дутова и др., 2020, 2022, 2023], однозначно указывающих на влияние сейсмических событий на гидродинамический режим и качественный состав подземных вод, как регионального, так и локального характера.

Целью этой работы является изучение влияния землетрясений в Алтае-Саянской горной области и промышленных взрывов, производимых на горных выработках Кемеровской области, на температурные характеристики подземных вод Республики Алтай.

Характеристика объекта и методика исследований

Территория Республики Алтай входит в состав Алтае-Саянской горной области. Большую часть ее территории (85 %) занимают горно-складчатые сооружения с массивами трещинных вод. Существенно меньшую часть (15 %) занимают артезианские бассейны (Чуйский, Уймонский, Бертекский, Курайский и Джулукульский). В условиях гидрогеологических массивов подземные воды приурочены к трещинным, трещинно-жильным, трещинно-карстовым и карсто-

вым коллекторам в осадочных, вулканогенных, метаморфических и интрузивных породах широкого возрастного диапазона – от мезозойского до протерозойского. В условиях чехла артезианских бассейнов подземные воды сосредоточены в порово-пластовых коллекторах четвертичных, неогеновых и палеогеновых отложений. В зонах контактов массивов и бассейнов, в фундаменте артезианских бассейнов широкое распространение имеют воды зон тектонических нарушений, характеризующиеся глубокой циркуляцией их и часто контролирующейся родниковой разгрузкой [Дутова и др., 2020].

Мониторинг подземных вод на территории Республики Алтай осуществляется Территориальным центром «Алтайгеомониторинг», являющимся структурным подразделением ОАО «Геологическое предприятие АО «Алтай-Гео»». Мониторинг ведется на объектном (локальном), территориальном и региональном уровнях. В результате наблюдений фиксируются гидродинамический (уровень, дебит), температурный режимы и качественный состав подземных вод. Замеры температуры воды в скважинах осуществлялись электронным термометром (Щуп) с точностью измерения 0,5 °C.

Государственный наблюдательный пункт мониторинга (ГОНС) «Северная», расположенный в г. Горно-Алтайске по улице Северной, 16, представляет собой наблюдательную скважину глубиной около 10 м. Данная скважина каптирует совместный водоносный комплекс четвертичных отложений и водоносную зону вендо-нижнекембрийских пород.

Выбор данной точки мониторинга обусловлен её высокой тензочувствительностью и выраженной реакцией на крупное Чуйское землетрясение 2003 г., которое привело к существенным изменениям химического состава и температуры подземных вод (до 40 °C) и в ряде соседних наблюдательных пунктов [Шитов и др., 2008; Кац и др., 2010].

Начиная с 2003 г., сотрудники ТЦ «Алтайгеомониторинг» проводят регулярные измерения температуры подземных вод на данном пункте мониторинга. Измерения осуществляются с периодичностью один

раз в 10 дней при помощи электронного термометра после предварительной прокачки воды механическим насосом, что позволяет обеспечить стабильность и репрезентативность результатов.

Вмещающие породы, вскрытые скважиной до глубины 10 м, – делювиальные отложения, сложенные щебнистыми отломками терригенно-карбонатных пород, залегающие на сланцах, известняках и кварцитах. По имеющимся геологическим разрезам водозаборных скважин в районе пункта ГОНС водоносная зона

устанавливается до глубины 50 м. По геофизическим данным есть вероятность наличия ниже 50 м гранитоидного массива по типу Белокурихинского. На рис. 1 приведена схема разломных зон в регионе исследования, которые предположительно являются путями миграции глубинных флюидов, активно влияющих на гидрогеологические условия в пункте мониторинга «Северная». Схема помогает понять структурно-тектонические особенности региона и их связь с наблюдаемыми изменениями температуры подземных вод.

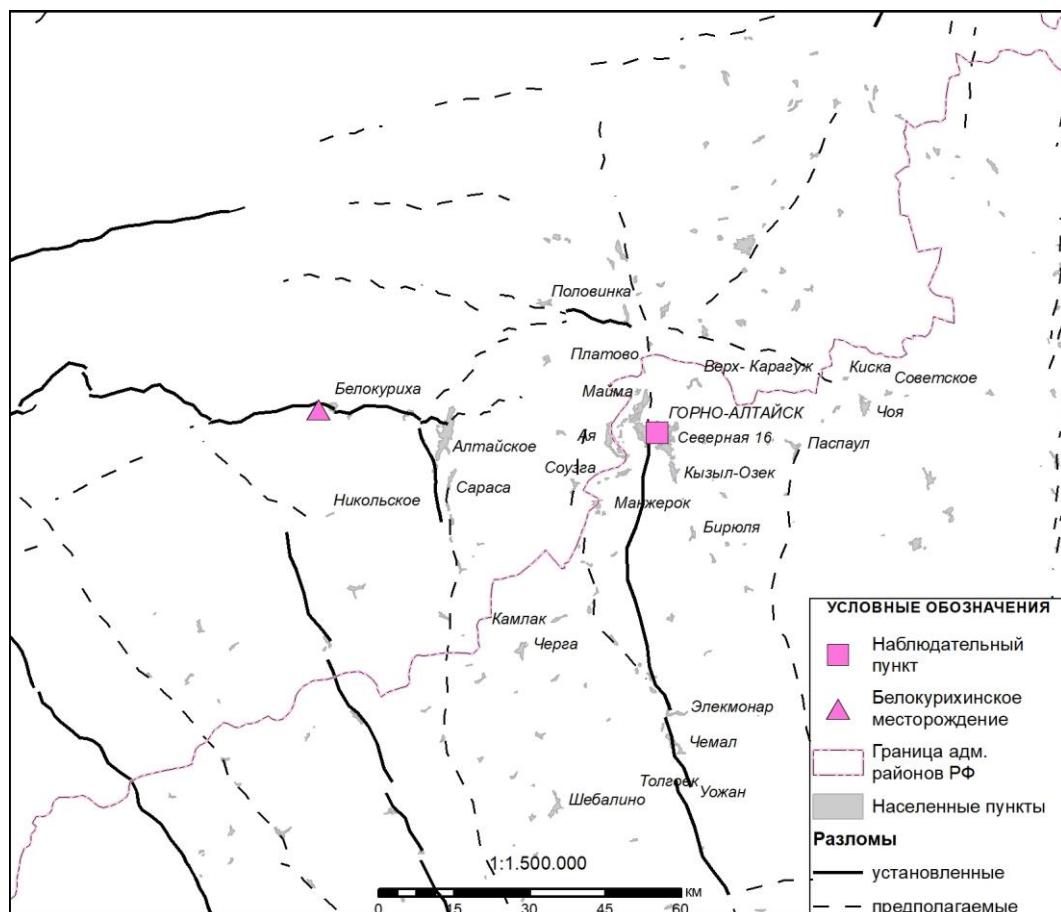


Рис. 1. Схема размещения объекта исследований и расположение разломных зон региона [Zelenin et al., 2022]

Fig. 1. Layout of the research site and the location of fault zones in the region [Zelenin et al., 2022]

Белокурихинское месторождение минеральных вод приурочено к зоне сопряжения отрогов Ануйского хребта Горного Алтая и Предалтайской равнины, вмещающими породами являются гранитоиды Белокурихинского массива. Подземные воды месторождения классифицируются как пресные (минерализация менее 1 г/дм³), сульфатно-гидрокарбонатные натриевые с щелочной реакцией водной среды (рН 9,5), термальные, теплые (температура 35–42 °С), слаборадоновые (5,0–8,1 нКи/дм³), кремнистые

(H_2SiO_3 – 62–74 мг/дм³), фторсодержащие (16–17 мг/дм³), сульфатно-гидрокарбонатные натриевые с щелочной реакцией водной среды (рН 9,5).

В результате крупного Чуйского землетрясения изменился химический состав подземных вод как в целом по Республике Алтай, так и локально, и значимо на отдельных участках. Такие участки, как правило, приурочены к зонам тектонических нарушений. Одним из таких участков оказалась наблюдательная скважина по ул. Северной.

В изучаемом пункте мониторинга состояния вод устанавливаются существенные колебания химического состава и температуры вод. Еще в начале мониторинга (в 2004 г.) было констатировано увеличение концентрации сульфатов с 8,5 мг/дм³ (фон, усредненное значение) до максимального значения 86,4 мг/дм³ (08.09.2004), хлоридов с 4,9 до 25,5 мг/дм³. Повысилась концентрация растворенной в воде углекислоты до 84,48 мг/дм³ (25.07.2004). Содержание метакремниевой кислоты увеличилось до 25,7–54,9 мг/дм³ [Шитов и др., 2005]. По химическому составу воды в скважине гидрокарбонатные, сульфатно-гидрокарбонатные кальциево-натриевые пресные с минерализацией 0,2–0,8 г/л. За период наблюдений увеличилась минерализация воды, менялся ее класс: с гидрокарбонатно-кальциевого на гидрокарбонатно-натриевый.

Концентрация радона в водных пробах по данным радиологической лаборатории ЦСЭН по Республике Алтай составляли 27–41 Бк/дм³. Количество радона в атмосферном воздухе в подполе усадьбы по ул. Северной – 876 Бк/дм³, что более чем в 8 раз превышает нормы НРБ-96 по природным источникам [Аптикаева и др., 2016].

Следует отметить, что основной интерес к объекту вызвало повышение температуры воды за весьма короткий срок, практически сразу после афтершока

(февраль 2004 г.). За период проведенных нами исследований температура воды в скважине изменялась от 37,0 °С (11.06.2004) до 48 °С (01.10.2004). При этом наблюдалось скачкообразное изменение значений температуры с понижением до 37,0 °С (первый минимум) и еще два понижения с минимумами до 35,0 °С (август) и 34,0 °С (сентябрь). Причем температура воды изменялась в пределах 36–37 °С при фоновой температуре подземных вод 7–9 °С. На рис. 2 отображена динамика изменения температуры подземных вод на ГОНС «Северная» в начале мониторинга (2004 г.). На графике наглядно представлены резкие колебания температуры, связанные с реакцией подземных вод на Чуйское землетрясение, подтверждая высокую чувствительность данной скважины к сейсмическим событиям.

В районе расположения ГОНС «Северная» в разные годы функционировали многочисленные гидрогеологические скважины. Дебиты скважин варьировали от 1,3 до 20 л/с, статический уровень колебался от 1,1 до 12 м, а температура изменялась от 16 до 30 °С.

Температура почвы в закопушах на глубине 30–40 см составила 23–25 °С при температуре воздуха 7 °С (25.09.2004). Температура воздуха в подполе дома в зимний период равнялась 20 °С, несмотря на сильные морозы в феврале.

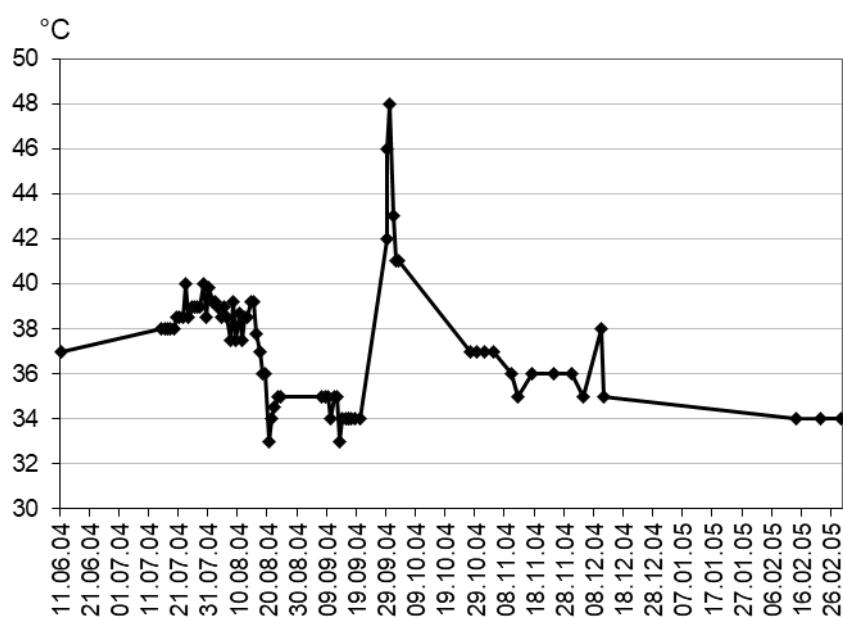


Рис. 2. Динамика изменения температуры на ГОНС «Северная» в начале мониторинга

Fig. 2. Temperature dynamics at the GONS Severnaya station at the beginning of the monitoring period

В период 14.01–24.03.2021 нами проводились краткосрочные ежесуточные исследования для выявления реагирования геохимических характеристик подземных вод на сейсмические события. Было установлено, что Хубсугульское землетрясение (2021 г.)

оказало влияние на геохимический состав вод ГОНС «Северная» (Горно-Алтайск), где в момент основного толчка отмечено резкое изменение измеряемых характеристик (температуры, pH, Eh) [Дутова и др., 2022]. Установленный факт влияния Хубсугульского

землетрясения на состояние подземных вод свидетельствует о том, что подземные воды данной точки мониторинга могут реагировать даже на землетрясения, удаленные на расстояния более 1000 км.

Как показали последующие исследования, химический состав вод в колонке за период наблюдений с 2004–2023 гг. весьма чутко реагирует на все малоамплитудные сейсмические события как в эпицентralной части Чуйского (2003 г.) землетрясения, так и на сейсмические события в Алтае-Саянском регионе (на сопредельных территориях). Воды скважины можно рассматривать в качестве индикатора сейсмических событий [Кац и др., 2010].

Для изучения влияния энергии землетрясений на характеристики подземных вод использовался пересчет магнитуды землетрясений в сейсмическую энергию, выраженную в эргах. Необходимо отметить, что известная формула Гутенберга – Рихтера [Gutenberg, Richter, 1956] в данном случае отличается от формулы (1) главным образом тем, что она была получена по записям сильных землетрясений ($M > 6$) на широкополосных приборах:

$$\log E = 1,5 \times M + 11,8. \quad (1)$$

В представленном виде соотношение уточнено по результатам обработки данных по 200 коровым землетрясениям с магнитудами $M > 6$, происходившими

на всем земном шаре, и по ряду более слабых ($4 < M < 6$) кавказских землетрясений [Садовский, 2004].

Результаты и обсуждение

Для оценки влияния землетрясений на температуру подземных вод в пункте мониторинга нами были использованы данные о сейсмических событиях и промышленных взрывах в Алтае-Саянской горной области, за период 2013–2023 гг. На рис. 3 показано местоположение ГОНС «Северная» относительно эпицентров землетрясений, произошедших за период 2013–2023 гг., что позволило оценить пространственное распределение сейсмической активности и её потенциальное влияние на пункт мониторинга.

Рис. 4 показывает местоположение ГОНС «Северная» относительно участков выполнения промышленных взрывов за 2013–2023 гг. [Алтае-Саянский..., 2025].

Для количественной оценки сейсмической энергии землетрясений использовался пересчёт магнитуд в энергию в эргах по уточнённой формуле Гутенберга – Рихтера.

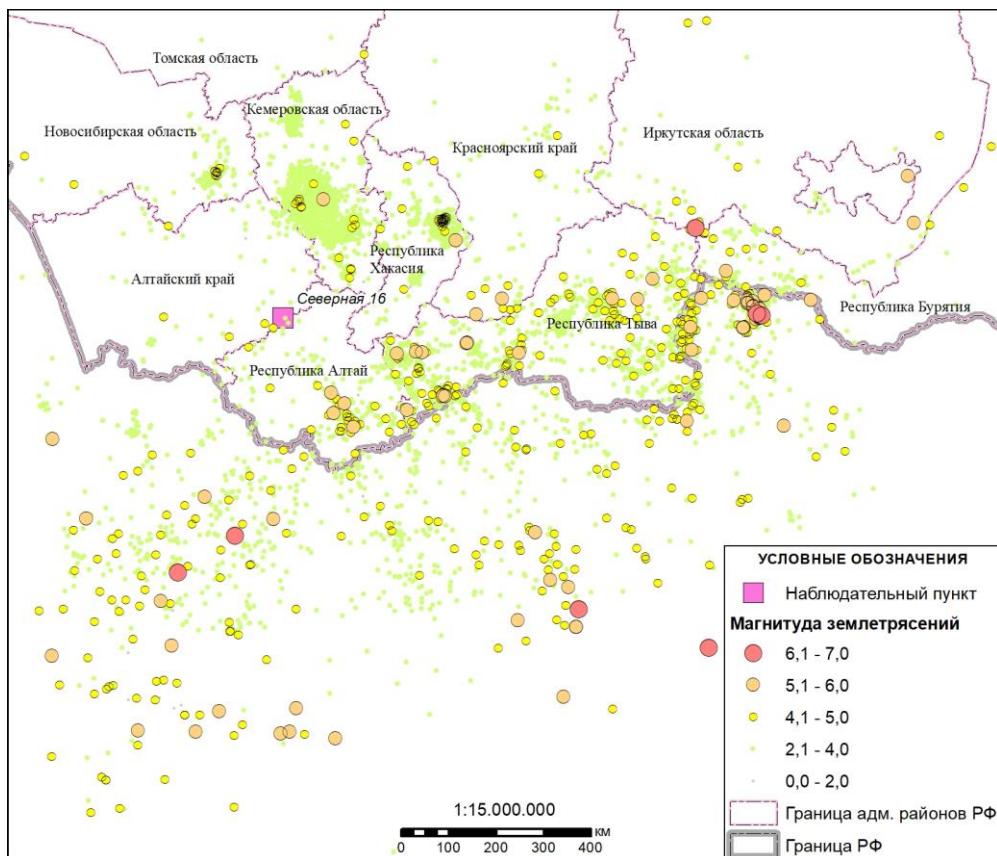


Рис. 3. Место расположения ГОНС «Северная» относительно эпицентров землетрясений за 2013–2023 гг. [Алтае-Саянский..., 2025]

Fig. 3. Location of the GONS Severnaya station relative to earthquake epicenters from 2013 to 2023 [Altai-Sayan..., 2025]

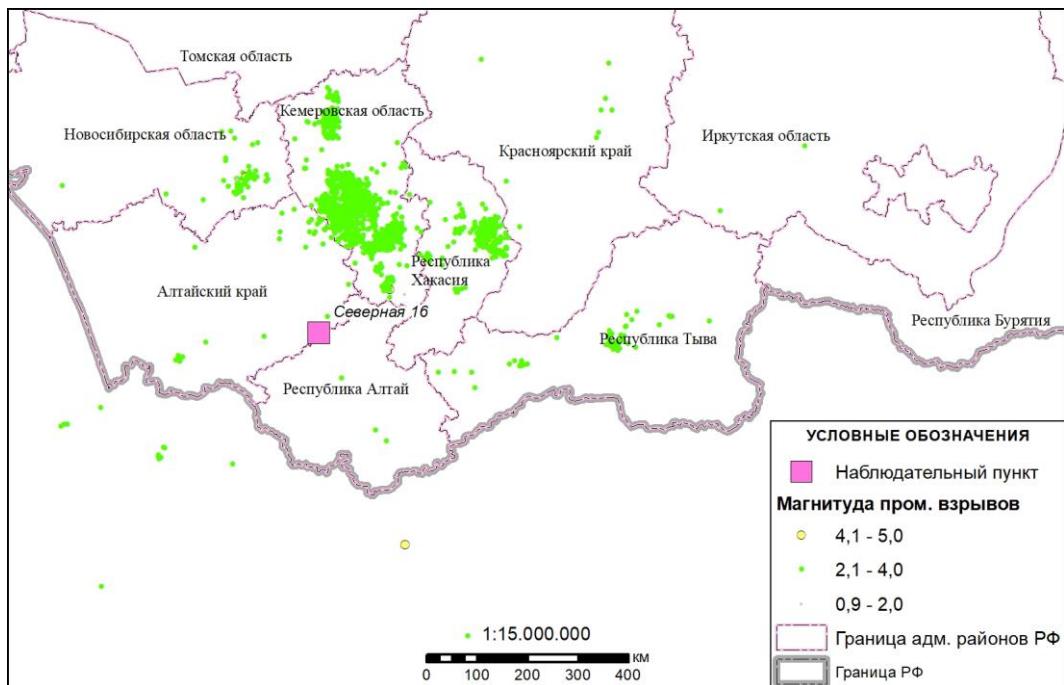


Рис. 4. Место расположения ГОНС «Северная» относительно участков выполнения промышленных взрывов за 2013–2023 гг. [Алтай-Саянский..., 2025]

Fig. 4. Location of the GONS Severnaya station relative to industrial blasting sites from 2013 to 2023 [Altai-Sayan..., 2025]

Для обеспечения единой временной привязки и сопоставимости данных сейсмическая энергия суммировалась в интервалы по 10 дней, что соответствует периоду измерения температуры на пункте мониторинга (5, 15 и 25-е числа каждого месяца). Таким образом, была получена совмещенная таблица температур и сейсмической энергии от землетрясений и взрывов в Алтай-Саянской горной области, представленная графически (см. рис. 5, 6). Результаты исследований, представленные на рисунках, иллюстрируют динамику температуры подземных вод и выделенной сейсмической энергии соответственно. Сопоставление этих графиков дает возможность наглядно проследить временные задержки и изменения корреляции между сейсмическими событиями и температурными реакциями подземных вод.

Помимо сейсмических событий в Алтай-Саянской горной области нами также учитывались взрывы, проводимые в результате горных работ в Кемеровской области. Данные о взрывах и их энергии получены по материалам Алтай-Саянского филиала Единой геофизической службы РАН (см. рис. 7) [Алтай-Саянский..., 2025]. Кемеровская область и взрывы, производимые на ее территории, расположены на расстоянии порядка первых сотен километров от пункта наблюдения, поэтому нами было предположено, что производимые взрывы также могут оказывать влияние на температуру подземных вод в пункте мониторинга.

Для анализа взаимосвязи между температурой подземных вод и энергией сейсмических событий применялся корреляционный анализ в скользящем временном окне. Данный подход выбран, исходя из необходимости учесть временные задержки и инерционность реакции гидрогеологических параметров на сейсмические и техногенные воздействия. Размер временного окна подбирался опытным путем, учитывая характерные временные интервалы реакции подземных вод на сейсмические события. В результате были выбраны два основных временных окна анализа: 120 и 300 сут.

Временное окно в 120 суток (соответствующее 12 измерениям при частоте 3 раза в месяц) было выбрано для выявления относительно краткосрочных эффектов от сейсмических событий и промышленных взрывов, проявляющихся в течение первых месяцев после воздействия. Временное окно в 300 сут (соответствующее 30 измерениям) использовалось для анализа долговременных реакций и позволило оценить затухающие и кумулятивные эффекты от нескольких последовательно произошедших событий. Выбор данных временных интервалов был обусловлен стремлением обеспечить оптимальный баланс между разрешающей способностью анализа и статистической значимостью получаемых корреляционных результатов.

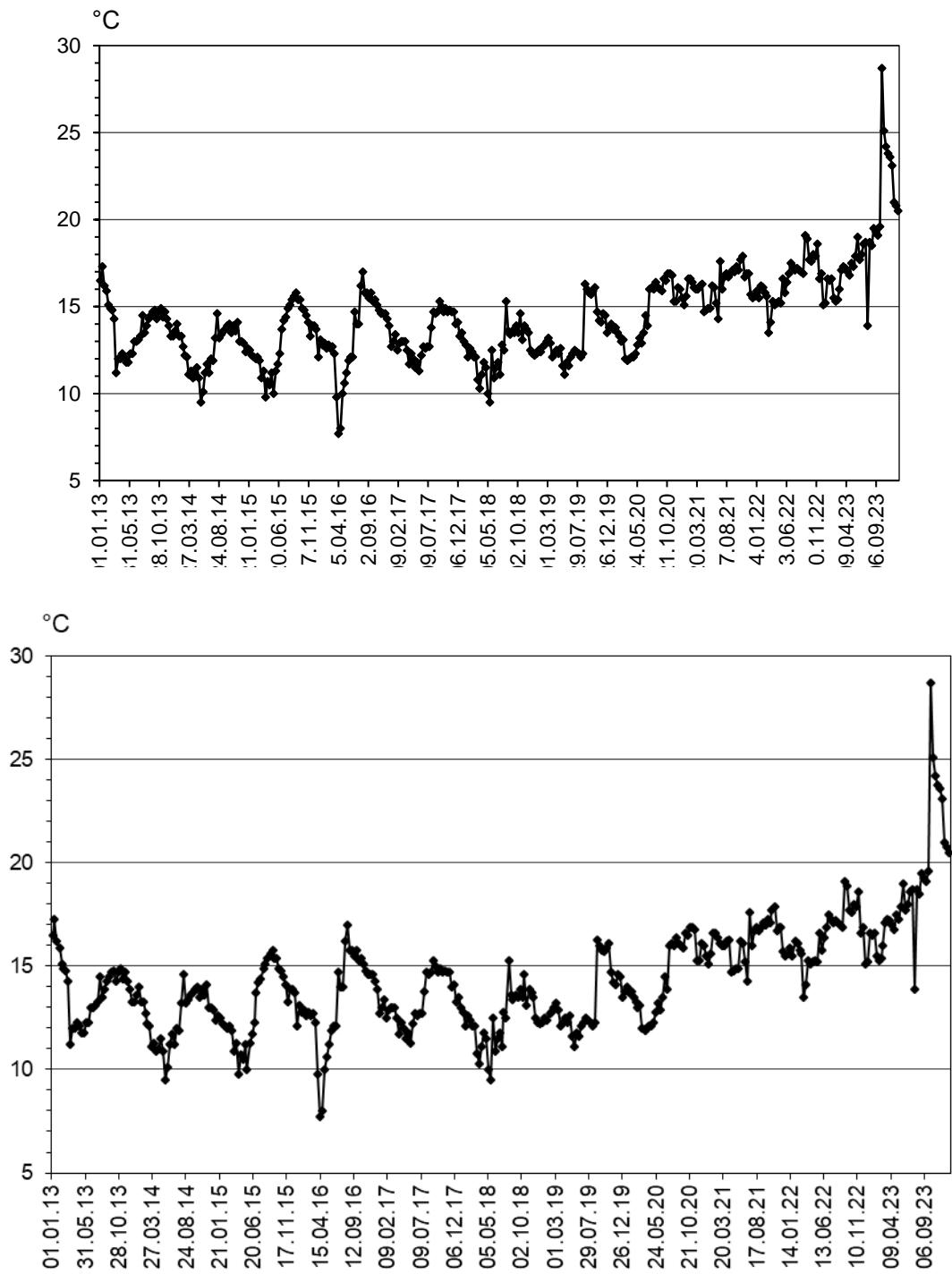


Рис. 5. Динамика изменения температуры подземных вод на ГОНС «Северная»

Fig. 5. Dynamics of groundwater temperature at the GONS Severnaya station

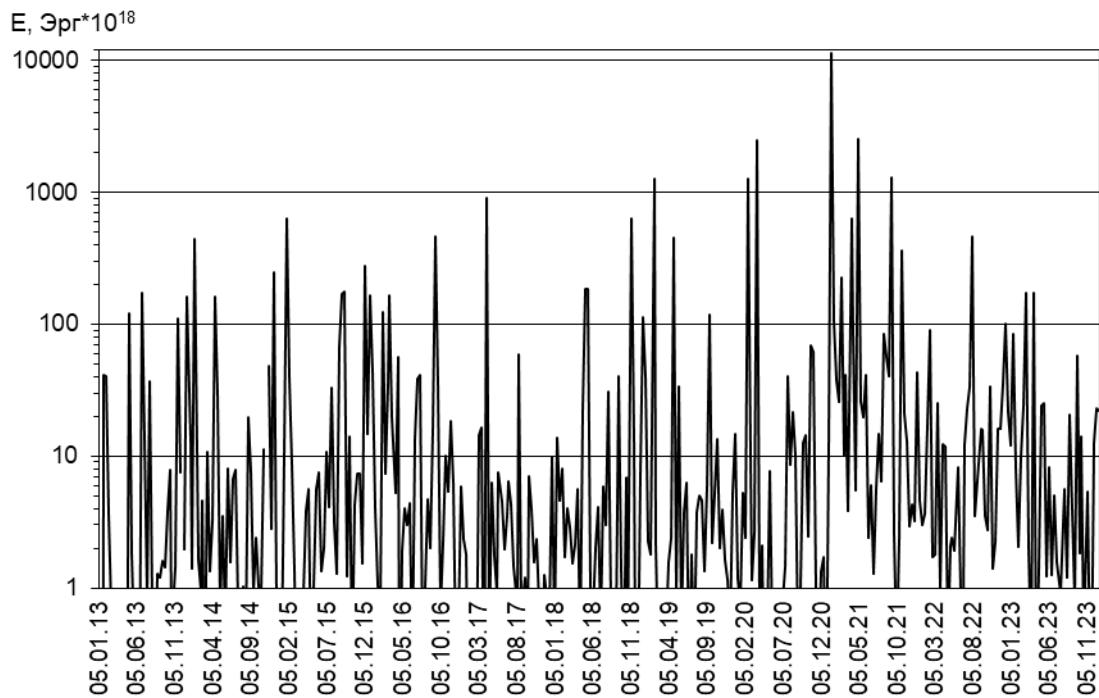


Рис. 6. Выделенная сейсмическая энергия в результате землетрясений в Алтай-Саянской горной области

Fig. 6. Released seismic energy from earthquakes in the Altai-Sayan mountain region

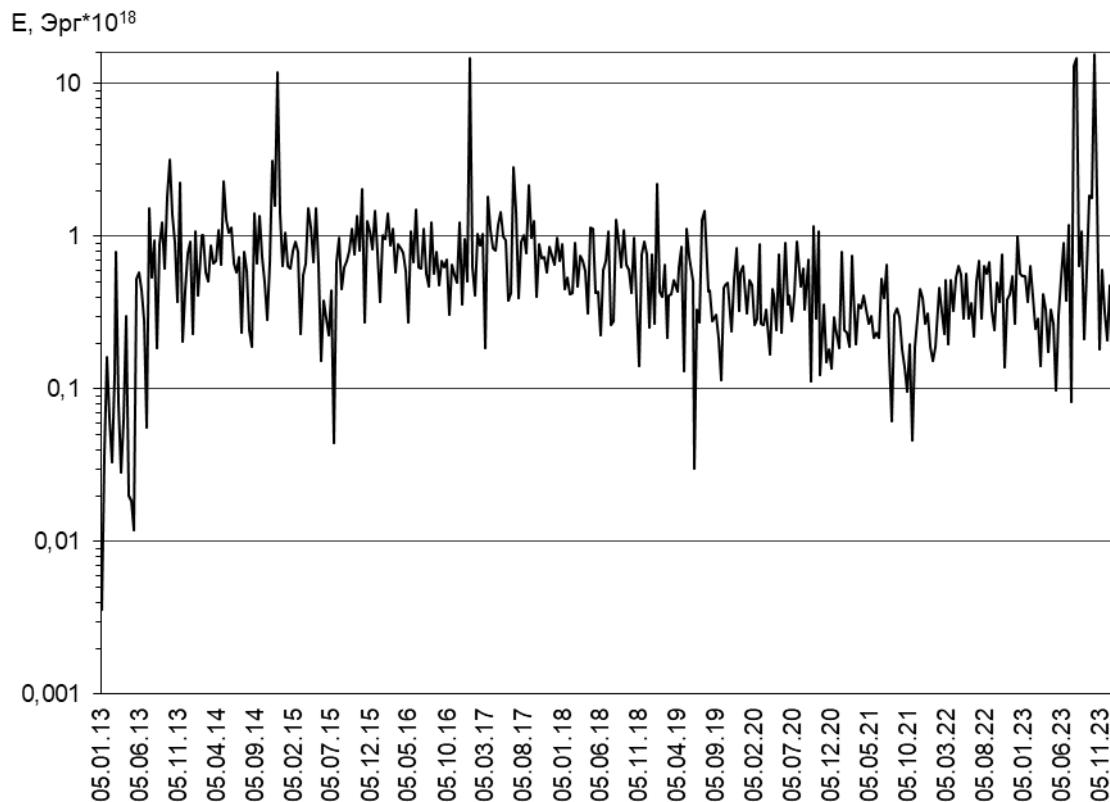


Рис. 7. Выделенная сейсмическая энергия в результате промышленных взрывов в Кемеровской области

Fig. 7. Released seismic energy from industrial explosions in the Kemerovo Region

Рис. 8, 9 показывают результаты корреляционного анализа с использованием окон в 120 и 300 сут соответственно. Эти графики демонстрируют, как изменяется сила и знак корреляционной связи в зависимости от временного окна и удаленности во времени от события.

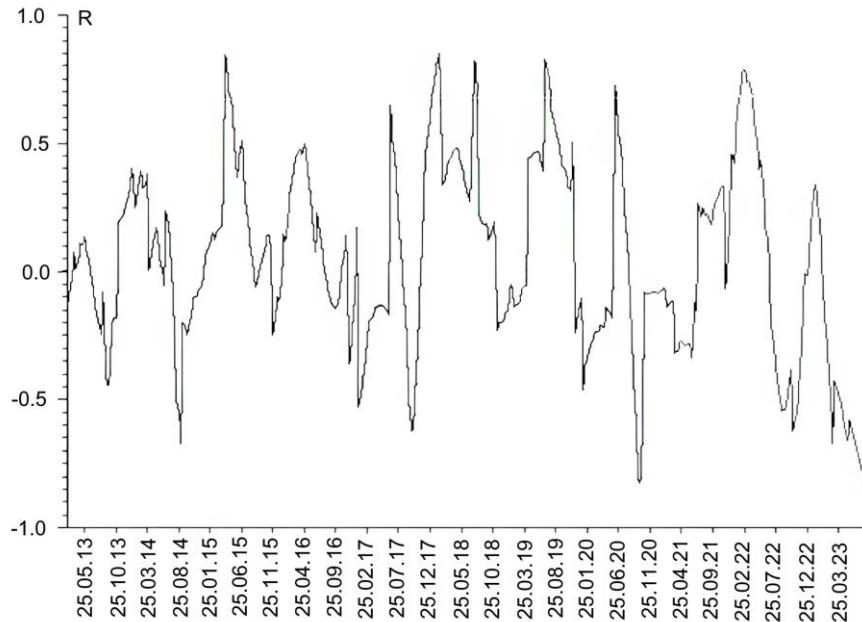


Рис. 8. Скользящие коэффициенты взаимной корреляции (R) рядов температуры подземных вод и выделенной сейсмической энергии в результате землетрясений в Алтае-Саянской горной области (lgE)
Частота опроса – 3 отсчета/мес; скользящее временное окно – 120 сут; доверительная корреляция при уровне значимости 0,05 – $r_{kp} = 0,576$

Fig. 8. Sliding mutual correlation coefficients (R) between groundwater temperature series and released seismic energy from earthquakes in the Altai-Sayan mountain region (lgE)
Sampling frequency – 3 points/month; sliding time window – 120 days; critical correlation coefficient at significance level 0,05 – $r_{cc} = 0,576$

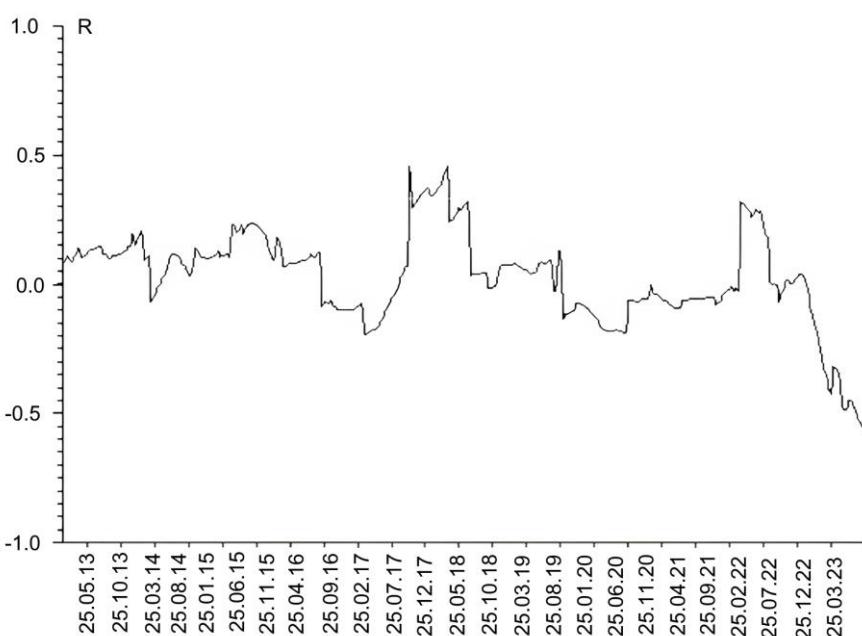


Рис. 9. Скользящие коэффициенты взаимной корреляции (R) ряда температуры подземных вод и ряда выделенной сейсмической энергии в результате землетрясений в Алтае-Саянской горной области (lgE)
Частота опроса – 3 отсчета/мес; скользящее временное окно – 300 сут; доверительная корреляция при уровне значимости 0,05 – $r_{kp} = 0,361$

Fig. 9. Sliding mutual correlation coefficients (R) between groundwater temperature series and released seismic energy series from earthquakes in the Altai-Sayan mountain region (lgE)
Sampling frequency – 3 points/month; sliding time window – 300 days; critical correlation coefficient at significance level 0,05 – $r_{cc} = 0,361$

При этом было выявлено, что большая часть сейсмических событий, происходивших в изучаемый период времени, отражается положительной связью с температурой в пункте мониторинга. Причем рост корреляции, особенно от удаленных землетрясений, наблюдается спустя 30–40 сут после сейсмического события.

При этом спустя 50–60 сут после землетрясения корреляция меняет знак на отрицательный. Таким образом, крупное землетрясение или серия афтершоков отмечается резким повышением степени связи между наблюдаемыми параметрами (до значимых величин) и затем таким же резким понижением.

Практически все крупные сейсмические события отмечаются повышением степени связи между температурой и выделенной сейсмической энергией, хотя не все достигают значимых величин корреляции.

Рис. 10, 11 отражают аналогичный анализ взаимосвязи температуры подземных вод с энергией промышленных взрывов в Кемеровской области, демонстрируя влияние техногенных факторов на гидрологические процессы.

В связи с расширением диапазона выборки скользящего временного окна (до 300 сут) (рис. 11) другие сейсмические события перебивают выявленные пики скользящей корреляции.

Анализ сопоставления значений температуры в пункте мониторинга и выделенной энергии промышленных взрывов в Кемеровской области показал, что несмотря на значительно более низкий уровень энергий, промышленные взрывы оказывают также влияние на характеристики температуры подземных вод в точке мониторинга (рис. 10, 11). Данный факт может быть обусловлен наведенной сейсмичностью от промышленных взрывов, выражаяющейся в увеличении событий с магнитудой 3–4 [Еманов и др., 2020], что характеризуется значительно большей сейсмической энергией, нежели сам взрыв, и может оказывать влияние на удаленные объекты.

При этом по кривой скользящего коэффициента корреляции очень хорошо прослеживается сезонность взрывов (при увеличении взрывов уровень корреляции повышается). При увеличении выборки до 300 сут сезонные характеристики стираются или объединяются в одну большую временную область повышенной связи между наблюдаемыми параметрами.

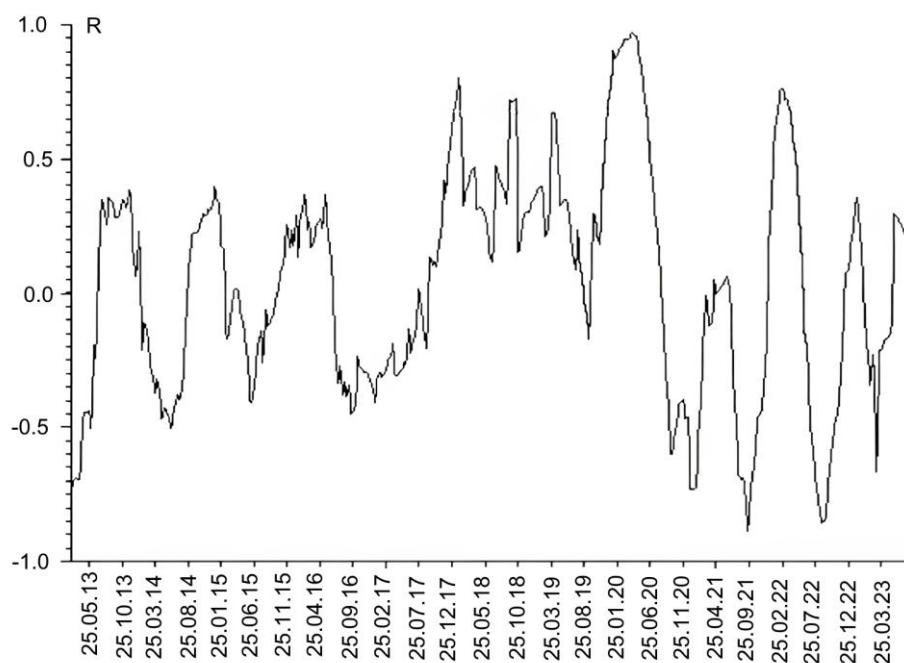


Рис. 10. Скользящие коэффициенты взаимной корреляции (R) рядов температуры подземных вод и выделенной сейсмической энергии от взрывов в Кемеровской области (lgE)

Частота опроса – 3 отсчета/мес; скользящее временное окно – 120 сут; доверительная корреляция при уровне значимости 0,05 – $r_{kp} = 0,576$

Fig. 10. Sliding mutual correlation coefficients (R) between groundwater temperature series and released seismic energy from explosions in the Kemerovo Region (lgE)

Sampling frequency – 3 points/month; sliding time window – 120 days; critical correlation coefficient at significance level 0,05 – $r_{cc} = 0,576$

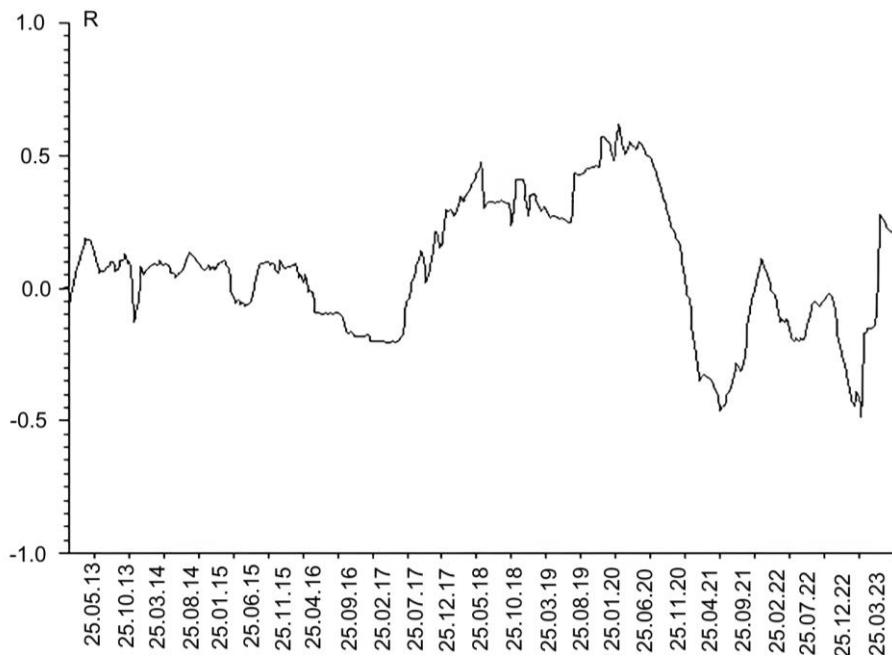


Рис. 11. Скользящие коэффициенты взаимной корреляции (R) ряда температуры подземных вод и ряда выделенной сейсмической энергии от взрывов в Кемеровской области (lgE)

Частота опроса – 3 отсчета/мес; скользящее временное окно – 300 сут; доверительная корреляция при уровне значимости 0,05 – $r_{\text{kp}} = 0,361$

Fig. 11. Sliding mutual correlation coefficients (R) between groundwater temperature series and released seismic energy series from explosions in the Kemerovo Region (lgE)

Sampling frequency – 3 points/month; sliding time window – 300 days; critical correlation coefficient at significance level 0,05 – $r_{\text{cc}} = 0,361$

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что изменения температуры подземных вод в пункте наблюдений ГОНС «Северная» напрямую связаны с сейсмическими и техногенными событиями в регионе. Особый интерес представляет выявленное изменение знака корреляционной связи с положительного на отрицательный спустя 50–60 сут после событий. Подобные изменения могут быть связаны с комплексом геодинамических процессов и требуют более детального анализа.

Одной из возможных причин такого явления является процесс миграции глубинных флюидов, активизирующийся вследствие изменения напряженно-деформированного состояния земной коры после землетрясений или промышленных взрывов. В период сразу после сейсмического события разломные зоны раскрываются и проницаемость пород увеличивается, что приводит к интенсификации вертикальной миграции теплых флюидов и, как следствие, повышению температуры подземных вод. В последующие

периоды, когда напряжение в породах начинает снижаться и проницаемость постепенно уменьшается, интенсивность флюидной миграции снижается, и это отражается в изменении корреляционной связи на отрицательную.

Также возможно, что негативная корреляция обусловлена охлаждением водоносного горизонта в результате поступления холодных поверхностных или инфильтрационных вод, активизированного тем же изменением проницаемости пород после пикового момента раскрытия разломов. Таким образом, наблюдаемое изменение знака корреляции является отражением сложного взаимодействия между вертикальной и горизонтальной миграцией различных типов флюидов, изменения гидродинамических условий и напряженно-деформированного состояния массива пород.

Дополнительные исследования, включая проведение геохимического и изотопного анализа флюидов, позволяют уточнить механизмы их миграции и лучше понять природу наблюдаемых гидрологических явлений.

Список источников

- Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН». Оперативные сообщения о сейсмических событиях. Новосибирск, 2025. URL: <https://asgsr.ru/node/1> (дата обращения: 23.01.2025).
 Аптикаева О.И., Шитов А.В. Динамика радионовой активности в связи с землетрясениями (на примере Алтайской сейсмоактивной области) // Геофизические процессы и биосфера. 2016. Т. 15, № 1. С. 25–42.

Вартанян Г.С. Флюидосфера и эндодренаж Земли: Некоторые геофизические и биофизические последствия // Геофизические процессы и биосфера. 2024. Т. 23, № 1. С. 65–79. doi: 10.21455/GPB2024.1-4

Дутова Е.М., Кац В.Е., Шитов А.В., Сурнин А.И., Молоков В.А. Гелий в подземных водах Республики Алтай // Геодинамика и тектонофизика. 2020. № 11 (3). С. 651–663. doi: 10.5800/GT-2020-11-3-0497

Дутова Е.М., Кац В.Е., Шитов А.В., Сурнин А.И., Драчев С.С. Результаты краткосрочного мониторинга содержания гелия и обобщенных показателей в подземных водах Горного Алтая // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. С. 38–46.

Дутова Е.М., Шитов А.В., Кац В.Е., Драчев С.С. Динамика гелия в подземных водах Горного Алтая // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами : материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием имени профессора С.Л. Шварцева, Томск, 16–21 октября 2023 г. Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. С. 339–342. EDN UEFHDO.

Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г., Куприш О.В. Наведённая сейсмичность в угольных и железорудных районах Кузбасса // Российский сейсмологический журнал. 2020. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/navedyonnaya-seysmichnost-v-ugolnyh-i-zhelezorudnyh-rayonah-kuzbassa> (дата обращения: 03.04.2025).

Кац В.Е., Шитов А.В., Драчёв С.С. О механизмах изменения химического состава и температуры подземных вод в районе Горно-Алтайска // Геоэкология. 2010. № 3. С. 207–212.

Киссин И.Г. Флюиды в земной коре. Геофизический и тектонический аспекты. Институт физики Земли. М. : Наука, 2009. 329 с.

Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогоесисмологические исследования на Камчатке: 1977–2017 гг. // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 3–20.

Садовский М.А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва / отв. ред. В.В. Адушкин. М. : Наука, 2004. 440 с.

Уткин В.И., Юрков А.К. Радон и проблема тектонических землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1997. № 4. С. 84–92.

Шитов А.В., Ушакова В.Г., Больбух Т.В., Гвоздарев А.Ю., Кочеева Н.А. Термальные источники, активизировавшиеся после сейсмической деятельности на территории Горного Алтая // Геоэкология Алтас-Саянской горной страны: Ежегодный международный сборник. Горно-Алтайск : РИО, 2005. С. 112–118.

Шитов А.В., Кац В.Е., Харькина М.А. Эколого-геодинамическая оценка Чуйского землетрясения // Вестник Московского университета. Сер. Геология. 2008. № 3. С. 41–47.

Шитов А.В., Кац В.Е., Дутова Е.М., Молоков В.Ю., Покровский В.Д. Изменение химического состава подземных вод Республики Алтай при землетрясениях // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, № 1. С. 19–29.

Claesson L., Skelton A. et al. The timescale and mechanisms of fault sealing and water-rock interaction after an earthquake // Geofluids. 2007. № 7 (4). P. 427–440.

Gutenberg B., Richter C. Magnitude and energy of earthquakes // Annals of Geophysics. 1956. V. 9, № 1. P. 1–15.

Zelenin E.A., Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // Earth System Science Data. 2022. V. 14. P. 4489–4503. URL: <https://essd.copernicus.org/articles/14/4489/2022/> (Date of accessed: 07.04.2025).

Skelton A., Andren M. et al. Changes in groundwater chemistry before two consecutive earthquakes in Iceland // Nature Geoscience. 2014. № 7 (10). P. 752–756.

References

Altaye-Sayan斯基 filial Federal'nogo issledovatel'skogo tsentra «Edinaya geofizicheskaya sluzhba RAN». Operativnyye soobshcheniya o seismicheskikh sobytiyakh [Altai-Sayan Branch of the Federal Research Center 'Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences'. Operational reports on seismic events] Electronic resource. Novosibirsk, 2025. <https://asgsr.ru/node/1> (Date of accessed: 23.01.2025). In Russian

Aptikaeva O.I., Shitov A.V. Radon activity dynamics in connection with earthquakes (case study of the Altai seismic region) // Geophysical Processes and Biosphere. 2016. V. 15, No. 1. pp. 25–42. In Russian

Vartanyan G.S. The fluidosphere and Earth's endodrainage: Some geophysical and biophysical consequences // Geophysical Processes and Biosphere. 2024. V. 23, No. 1. pp. 65–79. <https://doi.org/10.21455/GPB2024.1-4>. In Russian

Dutova E.M., Kats V.E., Shitov A.V., Surnin A.I., Molokov V.A. Helium in groundwater of the Altai Republic // Geodynamics and Tectonophysics. 2020. V. 11, No. 3. pp. 651–663. doi: 10.5800/GT-2020-11-3-0497. In Russian

Dutova E.M., Kats V.E., Shitov A.V., Surnin A.I., Drachev S.S. Results of short-term monitoring of helium and general indicators in the groundwater of Gorny Altai // Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo-Resource Engineering. 2022. V. 333. pp. 38–46. In Russian

Dutova E.M., Shitov A.V., Kats V.E., Drachev S.S. *Dinamika gelya v podzemnykh vodakh Gornogo Altaya* [Helium dynamics in the groundwater of Gorny Altai] // *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeystviya vody s gornymi porodami: Materialy V Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezdunarodnym uchastiyem imeni professora S.L. Shvartseva, Tomsk, 16–21 oktyabrya 2023 goda* [Geological Evolution of Water-Rock Interaction: Proceedings of the 5th All-Russian Scientific Conference with International Participation named after Prof. S.L. Shvartsev, Tomsk, October 16–21, 2023]. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2023. pp. 339–342. EDN UEFHDO. In Russian

Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Shevkunova E.V., Podkorytova V.G., Kuprish O.V. *Navedennaya seysmichnost' v ugol'nykh i zhelezorudnykh rayonakh Kuzbassa* [Induced seismicity in coal and iron ore areas of Kuzbass] // Russian Seismological Journal. 2020. No. 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/navedyonnaya-seysmichnost-v-ugolnyh-i-zhelezorudnyh-rayonah-kuzbassa> (Date of accessed: 03.04.2025). In Russian

Kats V.E., Shitov A.V., Drachev S.S. On the mechanisms of changes in the chemical composition and temperature of groundwater in the Gorno-Altaisk region // *Geoekologiya* [Geoecology]. 2010. No. 3. pp. 207–212. In Russian

Kissin I.G. *Flyuidy v zemnoy kore. Geofizicheskiy i tektonicheskiy aspekty* [Fluids in the Earth's Crust: Geophysical and Tectonic Aspects]. Institute of the Physics of the Earth. Moscow: Nauka, 2009. 329 p. In Russian

- Kopylova G.N., Boldina S.V. Hydrogeo-seismological studies in Kamchatka: 1977–2017 // *Vulkanologiya i seismologiya* [Volcanology and Seismology]. 2019. No. 2. pp. 3–20. In Russian
- Sadovsky M.A. *Izbrannyye trudy: Geofizika i fizika vzryva* [Selected Works: Geophysics and Explosion Physics] Ed. by V.V. Adushkin. Moscow: Nauka, 2004. 440 p. In Russian
- Utkin V.I., Yurkov A.K. Radon and the problem of tectonic earthquakes // *Vulkanologiya i seismologiya* [Volcanology and Seismology]. 1997. No. 4. pp. 84–92. In Russian
- Shitov A.V., Ushakova V.G., Bolbukh T.V., Gvozdarev A.Yu., Kochueva N.A. *Termal'nyye istochniki, aktivizirovavshiesya posle seismicheskoy deyatel'nosti na territorii Gornogo Altaya* [Thermal springs activated after seismic activity in Gorny Altai] // *Geoekologiya Altaye-Sayanской горной страны. Ezhegodnyy mezhdunarodnyy sbornik* [Geoecology of the Altai–Sayan Mountain Country. Annual International Collection]. Gorno-Altaisk: RIO, 2005. pp. 112–118. In Russian
- Shitov A.V., Kats V.E., Kharkina M.A. Ecological and geodynamic assessment of the Chuya earthquake // Moscow University Geology Bulletin. 2008. No. 3. pp. 41–47. In Russian
- Shitov A.V., Kats V.E., Dutova E.M., Molokov V.A., Pokrovskiy V.D. Changes in the chemical composition of groundwater in the Altai Republic during earthquakes // Bulletin of Tomsk Polytechnic University. 2016. V. 327, No. 1. pp. 19–29. In Russian
- Claesson L., Skelton A. et al. The timescale and mechanisms of fault sealing and water-rock interaction after an earthquake // *Geofluids*. 2007. V. 7, No. 4. pp. 427–440.
- Gutenberg B., Richter C. Magnitude and energy of earthquakes // *Annals of Geophysics*. 1956. V. 9, No. 1. pp. 1–15.
- Zelenin E.A., Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset [Electronic resource] // *Earth System Science Data*. 2022. V. 14. pp. 4489–4503. URL: <https://essd.copernicus.org/articles/14/4489/2022/> (Date of accessed: 07.04.2025).
- Skelton A., Andren M. et al. Changes in groundwater chemistry before two consecutive earthquakes in Iceland // *Nature Geoscience*. 2014. V. 7, No. 10. pp. 752–756.

Информация об авторах:

Драчев С.С., аспирант, кафедра природопользования, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: oldwolf07@yandex.ru

Кац В.В., ведущий специалист, АО «Геологическое предприятие “Алтай-Гео”», с. Майма, Республика Алтай, Россия.

E-mail: altai.geo@yandex.ru

Шитов А.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры географии и природопользования, Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск, Россия.

E-mail: sav103@yandex.ru

Дутова Е.М., доктор геолого-минералогических наук, профессор? кафедра природопользования, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия; профессор, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия.

E-mail: dutova@tpu.ru

Покровский В.Д., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия.

E-mail: pokrovskiy.v@gmail.com

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Dravchev S.S., post-graduate student, Department of Environmental Management, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: oldwolf07@yandex.ru

Kats V.E., Head of the Monitoring Service, Open Joint-Stock Company "Geological Enterprise Altai-Geo", Mayma, Russia.

E-mail: altai.geo@yandex.ru

Shitov A.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Gorno-Altaisk State University, Gorno-Altaisk, Russia.

E-mail: altai.geo@yandex.ru

Dutova E.M., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor Department of Environmental Management, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia; Professor, School of Natural Resources Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

E-mail: dutova@tpu.ru

Pokrovskiy V.D., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, School of Natural Resources Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

E-mail: pokrovskiy.v@gmail.com

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.04.2025; одобрена после рецензирования 25.05.2025; принята к публикации 02.06.2025

The article was submitted 23.04.2025; approved after reviewing 25.05.2025; accepted for publication 02.06.2025

Научная статья

УДК 551.31:551.736.1(470.53)

doi: 10.17223/25421379/35/2

**СОСТАВ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД
НЕПСКОЙ СВИТЫ ВЕНДСКОГО ВОЗРАСТА ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ
НЕПСКО-БОТУОБИНСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ (по результатам изучения
керна скважины ВЧ-3Х)**



Алексей Владимирович Плюснин¹, Зинаида Леонидовна Мотова²,
Рушан Рушанович Валеев³, Елена Михайловна Томилина⁴,
Владимир Александрович Фомин⁵

¹ ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть», Красноярск, Россия

¹ Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», Альметьевск, Россия

^{2, 3, 5} Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

³ АО «Верхнечонскнефтегаз», Иркутск, Россия

⁴ Пермский государственный исследовательский университет, Пермь, Россия

¹ PlyusninAV@knipi.rosneft.ru

² motova@crust.irk.ru

³ rrvaleev6@rosneft.ru

⁴ tomilinaelena.psu@yandex.ru

⁵ foivarid@gmail.com

Аннотация. Представлены результаты петрографических и литогеохимических исследований непской свиты внутреннего района Сибирской платформы, изученных по керну скважины ВЧ-3Х. Разрез непской свиты характеризуется терригенным составом. Для терригенных пород характерна низкая степень сортировки и окатанности обломочного материала. Изученные породы непской свиты являются осадками первого цикла седиментации. Обнаруженные сходства петрографических и литогеохимических характеристик изученных песчаников нижненепской и вехненепской подсвит свидетельствуют о том, что седиментация этих пород происходила в схожем тектоническом режиме при поступлении обломочного материала из одной питающей провинции. Обилие обломков гранитоидов, кварцитов, сланцев (кремниевых, глинисто-кремниевых, глинистых) в кластогенном составляющей позволило установить, что терригенные породы непской свиты были образованы в основном за счет разрушения кислых магматических и метаморфических пород. Породы непской свиты центральной части Непско-Ботуобинской антеклизы накапливались в остаточном бассейне, сформированном в результате вендинских аккреционно-коллизионных событий, известных на юге Сибирской платформы, при этом в качестве основного поставщика обломочного материала в бассейн седиментации этой свиты выступали породы фундамента Сибирской платформы.

Ключевые слова: непская свита, венд, петрография, литогеохимия, геодинамика, Непско-Ботуобинская антеклиза, Сибирская платформа

Источник финансирования: исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-17-00196, <https://rscf.ru/project/23-17-00196/>).

Для цитирования: Плюснин А.В., Мотова З.Л., Валеев Р.Р., Томилина Е.М., Фомин В.А. Состав и условия формирования терригенных пород непской свиты Вендинского возраста центральной части Непско-Ботуобинской антеклизы (по результатам изучения керна скважины ВЧ-3Х) // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 19–33. doi: 10.17223/25421379/35/2

Original article

doi: 10.17223/25421379/35/2

**COMPOSITION AND FORMATION CONDITIONS OF THE TERRIGENOUS ROCKS
OF THE NEPSKAYA FORMATION OF THE VENDIAN AGE IN THE CENTRAL PART
OF THE NEPSK-BOTUOBANSKAYA ANTECLISE (based on the results of studying the core
of the VCh-3Kh well)**

Alexey V. Plyusnin¹, Zinaida L. Motova², Rushan R. Valeev³, Elena M. Tomilina⁴, Vladimir A. Fomin⁵

¹ ООО РН-КрасноярскНИПИнефть, Красноярск, Россия

¹ Almetyevsk State Technological University "Higher School of Oil", Almetyevsk, Russia

^{2, 3, 5} Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia

³ Verkhnechonskneftegaz JSC, Irkutsk, Russia

⁴ Perm State National Research University, Perm, Russia

¹ PlyusninAV@knipi.rosneft.ru

² motova@crust.irk.ru

³ rrvaleev6@rosneft.ru

⁴ tomilinaelena.psu@yandex.ru

⁵ fovardid@gmail.com

Abstract. The paper presents the results of petrographic and lithogeochemical studies of the Nepa Formation of the inner region of the Siberian Platform, studied from the core of the VCh-3Kh well. The section of the Nepa Formation is characterized by terrigenous composition. Terrigenous rocks are characterized by a low degree of sorting and roundness of clastic material. The studied rocks of the Nepa Formation are sediments of the first sedimentation cycle. The revealed similarities in the petrographic and lithogeochemical characteristics of the studied sandstones of the Nepa Formation Subformation indicate that the sedimentation of these rocks occurred in a similar tectonic regime, with the supply of clastic material from the same supply province. The abundance of fragments of granitoids, quartzites, schists (siliceous, argillaceous-silicic, argillaceous) in the clastogenic component made it possible to establish that the terrigenous rocks of the Nepa Formation were formed mainly due to the destruction of acidic igneous and metamorphic rocks. Both Archean-Early Proterozoic rocks of the basement of the Siberian Platform and igneous and metamorphic rocks of the adjacent areas of the Central Asian fold belt are assumed to be the main suppliers of clastic material to the sedimentation basin of the Nepa Formation.

Keywords: Nepa Formation; vendian; petrography; lithogeochemistry; geodynamics; Nepa-Botuoba antecline; Siberian platform

Source of financing: the research was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 23-17-00196, <https://rscf.ru/project/23-17-00196/>).

For citation: Plyusnin A.V., Motova Z.L., Valeev R.R., Tomilina E. M., Fomin V.A. (2025) Composition and formation conditions of the terrigenous rocks of the Nepa Formation of the Vendian age in the central part of the Nepa-Botuoba antecline (based on the results of studying the core of the VCh-3Kh well). *Geofernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2. pp. 19–33. (In Russian) doi: 10.17223/25421379/35/2

Введение

Начиная с 1970-х гг., на территории Непско-Ботубинской антеклизы (НБА) ведутся активные геологоразведочные работы с целью поиска углеводородов. Одним из основных объектов разработки являются терригенные отложения вендинского возраста, в которых сосредоточено до половины запасов углеводородов данного региона. Представления о строении и условиях формирования глубокозалегающих горизонтов строятся по результатам изучения керна скважин. До недавнего времени освещенность продуктивных интервалов была низкой. С появлением современных керноотборочных снарядов отбор керна стал производиться со 100 %-м выносом в необходимом интервале, что значительно повысило детальность разреза. Помимо стандартных работ (описание керна, изучение фильтрационно-емкостных свойств и др.) появилась возможность проводить сиквенс-стратиграфические, петрографические и литогеохимические исследования с целью выявления основных этапов осадконакопления и прогноза распространения и качества коллекторов.

Настоящая работа является продолжением исследований поздневендинских терригенных отложений непской свиты, распространенных на территории НБА.

Основная цель исследования заключается в реконструкции условий осадконакопления терригенных отложений непской свиты, распространенных в центральной части НБА, на основе петрографических и литогеохимических исследований керна скважины ВЧ-3Х (Верхнеченского месторождения), а также с учетом опубликованных данных по U-Pb (LA-ICP-MS) исследованиям возраста дегритовых цирконов из нижненепской подсвиты центральной части НБА [Изюрова и др., 2020]. В конечном итоге результаты исследований будут сопоставлены с аналогичными исследованиями авторов по терригенным породам непской свиты, распространенных на южной части НБА [Motova, Plyusnin, 2022].

Краткие сведения о геологическом строении

Район исследования приурочен к центральной части Непско-Ботубинской антеклизы, одноименному фациальному району в центре Приленско-Непской фациальной зоны (рис. 1).

Согласно принятой стратиграфической схемы [Решения четвертого..., 1989], в регионе выделены следующие свиты: непская (непский горизонт), тирская (тирский горизонт), а также перекрывающая их катангская свита нижнего подгоризонта даниловского горизонта.

На основании биостратиграфических исследований [Голубкова, Кузнецов, 2014] возраст рассматриваемых толщ определён как поздний венд.

Непская свита (названа по р. Непа на севере Иркутской области) с региональным несогласием залегает на образованиях фундамента. Стратотип свиты – в скв. Марковская 23 (интервал 2556,7–2650,9 м) [Решения четвертого..., 1989]. Подразделяется на верхненепскую и нижненепскую подсвиту [Шемин, 2007; Мельников, 2018].

Нижненепская подсвита литологически представлена гравийно-глинисто-песчаными породами. В по-дошве подсвиты отмечаются гравелиты в ассоциации с конгломератами и песчаниками; в средней части разреза залегают песчаники с прослоями алевролитов, которые выше переходят в алевролиты. Мощность подсвиты изменяется от первых метров до 70 м. На территории центральной части НБА в отложениях подсвиты выделяется верхнечонский второй продуктивный горизонт (ВЧ2), а на юге – безымянный.

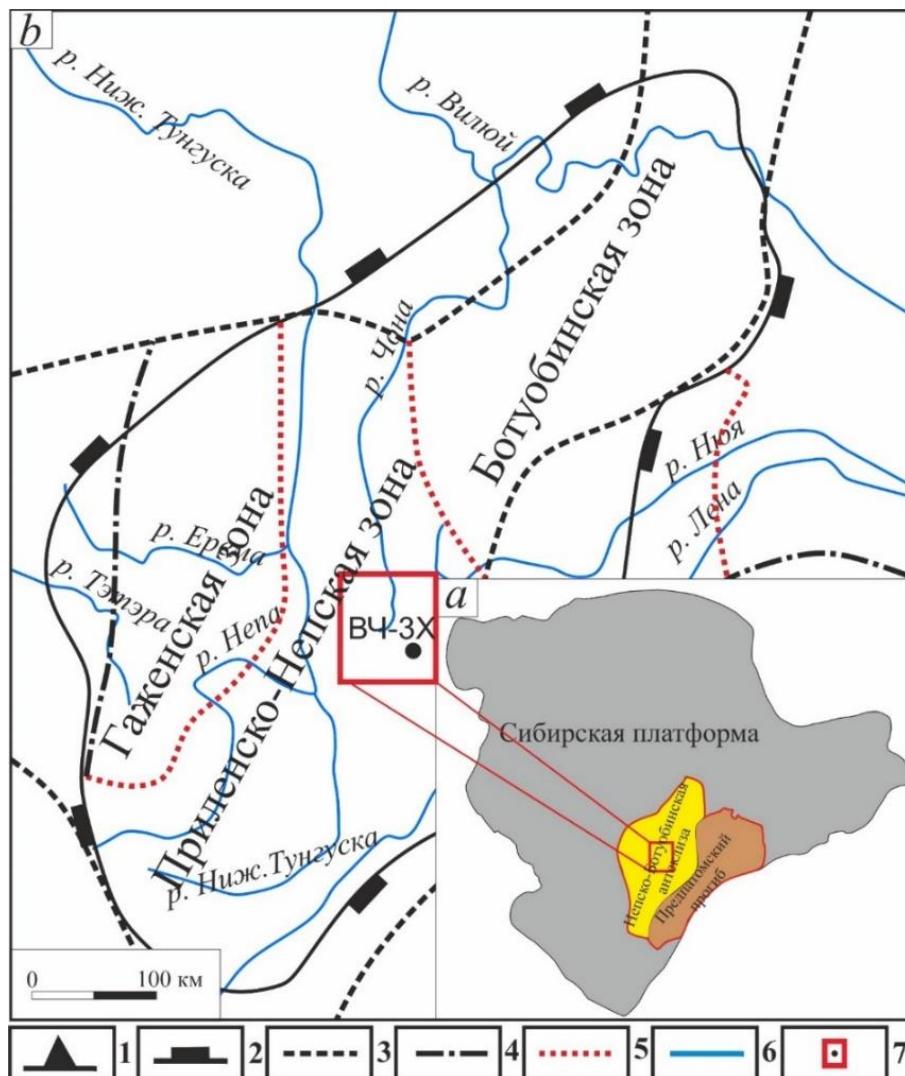


Рис. 1. Район исследований (а) и фрагмент схемы структурно-фациального районирования Сибирской платформы (б) [Стратиграфия..., 2005]

1 – граница Сибирской платформы; 2 – граница Непско-Ботуобинской антеклизы; 3 – границы фациальных регионов; 4 – границы фациальных районов; 5 – границы фациальных зон; 6 – гидросеть; 7 – район исследования и изученная скважина

Fig. 1. Study area (a) and a fragment of the scheme of structural-facies zoning of the Siberian Platform (b) [Stratigraphy..., 2005]

1 – border of the Siberian platform; 2 – boundary of the Nepa-Botuoba antecline; 3 – boundaries of facies regions; 4 – boundaries of facies regions; 5 – boundaries of facies zones; 6 – hydraulic network; 7 – study area

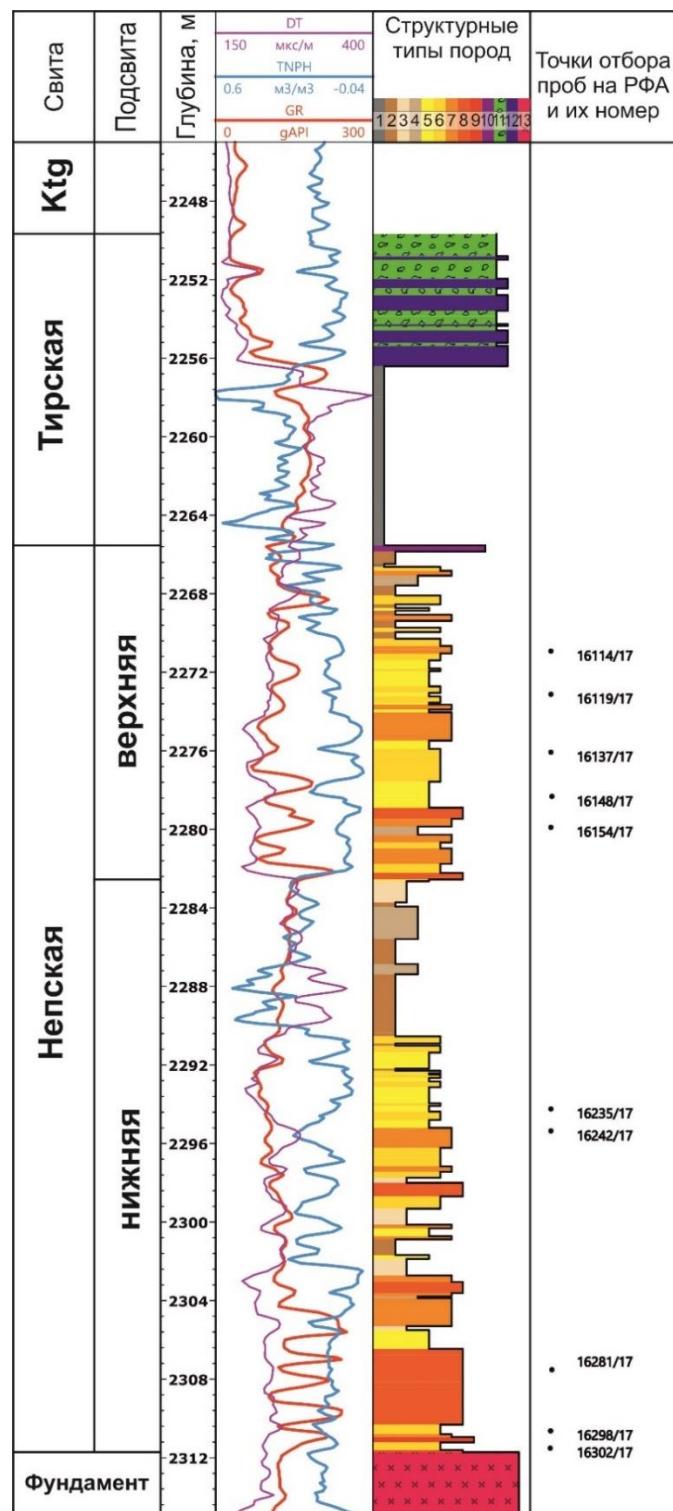


Рис. 2. Литологический разрез скважины ВЧ-3Х [Плюснин и др., 2019] с точками отбора проб

Структурные типы пород: 1 – аргиллиты; 2 – алевролиты крупно-мелкозернистые; 3 – алевролиты мелко-крупнозернистые; 4 – переслаивание алевролитов и песчаников; 5 – песчаники мелкозернистые; 6 – песчаники среднезернистые; 7 – песчаники крупнозернистые; 8 – песчаники грубозернистые; 9 – гравелиты и конгломераты; 10 – терригено-сульфатно-карбонатные породы; 11 – доломиты брекчированные; 12 – доломиты; 13 – породы фундамента

Fig. 2. Lithological section of the well VCh-3X [Plyusnin et al., 2019] with sampling points

Structural types of rocks: 1 – argillites; 2 – coarse-fine-grained siltstones; 3 – fine-coarse-grained siltstones; 4 – interbedding of siltstones of terrigenous rocks; 5 – fine-grained sandstones; 6 – medium-grained sandstones; 7 – coarse-grained sandstones; 8 – coarse-grained sandstones; 9 – gravelites and conglomerates; 10 – terigen sulfate-carbonate rocks; 11 – brecciated dolomites; 12 – dolomites; 13 – rock foundation

Верхненепская подсвита литологически представлена гравийно-глинисто-песчаными породами с единичными прослойками смешанных терригенно-сульфатно-карбонатных пород. Подсвита представлена песчаниками: в нижней половине разреза – разнозернистыми неравномерно гравелистыми и гравийными, чередующимися с гравелитами, в верхней – мелкозернистыми с прослойками алевролитов. В кровле разреза подсвиты располагаются смешанные терригенно-сульфатно-карбонатные породы. Мощность от первых десятков метров до 80 м. К верхненепской подсвите центральной части НБА приурочен верхнечонский первый продуктивный горизонт (ВЧ1), а на юге – ярактинский. Подробное описание свит рассматриваемого района приводится авторами в работе [Плюснин, Гёкче, 2020].

Фактический материал и методы исследования

Работа выполнена на основе исследований терригенных отложений венда в разрезе скважины ВЧ-3Х. Детальная литолого-фациальная характеристика разреза скважины опубликована в работе [Плюснин и др., 2019] (см. рис. 2). Петрографические исследования шлифов из осадочных пород выполнены в ООО «ТННЦ» по методике НСОММИ МР № 184 (исполнитель Е.В. Мартынюк) с использованием поляризационного микроскопа Nikon Eclipse E600POL (Nikon, Япония).

Определение основных петрогенных оксидов производилось на рентгенофлуоресцентном спектрометре S8 Tiger (Bruker AXS GmbH, Германия) в НОЦ «Геотермояхронология» ИГиНГТ КФУ. Подготовка проб для анализа породообразующих элементов выполнена путем плавления 0,5 г порошка пробы, 2 г тетрабората лития и 2 г в муфельной печи с последующим отливом стеклообразного диска. При калибровке спектрометра и для контроля качества измерений использованы государственные стандартные образцы химического состава горных пород – ГСО № 8871-2007, ГСО № 3333-85, ГСО № 3191-85. Точность анализа составляла 1–5 отн. % для элементов с концентрациями выше 1–5 мас. % и до 12 отн. % для элементов с концентрацией ниже 0,5 мас. %. Обработка результатов проводилась посредством разработанных методик в программе Spectra Plus (Bruker AXS GmbH, Германия).

Генетическая типизация терригенных пород проведена с использованием системы петрохимических модулей по методике [Юдович, Кетрис, 2000].

Петрографическая характеристика

Исследованные образцы пород нижненепской подсвиты представлены алевролитами, песчаниками и гравелитами. Всего изучено пять шлифов. В соответствии с классификацией по Н.В. Логвиненко [Логвиненко, 1974] минеральный состав терригенных

пород нижненепской подсвity отвечает аркозам (рис. 3, a).

Текстура пород слабо выраженная слойчатая, подчеркнутая слойками, обогащенными грубо-, крупно- и средне-псаммитовым материалом, и акцессорными минералами, толщиной до 3,6 мм, микрослоистая за счет односторонней ориентировки большинства удлиненных зерен. Структура псаммитовая, псефитовая и алевролитовая. Преобладающий размер от 0,05 до 3,5 мм, единично до 4–7 мм (рис. 4).

Форма обломков субизометрическая, слабоудлиненная, редко удлиненная, полуокатанная, реже окатанная, иногда неокатанная и угловатая. Единичные гравийные обломки значительно удлинены (рис. 4, d). Снизу вверх по разрезу степень сортировки изменяется от плохой до средней. Плохая сортировка преобладает в большинстве образцов. Для пород характерен смешанный тип цементации: кварцевый регенерационный цемент, либо бесцементное контактное соединение зерен кварца и обломков пород, которое характеризуется конформной структурой, или пленоно-поровый глинистый цемент, преимущественно гидрослюдистый, а также поровый карбонатный и сульфатный цемент (рис. 4, e, f). Состав обломочной части: кварц (51–60 %), полевые шпаты (28–34 %), слюды (от 1 до 2 %) и обломки пород (от 4 до 16 %). Полевые шпаты слабо или полностью пелитизированные, частично растворены, представлены ортоклазом и микроклином. Слюды представлены отдельными чешуйками и мелкими листочками гидратированного биотита и единично – мусковита и хлорита. Обломки пород представлены кварцитами, которые преобладают в большей степени, гранитоидами и микросланцами (кремниевыми, глинисто-кремниевыми, глинистыми). Аутигенные минералы: кальцит, доломит, ангидрит, гидрослюдистый цемент и пирит. Акцессорные минералы: циркон, турмалин, монацит, сфен. Постседиментационные преобразования: структура вдавливания и образование конформных структур за счет регенерации кварца и уплотнения обломков; пелитизация и частичное растворение полевых шпатов; корродирование кромок зёрен на границе с карбонатом, укрупнение чешуек гидрослюдистого цемента.

Исследованные образцы пород верхненепской подсвity представлены песчаниками. Всего изучено пять шлифов. В соответствии с классификацией по Н.В. Логвиненко [Логвиненко, 1974] минеральный состав этих пород отвечает аркозам (см. рис. 3, b). Текстура слойчатая, подчеркнутая слойками, обогащенными грубо-псаммитовым материалом и титанистыми минералами, толщиной до 2,4 мм и микрослоистая, обусловленная односторонней ориентировкой большинства слабоудлиненных и удлиненных обломков. Структура псаммитовая, псефитовая и алевролитовая. Преобладающий размер от 0,03 до 3,7 мм (рис. 5).

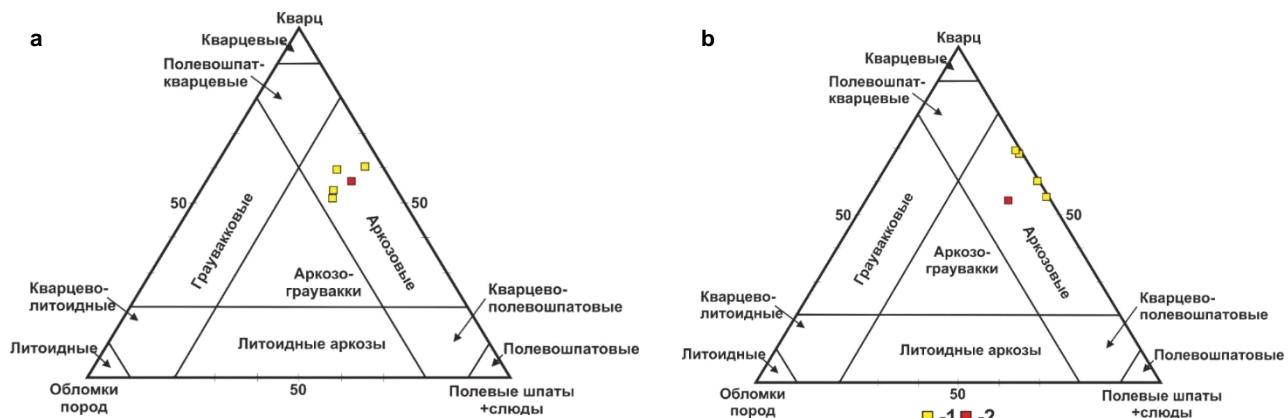


Рис. 3. Классификационные диаграммы для терригенных пород нижненепской (а) и верхненепской (б) подсвит по Н.В. Логвиненко [Logvinenko, 1974]

1 – песчаники; 2 – гравелиты

Fig. 3. Classification diagrams for terrigenous rocks of the Lower Nep (a) and Upper Nep (b) formations after [Logvinenko, 1974]

1 – sandstones; 2 – gravelites

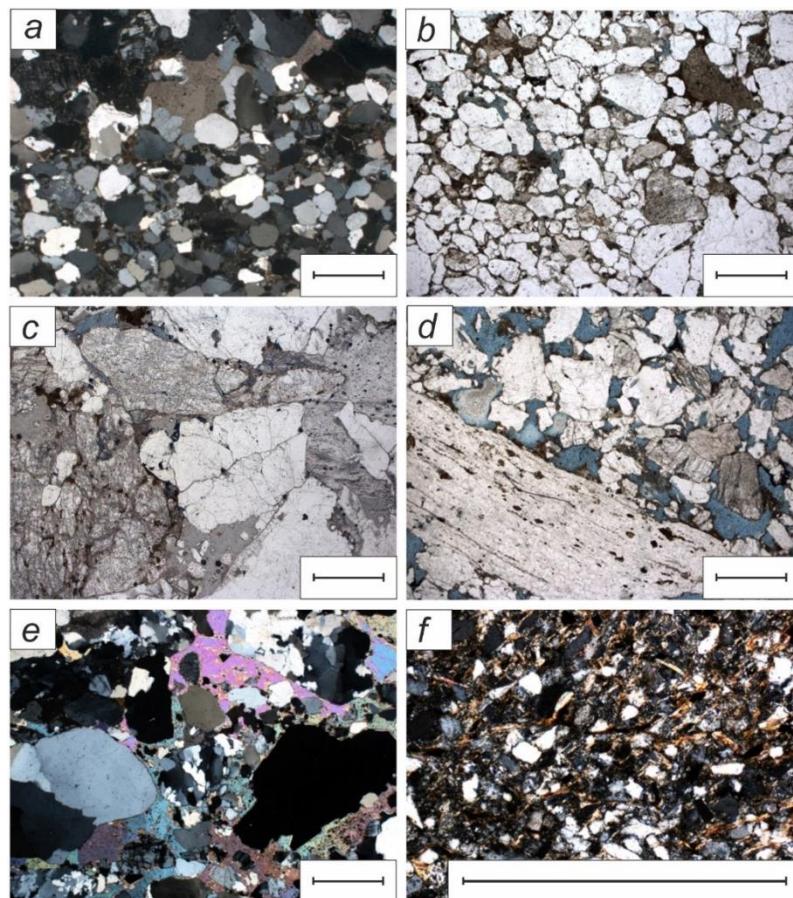


Рис. 4. Микрофотографии шлифов терригенных пород нижненепской подсвиты

а – песчаник разнозернистый с редкими обломками гравийной размерности; б – песчаник разнозернистый гравелистый; в – гравелит мелко-галечниковый песчаный с плёночно-поровыми глинистыми цементом; г – песчаник разнозернистый гравийный, пористый; е – поровый сульфатный цемент, представленный пойкилитовыми кристаллами ангидрита; ф – алевролит мелко-крупнозернистый песчаный, слюдистый с плёночно-поровыми глинистыми цементом. Длина масштабной линейки 1 мм. Николи прямые б–д. Николи скрещенные а, в, е, ф

Fig. 4. Micrographs of thin sections of terrigenous rocks of the lower nep subformation

а – inequigranular sandstone with rare fragments of gravel size; б – inequigranular gravelly sandstone; в – small-pebble sandy gravelstone with film-pore clayey; г – inequigranular gravel, porous sandstone; е – porous sulfate cement, represented by poikilitic anhydrite crystals; ф – fine-coarse-grained sandy, micaceous siltstone with film-porous clay cement. The length of the scale bar is 1 mm. Nikoli straight b–d. Nikoli crossed a, в, е, ф

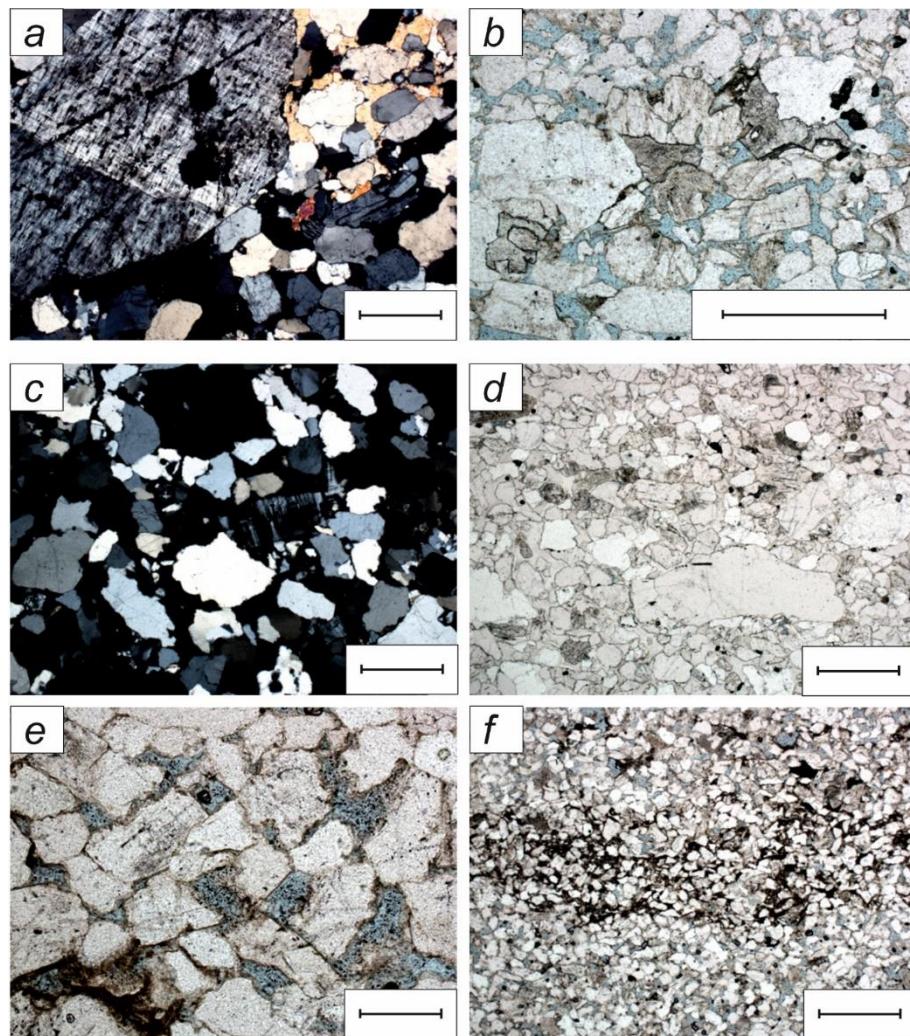


Рис. 5. Микрофотографии шлифов терригенных пород верхненепской подсвиты

а – песчаник разнозернистый гравелистый, участками с поровым сульфатным цементом, и бесцементное контактное соединение зерен кварца и полевых шпатов; б – песчаник разнозернистый слабо алевритистый, с хаотичным расположение зерен и обломков; в – бесцементное контактное соединение зерен кварца и полевых шпатов, которое характеризуется конформной структурой; г – песчаник крупно-, мелко-, среднозернистый с единичными включениями грубообломочного материала; д – песчаник мелко- среднозернистый пористый; е – песчаник мелкозернистый алевритовый с пленочно-поровыми глинистым цементом. Длина масштабной линейки 1 мм. Николи прямые б, д–г. Николи скрещенные а, в

Fig. 5. Micrographs of thin sections of terrigenous rocks of the upper nepa subformation

а – sandstone of various grains, gravelly, in areas with pore sulfate cement, and a cementless contact connection of quartz grains and feldspars; б – heterograno-granular sandstone, slightly silty, with a chaotic arrangement of grains and fragments; в – cementless contact connection of quartz grains and feldspars, which is characterized by a conformal structure; г – coarse-fine-medium-grained sandstone with isolated inclusions of coarse clastic material; д – fine-medium-grained porous sandstone; е – fine-grained silty sandstone with film-pore clay cement. The length of the scale bar is 1 mm. Nikoli straight b, d–g. Nikoli crossed a, в

Форма обломков субизометрическая, неправильная, удлиненная, полуокатанная, полууглуватая, редко окатанная. Гравийные обломки окатанные, полуокатанные, реже полууглуватые. Снизу вверх по разрезу степень сортировки попеременно изменяется от плохой до средней. Преобладает средняя сортировка зерен. Для пород характерен смешанный тип цементации. Кварцевый или полевошпатовый регенерационный цемент (см. рис. 5, в). Бесцементное контактное соединение зерен кварца и обломков пород, которое

характеризуется конформной структурой (рис. 5, а, в). Пленочно-поровый глинистый цемент, преимущественно гидрослюдистый. Поровый карбонатный и сульфатный цемент. Состав обломочной части: кварц (55–70 %), полевые шпаты (31–41 %), слюды (от 1 до 3 %) и обломки пород присутствуют в незначительном количестве (ед. до 10 %). Полевые шпаты представлены зернами ортоклаза, микроклина, единично плагиоклазов. Редкие слюды представлены пластинками биотита и мусковита. Обломки пород

представлены гранитоидами, кварцитами, глинистыми сланцами. Аутигенные минералы: кальцит, доломит, ангидрит, гидрослюдя цемента и пирит. Аксессорные минералы: циркон, ильменит, турмалин, циркон, монацит и сфен. Постседиментационные преобразования: структура вдавливания и образование конформных структур за счет регенерации кварца и уплотнения обломков; пелитизация и частичное растворение полевых шпатов; корродирование кромок зёрен на границе с карбонатом, укрупнение чешуек гидрослюдистого цемента.

Геохимическая характеристика

Содержания петрогенных оксидов и рассчитанные значения петрохимических модулей по [Юдович, Кетрис, 2000] приведены в таблице.

Петрохимический состав терригенных пород непской свиты скважины ВЧ-3Х

Petrochemical composition of terrigenous rocks of the Nepa Formation from the VCh-3X well

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Литология	Песчаник	Песчаник	Песчаник	Песчаник	Песчаник	Песчаник	Алевролит	Гравелит	Песчаник	Песчаник
Лабораторный номер	16114/17	16119/17	16137/17	16148/17	16154/17	16235/17	16242/17	16281/17	16298/17	16302/17
Подсвита										
Верхненепская										
Глубина, м	2270,94	2273,13	2276,08	2278,35	2279,91	2294,25	2295,38	2307,6	2310,64	2311,52
SiO ₂ , мас. %	67,36	74,86	85,44	76,81	76,41	80,27	65,83	69,73	69,17	71,89
TiO ₂	0,64	0,36	0,63	0,42	2,10	0,69	1,01	0,18	0,13	0,37
Al ₂ O ₃	9,78	9,14	4,79	8,34	7,77	5,77	10,59	9,45	9,62	7,83
Fe ₂ O ₃ общ	1,19	0,91	0,51	0,92	0,57	0,84	1,74	1,28	1,32	1,69
MnO	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02
MgO	4,64	1,66	0,38	1,82	0,95	0,65	1,71	2,19	3,62	3,61
CaO	0,74	0,55	0,16	0,59	0,25	0,26	0,89	0,45	0,93	0,99
Na ₂ O	0,40	1,54	1,49	0,90	1,20	2,83	3,13	1,72	0,96	0,54
K ₂ O	6,59	7,01	4,03	6,77	5,96	4,14	5,90	7,64	5,89	5,31
P ₂ O ₅	0,05	0,04	0,05	0,03	0,06	0,02	0,06	0,03	0,00	0,00
ППП	3,27	1,55	0,56	1,62	1,93	1,24	3,79	3,07	4,31	4,22
<i>Сумма</i>	94,68	97,62	98,04	98,23	97,19	96,70	94,65	95,76	95,97	96,46
log (SiO ₂ /Al ₂ O ₃)	0,84	0,91	1,25	0,96	0,99	1,14	0,79	0,87	0,86	0,96
log (Fe ₂ O ₃ /K ₂ O)	-0,74	-0,89	-0,89	-0,87	-1,00	-0,69	-0,53	-0,78	-0,65	-0,50
ГМ	0,18	0,15	0,07	0,13	0,14	0,09	0,22	0,16	0,17	0,15
ФМ	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,04	0,02	0,03	0,04
НКМ	0,71	0,94	1,15	0,92	0,92	1,21	0,85	0,99	0,71	0,75

Примечание. Петрохимические модули [Юдович, Кетрис, 2000]: ГМ (гидролизатный) = (TiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃+FeO+MnO)/SiO₂; ФМ (фемический) = (Fe₂O₃+FeO+MnO+MgO)/SiO₂; модуль нормированной щелочности НКМ = (Na₂O+K₂O)/Al₂O₃).

Note. Petrochemical modules [Yudovich, Ketris, 2000]: GM (hydrolysate) = (TiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃+FeO+MnO)/SiO₂; FM (femic) = (Fe₂O₃+FeO+MnO+MgO)/SiO₂; modulus of normalized alkalinity NKM = (Na₂O+K₂O)/Al₂O₃).

Концентрации SiO₂ в алевролитах, песчаниках и гравелитах нижненепской подсвиты изменяются от 65,83 до 80,27 мас. %. Значения гидролизатного модуля (ГМ) варьируются в широком диапазоне (0,09–0,22) и позволяют классифицировать их как супер-, нормо- и миосилиты.

Проанализированные образцы нижненепской подсвиты характеризуются как пониженными, так и повышенными значениями модуля нормированной щелочности (НКМ = 0,71–1,21). Для этих пород отмечается положительная корреляция между ГМ-ФМ ($r = 0,84$) и отрицательная между НКМ-ГМ ($r = -0,97$) (рис. 6, а).

На классификационной диаграмме М. Херрона [Herron, 1988] фигуративные точки состава терригенных пород нижненепской и верхненепской подсвит расположились в поле аркозов и субаркозов (рис. 7).

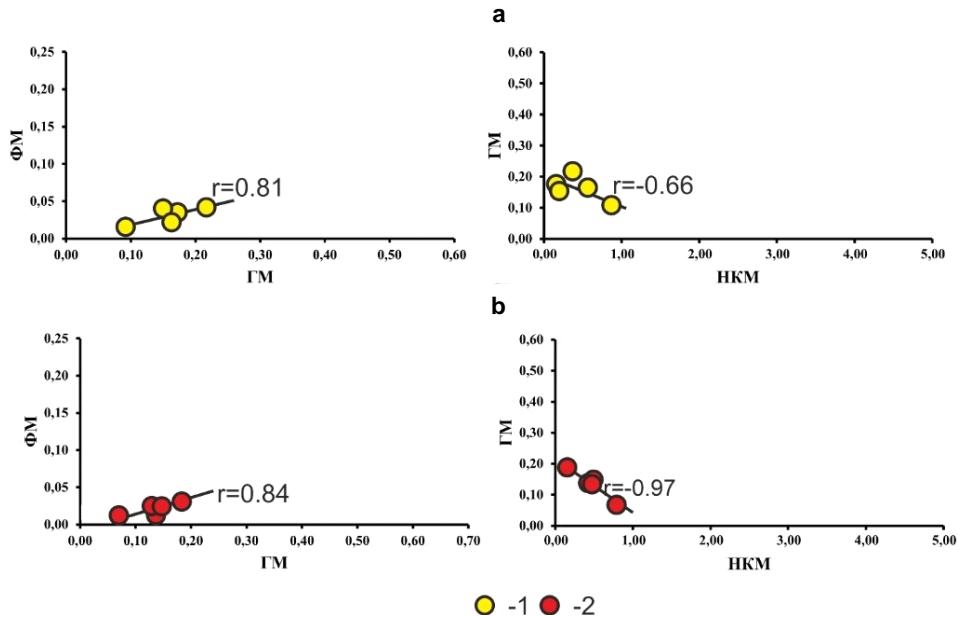


Рис. 6. Диаграммы ГМ-ФМ и НКМ-ГМ по [Юдович, Кетрис, 2000]

для терригенных пород нижненепской подсвиты (а), верхненепской подсвиты (б)

1 – точки проб из нижненепской подсвиты; 2 – точки проб из верхненепской подсвиты

Fig. 6. Diagrams of GM-FM and NKM-GM according to [Yudovich, Ketris, 2000] for terrigenous rocks of the Lower Nepa Subformation (a) and the Upper Nepa Subformation (b)

1 – points of samples from the lower nep subformation; 2 – points of samples from the upper nepa subformation

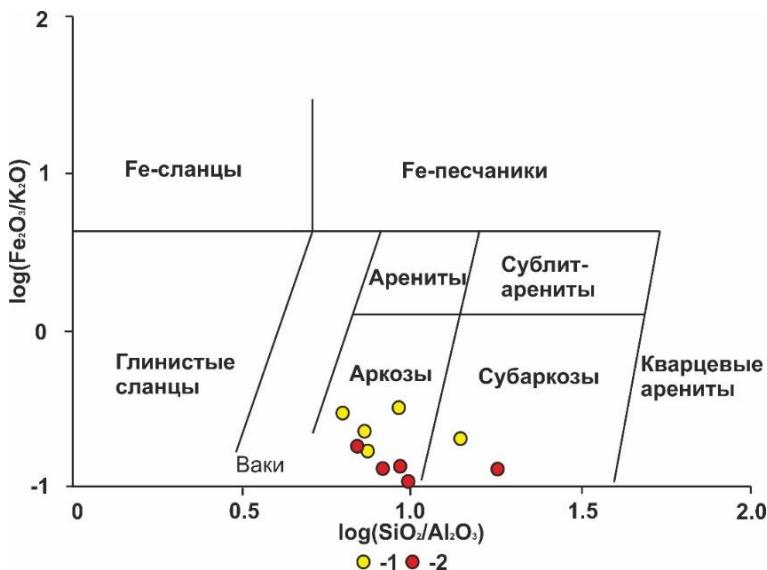


Рис. 7. Положение фигуративных точек состава терригенных пород нижненепской подсвиты (1), верхненепской подсвиты (2) по [Herron, 1988]

1 – точки проб из нижненепской подсвиты; 2 – точки проб из верхненепской подсвиты

Fig. 7. Position of figurative points of composition of terrigenous rocks of the Lower Nepa Subformation (1) and the Upper Nepa Subformation (2) according to [Herron, 1988]

1 – points of samples from the lower nep subformation; 2 – points of samples from the upper nepa subformation

В терригенных породах верхненепской подсвиты содержания SiO_2 варьируются от 67,36 до 85,44 мас. %. Значения гидролизатного модуля в исследуемых породах изменяются в широком диапазоне

(0,07–0,18), что позволяет классифицировать их, как супер- и нормосилиты. Изученные образцы характеризуются различными значениями модуля нормированной щелочности ($\text{НКМ} = 0,71\text{--}1,25$). Для пород

верхненепской подсвиты отмечается положительная корреляция ГМ-ФМ ($r = 0,83$) и отрицательная НКМ-ГМ ($r = -0,81$) (см. рис. 6, б).

Обсуждение результатов

Терригенные породы нижненепской подсвиты в основном сложены плохо отсортированным полуокатанным и неокатанным материалом, что может указывать на близость пород источника к бассейну седиментации. Породы преимущественно полевошпат-кварцевого состава, с повышенным содержанием полевых шпатов (до 34 %). Сравнительный анализ составов обломков в терригенных породах нижненепской подсвиты, распространенных в центральной и южной частях НБА, демонстрирует определенные отличия (см. рис. 3, а). А именно, терригенные породы нижненепской подсвиты, распространенные в

центральной части НБА, обнаружают более однородный состав обломков, принадлежат группе арков, и в целом содержат меньшее количество обломков пород.

Положение большинства фигуративных точек на диаграмме F – Q – L (полевые шпаты – кварц – обломки пород) [Dickinson, Suczek, 1979] позволяет рассматривать магматические и метаморфические комплексы внутренних частей кратонов и рециклированных орогенов в качестве основных поставщиков обломочного материала в бассейн седиментации нижненепской подсвиты центральной части НБА. При этом для терригенных отложений нижненепской подсвиты, распространенных на юге НБА, в качестве источников рассматриваются породы внутренних частей кратона, рециклированных орогенов, а также островодужных комплексов (рис. 8, а).

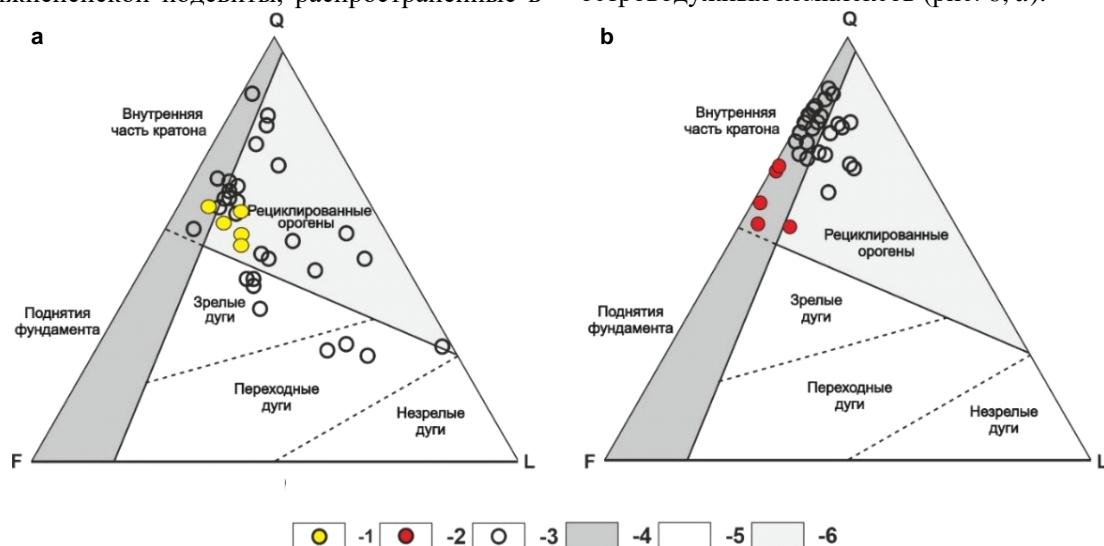


Рис. 8. Возможные типы источников питания для песчаников нижненепской (а) и верхненепской (б) подсвит по поронообразующим компонентам [Dickinson, Suczek, 1979]

Q – кварц, L – обломки пород, F – полевые шпаты. 1 – песчаники нижненепской подсвиты; 2 – песчаники верхненепской подсвиты; 3 – точки составов терригенных пород непской свиты, распространенных на юге НБА [Motova, Plyusnin, 2022]; 4–6 – группы источников: 4 – континентальный блок, 5 – магматические дуги, 6 – рециклированные орогены

Fig. 8. Possible types of food sources for sandstones of the Lower Nepa (a) and Upper Nepa (b) subformations according to rock-forming components [Dickinson, Suczek, 1979]

Q – quartz, L – rock fragments, F – feldspars. 1 – gerbils of the Lower Nepa subformation; 2 – sandstones of the Upper Nepa subformation; 3 – points of composition of terrigenous rocks of the Nepa Formation, distributed in the south of the NBA [Motova, Plyusnin, 2022]; 4–6 – groups of sources: 4 – continental block, 5 – magmatic arcs, 6 – recycled orogens

Для терригенных пород верхненепской подсвиты, распространенных в центральной части НБА, отмечается увеличение степени зрелости обломочного материала, что свидетельствует об удаленности пород источника от бассейна седиментации. Породы верхненепской подсвиты центральной части НБА обнаруживают преимущественно полевошпат-кварцевый состав. Сравнительный анализ составов обломочной части терригенных пород верхненепской подсвиты,

распространенных в центральной и южной частях НБА, демонстрирует меньшее количество обломков пород в отложениях верхненепской подсвиты, распространенных в центральной части НБА (см. рис. 3, б). Анализ состава обломков пород и минералов тяжелой фракции позволяет предположить, что в области источника пород верхненепской подсвиты разрушились преимущественно магматические и метаморфические породы кислого состава.

Следует отметить, что в изученных терригенных породах верхне- и нижненепской подсвит, распространенных в центральной части НБА, отсутствуют обломки пород основного состава, которые присутствуют в породах нижненепской подсвиты, распространенных на юге НБА [Motova, Plyusnin, 2022]. Характер положения точек составов верхненепской подсвиты, распространенных в центральной части НБА, на диаграмме кварц – полевые шпаты – обломки пород [Dickinson, Suczek, 1979] позволяет предположить в качестве основных источников обломочного материала в бассейн седиментации этих отложений магматические и метаморфические образования внутренних частей кратонов (см. рис. 8, б).

Результаты сиквенс-стратиграфических исследований пород верхне- и нижненепской подсвит в керне скважины ВЧ-3Х, расположенной в центральной части НБА, а также разрезов этих подсвит, распространенных на юге НБА, совпадают и позволяют сделать выводы, что непская свита сформирована в результате двух трансгрессивно-ретрессивных циклов, связанных с относительным колебанием уровня моря [Плюснин и др., 2019, 2020].

Генетическая типизация терригенных пород непской свиты, проведенная с использованием системы петрохимических модулей по [Юдович, Кетрис, 2000], позволила аттестовать их как петрогенные осадочные образования, т.е. породы, образованные за счет разрушения первично-магматических и метаморфических пород. Это подтверждает положительная корреляция ГМ-ФМ и отрицательная НКМ-ГМ. Аналогичные характеристики получены авторами ранее для пород непской свиты, распространенных на юге НБА [Motova, Plyusnin, 2022].

Литогеохимическая классификация пород подтверждает результаты петрографии. На диаграмме М. Херрона [Herron, 1988] большинство точек попало в область аркоз.

Для терригенных пород непской свиты, распространенных в центральной части НБА, проведены U-Pb (LA-ICP-MS) исследования возраста дегритовых цирконов [Изюрова и др., 2020]. Из базальных отложений непской свиты, по-видимому, нижненепской свиты, из керна скважины, расположенной в районе Верхнечонского месторождения, выделены дегритовые цирконы (87 зерен). Конкордантные значения получены для 66 зерен ($d < 5\%$). Возраст самого молодого дегритового циркона составил 631 ± 14 млн лет, самого древнего – 2722 ± 38 млн лет. Архейские оценки возраста определены для 4 зерен (6 %), 58 зерен (88 %) отвечают раннему протерозою, 4 зерна дегритовых цирконов (6 %) соответствуют позднему протерозою. На рис. 9 приведено сопоставление опубликованных ранее данных по результатам U-Pb (LA-ICP-MS) исследований возраста дегритовых цирконов из терригенных отложений нижне- и верхненепской подсвит

[Изюрова и др., 2020; Motova, Plyusnin, 2022] с возрастом пород террейнов северного сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) (по [Donskaya et al., 2017]), а также с оценками возраста пород фундамента южной окраины Сибирской платформы (по [Rojas-Agramonte et al., 2011]). В результате сопоставления можно сделать вывод о том, что в непское время в бассейн седиментации обломочный материал поступал как за счет разрушения архейских и раннепротерозойских магматических и метаморфических пород фундамента Сибирской платформы, так и при участии позднепротерозойских пород, слагающих северный сегмент ЦАСП. При этом породы нижненепской подсвиты, распространенные в центральной части НБА, обнаруживают обильную популяцию дегритовых цирконов раннепротерозойского возраста, в меньшем количестве присутствуют дегритовые цирконы архейского и позднепротерозойского возраста. Для терригенных пород нижне- и верхненепской подсвит, распространенных на юге НБА, характерно наличие обильных популяций архейского, ранне- и позднепротерозойского возрастов. Таким образом, можно предположить, что терригенные породы непской свиты, распространенные в центральной части НБА, образовались преимущественно за счет разрушения магматических и метаморфических пород фундамента южной окраины Сибирской платформы. Комплексы пород, слагающих террейны северного сегмента ЦАСП, в бассейн седиментации этой свиты разрушались в меньшем количестве. В то же время на юге НБА в бассейн седиментации непской свиты обломочный материал поступал в равных количествах как с территории внутренних частей Сибирской платформы, так и с прилегающими областями северного сегмента ЦАСП.

Согласно современным представлениям о геодинамической эволюции южной окраины Сибирской платформы, в венде имели место аккреционно-коллизионные события за счет присоединения к южной окраине платформы орогена, сформированного в акватории Палеоазиатского океана и в настоящее время входящего в структуру северного сегмента ЦАСП [Powerman et al., 2015; Donskaya et al., 2017; Gladkochub et al., 2019]. На заключительном этапе этих вендинских аккреционно-коллизионных событий сформирована серия прогибов. Формирование терригенных толщ в этой серии происходило как за счет разрушения внутренних областей фундамента платформы, так и за счет поступления обломочного материала с орогена. Приведенные в работе характеристики терригенных пород непской свиты, распространенных в центральной части НБА, несколько отличаются от аналогичных характеристик пород непской свиты, распространенных на юге НБА [Motova, Plyusnin, 2022].

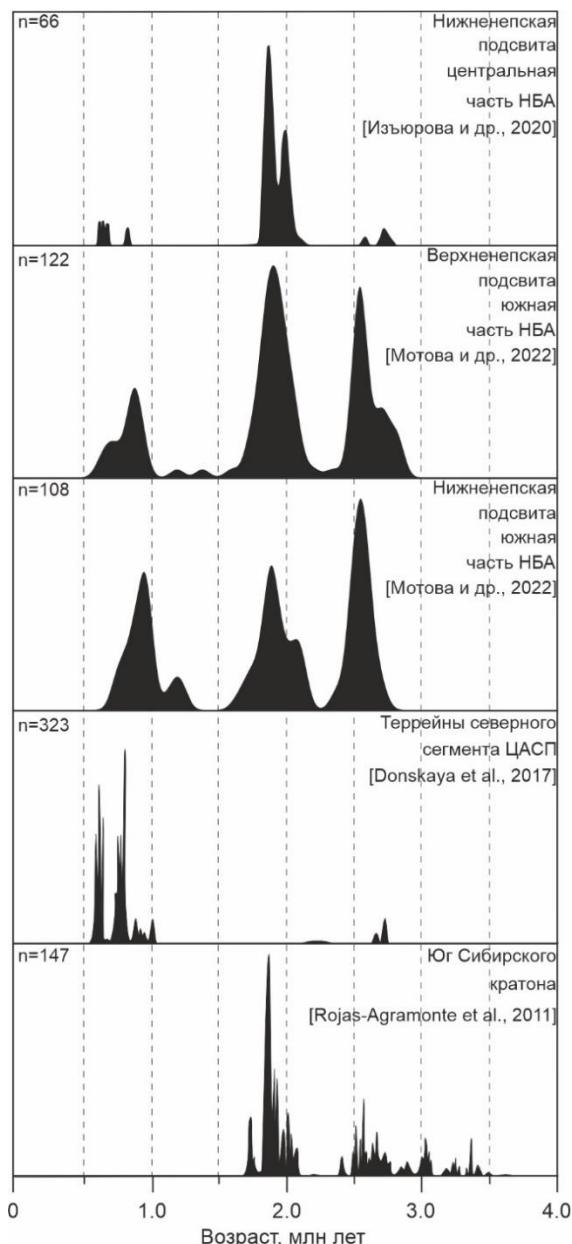


Рис. 9. Сопоставление возрастных спектров для обломочных цирконов непской свиты внутренних районов Сибирской платформы со спектрами по террейнам ЦАСП и фундаменту южной окраины Сибирской платформы

Fig. 9. Comparison of age spectra for detrital zircons from the Nepa Formation of the surrounding Siberian Platform with spectra from CAPS terranes and the basement of the southern margin of the Siberian Platform

Учитывая то, что исследованный разрез непской свиты расположен в центральной части НБА и, следовательно, находится на удалении от прилегающих областей ЦАСП, можно предположить Следующее: седиментация изученных пород непской свиты центральной части НБА происходила в остаточном бассейне, сформированном в результате вендинских аккреционно-коллизионных событий, при этом в качестве

основного поставщика обломочного материала в бассейн седиментации этой свиты выступали породы фундамента Сибирской платформы.

Заключение

Результаты, полученные в ходе проведенных исследований, позволили сделать следующие выводы:

1. Изученные породы верхне- и нижненепской подсвит, распространенные в центральной части НБА, представлены алевролитами, песчаниками и гравелитами, сложенными преимущественно полуокатанным и неокатанным обломочным материалом.

2. Терригенные породы непской свиты обнаруживают кварц-полевошпатовый состав и классифицируются как аркозы.

3. Генетическая типизация, проведенная с применением системы петрохимических модулей, свидетельствует о том, что эти породы являются осадками первого цикла седиментации, т.е. образованными преимущественно за счет первично-магматических и метаморфических пород.

4. Обилие обломков гранитоидов, кварцитов и сланцев в кластогенной составляющей изученных образцов позволило установить, что отложения непской свиты образованы в основном за счет разрушения кислых магматических и метаморфических пород.

5. По анализу опубликованных данных по результатам U-Pb (LA-ICP-MS) исследований возраста дегритовых цирконов, отобранных из терригенных пород нижне- и верхненепской подсвит, распространенных в центральной и южной частях НБА [Изьюрова и др., 2020; Motova, Plyusnin, 2022], в совокупности

реконструкций пород источника сноса, проведенной по методике [Dickinson, Suczek, 1979], выявлены следующие различия. А именно, в качестве источника терригенных пород непской свиты центральной части НБА предполагаются преимущественно породы фундамента южной окраины Сибирской платформы. Комплексы пород, слагающих террейны северного сегмента ЦАСП, в бассейне седиментации этой свиты разрушились в меньшем количестве. На юге НБА в бассейн седиментации непской свиты обломочный материал поступал в равных количествах как с территории внутренних частей Сибирской платформы, так и с прилегающих областей северного сегмента ЦАСП.

6. Совокупность полученных данных, приведенных в настоящей работе и опубликованных результатов изучения терригенных пород непской свиты, расположенных в центральной и южной частях НБА, позволяют предположить, что породы непской свиты центральной части НБА накапливались в остаточном бассейне, сформированном в результате вендинских аккреционно-коллизионных событий, при этом в качестве основного поставщика обломочного материала в бассейн седиментации этой свиты выступали породы фундамента Сибирской платформы.

Список источников

Голубкова Е.Ю., Кузнецов А.Б. Таксономическое разнообразие и корреляция эдиакарских комплексов акантоморфной палеофоры мира // Водоросли в эволюции биосфера / отв. ред. С.В. Рожнов. Серия: Гео-биологические процессы в прошлом. М. : ПИН РАН, 2014. С. 119–140.

Изьюрова Е.С., Постникова О.В., Постников Л.В., Зуева О.А. Фациально-палеогеографические реконструкции для постглациальных отложений венда юго-востока Непско-Ботуобинской антеклизы // Литология и полезные ископаемые. 2020. № 5. С. 419–437.

Логвиненко Н.В. Петрография осадочных пород. М. : Высшая школа, 1974. 400 с.

Мельников Н.В. Вендинско-кембрийский соленосный бассейн Сибирской платформы (Стратиграфия, история развития). 2-е изд., доп. Новосибирск : СНИИГГиМС, 2018. 177 с.

Плюснин А.В., Гёкче М.И. Состав и строение непского и тирского горизонтов Приленско-Непской литолого-фациальной зоны Непско-Ботуобинской антеклизы по результатам изучения кернового материала // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2020. № 1. С. 75–89.

Плюснин А.В., Неделько О.В., Вилесов А.П., Черепкова А.А., Максимова Е.Н. Секвенс-стратиграфическая модель непской и тирской свит венда центральной части Непского свода (Непско-Ботуобинская антеклиза, Сибирская платформа) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2019. Т. 14, № 2. URL: http://www.ngtp.ru/tub/2019/13_2019.html (дата доступа: 01.03.2023).

Решения четвертого межведомственного регионального совещания по уточнению и дополнению стратиграфических схем венда и кембрия внутренних районов Сибирской платформы. Новосибирск : СНИИГГиМС, 1989. С. 40.

Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Рифей и вендинско-ботуобинский бассейн Сибирской платформы и ее складчатого обрамления / ред. А.Э. Конторович. Новосибирск : Гео, 2005. 432 с.

Шемин Е.Г. Геология и перспективы нефтегазоносности венда и нижнего кембрия центральных районов Сибирской платформы (Непско-Ботуобинская, Байкитская антеклизы и Катангская седловина). Новосибирск : СО РАН, 2007. 467 с.

Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. СПб. : Наука, 2000. 497 с.

Dickinson W.R., Suczek C.A. Plate tectonics and sandstone compositions // American Association of Petroleum Geologists Bulletin. 1979. V. 63. P. 2164–2182.

Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V., Cho M., Sergeev S.A., Demonterova E.I., Mazukabzov A.M., Lepekhina E.N., Cheong W., Kim J. Pre-collisional (> 0.5 Ga) complexes of the Olkhon terrane (southern Siberia) as an echo of events in the Central Asian Orogenic Belt // Gondwana Research. 2017. V. 42. P. 243–263.

Herron M.M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data // Journal of Sedimentary Petrology. 1988. V. 58. P. 820–829.

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Stanevich A.M., Pisarevsky S.A., Zhang S., Motova Z.L., Mazukabzov A.M., Li H. U-Pb detrital zircon geochronology and provenance of Neoproterozoic sedimentary rocks in southern Siberia: New insights into breakup of Rodinia and opening of Paleo-Asian Ocean // Gondwana Research. 2019. V. 65. P. 1–16.

Motova Z.L., Plyusnin A.V. Provenances and sedimentation settings of the vendian terrigenic rocks of the southern part of Nepa-Botuoba anteclide (Siberian platform) // Geodynamics & Tectonophysics. 2022. V. 13 (5).

Powerman V., Shatsillo A., Chumakov N., Kapitonov I., Hourigane J. Interaction between the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and the Siberian craton as recorded by detrital zircon suites from Transbaikalia // Precambrian Research. 2015. V. 267. P. 39–71.

Rojas-Agramonte Y., Kröner A., Demoux A., Xia X., Wang W., Donskaya T., Liu D., Sun M. Detrital and xenocrystic zircon ages from Neoproterozoic to Palaeozoic arc terranes of Mongolia: Significance for the origin of crustal fragments in the Central Asian Orogenic Belt // Gondwana Research. 2011. V. 19(3). P. 751–763.

References

- Golubkova E.Yu., Kuznecov A.B. *Taksonomicheskoe raznoobrazie i korrelyaciya ediakarskih kompleksov akantomorfnoj palinoflory mira* [Taxonomic diversity and correlation of Ediacaran complexes of acanthomorphic palynoflora of the world]// Vodorosli v evolyuции biosfery. Otv. red. S.V. Rozhnov. Ser. "Geo-biologicheskie processy v proshlom" Moscow. PIN RAN. 2014. pp. 119–140. In Russian
- Izyurova E.S., Postnikova O.V., Postnikov A.V., Zueva O.A.. *Fatsial'no- paleogeograficheskie rekonstruktsii dlya postglyatsial'nykh otlozheniy venga yugo-vostoka Nepsko-Botuobinskoy anteklizy* [Facies and Paleogeographic Reconstructions of Vendian Postglacial Deposits in the Southeastern Nepa-Botuoba Anteclide] // Lithology and Mineral Resources. 2020. 55 (5). pp. 419–437. In Russian
- Logvinenko N.V. *Petrografiya osadochnykh porod* [Petrography of Sedimentary Rocks]. Moscow : Vysshaya Shkola, 1974. 400 p. In Russian
- Mel'nikov N.V. *Vend-kembriyskiy solerodny basseyn Sibirskoy platform* [Vendian-Cambrian salt-bearing basin of the Siberian platform]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2009. 148 p. In Russian
- Plyusnin A.V., Gekche M.I. *Sostav i stroenie nepskoi i tirskoi svity Prilensko-Nepskoi strukturnofatsial'noi zony Nepsko-Botuobinskoi anteklizy po rezul'tatam izucheniya kernoogo materiala* // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka. 2020. No. 2. pp. 75–89. In Russian
- Plyusnin A.V., Nedel'ko O.V., Vilesov A.P., Cherekova A.A., Maksimova E.N. *Sekvens-stratigraficheskaya model' nepskoi i tirskoi svit venga tsentral'noi chasti Nepskogo svoda* (Nepsko-Botuobinskaya antekliza, Sibirskaya platforma) [Electronic resource]: Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika. 2019. V. 14, No. 2. Electronic resource URL: http://www.ngtp.ru/rub/2019/13_2019.html (Date of accessed: 01.03.2023). In Russian
- Resheniya 4-go mezhvedomstvennogo regional'nogo stratigraficheskogo soveshchaniya po utochneniyu i dopolneniyu stratigraficheskikh skhem venga i kembriya vnutrennikh raionov Sibirskoi platform* [Decisions of the 4th Interdepartmental Regional Stratigraphic Conference on the Refinement and Supplementation of the Vendian and Cambrian Stratigraphic Schemes for Internal Regions of the Siberian Platform], Mel'nikov N.V., Khomentovskii V.V., and Repin L.N., Eds. Novosibirsk: SNIIGGiMS, 1989. In Russian
- Stratigrafiya neftegazonosnykh basseinov Sibiri. Rifei i vend Sibirskoi platformy i ee skladchatogo obrazleniya* [Stratigraphy of Petroliferous Basins in Siberia: Riphean and Vendian in the Siberian Platform and Its Folded Framing], Mel'nikov N.V., Ed. Novosibirsk: Geo, 2005. In Russian
- Shemin G.G. *Geologiya i perspektivy neftegazonosnosti venga i nizhnego kembriya central'nyh rajonov Sibirskoj platform (Nepsko-Botuobinskaya, Baikitskaya anteklizy i Katangskaya sedlovina)* [Geology and oil and gas potential of the Vendian and Lower Cambrian in the central regions of the Siberian platform (Nepsko-Botuobinskaya, Baikit anteclices and Katanga saddle)]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2007, 467 p. In Russian
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Osnovy litokhimii* [Fundamentals of lithochemistry]. St. Petersburg, Nauka Publ. 2000. 479 p. In Russian
- Dickinson W.R., Suczek C.A. Plate tectonics and sandstone compositions. American Association of Petroleum Geologists Bulletin. 1979. V. 63. pp. 2164–2182.
- Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V., Cho M., Sergeev S.A., Demonterova E.I., Mazukabzov A.M., Lepekhina E.N., Cheong W., Kim J. Pre-collisional (> 0.5 Ga) complexes of the Olkhon terrane (southern Siberia) as an echo of events in the Central Asian Orogenic Belt. Gondwana Research. 2017. V. 42. pp. 243–263.
- Herron M.M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data // Journal of Sedimentary Petrology. 1988. V. 58. pp. 820–829.
- Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Stanevich A.M., Pisarevsky S.A., Zhang S., Motova Z.L., Mazukabzov A.M., Li H. U-Pb detrital zircon geochronology and provenance of Neoproterozoic sedimentary rocks in southern Siberia: New insights into breakup of Rodinia and opening of Paleo-Asian Ocean. Gondwana Research. 2019. V. 65. pp. 1–16.
- Motova Z.L., Plyusnin A.V. Provenances and sedimentation settings of the Vendian terrigenic rocks of the southern part of Nepa-Botuoba anteclide (Siberian platform) // Geodynamics & Tectonophysics. 2022. 13 (5). In Russian
- Powerman V., Shatsillo A., Chumakov N., Kapitonov I., Hourigane J. Interaction between the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and the Siberian craton as recorded by detrital zircon suites from Transbaikalia // Precambrian Research. 2015. V. 267. pp. 39–71.
- Rojas-Agramonte Y., Kröner A., Demoux A., Xia X., Wang W., Donskaya T., Liu D., Sun M. Detrital and xenocrystic zircon ages from Neoproterozoic to Palaeozoic arc terranes of Mongolia: Significance for the origin of crustal fragments in the Central Asian Orogenic Belt. Gondwana Research. 2011. V. 19 (3). pp. 751–763.

Информация об авторах:

Плюснин А.В., кандидат геолого-минералогических наук, эксперт по седиментологии, ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть», Красноярск, Россия; научный консультант департамента нефтегазового инжиниринга ПИНШ, Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», Альметьевск, Республика Татарстан, Россия.

E-mail: PlyusninAV@knipi.rosneft.ru

Мотова З.Л., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия. E-mail: motova@crust.irk.ru

Валеев Р.Р., кандидат геолого-минералогических наук, начальник управления, управление по разработке месторождений, АО «Верхнечонскнефтегаз», Иркутск, Россия; ведущий инженер, Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия.
E-mail: rrvaleev6@rosneft.ru

Томилина Е.М., старший преподаватель кафедры минералогии и петрографии, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия.
E-mail:tomilinaelena.psu@yandex.ru

Фомин В.А., аспирант, Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия.
E-mail: fovarid@gmail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Plyusnin A.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Expert in Sedimentology, LLC "RN-KrasnoyarskNIPIneft", Krasnoyarsk, Russia; scientific consultant of the department of oil and gas engineering PINSH, Almetyevsk State Technological University "Higher School of Oil", Almetyevsk, Republic of Tatarstan, Russia.
E-mail: PlyusninAV@knipi.rosneft.ru

Motova Z.L., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia.
E-mail: motova@crust.irk.ru

Valeev R.R., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Department, Field Development Department, Verkhnechonskneftegaz JSC, Irkutsk, Russia; Leading engineer, Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia.
E-mail: rrvaleev6@rosneft.ru

Tomilina E. M., Senior Lecturer, Department of Mineralogy and Petrography, Perm State National Research University, Perm, Russia.
E-mail: tomilinaelena.psu@yandex.ru

Fomin V.A., post-graduate student, Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia.
E-mail: fovarid@gmail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.04.2023; одобрена после рецензирования 03.05.2024; принята к публикации 02.06.2025

The article was submitted 12.04.2023; approved after reviewing 03.05.2024; accepted for publication 02.06.2025

ПЕТРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 552.331.1:549.643

doi: 10.17223/25421379/35/3

АМФИБОЛСОДЕРЖАЩИЕ ГРАНИТЫ ЗАШИХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ВОСТОЧНЫЙ САЯН)



Наталья Викторовна Алымова¹, Александр Александрович Воронцов²,
Дмитрий Алексеевич Лыхин³, Анатолий Викторович Никифоров⁴,
Ольга Андреевна Андреева⁵, Андрей Юрьевич Бычков⁶, Ольга Юрьевна Белозерова⁷,
Виктор Федорович Посохов⁸, Ирина Александровна Сотникова⁹

^{1, 2, 7, 9} Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

^{3, 4, 5} Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

⁶ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁸ Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия

¹ alymova@igc.irk.ru

² voront@igc.irk.ru

³ lykhind@rambler.ru

⁴ usn2007b@yandex.ru

⁵ oandreeva@igem.ru

⁶ bychkov@geol.msu.ru

⁷ obel@igc.irk.ru

⁸ vital@yandex.ru

⁹ sotnikova@igc.irk.ru

Аннотация. Приведены результаты детального минералого-геохимического исследования амфиболсодержащих гранитов Зашихинского месторождения (Восточный Саян). В пределах месторождения установлены кварц-микроклин-альбитовые граниты с игольчатой морфологией амфиболя и граниты с крупными пойкилокристаллами амфиболя. Две морфологические разновидности имеют близкий химический состав и представлены арфведсонитом с высоким содержанием фтора. Сходство вещественных характеристик исследуемых пород указывает на их принадлежность к двум фациальным разновидностям гранитов, которые формировались в рамках одного магматического события из общего источника.

Ключевые слова: щелочные граниты, амфибол, минералогия, редкие элементы, Зашихинское месторождение

Благодарности: статья посвящена памяти доктора геолого-минералогических наук Н.В. Владыкина, уникальная коллекция которого стала основой для научных исследований, также авторы выражают благодарность ЗАО «Техноинвест Альянс» за всестороннюю помощь при проведении полевых экспедиционных работ на Зашихинском месторождении.

Источник финансирования: исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № 0284-2021-0006; экспедиционные работы и изучение геологии района проведены ИГЕМ РАН по теме FMMN-2024-0016.

Для цитирования: Алымова Н.В., Воронцов А.А., Лыхин Д.А., Никифоров А.В., Андреева О.А., Бычков А.Ю., Белозерова О.Ю., Посохов В.Ф., Сотникова И.А. Амфиболсодержащие граниты Зашихинского месторождения (Восточный Саян) // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 34–46. doi: 10.17223/25421379/35/3

Original article

doi: 10.17223/25421379/35/3

AMPHIBOLE-BEARING GRANITES OF THE ZASHIKHINSKY DEPOSIT (EAST SAYAN)

Natalya V. Alymova¹, Alexander A. Vorontsov², Dmitry A. Lykhin³, Anatoly V. Nikiforov⁴,
Olga A. Andreeva⁵, Andrey Yu. Bychkov⁶, Olga Yu. Belozerova⁷, Victor F. Posokhov⁸, Irina A. Sotnikova⁹

^{1, 2, 7, 9} A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS, Irkutsk, Russia

^{3, 4, 5} Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS, Moscow, Russia

⁶ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁸ Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia

¹ alymova@igc.irk.ru

² voront@igc.irk.ru

³ lykhind@rambler.ru

⁴ usn2007b@yandex.ru

⁵ oandreeva@igem.ru

⁶ bychkov@geol.msu.ru

⁷ obel@igc.irk.ru

⁸ vita1@yandex.ru

⁹ sotnikova@igc.irk.ru

Abstract. The Zashikhinsky tantalum-niobium deposit is located on the territory of the Irkutsk region and is confined to the East Sayan zone of alkaline magmatism. The deposit is caused by aplitic granites and albites adjacent to mineralogical and petrochemical rocks, amphibole-bearing rocks making up more than 50% of the total alkaline rocks. Rare metal mineralization is represented by columbite, Nb-rutile, zircon, xenotimium-Y, gagarinite-Y. Pyrochlore, fergusonite, monazite, thorite, samarskite, bastnäsite, cryolite and fluorocerite found in the rocks are observed in small quantities and do not affect the noticeable quality of the ores and concentrates of the deposit. To assess the content of components, a quantitative X-ray fluorescence analysis of the samples was carried out on an S4 Pioneer X-ray spectrometer (Bruker, AXS, Germany). The concentrations of 35 trace elements in the rock were measured by ICP-MS method on an Element 2 mass spectrometer. The chemical composition of minerals was determined on a Superprobe JXA-8200 electron probe microanalyzer (JEOL Ltd, Japan). Measurements of the oxygen isotope composition of oxygen in quartz were performed on a Finnigan MAT 253 gas mass spectrometer.

Two varieties of amphibole-containing rare-metal granites have been studied: with an acicular amphibole and with a poikilitic amphibole. The rocks have a similar composition, correspond to the composition of moderately alkaline leucogranites, correspond to high-potassium varieties, are characterized by high iron content and belong to the field of alkali-supersaturated granites. The main geochemical characteristics and mineral composition of the rocks correspond to A-type granites. The studied granites have high concentrations of most incompatible elements (Zr, Hf, Ta, Nb, Th, U, REE), and moderate enrichment in light lanthanides was observed (La/Yb(n) up to 4.16). This distribution significantly distinguishes amphibole alkaline granites from leucocratic varieties of rocks and ores of the deposit, which are characterized by higher concentrations of MREE and HREE. Melanocratic varieties of alkaline granites of the Zashikhinsky deposit contain a large amount of amphibole with a predominant role among dark-colored minerals. In granites, two morphological varieties of amphibole have a similar chemical composition and are represented by arfvedsonite with a high fluorine content. The similarity of the material characteristics of the studied rocks indicates that they belong to two facies varieties of granites, which were formed within the framework of one magmatic event from a common source. The formation of amphibole-containing granites within the framework of a single magmatic event is also indicated by the chemical composition of the main ore mineral columbite and the oxygen isotopic composition of quartz samples from these varieties of deposit rock with similar values in the range from +8.7 to +9.4 ‰ $\delta^{18}\text{O}$.

Keywords: alkaline granites, amphibole, mineralogy, rare elements, Zashikhinsky deposit

Acknowledgments: This article is dedicated to the memory of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences N.V. Vladynkin, whose unique collection became the basis for scientific research. The authors also express gratitude to Technoinvest Alliance company for assistance in conducting field expedition work at the Zashikhinsky deposit.

Source of financing: the study was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the topic No. 0284-2021-0006; the expedition work and the study of the geology of the region were conducted by IGEM RAS on the topic No. FMMN-2024-0016.

For citation: Alymova N.V., Vorontsov A.A., Lykhin D.A., Nikiforov A.V., Andreeva O.A., Bychkov A.Y., Belozerova O.Y., Posokhov V.F., Sotnikova I.A. (2025) Amphibole-bearing granites of the Zashikhinsky deposit (East Sayan). *Geofernye issledovaniya – Geosphere Research.* 2. pp. 34–46. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/35/3

Введение

Щелочные граниты вызывают научный интерес во многом благодаря обогащению этих пород редкими и редкоземельными элементами, часто с образованием

месторождений комплексной редкometалльной минерализации, которые по масштабам накопления полезных компонентов являются весьма крупными и перспективными объектами. К подобным гранитным проявлениям с промышленным содержанием ниобия

и тантала относится Зашихинское месторождение, приуроченное к Восточно-Саянской зоне щелочного магматизма. Данное тантал-ниобиевое месторождение было открыто в 1971 г., оно расположено на территории Иркутской области в 150 км от г. Нижнеудинска и связано с позднепалеозойскими щелочными гранитами Хайламинского массива. После проведения поисково-оценочных работ массив был оконтурен и назван Зашихинским месторождением в память одного из первооткрывателей геолога Нижнеудинской экспедиции Юрия Павловича Зашихина [Архангельская и др., 2012; Бескин, 2014].

С момента открытия Зашихинского месторождения редкometалльные породы традиционно относили к метасоматически измененным щелочным гранитам [Архангельская, Шурига, 1997; Быховский, Потанин, 2009; Архангельская и др., 2012; Бескин, 2014], были выделены следующие типы пород: 1) микроклин-кварц-рибекитовые граниты пегматоидной структуры; 2) рибекитовые граниты, гранит-порфиры (зона IV убогих тантал-ниобиевых руд); 3) протолитионит-рибекит-арфведсонитовые метасоматиты, местами с эгирином (зона III бедных тантал-ниобиевых руд); 4) лейкократовые микроклин-кварц-альбитовые метасоматиты с горошковидным кварцем (зона II рядовых тантал-ниобиевых руд); 5) кварц-альбитовые граниты и альбититы (зона I богатых тантал-ниобиевых руд). Дальнейшие исследования показали, что месторождение сложено агпайтовыми гранитами и альбититами с рядом минералогических и петрохимических особенностей. Ведущая роль при образовании редкometалльной минерализации была отведена длительной кристаллизационной дифференциации расплава с закономерным накоплением несовместимых элементов к конечным продуктам магматического процесса [Бескин, 2014; Vladykin et al., 2016; Yarmolyuk et al., 2016; Перфильев и др., 2017; Alymova, Vladykin, 2021; Алымова и др., 2022].

Важное значение для понимания процессов, ответственных за формирование Зашихинского месторождения, приобретают исследования минералого-геохимических особенностей двух разновидностей амфиболсодержащих гранитов. Для их сравнения мы использовали комплексный подход, включающий, помимо геохимических исследований щелочных пород, изучение составов амфиболя и колумбита (главного рудного минерала месторождения), а также сопоставление изотопного состава кислорода в кварце.

Краткая геологическая характеристика Зашихинского месторождения

Зашихинское месторождение (Хайламинский массив) приурочено к зоне Главного Саянского разлома,

на участке сочленения Бирюсинского выступа Сибирского кратона и Дербинского блока Саяно-Енисейского аккреционного пояса. Месторождение характеризуется самыми высокими содержаниями тантала в России [Машковцев и др., 2011] и сложено щелочными гранитами и альбититами, обогащенными редкими и редкоземельными элементами. В плане месторождение имеет эллипсовидную, вытянутую в северо-западном направлении форму, его площадь составляет около 1,3 км² [Vladykin et al., 2016]. Изотопно-геохронологические исследования показали позднепалеозойский возраст пород Зашихинского месторождения (Хайламинского массива) [Архангельская, Шурига, 1997; Kostitsyn, Altukhov, 2004]. Вмещающие интрузивные породы представлены гранитами саянского комплекса, гранитами, сиенитами, граносиенитами огнитского комплекса, диоритами, гранодиоритами хойтоокинского (урдаокинского) комплекса. Контакты массива с вмещающими комплексами пород крутопадающие (50–80°) и имеют сектущий характер [Vladykin et al., 2016].

На основе литературных данных и проведенных полевых экспедиционных работ нами выделены следующие разновидности пород в пределах Зашихинского месторождения (рис. 1): 1) микроклин-кварц-рибекитовые граниты пегматоидной структуры (только по работам В.В. Архангельской с соавторами [2012]); 2) кварц-микроклин-альбитовые граниты с игольчатым амфиболом; 3) кварц-микроклин-альбитовые граниты с пойкилитовым амфиболом; 4) кварц-альбит-микроклиновые лейкограниты; 5) кварц-альбитовые граниты и альбититы. Границы между разновидностями пород постепенные. Амфиболсодержащие граниты составляют более 50 % объема щелочных пород Зашихинского месторождения.

Граниты Зашихинского месторождения характеризуются массивной текстурой и гипидиоморфнозернистой структурой и, как правило, являются крупно-среднезернистыми разновидностями. В зависимости от типа гранитов наблюдаются вариации содержаний породообразующих и акцессорных минералов [Vladykin et al., 2016; Алымова и др., 2021]. Редкometалльная минерализация представлена колумбитом, Nb-рутилом, цирконом, ксенотитом-Y, гагаринитом-Y [Alymova, Vlodykin, 2021]. Установленные в породах пирохлор, фергусонит, монацит, торит, самарскит, бастнезит, криолит, флюоцерит отмечаются в незначительных количествах и заметного влияния на качество руд и концентратов месторождения не оказывают [Архангельская и др., 2012].

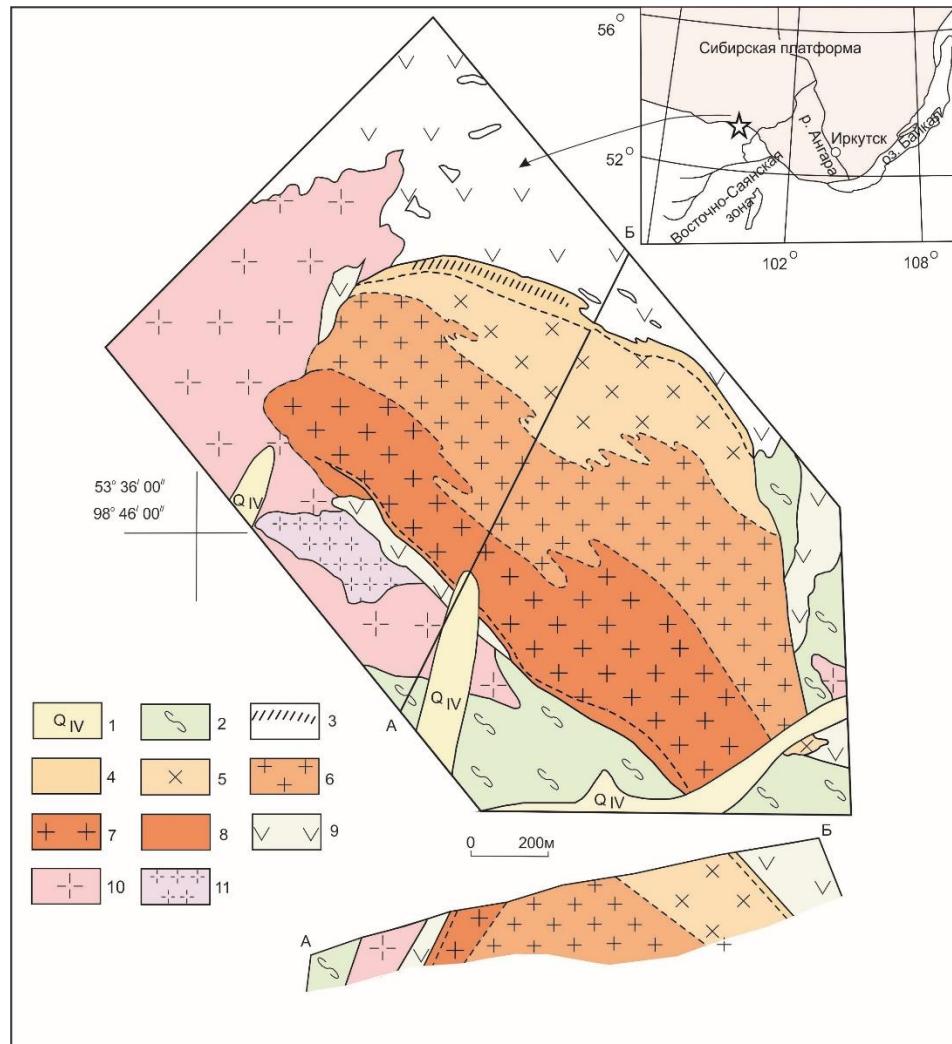
Методы исследования

Аналитические исследования проводились с использованием научного оборудования ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН

(г. Иркутск) и ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ).

Для оценки содержания компонентов в исследуемых образцах был проведен количественный рентгенофлуоресцентный анализ на рентгеновском волнодисперсионном спектрометре S4 Pioneer (Bruker

AXS, Германия) с рентгенооптической схемой по Соллеру, оснащенном рентгеновской трубкой с Rh-анодом мощностью 4 кВт. Материал для измерения приготовлен прессованием порошковой пробы на подложке из борной кислоты, масса навески составляла 2 г.



Р и с . 1. Схема геологического строения Зашихинского месторождения
[Архангельская и др., 2012, Перфильев и др., 2017 с изменениями авторов]

1 – четвертичные отложения; 2 – сланцы, микрогнейсы, амфиболиты бирюсинской свиты; 3–8 – Зашихинское месторождение: 3 – область формирования пород с высоким содержанием флюорита и рудных минералов, 4 – кварц-альбитовые граниты и альбититы, 5 – кварц-альбит-микроклиновые лейкограниты, 6 – кварц-микроклин-альбитовые граниты с крупнолейстовым пойкилитовым амфиболом, 7 – кварц-микроклин-альбитовые граниты с игольчатым амфиболом, 8 – микроклин-кварц-рибекитовые граниты пегматоидной структуры; 9 – граниты, сиениты, граносиениты огнитского интрузивного комплекса; 10 – диориты хойто-окинского (урдаокинского) интрузивного комплекса; 11 – пегматоидные амфиболовые граниты саянского интрузивного комплекса

Fig. 1. The scheme of the geological structure of the Zashikhinsky deposit
[Arkhangelskaya et al., 2012, Perfiliev et al., 2017 with changes by the authors]

1 – quaternary deposits; 2 – shales, microgneisses, amphibolites of the Biryusinsk formation; 3 – the area of formation of rocks with a high content of fluorite and ore minerals, 4 – quartz-albite granites and albites, 5 – quartz-albite-microcline leucogranites, 6 – quartz-microcline-albite granites with large-laminated poikilitic amphibole, 7 – quartz-microcline-albite granites with a needle amphibole, 8 – quartz-microcline-riebeckite granites of a pegmatoid structure; 9 – granites, syenites, granosyenites of the Ognit intrusive complex; 10 – diorites of the Khoito-Okinsky (Urdaokinsky) intrusive complex; 11 – pegmatoid amphibole granites of the Sayan intrusive complex

Концентрации 35 микроэлементов в породе определены методом ICP-MS на масс-спектрометре высокого разрешения с двойной фокусировкой Element 2. Пробоподготовка осуществлялась методом разложения при сплавлении с флюсом – метаборатом лития (LiBO_2) в соотношении 1 : 2. Масса навески – 0,1 г.

Минералого-петрографические исследования пород проводились с помощью поляризационного микроскопа Olympus BX51 (США) и аппаратно-программного комплекса для анализа изображений ImageScope M.

Определение химического состава минералов выполнено на электронно-зондовом микроанализаторе Superprobe JXA-8200 (JEOL Ltd, Япония): ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток зонда – 20 нА, диаметр зонда – 1 мкм. Экспозиция измерения интенсивностей на пике аналитической линии элементов составила 10 с, фон – 5 с. Используемые стандарты: F – флогопит; Na – альбит; Mg – оливин CH-1; Al, Cr – пироп C-153; K – ортоклаз; Si, Ca – голубой диопсид; Ti – рутил TiO_2 ; Mn – Mn-гранат; Fe – NiFe_2O_4 ; Zn – ZnS ; Nb – Nb-металлический; Ta – Ta_2O_5 . Предел обнаружения составляет 0,1 мас. %.

Измерения изотопного состава кислорода в кварце выполнялись на газовом масс-спектрометре FINNIGAN MAT 253 (США). Для анализа были отобраны монофракции чистого кварца массой навески 2,5 мг. Пробоподготовка проводилась с использованием метода лазерного фторирования в режиме «лазерная абляция с экстракцией кислорода из силикатов» в присутствии реагента BrF_5 по методике [Sharp, 1990]. Расчеты $\delta^{18}\text{O}$ выполнены относительно международных стандартов NBS-28 (кварц). Аналитическая погрешность для $\delta^{18}\text{O}$ составила $(1\text{s}) \pm 0,2\text{ }%$.

Минералого-петрографическая характеристика амфиболсодержащих гранитов

В пределах Зашихинского месторождения среди всех редкометалльных щелочных пород выделены три разновидности амфиболсодержащих гранитов: 1) пегматоидные микроклин-кварц-рибекитовые; 2) кварц-микроклин-альбитовые с игольчатым амфиболом; 3) кварц-микроклин-альбитовые с пойкилитовым амфиболом. Однако небольшая оторочка пород микроклин-кварц-рибекитовых гранитов пегматоидной структуры на юго-западном эндоконтакте месторождения [Архангельская и др., 2012] экспедиционными полевыми отрядами в период 2014–2022 гг. найдена не была. Поэтому в данной статье проведено минералого-геохимическое сопоставление только двух типов амфиболсодержащих гранитов, слагающих основной объём Зашихинского месторождения.

Кварц-микроклин-альбитовые граниты с тонкоигольчатым амфиболом (рибекитовые граниты, гранит-порфиры [Архангельская и др., 2012]) прослеживаются в юго-западной части месторождения (см. рис. 1) и представляют собой полнокристаллическую крупно-среднезернистую породу с массивной текстурой, сложенную кварцем ($\sim 30\text{--}35\text{ об. \%}$), микроклином ($\sim 25\text{--}35\text{ об. \%}$), альбитом ($\sim 10\text{--}15\text{ об. \%}$), амфиболом щелочного ряда ($\sim 10\text{ об. \%}$) (рис. 2, a). В качестве акцессорных минералов установлены колумбит, циркон, литиевая слюда, торит, монацит, пирохлор, REE-карбонаты.

Амфибол в породе присутствует в значимых количествах и преобладает над другими темноцветными минералами. В образцах распределен равномерно, образует хаотично ориентированные тонкоигольчатые кристаллы размером до 10 мм в базисе салических минералов (рис. 2, a). В породе – черный непрозрачный, в шлифах минерал отличается отчетливо выраженным плеохроизмом: от индигово-синего по Nr до сине-зеленого по Ng (рис. 2, b).

Амфибол имеет однородный химический состав. Минерал характеризуется высокими содержаниями щелочей (более 10 мас. % $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) с преобладанием натрия, железа (до 29,65 мас. % FeO общ.), алюминия (до 1,92 мас. %), фтора (до 3,0 мас. %), низкими концентрациями магния (до 0,09 мас. % MgO) и титана (до 0,14 мас. % TiO_2), отсутствием кальция. Расчет формульных коэффициентов проводился согласно программе [Li et al., 2020]. Представительные анализы компонентов в пределах каждого исследуемого зерна амфибала приведены в табл. 1.

Ранее минерал в данной разновидности гранитов диагностировался как рибекит [Архангельская и др., 1997, 2012]. По результатам проведенных электронно-зондовых исследований (рис. 2, c) он относится к подгруппе Na-амфиболов и представлен арфведсонитом с высоким содержанием $\text{F} > 1\text{ ф. е.}$ (фтор-арфведсонитом) (рис. 3, a) [Leake et al., 2003; Hawthorne et al., 2012]. Моноклинные амфиболы подобного состава характерны для щелочных агпапитовых пород, в том числе для гранитов и метасоматитов и, как правило, содержат повышенные концентрации Li [Sharygin et al., 2016]. В игольчатом фтор-арфведсоните в гранитах Зашихинского месторождения содержания Li_2O достигают 0,49 мас. % [Архангельская и др., 2012], поэтому для полученных данных возможны небольшие корректировки в расчете формульных коэффициентов и в структурной формуле.

При сопоставлении двух типов гранитов, помимо щелочного амфибала, особое внимание было уделено колумбиту – главному рудному минералу месторождения, который встречен во всех разновидностях пород.

В щелочных гранитах с игольчатым амфиболом он образует равномерную вкрапленность, размер гипидиоморфных зерен составляет 0,2–0,5 мм и представлен колумбитом-Мn (рис. 3, *b*): $Ta/(Ta+Nb) = 0,03–0,1$ и $Mn/(Mn+Fe) = 0,61–0,82$. Колумбит характеризуется повышенными содержаниями Nb_2O_5 (до 76,29 мас. %), FeO (до 8,05 мас. %), MnO (до

14,83 мас. %), также установлены TiO_2 (до 1,84 мас. %), Ta_2O_5 (до 6,54 мас. %), ZnO (до 0,16 мас. %).

Также было проведено изучение изотопного состава кислорода в образцах кварца из гранитов с игольчатым амфиболом (ЗШХ-701/4 и ЗШХ-39/22), который показал утяжеленный (коровий) изотопный состав со значениями $+8,7 \text{ ‰ } \delta^{18}\text{O}$ и $+9,4 \text{ ‰ } \delta^{18}\text{O}$ соответственно.

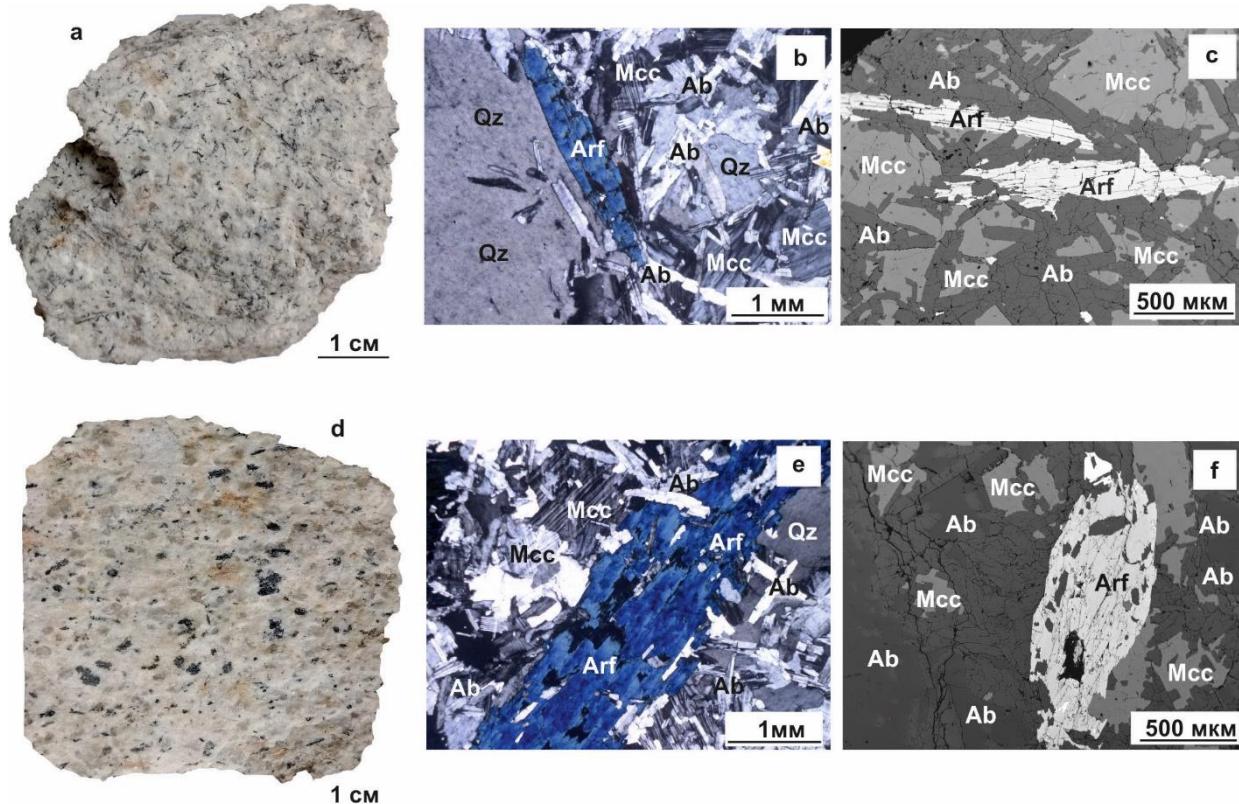


Рис. 2. Щелочные граниты Зашихинского месторождения

а–с – гранит с игольчатым амфиболом: а – фотография образца, б – микрофотография шлифа, с – электронно-зондовое изображение (BSE); д–ф – гранит с пойкилитовым амфиболом: д – фотография образца, е – электронно-зондовое изображение (BSE), ф – микрофотография шлифа,. Ab – альбит, Arf – арфведсонит, Mcc – микроклин, Qz – кварц

Fig. 2. Alkaline granites of the Zashikhinsky deposit

а–с – granite with acicular amphibole: а – photo of the granite, б – thin-section photomicrograph, с – back-scattered electron (BSE) image; д–ф – granite with poikilitic amphibole: д – photo of the granite, е – back-scattered electron (BSE) image, ф – thin-section photomicrograph,. Ab – albite, Arf – arfvedsonite, Mcc – microcline, Qz – quartz

Таблица 1

Представительные анализы Na-амфиболов из гранитов Зашихинского месторождения, мас. %

Table 1

Representative analyzes of Na-amphiboles from granites of the Zashikhinsky deposit, wt. %

Компонент	Игольчатый амфибол										
	Образец ЗШХ-701/4 (зерно 1)					Образец ЗШХ-701/4 (зерно 2)					
	т. 1	т. 2	т. 4	т. 11	т. 12	т. 13	т. 29	т. 30	т. 34	т. 37	т. 39
SiO_2	51,00	50,20	49,20	50,46	51,32	50,48	50,87	51,02	51,22	50,22	51,28
TiO_2	0,17	0,10	0,16	0,13	0,10	0,15	0,10	0,14	0,12	0,05	0,13
Al_2O_3	1,62	1,53	1,61	1,64	1,54	1,61	1,64	1,69	1,74	1,75	1,92
Cr_2O_3	0,02	–	0,01	0,03	0,03	0,01	0,01	–	–	–	–
$\text{FeO}_{\text{общ}}$	29,36	29,48	29,48	29,49	29,56	29,61	29,07	29,12	29,48	28,78	29,07
MnO	2,47	2,56	2,51	2,56	2,52	2,54	2,57	2,50	2,47	2,49	2,72
ZnO	0,98	0,98	1,01	1,00	1,03	1,07	1,11	1,10	1,10	0,93	1,44
MgO	0,02	0,06	–	0,06	0,11	–	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05

Компонент	Игольчатый амфибол										
	Образец ЗШХ-701/4 (зерно 1)						Образец ЗШХ-701/4 (зерно 2)				
	т. 1	т. 2	т. 4	т. 11	т. 12	т. 13	т. 29	т. 30	т. 34	т. 37	т. 39
CaO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Na ₂ O	9,82	9,90	9,91	10,10	9,47	10,04	9,85	9,68	9,93	9,60	9,46
K ₂ O	1,29	1,36	1,41	1,44	1,43	1,42	1,41	1,37	1,25	1,34	1,33
Ta ₂ O ₅	—	0,03	—	—	—	—	0,02	—	0,05	0,03	—
F	2,63	2,72	2,45	2,86	2,79	2,82	2,79	2,76	2,86	2,93	2,30
—O=F ₂	1,11	1,15	1,03	1,20	1,17	1,19	1,17	1,16	1,20	1,23	0,97
<i>Сумма</i>	98,27	97,77	96,72	98,57	98,73	98,56	98,3	98,26	99,07	96,93	98,73
FeO расч	20,01	19,63	19,52	19,78	20,01	19,91	19,61	19,80	20,10	19,41	19,23
Fe ₂ O ₃ расч	10,39	10,95	11,06	10,79	10,61	10,78	10,51	10,36	10,42	10,41	10,93
H ₂ O расч	1,11	1,07	1,19	1,01	1,02	1,02	1,06	1,06	1,00	1,00	1,26
Формульные коэффициенты, рассчитанные по [Li et al., 2020]*											
Si	7,862	7,793	7,713	7,796	7,891	7,803	7,852	7,869	7,865	7,821	7,873
Al	0,083	0,160	0,246	0,149	0,051	0,143	0,093	0,075	0,079	0,134	0,074
Ti	0,020	0,012	0,013	0,015	0,012	0,017	0,012	0,016	0,014	0,006	0,015
<i>Сумма Т</i>	7,965	7,965	7,972	7,960	7,954	7,963	7,957	7,961	7,958	7,961	7,962
Ti	—	—	0,006	—	—	—	—	—	—	—	—
Al	0,211	0,120	0,051	0,150	0,228	0,151	0,206	0,232	0,236	0,187	0,273
Cr	0,002	—	0,001	0,004	0,004	0,001	0,001	—	—	—	—
Fe ³⁺	1,326	1,402	1,423	1,382	1,345	1,379	1,351	1,325	1,325	1,343	1,390
Zn	0,112	0,112	0,117	0,114	0,117	0,122	0,126	0,125	0,125	0,107	0,163
Mn ²⁺	0,281	0,290	0,286	0,291	0,284	0,289	0,292	0,284	0,281	0,281	0,306
Fe ²⁺	2,838	2,795	2,791	2,816	2,817	2,830	2,799	2,813	2,842	2,782	2,717
Mg	0,005	0,014	—	0,014	0,025	—	0,009	0,009	0,011	0,009	0,011
Ta	—	0,001	—	—	—	—	0,001	—	0,002	0,001	—
<i>Сумма С</i>	4,774	4,735	4,675	4,771	4,821	4,771	4,785	4,788	4,822	4,710	4,861
Mn ²⁺	0,041	0,047	0,048	0,044	0,044	0,044	0,044	0,043	0,041	0,047	0,047
Na	2,293	2,281	2,265	2,306	2,55	2,300	2,313	2,291	2,296	2,277	2,275
<i>Сумма В</i>	2,335	2,328	2,312	2,350	2,299	2,343	2,358	2,334	2,336	2,324	2,322
Na	0,642	0,698	0,748	0,719	0,568	0,709	0,635	0,604	0,661	0,622	0,541
K	0,267	0,283	0,294	0,296	0,293	0,292	0,290	0,282	0,258	0,280	0,275
<i>Сумма А</i>	0,909	0,981	1,042	1,015	0,861	1,002	0,925	0,886	0,919	0,902	0,815
OH	1,146	1,113	1,246	1,043	1,045	1,054	1,095	1,088	1,027	1,039	1,292
F	1,166	1,210	1,093	1,273	1,234	1,255	1,239	1,224	1,270	1,306	1,007
<i>Сумма W</i>	2,312	2,323	2,339	2,316	2,279	2,309	2,333	2,312	2,297	2,345	2,299

Продолжение таблицы 1
Continuation of table 1

Компонент	Пойкилитовый амфибол											
	Образец ЗШХ-707 (зерно 1)						ЗШХ-707 (зерно 2)					
	т. 2	т. 4	т. 7	т. 8	т. 9	т. 10	т. 12	т. 14	т. 15	т. 48	т. 49	т. 50
SiO ₂	50,78	51,33	51,33	50,95	50,70	52,24	50,49	50,95	51,05	50,80	50,60	50,49
TiO ₂	0,06	0,08	0,08	0,05	—	—	0,01	0,10	0,07	0,06	0,03	—
Al ₂ O ₃	1,48	1,74	1,87	2,05	1,87	1,81	1,89	1,79	1,85	1,87	2,00	1,85
Cr ₂ O ₃	—	—	0,01	—	—	—	—	—	—	0,01	—	—
FeO общ	33,05	32,07	29,88	29,89	29,25	28,66	31,76	29,15	29,61	30,57	29,38	29,80
MnO	1,46	1,49	2,72	2,63	2,58	2,62	1,96	2,66	2,63	2,38	2,35	2,39
ZnO	1,70	1,69	1,35	1,15	0,94	1,06	1,63	1,20	1,50	0,86	1,53	1,50
MgO	—	—	0,04	0,07	0,03	0,11	0,03	0,01	0,01	0,05	—	—
CaO	—	—	0,08	0,14	—	—	—	0,03	—	0,02	—	—
Na ₂ O	8,40	9,25	9,83	9,82	10,18	9,27	9,06	9,98	9,46	9,51	9,18	9,47
K ₂ O	1,92	1,92	1,38	1,36	1,60	1,72	1,47	1,36	1,41	1,42	1,94	1,85
Ta ₂ O ₅	—	—	0,06	0,03	0,04	—	—	—	—	—	0,01	—
F	0,98	1,40	2,30	2,53	2,64	2,54	1,49	2,68	2,29	2,80	2,23	2,02
—O=F ₂	0,41	0,59	0,97	1,07	1,11	1,07	0,63	1,13	0,96	1,18	0,94	0,85
<i>Сумма</i>	99,42	100,38	99,96	99,6	98,72	98,96	99,16	98,78	98,92	99,17	98,31	98,52
FeO расч	24,02	23,75	19,72	19,79	19,68	19,54	22,05	19,47	19,68	20,69	20,16	20,26
Fe ₂ O ₃ расч	10,03	9,24	11,29	11,22	10,64	10,13	10,79	10,76	11,03	10,98	10,24	10,60
H ₂ O расч	1,68	1,57	1,25	1,13	1,15	1,19	1,51	1,11	1,25	0,95	1,29	1,39
Формульные коэффициенты, рассчитанные по (Li et al., 2020)*												
Si	7,843	7,865	7,842	7,808	7,807	7,974	7,790	7,839	7,851	7,814	7,834	7,809
Al	0,082	0,047	0,100	0,138	0,131	—	0,153	0,106	0,095	0,132	0,099	0,126
Ti	0,007	0,009	0,009	0,006	—	—	0,001	0,012	0,008	0,007	0,003	—

Компонент	Пойкилитовый амфибол									ЗШХ-707 (зерно 2)		
	т. 2	т. 4	т. 7	т. 8	т. 9	т. 10	т. 12	т. 14	т. 15	т. 48	т. 49	т. 50
Сумма Т	7,931	7,922	7,951	7,952	7,938	7,974	7,944	7,957	7,954	7,953	7,936	7,935
Al	0,188	0,267	0,237	0,232	0,208	0,326	0,190	0,219	0,240	0,207	0,266	0,212
Cr	—	—	0,001	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Fe ³⁺	1,201	1,125	1,425	1,414	1,367	1,293	1,317	1,380	1,395	1,371	1,301	1,344
Zn	0,194	0,191	0,152	0,130	0,107	0,119	0,186	0,136	0,170	0,098	0,175	0,171
Mn ²⁺	0,174	0,181	0,308	0,297	0,295	0,297	0,226	0,302	0,297	0,269	0,269	0,275
Fe ²⁺	3,196	3,213	2,765	2,773	2,811	2,772	2,992	2,774	2,767	2,868	2,844	2,854
Mg	—	—	0,009	0,016	0,007	0,025	0,007	0,002	0,002	0,011	—	—
Ta	—	—	0,001	0,001	0,001	—	—	—	—	—	0,001	—
Сумма С	4,953	4,977	4,897	4,862	4,795	4,832	4,918	4,813	4,872	4,824	4,855	4,855
Mn ²⁺	0,017	0,012	0,044	0,044	0,041	0,042	0,030	0,045	0,046	0,041	0,039	0,039
Na	2,019	2,160	2,283	2,261	2,349	2,320	2,104	2,323	2,255	2,194	2,254	2,265
Сумма В	2,036	2,173	2,327	2,305	2,390	2,362	2,134	2,368	2,300	2,235	2,293	2,304
Na	0,497	0,588	0,629	0,656	0,690	0,423	0,607	0,654	0,566	0,642	0,502	0,575
K	0,379	0,376	0,282	0,279	0,324	0,345	0,298	0,280	0,290	0,291	0,389	0,371
Сумма А	0,876	0,964	0,911	0,936	1,015	0,768	0,904	0,934	0,856	0,933	0,890	0,946
OH	1,729	1,601	1,273	1,155	1,184	1,213	1,559	1,142	1,286	0,980	1,330	1,435
F	0,425	0,619	1,007	1,115	1,173	1,116	0,651	1,186	1,005	1,241	0,987	0,892
Сумма W	2,154	2,220	2,280	2,270	2,357	2,329	2,210	2,328	2,291	2,221	2,317	2,327

* Возможны корректировки в расчетных формульных коэффициентах, так как содержание Li₂O не оценивалось.

* Adjustments to the calculated formula coefficients are possible, since the Li₂O content was not estimated.

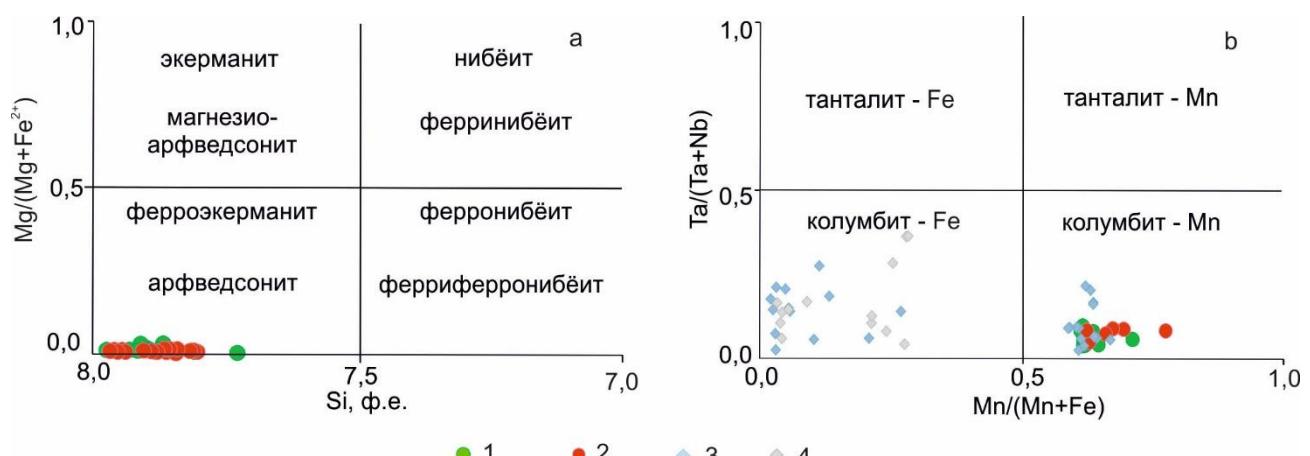


Рис. 3. Составы амфиболов (а) и колумбитов (б) из щелочных пород Зашихинского месторождения

1 – кварц-микроклин-альбитовые граниты с игольчатым амфиболом; 2 – кварц-микроклин-альбитовые граниты с пойкилитовым амфиболом; 3 – кварц-альбит-микроклиновые лейкограниты [Vladykin et al., 2016]; 4 – кварц-альбитовые граниты и альбититы [Vladykin et al., 2016]

Fig. 3. Compositions of amphiboles (a) and columbites (b) from alkaline rocks of the Zashikhinsky deposit

1 – quartz-microcline-albite granites with acicular amphibole; 2 – quartz-microcline-albite granites with poikilitic amphibole; 3 – quartz-albite-microcline leucogranites [Vladykin et al., 2016]; 4 – quartz-albite granites and albitites [Vladykin et al., 2016]

Кварц-микроклин-альбитовые граниты с пойкилитовым амфиболом (протолитионит-рибекит-арфведсонитовые метасоматиты [Архангельская и др., 2012]) наблюдаются в центральной части месторождения (см. рис. 1) и являются крупно-среднезернистой породой с массивной текстурой и сложены микроклином, альбитом и кварцем. Минеральный состав породы близок щелочным гранитам с игольчатым амфиболом. В изученных гранитах содержание амфиболя составляет ~ 5–10 об. %, он кристаллизуется в виде пойкилокристаллов размером до 10 мм

(см. рис. 2, d). Часто в амфибole фиксируются включения гипидиоморфных зерен колумбита как мелких (около 10 мкм), так и более крупных (100–400 мкм), а также включения и вrostки альбита и кварца. В породе амфибол – черный непрозрачный, в шлифах характерен ярко выраженный плеохроизм: от индиго-синего по Nr до сине-зеленого по Ng (рис. 2, e).

Минерал имеет однородный химический состав, характеризуется высокими содержаниями Na₂O (до 10,18 мас. %), FeO (до 33,93 мас. %), F (до 2,80 мас. %) и низкими концентрациями MgO (до 0,05 мас. %),

TiO_2 (до 0,14 мас. %). Также определен Li_2O до 0,53 мас. % [Архангельская и др., 2012]. От игольчатого амфибола отличается незначительными содержаниями CaO (до 0,02 мас. %) и слегка повышенными расчетными значениями соотношений окисного и закисного железа и H_2O (см. табл. 1). Установленный химический состав минерала идентичен составу амфибола из шлиховых проб данного типа гранитов, изученный ранее коллективом авторов [Vladykin et al., 2016]. Согласно классификации IMA, относится к группе Na-амфиболов и представлен арфведсонитом (фтор-арфведсонитом) (см. рис. 3, a) [Leake et al., 2003; Hawthorne et al., 2012]. Таким образом, обе морфологические разновидности амфибола имеют близкий химический состав и на диаграммах образуют единый тренд.

Основной рудный минерал данных гранитов также представлен колумбитом-Мн: $\text{Ta}/(\text{Ta}+\text{Nb}) = 0,05\text{--}0,07$ и $\text{Mn}/(\text{Mn}+\text{Fe}) = 0,62\text{--}0,77$. Гипидиоморфные зерна (размером до 0,5 мм) встречены в породе в виде равномерной вкрапленности в матрице породообразующих минералов, а также в качестве включений разной размерности в пойкилокристаллах амфибола. В минерале установлены повышенные концентрации Nb_2O_5 (до 75,35 мас. %), FeO (до 7,88 мас. %), MnO (до 14,83 мас. %), Ta_2O_5 (до 5,67 мас. %). В целом колумбиты из двух разновидностей амфиболсодержащих гранитов месторождения имеют близкий химический состав и на бинарных диаграммах образуют единое поле фигуративных точек (рис. 3, b). Колумбит-Fe, установленный в кварц-альбитовых гранитах и лейкоократовых гранитах с горошковидным кварцем, в амфиболсодержащих породах не обнаружен.

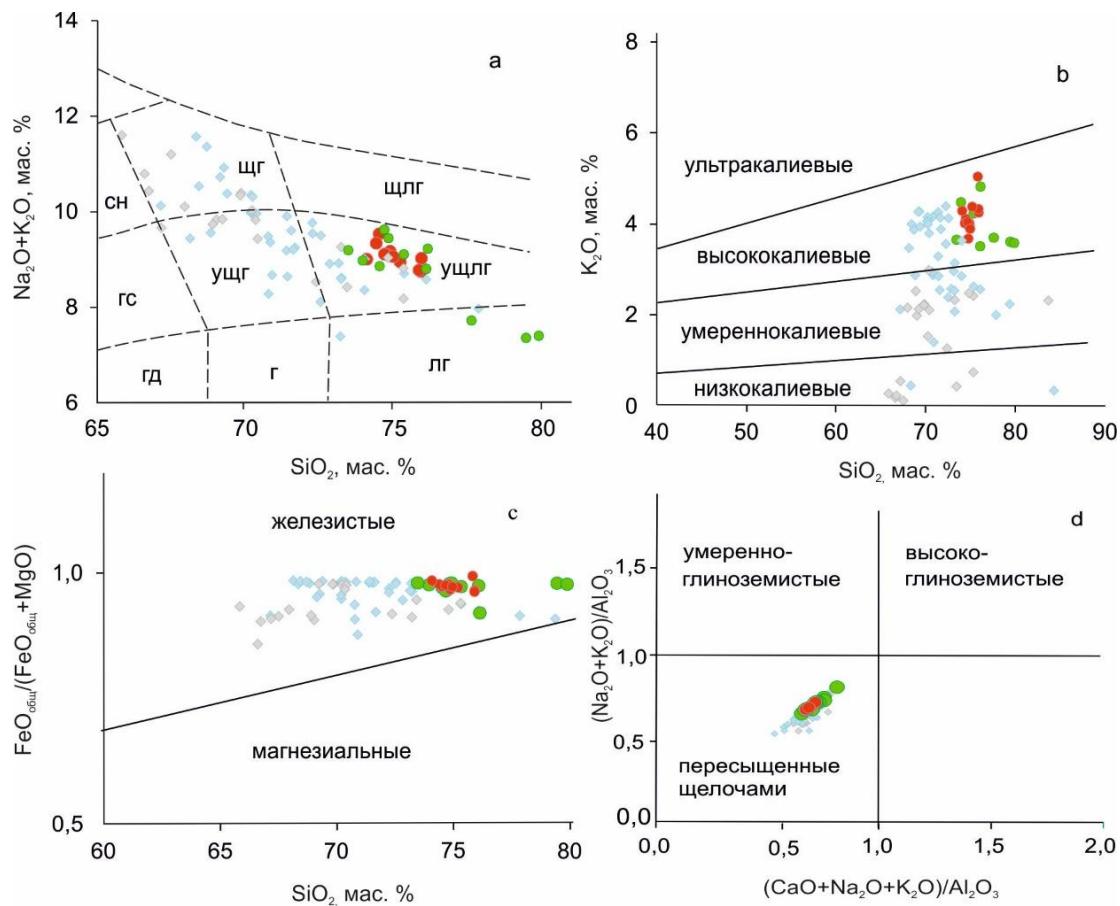


Рис. 4. Пetroхимические диаграммы для щелочных пород Зашихинского месторождения

а – диаграмма $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ [Шарпенок и др., 2013]: сн – сиениты, щг – щелочные граниты, щлг – щелочные лейкограниты, гс – граносиениты, ущг – умеренно-щелочные граниты, ущлг – умеренно-щелочные лейкограниты, гд – гранодиориты, г – граниты, лг – лейкограниты; б – диаграмма $\text{SiO}_2\text{--K}_2\text{O}$; в – диаграмма $\text{SiO}_2\text{--FeO}_{\text{обн}}/(\text{FeO}_{\text{обн}} + \text{MgO})$ [Frost et al., 2001]; г – диаграмма $(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ [Maniar, Piccolli, 1989]. Составы редкометалльных гранитов приведены в работах [Vladykin et al., 2016; Alymova, Vladykin, 2021]. Условные обозначения соответствуют рис. 3

Fig. 4. Petrochemical diagrams for alkaline rocks of the Zashikhinsky deposit

а – $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ diagram [Sharpenok et al., 2009]: сн – syenites, щг – alkaline granites, щлг – alkaline leucogranites, гс – granosyenites, ущг – moderately alkaline granites, ущлг – moderately alkaline granites, гд – granodiorites, г – granites, лг – leukogranites; б – $\text{SiO}_2\text{--K}_2\text{O}$ diagram; в – $\text{SiO}_2\text{--FeO}_{\text{tot}}/(\text{FeO}_{\text{tot}} + \text{MgO})$ diagram [Frost et al., 2001]; г – $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3\text{--}(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ diagram [Maniar, Piccolli, 1989]. The compositions of the rare-granites are given in the works [Vladykin et al., 2016; Alymova, Vladykin, 2021]. The symbols correspond to Fig. 3

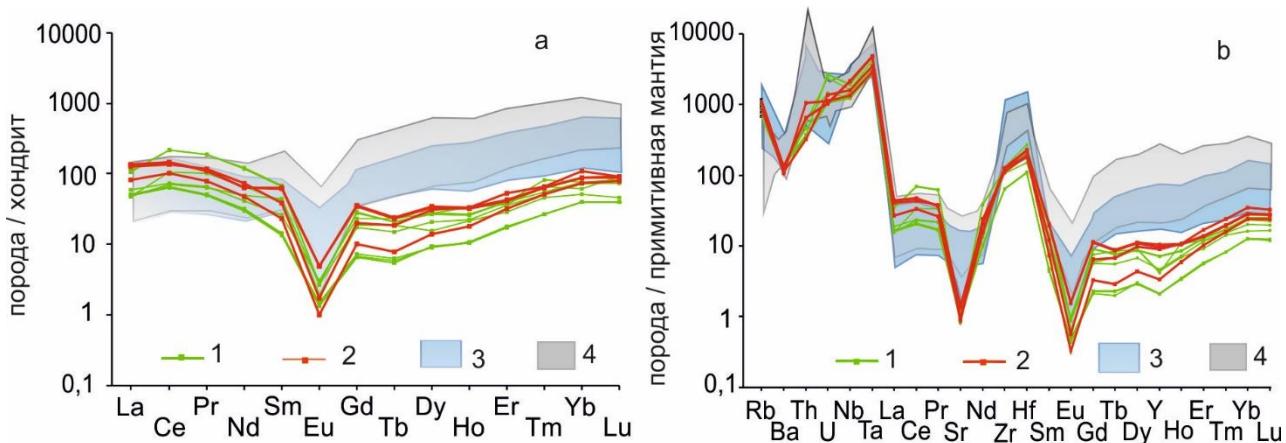


Рис. 5. Распределение микроэлементов в породах Зашихинского месторождения, нормированных на хондрит и состав прimitивной мантии [McDonough, Sun, 1995]

1 – кварц-микроклин-альбитовые граниты с игольчатым амфиболом; 2 – кварц-микроклин-альбитовые граниты с пойкилитовым амфиболом; 3 – поле составов кварц-альбит-микроклиновых лейкогранитов; 4 – поле составов кварц-альбитовых гранитов и альбититов. Составы пород приведены в работах [Vladykin et al., 2016; Alymova, Vladykin, 2021]

Fig. 5. Distribution of trace elements in rocks of the Zashikhinsky deposit, normalized for chondrite and composition of the primitive mantle [McDonough, Sun, 1995]

1 – quartz-microcline-albite granites with acicular amphibole; 2 – quartz-microcline-albite granites with poikilitic amphibole; 3 – field of compositions of quartz-albite-microcline leucogranites; 4 – field of compositions of quartz-albite granites and albitites. The compositions of the rocks are given in the works [Vladykin et al., 2016; Alymova, Vladykin, 2021]

Образцы кварца (ЗШХ-706, ЗШХ-707, ЗШХ-58/22) из данной разновидности пород также показали утяжеленный изотопный состав кислорода со значениями $+9,2 \delta^{18}\text{O}$, $+8,9 \text{‰} \delta^{18}\text{O}$, $+8,7 \text{‰} \delta^{18}\text{O}$, полученные данные аналогичны изотопному составу кварца из гранитов с игольчатым амфиболом.

Вещественный состав амфиболсодержащих гранитов

Кварц-микроклин-альбитовые граниты с тонкоигольчатым амфиболом по петрохимическим особенностям отвечают составу умеренно-щелочных лейкогранитов (73,46–79,87 мас. % SiO_2 , 7,15–9,18 мас. % $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) (см. рис. 4, a), на диаграмме $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ соответствуют высококалиевым разновидностям (рис. 4, b). Породы характеризуются высокой железистостью (Fe индекс $\sim 0,96$) (рис. 4, c) и относятся к области пересыщенных щелочами пород (коэффициенты A/NK и ASI меньше 1,0) (рис. 4, d). Геохимический и минеральный составы позволяют классифицировать породы как граниты А-типа. В изученных породах также установлены повышенные содержания несовместимых элементов [Vladykin et al., 2016; Alymova, Vladykin, 2021], диапазоны концентраций Nb и Ta составляют 809–1595 и 84–201 ppm соответственно. Спектры распределения микроэлементов показали умеренное обогащение LREE ($\text{La}/\text{Yb}_{\text{H}}$ до 5,13) (рис. 5, a) и положительные аномалии Ta, Zr, Hf (рис. 5, b).

($\text{La}/\text{Yb}_{\text{H}}$ до 4,16). Подобное распределение значительно отличает щелочные граниты с игольчатым амфиболом от лейкократовых разновидностей пород и руд месторождения, для которых характерны более высокие концентрации MREE и HREE (см. рис. 5, a).

Кварц-микроклин-альбитовые граниты с пойкилитовым амфиболом соответствуют умеренно-щелочным лейкогранитам (74,07–75,91 мас. % SiO_2 , 8,77–9,33 мас. % $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) (рис. 4, a), характеризуются высокой железистостью (Fe индекс $\sim 0,97$) (рис. 4, b), относятся к высококалиевым разновидностям (рис. 4, c) и области пересыщенных щелочами пород (коэффициенты A/NK и ASI меньше 1,0) (рис. 4, d). Геохимический и минеральный составы позволяют классифицировать породы как граниты А-типа. В изученных породах также установлены повышенные содержания несовместимых элементов [Vladykin et al., 2016; Alymova, Vladykin, 2021], диапазоны концентраций Nb и Ta составляют 809–1595 и 84–201 ppm соответственно. Спектры распределения микроэлементов показали умеренное обогащение LREE ($\text{La}/\text{Yb}_{\text{H}}$ до 5,13) (рис. 5, a) и положительные аномалии Ta, Zr, Hf (рис. 5, b).

Обсуждение

Щелочные граниты с игольчатым и пойкилитовым амфиболом характеризуются близкими петрохимическим и микроэлементным составами, породы об-

разуют единое поле фигурационных точек на различных дискриминационных диаграммах, а спектры распределения редких элементов перекрывают друг друга. Все проанализированные пробы соответствуют умеренно-щелочным лейкогранитам с высокими концентрациями несовместимых элементов, содержания $\Sigma HFSE+REE$ достигают ~ 4000 г/т. Обе разновидности амфиболсодержащих гранитов демонстрируют незначительное преобладание LREE над HREE ($La/Yb_{(n)}$ достигает ~ 5). В изученных породах наблюдаются резкие отрицательные аномалии Ba, Sr и Eu ($Eu/Eu^* \sim 0,1$) (см. рис. 5, b), высокие значения $10\,000^*Ga/Al (> 2,8)$ и $Fe\# (> 0,9)$, характерные для гранитов А-типа. Также только в данных гранитах установлена небольшая отрицательная Y-аномалия, которую можно объяснить фракционированием в высокофтористом расплаве Y-содержащих минералов (например, таких как ксенотим-(Y) или гагаринит-(Y)).

Меланократовые разновидности щелочных гранитов Зашихинского месторождения содержат большое количество амфибала, который в данных породах можно отнести к породообразующим минералам с преобладающей ролью среди темноцветных. Несмотря на смену морфологии, от небольших игольчатых идиоморфных кристаллов амфибала, соразмерных микроклину и кварцу, до минерала пойкилитового облика, полученные аналитические данные показали принадлежность натриевого амфибала к одному минеральному виду, который представлен арфведсонитом с высоким содержанием фтора (более

1 ф.е.). Обе морфологические разновидности амфибала характеризуются повышенным содержанием щелочей при преобладании натрия. Присутствие Zn в структуре минерала ($\sim 0,2$ ф.е.), является показателем низкой f_{S2} , высокой f_{O2} , высокой щелочности (агапитности) и флюидонасыщенности среды [Sharygin et al., 2016].

Проведенные исследования показали, что близкие по составу щелочные граниты Зашихинского месторождения содержат амфиболы одного минерального вида. Это указывает на тесную генетическую связь между данными породами и их формирование в рамках одного магматического события. Это подтверждается изотопным составом кислорода в образцах кварца из этих разновидностей пород месторождения, которые обладают близкими значениями в интервале от $+8,7$ до $+9,4$ ‰ $\delta^{18}O$.

Заключение

Сходство вещественных характеристик исследуемых пород указывает на принадлежность гранитов с тонкоигольчатым арфведсонитом и пойкилитовым арфведсонитом к двум фациальным разновидностям гранитов, которые формировались в рамках одного магматического события из общего источника. Морфологическое различие амфиболов натриевой подгруппы может быть связано с разной скоростью кристаллизации щелочного расплава: образование пород с тонкоигольчатым арфведсонитом происходило быстрее, чем формирование редкометалльных гранитов с пойкилокристаллами.

Список источников

- Алымова Н.В., Воронцов А.А., Дриль С.И., Сотникова И.А. Источники и механизмы формирования щелочных редкометалльных гранитов Зашихинского массива на основе геохимических и Nd изотопных данных // Геодинамика и тектонофизика. 2022. № 13 (4). 0648.
- Архангельская В.В., Рябцев В.В., Шурига Т.Н. Геологическое строение и минералогия месторождений тантала России. М. : ВИМС, 2012. 191 с.
- Архангельская В.В., Шурига Т.Н. Геологическое строение, зональность и оруденение Зашихинского тантал-ниобиевого месторождения // Отечественная геология. 1997. № 5. С. 7–10.
- Бескин С.М. Геология и индикаторная геохимия тантал-ниобиевых месторождений России (редкометалльные граниты). М. : Научный мир, 2014. 112 с.
- Быховский Л.З., Потанин С.Д. Геолого-промышленные типы редкометалльных месторождений. М. : ВИМС, 2009. 156 с.
- Машковцев Г.А., Быховский Л.З., Рогожин А.А., Темнов А.В. Перспективы рационального освоения комплексных ниобий-тантал-редкометалльных месторождений России // Разведка и охрана недр. 2011. № 6. С. 9–13.
- Перфильев В. В., Селезнев А. О., Соколов В. Д., Кознов А. В. Перспективы Зашихинского // Редкие земли. 2017. № 1 (8). С. 142–151.
- Шарпенок Л.Н., Костин А.Е., Кухаренко Е.А. TAS-диаграмма сумма щелочей – кремнезем для химической классификации и диагностики плутонических пород // Региональная геология и металлогения. 2013. № 56. С. 40–50.
- Alyanova N.V., Vladykin N.V. Geochemistry, Mineralogy and Ore Content of Alkaline Granite Magmatism of East Sayan Zone (On the Example of Zashikhinsky Deposit) // Alkaline Rocks, Kimberlites and Carbonatites: Geochemistry and Genesis. Springer, Cham, 2021. P. 63–80.
- Bonin B. A-Type Granites and Related Rocks: Evolution of Concept, Problems and Prospects // Lithos. 2007. V. 97. P. 1–29.
- Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. A Geochemical Classification for Granitic Rocks // J. Petrol. 2001. V. 42. P. 2033–2048.
- Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow G.E., Maresch W.V., Martin R.F., Schumacher J.C., Welch M.D. Nomenclature of the amphibole supergroup // Amer. Miner. 2012. V. 97. P. 2031–2048.
- Kostitsyn Yu.A., Altukhov E.N. The Khäilama and Aryskan massifs of alkali granitoids, Easyern Sayan: age and formation conditions by Rb-Sr isotopic and geochemical data // Geochem. Int. 2004. V. 42, No. 3. P. 195–204.
- Leake B.E., Woolley A.R., Birch W.D., Burke E.A.J., Ferraris G., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Schumacher J.C., Stephenson N.C.N., Whittaker E.J.W. Nomenclature of amphiboles: additions and revisions to the International Mineralogical Association's amphibole nomenclature // Can. Mineral. 2003. V. 41. P. 1355–1370.

- Li X., Zhang Ch., Behrens H., Holtz F.** Calculating amphibole formula from electron microprobe analysis data using a machine learning method based on principal components regression // *Lithos*. 2020. V. 362–363. 105469
- Maniar P.D., Piccoli P.M.** Tectonic discrimination of granitoids // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1989. № 101. P. 635–643.
- McDonough W.F., Sun S.-S.** The composition of the Earth // *Chem. Geol.* 1995. No. 3120. P. 223–253.
- Sharp Z.D.** A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1990. V. 54. P. 1353–1357.
- Sharygin V.V., Zubkova N.V., Pekov I.V., Rusakov V.S., Ksenofontov D.A., Nigmatulina E.N., Vladikin N.V., Pushcharovsky D.Yu.** Lithium-containing Na-Fe-amphibole from cryolite rocks of the Katugin rare-metal deposit (Transbaikalia, Russia): Chemical features and crystal structure // *Russ. Geol. Geophys.* 2016. V. 57, No. 8. P. 1191–1203.
- Vladikin N.V., Alyanova N.V., Perfil'ev V.V.** Geochemical features of rare-metal granites of the Zashikhinsky massif, Vostochny Sayan // *Petrology*. 2016. V. 24, No. 5. P. 512–525.
- Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W.** A-type granites: geochemical, characteristics, discrimination and petrogenesis // *Contrib. Miner. Petrol.* 1987. V. 95. P. 407–419.
- Yarmolyuk V.V., Lykhin D.A., Kozlovsky A.M., Nikiforov A.V., Travin A.V.** Composition, sources and mechanisms of formation of rare-metal granitoids of the Late Paleozoic East Sayan zone of alkaline magmatism (on the example of the Ulan-Tologoi massif) // *Petrology*. 2016. V. 24, No. 5. P. 477–496.

References

- Alyanova N.V., Vorontsov A.A., Dril S.I., Sotnikova I.A. *Istochniki i mehanizmy formirovaniya shchelochnyh redkometall'nyh granitov Zashikhinskogo massiva na osnove geohimicheskikh i Nd izotopnyh dannyh* [Sources and mechanisms of formation of alkaline rare-metal granites at the Zashikhinsky massif based on geochemical and Nd isotope data] // *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics]. 2022. 13(4). 0648. In Russian
- Arkhangelskaya V.V., Ryabtsev V.V., Shuriga T.N. *Geologicheskoe stroenie i mineralogiya mestorozhdenij tantal Rossi* [Geological structure and mineralogy of tantalum deposits in Russia]. Moscow: VIMS, 2012. 191 p. In Russian
- Arhangel'skaya V.V., Shuriga T.N. *Geologicheskoye stroeniye, zonal'nost' i orudieneniye Zashikhinskogo tantal-niobiyevogo mestorozhdeniya* [Geological Features, Zoning, and Mineralization of the Zashikhinsky Tantalum-Niobium Deposit] // *Otechestvennaya geologiya* [National Geology]. 1997. No. 5. pp. 7–10. In Russian
- Beskin S.M. *Geologiya i indikatornaya geohimiya tantal-niobievyh mestorozhdenij Rossii (redkometal'nye granity)* [Geology and indicator geochemistry of tantalum-niobium deposits in Russia (rare-metal granites)]. Moscow: Scientific World, 2014. 112 p. In Russian
- Bykhovsky L.Z., Potanin S.D. *Geologo-promyshlennye tipy redkometall'nyh mestorozhdenij* [Geological and industrial types of rare metal deposits]. Moscow: VIMS, 2009. 156 p. In Russian
- Mashkovtsev G.A., Bykhovsky L.Z., Rogozhin A.A., Temnov A.V. *Perspektivy ratsional'nogo osvoyeniya kompleksnykh niobiyan-tantal-redkozemel'nykh mestorozhdenij Rossii* [Prospects for the Rational Development of Complex Tantalum-Niobium-REE Ore Deposits of Russia] // *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and Protection of Mineral Resources]. 2011. No. 6. pp. 9–13. In Russian
- Perfil'ev V.V., Seleznev A.O., Sokolov V.D., Koznov A.V. *Perspektivy Zashikhinskogo* [Prospects of Zashikhinsky] // *Redkie zemli [Rare Earths]*. 2017. No. 1 (8). pp. 142–151. In Russian
- Sharpenok L.N., Kostin A.E., Kukharenko E.A. *TAS-diagramma summa shchelochey – kremnezem dlya khimicheskoy klassifikatsii i diagnostiki plutonicheskikh porod* [TAS-diagram sum of alkalis – silica for chemical classification and diagnostics of plutonic rocks] // *Regional'naya geologiya i metallogeniya* [Regional Geology and metallogeny]. 2013. No. 56. pp. 40–50. In Russian
- Alyanova N.V., Vladikin N.V. Geochemistry, Mineralogy and Ore Content of Alkaline Granite Magmatism of East Sayan Zone (On the Example of Zashikhinsky Deposit) // *Alkaline Rocks, Kimberlites and Carbonatites: Geochemistry and Genesis*. Springer, Cham. 2021. pp. 63–80. doi: 10.1007/978-3-030-69670-2_4
- Bonin B. A-Type Granites and Related Rocks: Evolution of Concept, Problems and Prospects // *Lithos*. 2007. V. 97. pp. 1–29. doi: 10.1016/j.lithos.2006.12.007
- Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. A Geochemical Classification for Granitic Rocks // *J. Petrol.* 2001. V. 42. pp. 2033–2048. doi:10.1093/petrology/42.11.2033
- Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow G.E., Maresch W.V., Martin R.F., Schumacher J.C., Welch M.D. Nomenclature of the amphibole supergroup // *Amer. Miner.* 2012. V. 97. pp. 2031–2048.
- Kostitsyn Yu.A., Altukhov E.N. The Khailama and Aryskan massifs of alkali granitoids, Easyern Sayan: age and formation conditions by Rb-Sr isotopic and geochemical data // *Geochem. Int.* 2004. V. 42. No. 3. pp. 195–204.
- Leake B.E., Woolley A.R., Birch W.D., Burke E.A.J., Ferraris G., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Schumacher J.C., Stephenson N.C.N., Whittaker E.J.W. Nomenclature of amphiboles: additions and revisions to the International Mineralogical Association's amphibole nomenclature // *Can. Mineral.* 2003. V. 41. pp. 1355–1370.
- Li X., Zhang Ch., Behrens H., Holtz F. Calculating amphibole formula from electron microprobe analysis data using a machine learning method based on principal components regression // *Lithos*. 2020. V. 362–363. 105469. doi: 10.1016/j.lithos.2020.105469
- Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1989. № 101. pp. 635–643.
- McDonough W.F., Sun S.-S. The composition of the Earth // *Chem. Geol.* 1995. No. 120. pp. 223–253.
- Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1990. V. 54. pp. 1353–1357.
- Sharygin V.V., Zubkova N.V., Pekov I.V., Rusakov V.S., Ksenofontov D.A., Nigmatulina E.N., Vladikin N.V., Pushcharovsky D.Yu. Lithium-containing Na-Fe-amphibole from cryolite rocks of the Katugin rare-metal deposit (Transbaikalia, Russia): Chemical features and crystal structure // *Russ. Geol. Geophys.* 2016. V. 57. No. 8. pp. 1191–1203. doi: 10.1016/j.rgg.2016.08.006
- Vladikin N.V., Alyanova N.V., Perfil'ev V.V. Geochemical features of rare-metal granites of the Zashikhinsky massif, Vostochny Sayan // *Petrology*. 2016. V. 24. No. 5. pp. 512–525. doi: 10.1134/S0869591116050052
- Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W. A-type granites: geochemical, characteristics, discrimination and petrogenesis // *Contrib. Miner. Petrol.* 1987. V. 95. pp. 407–419.

Yarmolyuk V.V., Lykhin D.A., Kozlovsky A.M., Nikiforov A.V., Travin A.V. Composition, sources and mechanisms of formation of rare-metal granitoids of the Late Paleozoic East Sayan zone of alkaline magmatism (on the example of the Ulan-Tologoi massif) // Petrology. 2016. V. 24. No. 5. p.p. 477–496. doi:10.1134/S0869591116050076

Информация об авторах:

Алымова Н.В., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, лаборатория геохимии основного и ультраосновного магматизма, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.
E-mail: alymova@igc.irk.ru

Воронцов А.А., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией геохимии основного и ультраосновного магматизма, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.
E-mail: voront@igc.irk.ru

Лыхин Д.А., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, лаборатория редкометального магматизма, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия.
E-mail: lykhind@rambler.ru

Никифоров А.В., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория редкометального магматизма, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия.
E-mail: usn2007b@yandex.ru

Андреева О.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория редкометального магматизма, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия.
E-mail: oandreeva@igem.ru

Бычков А.Ю., доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геохимии, геологический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия.
E-mail: bychkov@geol.msu.ru

Белозерова О.Ю., кандидат химических наук, старший научный сотрудник, лаборатория рентгеновских методов анализа, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.
E-mail: obel@igc.irk.ru

Посокхов В.Ф., старший научный сотрудник, лаборатория инструментальных методов анализа, Геологический институт им. Н.Л. Добретцова СО РАН, Улан-Удэ, Россия.
E-mail: vital1@yandex.ru

Сотникова И.А., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, лаборатория геохимии основного и ультраосновного магматизма, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.
E-mail: sotnikova@igc.irk.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Alymova N.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Laboratory of Geochemistry of Basic and Ultrabasic Magmatism, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS, Irkutsk, Russia.
E-mail: alymova@igc.irk.ru

Vorontsov A.A., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Head of the Laboratory of Geochemistry of Basic and Ultrabasic Magmatism, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS, Irkutsk, Russia.
E-mail: voront@igc.irk.ru

Lykhin D.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Laboratory of Rare Metal Magmatism, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS, Moscow, Russia.
E-mail: lykhind@rambler.ru

Nikiforov A.V., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Laboratory of Rare Metal Magmatism, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS, Moscow, Russia.
E-mail: usn2007b@yandex.ru

Andreeva O.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Laboratory of Rare Metal Magmatism, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS, Moscow, Russia.
E-mail: oandreeva@igem.ru

Bychkov A.Y., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Head of the Department of Geochemistry, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.
E-mail: bychkov@geol.msu.ru

Belozerova O.Y., Cand. Sci. (Chemistry), Senior Researcher, Laboratory of X-ray analysis methods, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS, Russia.
E-mail: obel@igc.irk.ru

Posokhov V.F., Senior Researcher, Laboratory of Instrumental Methods of Analysis, Dobretsov Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia.
E-mail: vital1@yandex.ru

Sotnikova I.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Laboratory of Geochemistry of Basic and Ultrabasic Magmatism, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS, Irkutsk, Russia.
E-mail: sotnikova@igc.irk.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 03.06.2024; одобрена после рецензирования 02.09.2024; принятая к публикации 02.06.2025

The article was submitted 03.06.2024; approved after reviewing 02.09.2024; accepted for publication 02.06.2025

Научная статья
УДК 552.3: 550.4
doi: 10.17223/25421379/35/4



УЛЬТРАМАФИТЫ И МАФИТЫ МАССИВА СЕВЕРНЫЙ КРАКА (ЮЖНЫЙ УРАЛ): ПЕТРОГРАФИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ

Руслан Азатович Гатауллин¹, Дмитрий Евгеньевич Савельев², Дарья Владимировна Киселёва³

^{1, 2} Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, Уфа,
Республика Башкортостан, Россия

³ Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заваричского УрО РАН, Екатеринбург, Россия

¹ rusgatln97@gmail.com

² savl71@mail.ru

³ kiseleva@igg.uran.ru

Аннотация. Приводятся результаты исследований ультрамафитов массива Северный Крака и ассоциированных с ними тел мафических пород. Описана минералогия и состав основных и акцессорных минералов ультрамафитов и мафитов, а также их валовые макро- и микротрасселементные составы, построены дискриминационные диаграммы для минеральных видов. Периодиты массива образованы как тугоплавкий остаток (рестит) от частичного плавления исходного мантийного субстрата, которое достигало значений не более 25 %. Мафические породы представляют собой дифференциаты расплавов, выплавленных из периотита при меньших степенях плавления.

Ключевые слова: ультрамафиты, мафиты, периодиты, олиолиты, Северный Крака

Источник финансирования: исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00019.

Для цитирования: Гатауллин Р.А., Савельев Д.Е., Киселева Д.В. Ультрамафиты и мафиты массива Северный Крака (Южный Урал): петрография, минералогия и геохимия // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 47–60. doi: 10.17223/25421379/35/4

Original article
doi: 10.17223/25421379/35/4

ULTRAMAFIC AND MAFIC ROCKS OF THE NORTHERN KRAKA MASSIF (SOUTHERN URALS): PETROGRAPHY, MINERALOGY AND GEOCHEMISTRY

Ruslan A. Gataullin¹, Dmitrii E. Saveliev², Darya V. Kiseleva³

^{1, 2} Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre, RAS, Ufa, Russia

³ Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, Ekaterinburg, Russia

¹ rusgatln97@gmail.com

² savl71@mail.ru

³ kiseleva@igg.uran.ru

Abstract. The paper presents the results of studies of ultramafic and mafic rocks of the Northern Kraka massif (Southern Urals). Petrographic, mineralogical and geochemical features and conditions of rock formation are characterized. The massif has outcrops of peridotites with low degrees of secondary alteration, which makes its study important for understanding the processes of mineral formation. Petrographic studies were carried out by optical and scanning electron microscopy methods, chemical composition of minerals was determined using an energy-dispersive spectrometer. The bulk composition of rocks was determined by silicate analysis, the content of impurity elements, including rare-earth elements, was determined by ICP-MS (inductively coupled plasma mass spectrometry). Mineralogy and composition of rock-forming and accessory minerals of peridotites and mafic rocks, as well as their bulk macro- and trace-element compositions were described, and discriminative diagrams for mineral species were plotted. Olivine of ultramafic rocks is represented by highly magnesian variety, orthopyroxenes mainly by enstatite, clinopyroxenes of both ultramafic and mafic rocks – by diopside and augite, in the latter it is highly titanic. Feldspars in mafic rocks correspond to labradorite, bytownite, and potassium feldspar. Cr-spinels form a wide variation of Cr-Al compositions, increasing #Cr from lherzolite to chromitite. Mafic rocks from the serpentinite melange of the Northern Kraka periphery are composed of highly titaniferous augite, plagioclase and potassium feldspar, which distinguishes them from typical ophiolitic gabbros. REE contents in both mafic rocks and peridotites show subhorizontal distribution relative to the estimated pyrolite composition, with REE contents in mafic rocks 1-2 orders of magnitude higher than in peridotites. Significant gross contents of alkaline-earth metals in mafic rocks are consistent with a large proportion of leucocratic minerals. Peridotites of the massif are formed as restite from partial melting of the

primitive mantle source, which reached values at most 25 %. The mafic rocks are differentiates of melts extracted from peridotite at much lower degrees of melting (about 15 %), which is also evidenced by the high content of sodium and potassium. In accordance with this inference is also the conclusion that the formation of parental melts for mafic rocks occurred at earlier stages of diapir development. This is evidenced by the greater depth of melt extraction, corresponding to the spinel facies, while the final position of peridotites corresponds to the transition from spinel to plagioclase facies.

Keywords: ultramafic rocks, mafic rocks, peridotites, ophiolites, Northern Kraka

Source of financing: The research was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 22-17-00019.

For citation: Gataullin R.A., Saveliev D.E., Kiseleva D.V. (2025) Ultramafic and mafic rocks of the Northern Kraka massif (Southern Urals): petrography, mineralogy and geochemistry. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research.* 2. pp. 47–60. doi: 10.17223/25421379/35/4

Введение

В составе складчатых структур Южного Урала присутствует значительное количество тел оphiолитовых ультрамафитов. При этом значительной площадью характеризуются только два из них – массивы Кемпирсайский и Крака. Наиболее изученной является южная часть Кемпирсайского массива вследствие присутствия здесь крупных месторождений хромовой руды. Вместе с тем остальная часть этого массива изучена фрагментарно по причине слабой обнажённости и тотальной серпентинизации пород на поверхности. Массивы Крака, напротив, хорошо обнажены, выражены в рельефе и доступны для исследований, однако из-за низкого потенциала хромитоносности изучены крайне неравномерно. Одним из наиболее интересных с точки зрения исследований процессов минералообразования может быть массив Северный Крака, поскольку на нём широким распространением пользуются обнажения перидотитов с относительно слабой долей вторичных изменений.

В данной работе рассматриваются особенности минералогии и геохимии ультрамафитов и ассоциированных с ними мафических пород, распространенных в виде даек внутри ультрамафитов и тектонизированных тел из серпентинитового меланжа, обрамляющего массив по периферии.

Цель исследования – охарактеризовать петрографические, минералогические и геохимические особенности ультрамафитов массива Северный Крака и ассоциированных с ними мафических пород для выяснения процессов и механизмов их генезиса и взаимосвязи. Исследование посвящено условиям и процессам формирования пород, их минеральному составу.

Геологическая обстановка

Офиолитовые массивы широко представлены в складчатой структуре Южного Урала. Хотя наибольшая насыщенность телами ультрамафитов характерна для сутурной зоны, традиционно именуемой

Главным Уральским разломом (ГУР), наиболее крупные массивы расположены западнее нее. В частности, Кемпирсайский массив расположен на границе ГУРа и Сакмарской зоны, а массивы Крака, о которых пойдет речь ниже, локализованы в северном замыкании Зилаирского мегасинклиниория.

Массивы Крака занимают площадь 900 км² и состоят из четырех отдельных тел (Северный, Средний, Южный и Узянский) (рис. 1). Северный массив (300 км²) по площади уступает только Южному, но отличается от остальных наилучшей сохранностью первичных минеральных ассоциаций, что делает его изучение важным для понимания процессов минералообразования. Большую часть площади данного массива занимают ультраосновные породы, представленные шпинелевыми лерцолитами, шпинель-плагиоклавовыми лерцолитами, гарцбургитами, дунитами (рис. 1), при этом преобладающим распространением пользуются шпинелевые лерцолиты.

Вторичные изменения ультрамафитов массива Северный Крака ограничены низкотемпературной петельчатой серпентинизацией, а количество серпентина варьирует от 90–100 об. % в серпентинитах краевой зоны до 60 об. % в дунитах и гарцбургитах и до 10–30 % в лерцолитах. В нескольких обнажениях северо-западной части массива встречены лерцолиты, в которых практически отсутствует серпентин (2–5 об. %). Кроме того, такие свежие породы встречаются в виде отпрепарированной гальки в аллювии ручьев.

Массив обрамляется зоной серпентинитового меланжа переменной мощности, при этом наиболее широкая его полоса (до 3 км) картируется в юго-восточной части. Внутри меланжа широко распространены блоки вулканогенных пород предположительно силурийского возраста и, возможно, комагматических им габбродолеритов [Сначев и др., 2001; Савельев и др., 2008]. Вулканогенные породы соответствуют толеитовым умеренно- и высокотитанистым (1,5–2,0 мас. % TiO₂) базальтам, характерным для рифтогенных обстановок. Помимо вулканогенных пород, с ультрамафитами ассоциируют разнообразные интрузивные основные породы.

Методика исследований

Основными методами изучения являлись геологические маршруты, оптическая и электронная микроскопия. Электронно-микроскопические исследования и изучение состава минералов проводились в полированых шлифах,

аншлифах и эпоксидных шашках на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega Compact с энергодисперсионным анализатором Xplorer 15 Oxford Instruments (ИГ УФИЦ РАН, Уфа). Обработка спектров производилась автоматически при помощи программного пакета AzTec One с использованием методики TrueQ.

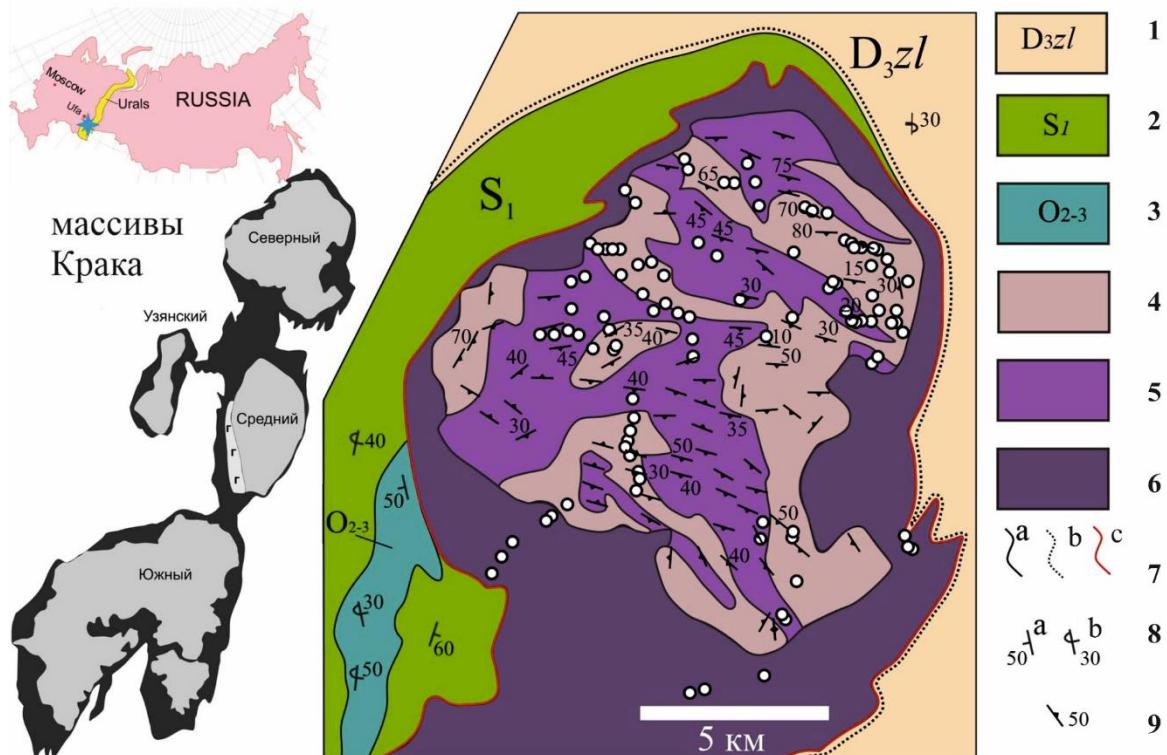


Рис. 1. Геологическое строение массива Северный Крака

Составлена по материалам работ [Москаleva, 1974; Савельева, 1987; Савельев и др., 2008] и геологической съемки (Ключихин и др., 1969 г.). Условные обозначения: 1–3 – вмещающие породы Зилаирской мегазоны: 1 – отложения среднего и верхнего ордовика O_{2-3} (кварцевые песчаники, алевролиты, метабазалты), 2 – отложения нижнего силура S_1 (кремнистые и глинистые сланцы), 3 – зилаирская свита D_3zl (полимиктовые песчаники, алевролиты, глинистые сланцы); 4–6: ультрамафиты массива Северный Крака: 4 – преимущественно лерцолиты, 5 – преимущественно гарцбургиты, 6 – серпентинитовый меланж; 7 – геологические границы (а – стратиграфические согласные, б – несогласные, с – тектонические), 8 – элементы залегания вмещающих пород (а – нормального, б – опрокинутого), 9 – элементы залегания полосчатости в ультрамафитах. Белыми кружками отмечены места отбора образцов

Fig. 1. Schematic geological map of the Northern Kraka massif

Compiled based on materials from works [Moskaleva, 1974; Savelyeva, 1987; Savelyev et al., 2008] and geological survey (Klochikhin et al., 1969). Legend: 1–3 – host rocks of the Zilair megazone: 1 – deposits of the Middle and Upper Ordovician O_{2-3} (quartz sandstones, siltstones, metabasalts), 2 – deposits of the Lower Silurian S_1 (siliceous and clayey shales), 3 – Zilair formation D_3zl (polymict sandstones, siltstones, shales); 4–6 – ultramafic rocks of Northern Kraka massif: 4 – predominantly lherzolites, 5 – predominantly harzburgites, 6 – serpentinite mélange; 7 – geological boundaries (a – stratigraphic concordant, b – unconformable, c – tectonic), 8 – layering of host rocks (a – normal, b – overturned), 9 – banding and foliation in ultramafic rocks. Sampling points are marked with white color

При съемке использованы следующие установки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 3–4 нА, время накопления спектра в точке 60 с в точечном режиме. Формулы хромшпинелидов и оливина рассчитывались на 4, пироксенов – на 6 атомов кислорода соответственно. В формуле хромшпинелидов количество двух- и трехвалентного железа определялось по стехиометрии минерала.

Анализ валового содержания основных петрогенных оксидов проводился в ИГ УФИЦ РАН при помощи стандартного силикатного анализа. Анализ валовых содержаний элементов с низкими концентрациями (в том числе редкоземельных элементов) проводился методом ICP-MS на приборе NexION 300S (PerkinElmer, США) в блоке чистых помещений ЦКП «Геоаналитик» (ИГРПО РАН) после кислотного разложения.

Результаты

Петрография. Ультрамафиты. Наиболее распространенной разновидностью ультрамафитов массива являются лерцолиты, состоящие из оливина (70–80 об. %), ромбического (10–25 об. %) и моноклинного (5–10 об. %) пироксенов. В акцессорных количествах присутствует хромшпинелид (до 3–5 об. %), реже – плагиоклаз (до 5 об. %) и амфибол (до 1–2 об. %). Гарцбургиты имеют подчиненное значение и отличаются отсутствием либо следовыми количествами моноклинного пироксена, в обнажениях они почти не отличимы от лерцолитов, особенно мелко-зернистые разновидности. Еще реже на массиве встречаются дунитовые тела, сложенные полностью оливином с незначительной примесью акцессорного хромшпинелида.

При увеличении концентрации последнего они могут переходить в убоговкрапленные хромититы. Дуниты хорошо отличимы в полевых условиях по гладкой однородной поверхности (отсутствие пироксенов), для них характерна светло-коричневая корка выветривания.

Во всех разновидностях ультрамафитов отмечаются следы высокотемпературных пластических деформаций, которые выражены в неоднородном (облачном) погасании зерен оливина и пироксенов, наличии полос пластического излома (рис. 2, c, d). Наиболее распространенной структурой первичных пород является порфирокластовая, обусловленная наличием крупных деформированных зерен оливина и ортопироксена и мелких, оптически однородных новообразованных зерен тех же минералов (необластов).

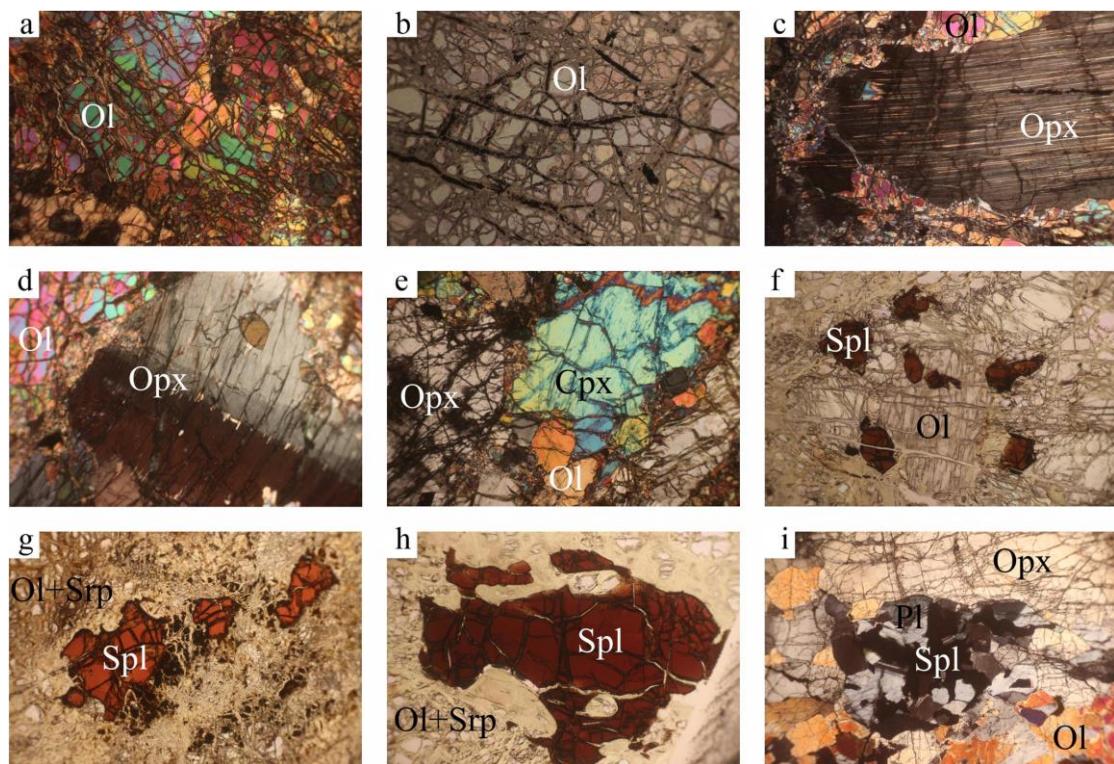


Рис. 2. Петрографические особенности ультрамафитов

а, б – типичная структура слабо серпентинизированного оливина в лерцолитах (а – николи скрещены, б – николи параллельны); с, д – порфироклазы ромбического пироксена (с – «волокнистая» структура, обусловленная наличием многочисленных ламелей диопсида, д – полоса пластического излома, вблизи которой отмечается увеличение количества ламелей диопсида и амфиболя); е – типичное выделение диопсида в лерцолите; ф – скопление субизометрических зерен хромшпинелида в гарцбургите; г – реликтовые хромшпинелиды в полностью серпентинизированном лерцолите; х – крупное ксеноморфное зерно хромшпинелида, захватывающее фрагменты оливина; и – ассоциация скелетного хромшпинелида с плагиоклазом в лерцолите. Поле зрения ~2 мм

Fig. 2. Petrographical peculiarities of ultramafic rocks

а, б – typical structure of weakly serpentinized olivine in lherzolites (а – cross-polarized transmitted light, б – plane-polarized transmitted light); с, д – porphyroclasts of orthopyroxene (с – “fibrous” structure due to the presence of numerous diopside lamellae, д – kink-band, near which there is an increase in the number of diopside and amphibole lamellae); е – typical appearance of diopside in lherzolite; ф – aggregate of subisometric Cr-spinel grains in harzburgite; г – relict Cr-spinel grains in completely serpentinized lherzolite; х – large xenomorphic grain of Cr-spinel, including olivine fragments; и – association of skeletal Cr-spinel grain with plagioclase in lherzolite. Field of view ~2 mm

Типичный акцессорный минерал ультрамафитов – хромшпинелид, его морфология и окраска варьируют от лерцолитов к дунитам. Для лерцолитов характерны ксеноморфные выделения хромшпинелидов (см. рис. 2, *g*, *h*). В ассоциации с плагиоклазами для них характерны вермикулярные выделения (рис. 2, *i*), окраска в проходящем свете варьирует от оранжевого до светло-коричневого. В гарцбургитах хромшпинелид представлен субизометричными зернами густой коричневой окраски (рис. 2, *f*), а в дунитах преобладают идиоморфные выделения, часто со сглаженными очертаниями.

Из вторичных минералов наиболее широко распространён серпентин, образующий петельчатую структуру замещения оливина (рис. 2, *a*, *b*) и баститовые псевдоморфозы по пироксенам. Доля серпентина в большинстве образцов варьирует от 10–15 % в наименее изменённых перidotитах до 90 % в апоперidotитовых и 100 % в меланжевых серпентинитах. В наиболее изменённых породах присутствует магнетит в виде кайм изменения хромшпинелидов (рис. 2, *g*) и в виде пылевидных выделений в серпентинитовых жилках (рис. 2, *b*).

При изучении аншилифов, в лерцолитах и гарцбургитах встречена сульфидная и самородная минерализация, включая минералы платиновой группы. К настоящему времени диагностированы пирротин, пентландит, кобальтсодержащий пентландит, аваруит, самородная медь, минералы платиновой группы: сплавы Os-Ir-Ru состава, изоферроплатина, сульфиды лаурит-эрликоманитового состава [Савельев и др., 2018; Савельев, Гатаулин, 2023].

Петрография. Мафические породы. Как уже было отмечено выше, с ультрамафитами массива ассоциируют тела пород основного состава. В некоторых случаях они образуют субвертикальные дайки в лерцолитах, но чаще встречаются в виде тел с тектоническими контактами в зоне меланжа либо в виде элювиальных развалов в плоскости распространения ультрамафитов. Большая часть изученных образцов в поле диагностирована как габбродолериты, для них характерна массивная текстура, офитовая и диабазовая структура. Валовый химический состав пород и присутствие в части образцов калиевого полевого шпата свидетельствуют о наличии среди изученных пород щелочных габбро (монцогаббро).

Породообразующие минералы в мафитах представлены клинопироксеном, плагиоклазом и в некоторых образцах – калиевым полевым шпатом. Клинопироксен распространен равномерно в виде гипидиоморфных, реже – ксеноморфных выделений размером до 0,5 мм. Зерна плагиоклаза встречаются как в виде гипидиоморфных вытянутых призматических

зерен размером до 0,5 мм, так и ксеноморфных, заполняющих промежутки между зернами клинопироксенов. Магнетит встречается редко в виде ксеноморфных отдельных зерен или в виде скоплений пылевидных частиц. Из вторичных изменений наиболее часто отмечаются альбитизация и соссюритизация.

Химический состав пород. Валовые составы пород в основных петрогенных оксидах представлены в табл. 1. Относительно высокие значения потерь при прокаливании (ППП) в некоторых анализах вызваны неравномерной серпентинизацией. Наиболее интенсивно данный процесс затрагивает дуниты и дунит-гарцбургиты, в меньшей степени он проявлен в лерцолитах.

Для дискриминации разновидностей ультрамафитов и исключения влияния серпентинизации пород был применён пересчёт результатов силикатного анализа на нормативный минеральный состав по Н.Д. Соболеву [Соболев, 1952]. Фигуративные точки соотношений порообразующих минералов нанесены на треугольную диаграмму (рис. 3, *a*). Эти же данные были использованы для нанесения точек составов на диаграмму A–S. Большинство фигуративных точек располагаются в пределах и вблизи полей гарцбургита и лерцолита (рис. 3, *b*). Составы мафических пород по соотношению главных компонентов (SiO_2 , $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) варьируют довольно значительно, от пикритов до монцогабродиоритов, образуя слабо выраженный тренд (рис. 3, *f*).

Микроэлементный валовый состав. Валовые содержания лантаноидов в ультрамафитах и мафитах были нормированы на хондрит C1 [McDonough, Sun, 1995], проведено сравнение их с таковыми в пиролите (рис. 3, *c*). В ультрамафитах содержания РЗЭ варьируют в довольно широком диапазоне – от 0,1 до 3–4 ед. хондритового уровня, при этом кривая распределения содержаний РЗЭ имеет U-образную форму с повышенными содержаниями La-Pr и Ho-Lu относительно средних РЗЭ – Nd-Dy. Усредненные хондрит-нормированные значения при этом образуют пологий график располагаются примерно на хондритовом уровне (рис. 3, *c*).

В мафических породах усредненные значения также образуют пологую кривую на уровне 20 ед. с небольшим отрицательным наклоном (рис. 3, *d*). Поскольку для части анализов основных пород характерна отрицательная европеевская аномалия, то можно предположить, что образование родоначального для них расплава проходило на уровне плагиоклазовой фации глубинности верхней мантии [Скляров и др., 2001]. В пользу данного предположения свидетельствует наличие комплементарной ей незначительной положительной аномалии европия в некоторых образцах лерцолитов.

По характеристике соотношений Lu, Hf, Sm и Nd локализация фигуративных точек анализов мафитов указывает на образование их из деплетированного

мантийного источника шпинелевой фации со степенью частичного плавления более 15 %. При этом все составы достаточно близки к полю MORB (рис. 3, e).

Таблица 1
Валовые составы изученных ультрамафитов
Table 1
Bulk compositions of the studied ultramafics

№ обр.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	ППП	Сумма	S	A
СеK-233	44,00	0,07	0,80	4,00	4,00	0,13	40,40	1,60	0,13	0,06	—	4,80	99,99	-4,60	2,59
СеK-235	39,90	0,08	0,80	4,50	4,30	0,13	40,60	1,60	0,20	0,06	—	7,40	99,57	-9,71	2,66
СеK-236	39,80	0,07	0,20	5,00	3,50	0,13	42,50	1,10	0,20	0,06	—	6,90	99,46	-11,40	1,56
СеK-237	39,80	0,07	1,40	4,00	4,00	0,13	42,40	2,50	0,13	0,04	—	5,20	99,67	-10,80	4,07
СеK-238	38,60	0,07	0,40	4,50	3,50	0,12	40,50	1,90	1,20	0,06	—	8,90	99,75	-10,09	3,56
СеK-239	41,00	0,07	2,80	5,00	3,60	0,12	42,00	1,60	0,13	0,04	—	4,00	100,36	-9,79	4,57
СеK-240	41,50	0,07	1,20	4,00	4,30	0,12	39,90	1,90	0,09	0,06	—	5,82	98,96	-6,89	3,25
СеK-244	40,50	0,10	1,20	2,80	5,30	0,13	40,80	1,60	0,13	0,06	—	6,80	99,42	-8,63	2,99
СеK-245	40,00	0,10	4,60	2,00	5,00	0,12	36,20	4,40	2,40	0,24	—	5,00	100,06	-3,42	11,64
СеK-247	41,80	0,10	0,20	6,00	2,50	0,14	40,40	0,50	0,24	0,04	—	7,80	99,72	-7,34	0,98
СеK-250	40,50	0,10	0,80	5,00	2,80	0,11	41,60	1,10	0,21	0,20	—	6,90	99,32	-9,11	2,31
СеK-251	42,00	0,10	2,80	5,00	4,30	0,12	38,20	2,80	0,80	0,06	—	3,90	100,08	-5,72	6,46
СеK-253	37,90	0,10	0,50	9,00	1,40	0,13	37,20	0,80	0,07	0,06	—	12,80	99,96	-9,93	1,43
СеK-263	37,90	0,10	0,20	8,00	0,50	0,11	38,40	0,50	0,04	0,06	—	13,90	99,71	-9,21	0,80
СеK-268	40,90	0,10	2,80	3,70	4,00	0,13	39,80	1,60	0,54	0,04	—	6,10	99,71	-6,83	4,98
Сек-1771	45,00	0,04	2,00	—	8,70	0,12	40,00	0,80	0,50	0,10	0,03	1,66	98,95	-3,86	3,40
Сек-1772-2	40,00	0,04	1,30	—	8,70	0,10	39,60	0,90	0,27	0,10	0,03	10,00	101,04	-8,44	2,57
Сек-1774	42,00	0,04	0,77	—	8,00	0,10	40,00	1,20	0,27	0,06	0,03	7,90	100,37	-6,14	2,30
Сек-1776-4	43,14	0,04	1,90	—	8,40	0,11	40,00	1,27	0,50	0,06	0,03	4,92	100,37	-5,41	3,73
Сек-1777	44,06	0,04	1,30	—	8,70	0,11	40,00	1,50	0,20	0,10	0,01	3,76	99,78	-4,79	3,10
СеK-78	39,60	0,07	0,50	2,40	5,70	0,12	47,00	0,20	1,30	0,10	—	2,80	99,79	-15,69	2,10
СеK-79	42,00	0,07	3,60	2,40	5,70	0,14	42,00	1,90	0,20	0,06	—	2,00	100,07	-8,31	5,76
СеK-80	43,50	0,06	0,90	4,00	3,50	0,11	34,40	7,80	0,20	0,06	—	5,50	100,03	1,43	8,96
СеK-82	42,00	0,06	3,20	3,00	6,10	0,12	37,30	3,90	2,40	0,15	—	1,80	100,03	-4,58	9,65
СеK-83	39,80	0,07	0,70	4,00	4,10	0,11	40,60	2,50	1,80	0,10	—	5,80	99,58	-9,08	5,10
СеK-84	39,00	0,06	0,20	8,00	4,30	0,11	40,00	0,50	0,13	0,06	—	7,80	100,16	-13,47	0,89
СеK-86	40,00	0,07	0,80	3,00	5,00	0,12	44,00	1,90	1,80	0,20	—	3,30	100,19	-12,19	4,70
СеK-91	39,80	0,06	3,60	4,50	3,30	0,12	33,80	4,90	0,07	0,03	—	9,90	100,08	-1,98	8,60
СеK-92	37,30	0,06	0,80	7,00	4,00	0,12	39,00	0,50	0,07	0,06	—	11,00	99,91	-12,88	1,43

* Прочерк означает, что концентрация оксида ниже предела обнаружения; в некоторых случаях приведены данные рентгенофлуоресцентного анализа без разделения FeO и Fe₂O₃.

* Dash means that the oxide concentration is below the detection limit; in some cases, X-ray fluorescence analysis data are provided without separation of FeO and Fe₂O₃.

Минералогия. Оливин ультрамафитов характеризуется постоянством состава. Доля форстеритового минала варьирует в пределах 0,91–0,95 в дунитах и 0,93–0,88 в перидотитах (см. рис. 5, c). Характерной примесью является никель, содержание которого варьирует в пределах 0,25–0,55 % NiO. По соотношениям FeO-NiO оливин перидотитов и дунитов попадает в типичные поля офиолитовых ультрамафитов (рис. 4, a). Лишь в части анализов обнаружен марганец в количествах до 0,37 % MnO.

Ортопироксен присутствует в гарцбургитах и лерцолитах в виде крупных таблитчатых зёрен, часто с ламеллями клинопироксена и амфибола, также в виде мелких зёрен – необластов в зонах динамической рекристаллизации вокруг некоторых крупных

зёрен [Савельев и др., 2017]. Состав достаточно стабилен, соответствует энстатиту с незначительным содержанием кальция и железа.

Постоянные примеси – алюминий, хром. В незначительном количестве анализов определены Na, Ti, Mn.

Клинопироксен перидотитов соответствует диопсиду (рис. 4, c), он встречается преимущественно в виде мелких зерен (необласт), окружающих крупные зёрна ортопироксена, значительно реже в виде более крупных таблитчатых изометрических зерен. Практически все изученные зерна клинопироксена из мафических пород, ассоциирующих с ультрамафитами, относятся к авгиту, который обнаруживает контрастное поведение титана.

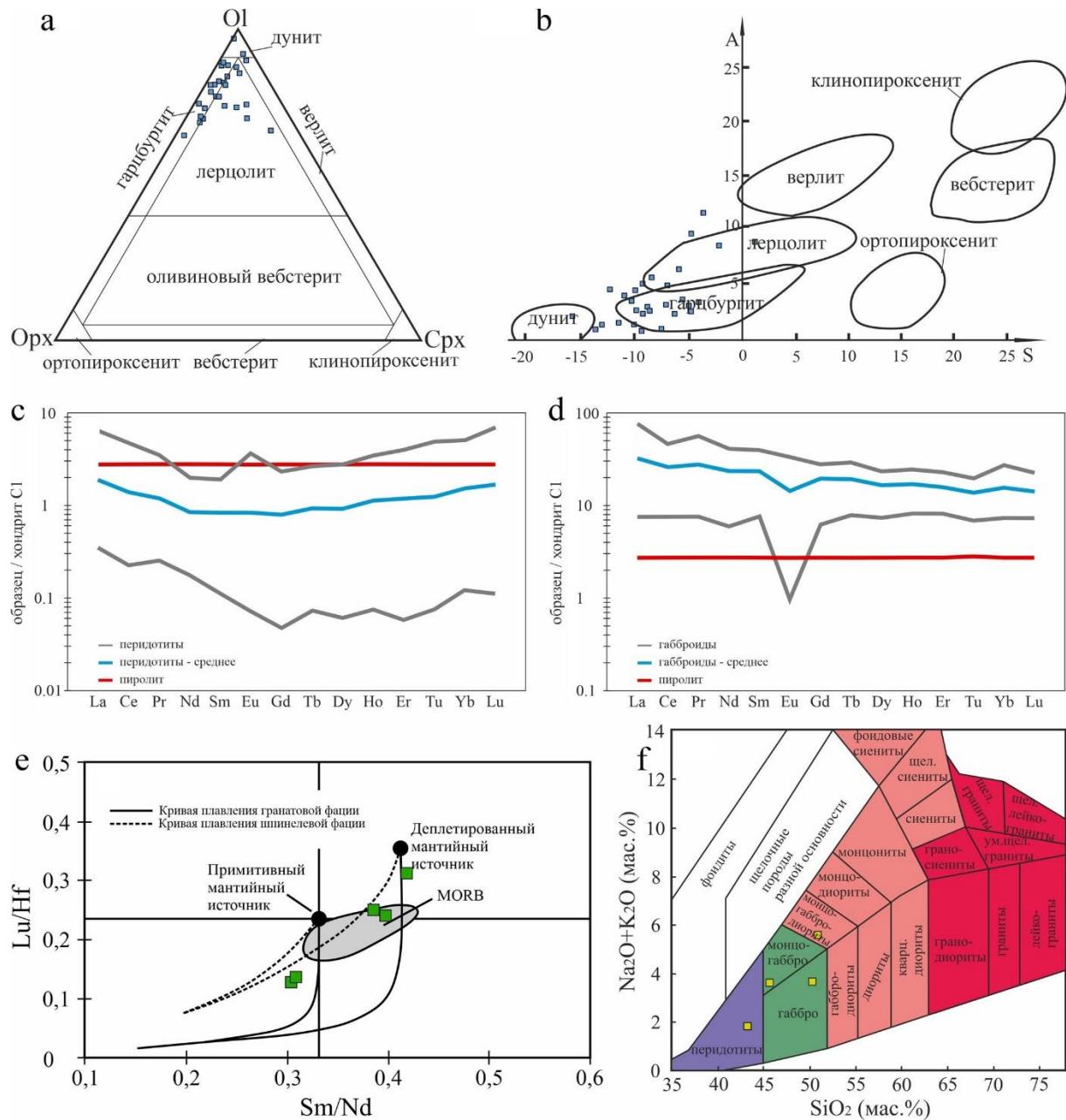


Рис. 3. Геохимические особенности ультрамафитов и мафитов

а, б – петрохимическая характеристика изученных пород мантийного комплекса: а – на диаграмме нормативного состава; б – на дискриминационной диаграмме A-S [Дмитриев и др., 1972]: A = $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$; S = $\text{SiO}_2 - (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2)$.
 с, д – валовые содержания РЗЭ в образцах перidotитов (С) и габброидов (D), нормированные на хондрит по [McDonough, Sun, 1995].
 е – диаграмма Lu/Hf-Sm/Nd для мafических пород (соотношения в примитивной мантии по [Sun, McDonough, 1989], модельные кривые и точка для деплацированной мантии из [Barry et al., 2003] по формулам [Albarede, 1995] для 15 %-й деплацированности начального мантийного состава (поле MORB по [Chauvel, Blichert-Toft, 2001]); f – классификационная TAS-диаграмма изученных мafических пород [Петрографический кодекс..., 2009]

Fig. 3. Compositional features of ultramafic and mafic rocks

a, b – petrochemical characterization of the studied rocks of the mantle complex: a – on the diagram of normative composition; b – on the discriminative diagram A-S [Dmitriev et al., 1972]: A = $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$; S = $\text{SiO}_2 - (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2)$. c, d – gross REE contents in samples of peridotite (C) and gabbroids (D), normalized to chondrite in comparison with REE contents in pyrolite according to [McDonough, Sun, 1995].; e – diagram of Lu/Hf – Sm/Nd for mafic rocks (ratios in primitive mantle according to [Sun, McDonough, 1989], model curves and point for the depleted mantle from [Barry et al., 2003] by formulas [Albarede, 1995] for 15 % depletion of initial mantle composition; field of mid-ocean ridge basalts according to [Chauvel, Blichert-Toft, 2001]). f – TAS-diagram of the studied mafic rocks [Petrograficheskiy kodeks..., 2009]

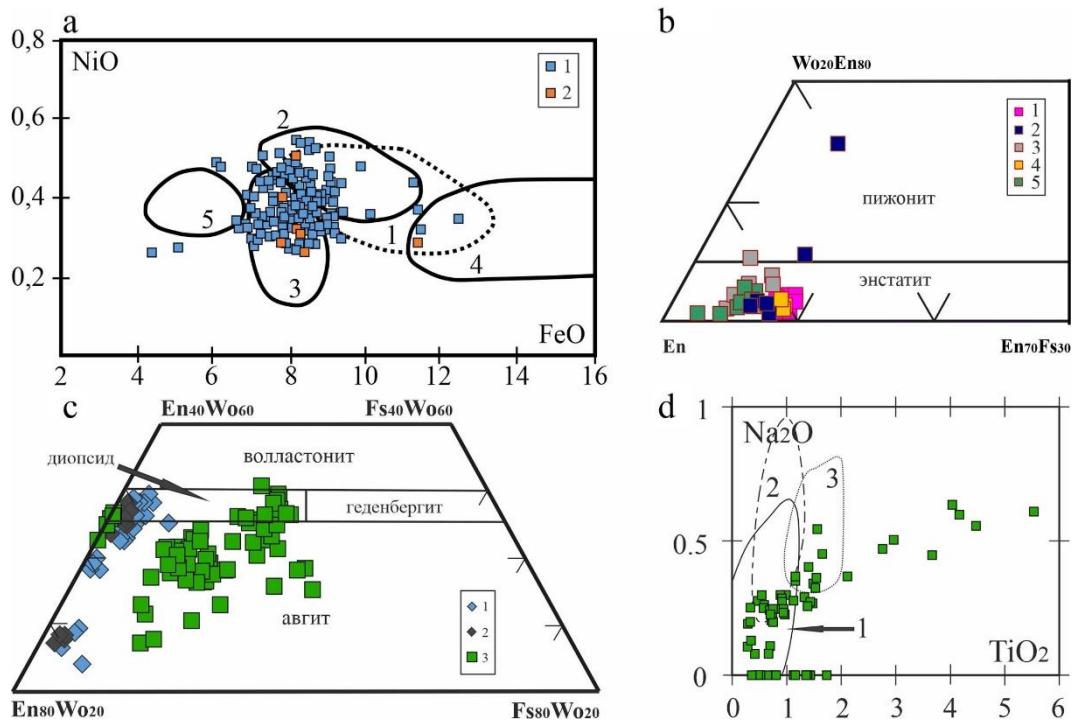


Рис. 4. Особенности состава поронообразующих силикатов из ультрамафитов и мафитов

а – диаграмма распределения FeO-NiO в оливине изученных пород. Фигуративные точки: 1 – перидотиты, 2 – дунит-гарцбургит. Поля даны для пород различных комплексов оphiолитов Полярного Урала [Брянчанинова, 1990]: 1 – гарцбургиты, 2 – дунит-гарцбургиты, 3 – дуниты, 4 – дунит-верлит-клинопироксенит, 5 – хромовые руды; б – состав изученных ортопироксенов на фрагменте диаграммы [Morimoto, 1989]. 1 – шпинелевые лерцолиты, 2 – шпинель-плагиоклавовые лерцолиты, 3 – гарцбургит, 4 – дунит-гарцбургит, 5 – хромитит; в, г – составы изученных клинопироксенов: в – тройная классификационная диаграмма для пироксенов [Morimoto, 1989], г – диаграмма TiO₂ – Na₂O (мас.%) для клинопироксенов из мафических пород Северного Крака. Поля: 1 – поле пироксенов корового разреза оphiолитов [Савельев и др., 2022], 2 – массивы Урало-Аляскинского типа, 3 – расслоенные интрузии Дулутского комплекса [Weiblen, Morey, 1980] и района Панкси, ЮЗ Китай [Hou et al., 2012]

Fig. 4. Compositional features of silicates from ultramafic and mafic rocks

а – diagram of FeO-NiO distribution in olivine of the studied rocks. Figurative points: 1 – peridotite, 2 – dunite-harzburgite. The fields are given for rocks of different complexes of ophiolites of the Polar Urals [Brianchaninova, 1990]: 1 – harzburgites, 2 – dunite-harzburgites, 3 – dunites, 4 – dunite-verlite-clinopyroxenite, 5 – chrome ores; б – composition of the studied orthopyroxenes on the fragment of the diagram [Morimoto, 1989]. 1 – spinel lherzolites, 2 – spinel-plagioclase lherzolites, 3 – harzburgite, 4 – dunite-harzburgite, 5 – chromitite; в, г – compositions of studied clinopyroxenes: в – classification diagram for pyroxenes [Morimoto, 1989], г – TiO₂-Na₂O diagram (wt.%) for clinopyroxenes of Northern Kraka gabbroids. Fields: 1 – field of pyroxenes of the crustal section of ophiolites [Saveliev et al., 2022], 2 – Ural-Alaskan-type massifs, 3 – stratified intrusions of the Duluth complex [Weiblen, Morey, 1980] and the Pangxi area, SW China [Hou et al., 2012]

В меньшей части анализов концентрация TiO₂ находится ниже предела обнаружения, но в значительной части выборки этот показатель резко повышен не только по сравнению с клинопироксенами перидотитов, но и с аналогичными минералами большинства габброидных интрузий (см. рис. 4, г). Поле составов изученных пироксенов резко отделено от такового из перидотитов массива Северный Крака и отличается повышенным содержанием железа. Некоторые зерна пироксена зональны по содержанию железа, что вызвано, по-видимому, реакцией раннего пироксена с остаточным расплавом.

Плагиоклаз встречается в лерцолитах в виде сростков с хромшпинелидом, в которых он слагает

периферию либо матрикс, а скелетный хромшпинелид – центральную часть. Плагиоклаз почти всегда значительно изменён с образованием соссюрита. По составу плагиоклаз лерцолитов соответствует лабрадору и битовниту ($An = 0,58–0,79$).

В мафитах плагиоклаз представлен как призматическими зернами вытянутой формы и ксеноморфными выделениями, заполняющими интерстиции между зёренами клинопироксена. Первичный плагиоклаз в большинстве случаев подвержен вторичным изменениям, по составу он соответствует в большинстве случаев альбиту, редко олигоклазу и андезину. В щелочных разновидностях мафитов (монцогаббро) место плагиоклаза занимают калиевые полевые

шпаты, указывая на повышенные содержания калия в породах.

Состав акцессорных хромшпинелидов варьирует в значительном диапазоне и демонстрирует зависимость от минерального состава породы (табл. 2, рис. 5, a, b).

В частности, наиболее глиноземистый состав имеют хромшпинелиды из лерцолитов ($\#Cr = 0,1\text{--}0,4$), в гарцбургитах распространены умеренно-хромистые минералы ($\#Cr = 0,3\text{--}0,6$), в дунитах и хромититах отмечаются наибольшие значения отношения Cr/Al ($\#Cr = 0,5\text{--}0,85$).

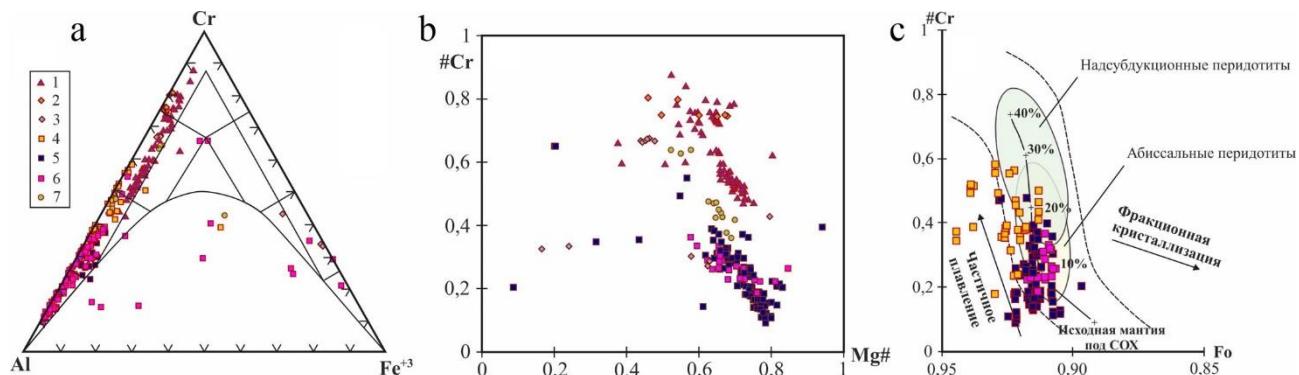


Рис. 5. Диаграммы составов хромшпинелидов

а – тройная диаграмма для трехвалентных катионов хромшпинелидов; б – диаграмма $\#Cr$ – Mg для хромшпинелидов; в – диаграмма состава сосуществующих зерен оливина и хромшпинелида, поля проведены в соответствии с [Arai, 1994]; En, Wo, Fs – атомные доли минералов энстатита, волластонита и ферросилилита в пироксенах соответственно; $\#Cr = Cr/(Cr+Al)$, ат. %; $\#Mg = Mg/(Mg+Fe^{2+})$, ат. % в хромшпинелиде; Fo = Mg/(Mg+Fe), ат. % в оливине. 1 – хромитит, 2 – дунит, 3 – дунит-гарцбургит, 4 – гарцбургит, 5 – шпинель-плагиоклазовый лерцолит, 6 – серпентинит

Fig. 5. Composition diagrams of Cr-spinels

а – ternary diagram for trivalent cations of Cr-spinels; б – diagram of $\#Cr$ – Mg for Cr-spinels; в – diagram of composition of coexisting olivine and Cr-spinel grains, the fields are drawn in accordance with [Arai, 1994]. En, Wo, Fs – atomic fractions of enstatite, wollastonite and ferrosilite minerals in pyroxenes, respectively; $\#Cr = Cr/(Cr+Al)$, at. %; $\#Mg = Mg/(Mg+Fe^{2+})$, at. % in Cr-spinels; Fo = Mg/(Mg+Fe), at. % in olivine. 1 – chromitite, 2 – dunite, 3 – dunite-harzburgite, 4 – harzburgite, 5 – spinel-plagioclase lherzolite, 7 – serpentinite

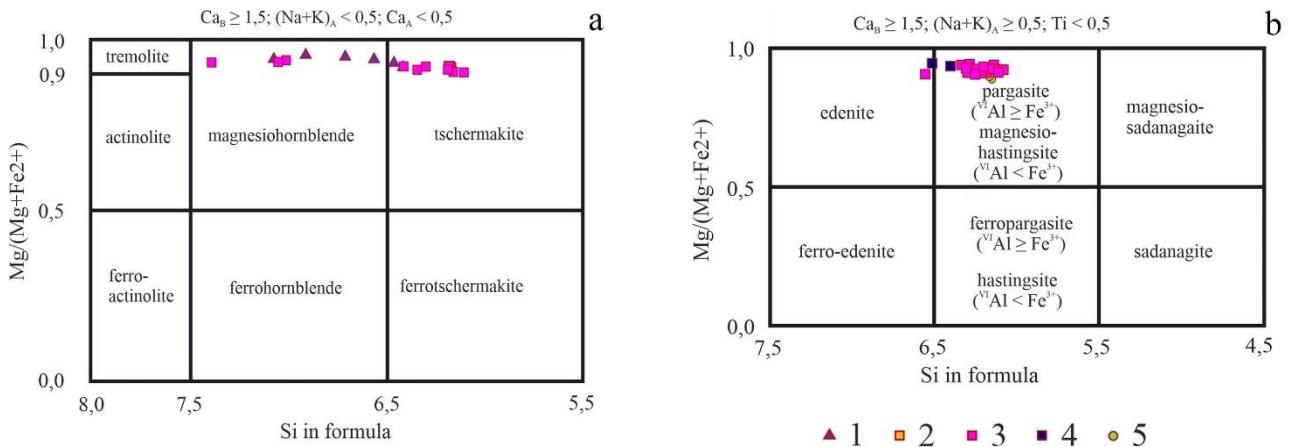


Рис. 6. Диаграммы составов амфиболов из ультрамафитов

а, б – диаграммы составов амфиболов из различных пород по классификации [Leake et al., 1997]. 1 – хромитит, 2 – дунит-гарцбургит, 3 – лерцолит, 4 – шпинель-плагиоклазовый лерцолит, 5 – серпентинит

Fig. 6. Composition diagrams of amphiboles from ultramafic rocks

а, б – diagrams of amphibole compositions from different rocks according to the classification [Leake et al., 1997]. 1 – chromitite, 2 – dunite-harzburgite, 3 – lherzolite, 4 – spinel-plagioclase lherzolite, 5 – serpentinite

Амфиболы представлены четырьмя модификациями: 1) призматическими зёренами, ассоциирующими с диопсидом близких размеров (0,1–0,5 мм); 2) ламеллями в ортопироксене; 3) необластами на периферии

крупных деформированных зёрен ортопироксена (0,05–0,2 мм), а также 4) включениями и интерстициальными фазами в хромититах. Составы амфиболов из хромитита соответствуют магнезиальной роговой

обманке, амфиболы шпинелевых лерцолитов в большинстве случаев попадают в поля паргасита, часто чермакита, а отдельных случаях – магнезиальной ро-

говой обманки и эденита. Единичные анализы амфиболов из серпентинитов и шпинель-плагиоклазового лерцолита соответствуют паргаситу (см. рис. 6, a, b).

Средние и максимальные значения $\#Cr = Cr/(Cr+Al+Fe^{3+})$ и $\#Mg = Mg/(Mg+Fe^{2+})$ в изученных породах

Table 2

Average and maximal values of $\#Cr = Cr/(Cr+Al+Fe^{3+})$ and $\#Mg = Mg/(Mg+Fe^{2+})$ in the studied rocks

	Хромитит		Дунит		Дунит-гарцбургит		Гарцбургит		Лерцолит		Лерц шп-плаг		Вебстерит	
	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.
#Cr	0,61	0,88	0,76	0,80	0,50	0,67	0,41	0,58	0,22	0,55	0,27	0,37	0,19	0,40
#Mg	0,66	0,80	0,60	0,68	0,48	0,79	0,64	0,77	0,73	0,83	0,69	0,84	0,67	0,83

Магнетит характерен для наиболее изменённых образцов дунита и перидотита, представлен двумя формами выделений. Большая часть – в виде кайм на периферии зёрен хромшпинелидов, в серпентините доходящих до полного замещения магнетитом хромшпинелидов. Незначительная часть – в виде пылевидных выделений в серпентинитовых жилах.

Обсуждение

Исходя из расположений точек составов существующих зёрен хромшпинелидов и оливина на диаграмме оливин-шпинелевой мантийной ассоциации (см. рис. 5, c), образование большинства перидотитов происходило при степени частичного плавления исходного мантийного субстрата менее 20 %, при этом наименьшая степень плавления устанавливается для лерцолита (до 10–15%). По результатам вычисления по формуле $F = 10 * \ln(Cr\#) + 24$ [Hellebrand et al., 2001], приведённым в табл. 3, степень частичного

плавления возрастает в ряду шпинель-плагиоклазовый лерцолит – шпинелевый лерцолит – гарцбургит – дунит-гарцбургит – дунит.

По данным предыдущих работ [Савельев, Гатаулин, 2021], большая часть значений оливин-хромшпинелидовых геотермометров для перидотитов (по трём версиям [Fabries, 1979; Roeder et al., 1979; Ballhaus et al., 1991]) укладывается в интервал 650–900 °C, при этом наиболее часто встречаются температуры около 700 °C. Двупироксеновые геотермометры трех различных версий [Wells, 1977; Brey, Köhler, 1990; Putirka, 2008] показали более высокие температуры закрытия обменных реакций: разброс значений составил 850–1200 °C, а наибольшая частота встречаемости отмечена для температур около 1000 °C. Значение фугитивности кислорода (по методике [Ballhaus et al., 1991]) варьирует в пределах $-3 \dots +1.5 \Delta \log O_2$ (FMQ). Расчёты геобарометров [Putirka, 2008] показали, что становление большей части изученных лерцолитов завершилось в диапазоне давлений от 5 до 14 кбар, что соответствует глубинам 15–40 км.

Средние и максимальные значения степени частичного плавления исходного мантийного вещества при образовании пород массива Северный Крака по формуле $F = 10 * \ln(Cr\#) + 24$ [Hellebrand et al., 2001]

Table 3

Average and maximum values of the degree of partial melting of the initial mantle matter during the formation of rocks of the Northern Kraka massif by the formula $F = 10 * \ln(Cr\#) + 24$ [Hellebrand et al., 2001]

Table 3

Дунит		Дунит-гарцбургит		Гарцбургит		Лерцолит		Лерц шп-плаг		Вебстерит	
ср	макс	ср	макс	ср	макс	ср	макс	ср	макс	ср	макс
21,20	21,8	16,3	20,0	14,7	18,6	8,2	18,0	10,9	13,9	6,9	14,7

Сопутствующий частичному плавлению, а также соответствующий данным геотермобарометрии процесс пластической деформации указывается как значимый в ходе образования офиолитовых ультрамафитов Урала в работах [Щербаков, 1990; Чернышов, 2001; Чернышев, Юричев, 2016; Савельев и др., 2017]. Содержание РЭЗ как в ультрамафитах, так и в мафитах демонстрирует субгоризонтальное распределение относительно оценочного состава пиролита,

при этом в мафитах содержания РЭЗ на 1–2 порядка выше таковых в перидотитах.

Значительные валовые содержания щелочноземельных металлов в мафических породах согласуются с большой долей лейкоократовых минералов. Соотношения лантаноидов указывают на образование изученных тел мафитов в результате частичного плавления слабо деплелированного мантийного источника.

Заключение

Соотношения составов хромшпинелида и оливина перidotитов указывают на образование их в ходе частичного плавления мантийного субстрата (до 25 %) в температурных условиях, соответствующих субсолидусным, при этом как показатель частичного плавления, так и температура в целом возрастают в ряду плагиоклаз-шпинелевый лерцолит – шпинелевый лерцолит – гарцбургит. Деформационные структуры, характерные для значительного числа зёрен оливина и пироксена, указывают на значительную роль пластических деформаций в ходе становления массива.

Мафиты из серпентинитового меланжа периферии Северного Крака сложены высокотитанистым авгитом, плагиоклазом и калиевым полевым шпатом и

представлены монцогаббро. Характеристики соотношений валовых содержаний лантаноидов в мафитах характеризуют их как результат кристаллизации расплавов, выплавленных из слабо деплелированных мантийных ультрамафитов (около 15 %) шпинелевой фации глубинности. Учитывая, что конечный состав реститовых перidotитов соответствует более высокой деплелированности, а РТ-условия – чаще плагиоклазовой, чем шпинелевой фациям, можно заключить, что расплавы, из которых образовались тела магматических пород периферической части массива, отделялись от рестита на ранних этапах подъема мантийного диапира, на что также указывает и высокое содержание К и Na. При этом оценка потенциального влияния корового смешения неоднозначна и требует дальнейших исследований.

Список источников

- Брянчанинова Н.И.** Породообразующие силикаты ультрабазитов как индикаторы условий образования и рудоносности. Сыктывкар : Коми науч. центр УрО АН СССР, 1990, 22 с. (Сер. препринтов «Научные доклады»; Вып. 226).
- Дмитриев Л.В., Уханов А.В., Шараськин Л.Я.** К вопросу о составе вещества верхней мантии // Геохимия. 1972. № 10. С. 1155–1167.
- Москалева С.В.** Гипербазиты и их хромитоносность. Л. : Недра, 1974. 279 с.
- Петрографический кодекс России: Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования** / под ред. О.А. Богатикова, О.В. Петрова, А.Ф. Морозова ; отв. ред. Л.В. Шарпенок. 3-е изд., испр. и доп. СПб. : ВСЕГЕИ, 2009. 200 с.
- Савельев Д.Е., Гатауллин Р.А.** Акцессорная платиноидная минерализация в лерцолитах массива Северный Крака (Южный Урал) // Георесурсы. 2023. № 25 (3). С. 208–215. doi: 10.18599/grs.2023.3.24
- Савельев Д.Е., Гатауллин Р.А.** Лерцолиты Азнагуловской площади (Южный Урал): состав и Р-Т-*f*O₂ условия образования // Вестник Академии Наук РБ. 2021. Т. 40, № 3 (103). С. 15–25.
- Савельев Д.Е., Масагутов Р.Х., Сирота С.Н.** Минералогические особенности и субсолидусные структуры израндитов Александровского комплекса // Геологический вестник. 2022. № 2. С. 30–47. doi: 10.31084/2619-0087/2022-2-3
- Савельев Д.Е., Пучков В.Н., Сергеев С.Н., Мусабиров И.И.** О деформационно-индуцированном распаде энстатита в мантийных перidotитах и его значении для процессов частичного плавления и хромитообразования // Доклады Академии наук. 2017. Т. 476, № 2. С. 200–204.
- Савельев Д.Е., Сначёв В.И., Савельева Е.Н., Бажин Е.А.** Геология, петрогохимия и хромитоносность габбро-гипербазитовых массивов Южного Урала. Уфа : ДизайнПолиграфСервис, 2008. 320 с.
- Савельев Д.Е., Нуруманова Я.Н., Гатауллин Р.А., Сергеев С.Н., Мусабиров И.И., Блинов И.А.** О новых проявлениях платинометальной минерализации в офиолитовых ультрамафитах Южного Урала // Петрология магматических и метаморфических комплексов : материалы X Всерос. петрографической конф. с междунар. участием. 2018. Вып. 10. С. 321–325.
- Савельева Г.Н.** Габбро-ультрабазитовые комплексы офиолитов Урала и их аналоги в современной океанической коре. М. : Наука, 1987. 230 с.
- Склиров Е.В., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Иванов А.В., Летников Е.Ф., Миронов А.Г., Бараш И.Г., Буланов В.А., Сизых А.И.** Интерпретация геохимических данных : учеб. пособие. М. : Интернет Инжиниринг, 2001. 288 с.
- Сначёв В.И., Савельев Д.Е., Рыкус М.В.** Петрогохимические особенности пород и руд габбро-гипербазитовых массивов Крака. Уфа, 2001. 212 с.
- Соболев Н.Д.** Ультрабазиты Большого Кавказа. М. : Госгеолиздат, 1952. 240 с.
- Чернышов А.И.** Ультрамафиты (пластическое течение, структурная и петроструктурная неоднородность). Томск, 2001. 215 с.
- Чернышов А.И., Юричев А.Н.** Структурная эволюция дунитов и хромитов Харчурзьского массива (Полярный Урал) // Геотектоника. 2016. № 2. С. 62–77. doi: 10.7868/S0016853X1602003X
- Щербаков С.А.** Пластические деформации ультрабазитов офиолитовой ассоциации Урала. М. : Наука, 1990. 120 с.
- Albarede F.** Residence time analysis of geochemical fluctuations in volcanic series // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995. No. 57. P. 615–621.
- Arai S.** Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation // Chemical Geology. 1994. No. 113. P. 191–204.
- Ballhaus C., Berry R., Green D.** High pressure experimental calibration of the olivine orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: Implication for the oxydation state of the upper mantle // Contribution to Mineralogy and Petrology. 1991. V. 107. P. 27–40.
- Barry T.L., Saunders A.D., Kempton P.D., Windley B.F., Pringle M.S., Dorjnamjaa D., Saandar S.** Petrogenesis of Cenozoic Basalts from Mongolia: Evidence for the Role of Asthenospheric versus Metasomatized Lithospheric Mantle Sources // Journal Of Petrology. 2003. V. 44, No. 1. P. 55–91.
- Brey G.P., Köhler T.** Geothermobarometry in 4-phase Iherzolites: 2. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers // Journal of Petrology. 1990. V. 31. P. 1353–1378.

- Chauvel B.-T.** A hafnium isotope and trace element perspective on melting of the depleted mantle // Earth and Planetary Science Letters. 2001. No. 190. P. 137–151.
- Fabries J.** Spinel-olivine geothermometry in peridotites from ultramafic complexes // Contribution to Mineralogy and Petrology. 1979. V. 6. P. 329–336.
- Hellebrand E., Snow J.E., Dick H.J.B., Hofmann A.** Coupled major and trace elements as indicators of the extent of melting in mid-ocean-ridge peridotites // Nature. 2001. P. 677–681.
- Hou T., Zhang Zh., Encarnacion J., Santosh M.** Petrogenesis and metallogenesis of the Taihe gabbroic intrusion associated with Fe-Ti-oxide ores in the Panxi district, Emeishan Large Igneous Province, southwest China // Ore Geology Reviews. 2012. V. 49. P. 109–127.
- Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne W.C., Kato A., Kisch K.J., Krivovichev V.G., Lithout K., Laird J., Mandarino J.A., Maresch W.V., Nickel E.A., Rock N.M.S., Schumacher J.C., Smith D.C., Stephenson N.C.N., Ungaretti L., Whittaker E.J.W., Youzhi G.** Nomenclature of amphiboles; report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association commission on new minerals and mineral names // Canadian Mineralogist. 1997. V. 35. P. 219–246.
- McDonough W.F., Sun S.-S.** The composition of the Earth // Chemical Geology. 1995. V. 120, Is. 3–4. P. 223–253.
- Morimoto N.** Nomenclature of pyroxenes // Canadian mineralogist. 1989. V. 27. P. 143–156.
- Putirka K.D.** Thermometers and barometers for volcanic systems // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2008. V. 69. P. 61–120.
- Roeder R.L., Campbell I.H., Jamieson H.E.** A reevaluation of the olivine-spinel geothermometer // Contribution to Mineralogy and Petrology. 1979. V. 68. P. 325–334.
- Sun S., McDonough W.F.** Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A.D. & Norry M.J. (eds) Magmatism in the Ocean Basins // Geological Society, London, Special Publications. 1989. No. 42. P. 313–345.
- Weiblen P.W., Morey G.B.** A summary of stratigraphy, petrology and structure of the Duluth complex // American Journal of Science. 1980. V. 280 A. P. 88–133.
- Wells P.R.A.** Pyroxene thermometry in simple and complex systems // Contribution to Mineralogy and Petrology. 1977. V. 62. P. 129–139.

References

- Bryanchaninova N.I. *Porodoobrazuyushchie silikaty ul'trabazitov kak indikatory usloviy obrazovaniya i rудносности* [Rock-forming silicates of ultrabasites as indicators of formation conditions and ore-bearing]. Syktyvkar: Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Academy of Sciences of the USSR, 1990. 22 p. (Ser. of preprints "Scientific Reports"; V. 226. In Russian)
- Dmitriev L.V., Ukhakov A.V., Sharashkin L.Ya. *K voprosu o sostave veshchestva verhnej mantii* [To the question of the upper mantle matter composition] // *Geokhimiya* [Geochemistry], 1972. No.10. pp. 1155–1167. In Russian
- Moskaleva S.V. *Giperbazity i ih hromitonostnost'* [Hyperbasites and their chromite content]. Leningrad: Nedra, 1974. 279 p. In Russian
- Petrograficheskiy kodeks Rossii: Magmaticheskiye, metamorficheskiye, metasomaticheskiye, impaktnyye obrazovaniya* [Petrographic Code of Russia: Igneous, metamorphic, metasomatic, impact formations]. Eds. O.A. Bogatikova, O.V. Petrova, A.F. Morozov; resp. ed. L.V. Sharpenok, 3rd ed., Rev. and additional. St. Petersburg: VSEGEI, 2009. 200 p. In Russian
- Saveliev D.E., Gataullin R.A. Accessory mineralisations in lherzolites of Northern Kraka massif (South Urals) // *Georesursy* [Georesources]. 2023, 25(3). pp. 208–215. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.3.24>. In Russian
- Saveliev D.E., Gataullin R.A. Lherzolites of Aznagulovo area (Southern Urals): composition and P-T-fO2 formation conditions // Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, 2021, V. 40, No. 3(103). pp. 15–25. In Russian
- Saveliev D.E., Masagutov R.H., Sirota S.N. *Mineralogicheskie osobennosti i subsolidusnye struktury izranditov Aleksandrovskogo kompleksa* [Mineralogical features and subsolidus structures of israndites of the Alexandrovsky complex] // Geological Bulletin. 2022. No. 2. pp. 30–47. In Russian
- Saveliev D.E., Nugumanova Y.N., Gataullin R.A., Sergeev S.N., Musabirov I.I., Blinov I.A. *O novykh proyavleniyakh platinometal'noy mineralizatsii v ofiolitovyh ul'tramafitakh Yuzhnogo Urala* [On new occurrences of platinometal mineralization in ophiolitic ultramafics of the Southern Urals] // Petrology of magmatic and metamorphic complexes: Proceedings of the X All-Russian Petrographic Conference with international participation. Iss. 10. 2018. pp. 321–325. In Russian
- Saveliev D.E., Puchkov V.N., Sergeev S.N., Musabirov I.I. *O deformacionno-inducirovannom raspade enstatita v mantijnyh peridotitah i ego znachenii dlya processov chastichnogo plavleniya i hromitoobrazovaniya* [On deformation-induced decay of enstatite in mantle peridotites and its significance for the processes of partial melting and chromite formation] // Reports of the Academy of Sciences. 2017. V. 476. No. 2. pp. 200–204. In Russian
- Saveliev D.E., Snachev V.I., Savel'yeva E.N., Bazhin E.A. *Geologiya, petrogeohimiya i hromitonosnost' gabbro-giperbazitovyh massivov Yuzhnogo Urala* [Geology, petrogeochemistry and chromitonosity of gabbro-hyperbasite massifs of the Southern Urals]. Ufa: DizaynPolygraphService, 2008. 320 p. In Russian
- Savel'yeva G.N. *Gabbro-ul'trabazitovye kompleksy ofiolitov Urala i ih analogi v sovremennoj okeanicheskoy kore* [Gabbro-ultrabasite complexes of the Ural ophiolites and their analogues in the modern oceanic crust]. Moscow: Nauka, 1987. 230 p. In Russian
- Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Ivanov A.V., Letnikov E.F., Mironov A.G., Barash I.G., Bulanov V.A., Sizykh A.I. *Interpretaciya geohimicheskikh dannyyh: Ucheb. posobie.* [Interpretation of geochemical data: the study guide]. M.: Internet Inzhiniring, 2001, 288 p. In Russian
- Snachev V.I., Savel'yev D.E., Rykus M.V. *Petrogeohimicheskie osobennosti porod i rud gabbro-giperbazitovyh massivov Kraka* [Petrogeochemical features of rocks and ores of Kraka gabbro-hyperbasite massifs]. Ufa, 2001. 212 p. In Russian
- Sobolev N.D. *Ul'trabazity Bol'shogo Kavkaza* [Ultrabasites of the Greater Caucasus]. Moscow: Gosgeolizdat, 1952, 240 p. In Russian

- Chernyshov A.I. *Ul'tramafity (plasticheskoe techenie, strukturnaya i petrostrukturnaya neodnorodnost')* [Ultramafics (plastic flow, structural and petrostructural heterogeneity)]. Tomsk, 2001. 215 p. In Russian
- Chernyshov A.I., Yurichev A.N. *Strukturnaya evolyuciya dunitov i hromitov Harcheruz'skogo massiva (Polyarnyj Ural)* [Structural evolution of dunites and chromites of the Kharcheruz massif (Polar Urals)] // *Geotektonika* [Geotectonics]. 2016. No. 2. pp. 62–77. doi: 10.7868/S0016853X1602003X. In Russian
- Shcherbakov S. A. *Plasticheskie deformacii ul'trabazitov ofiolitovoj associacii Urala* [Plastic deformations of ultrabasites of the Ural ophiolite association]. Moscow: Nauka, 1990. 120 p. In Russian
- Albarede F. Residence time analysis of geochemical fluctuations in volcanic series // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1995. 57. pp. 615–621.
- Arai S. Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation // *Chemical Geology*. 1994. 113. pp. 191–204.
- Ballhaus C., Berry R., Green D. High pressure experimental calibration of the olivine orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: Implication for the oxydation state of the upper mantle // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 1991. V. 107. pp. 27–40.
- Barry T. L., Saunders A. D., Kempton P. D., Windley B. F., Pringle M. S., Dorjnamjaa D., Saandar S. Petrogenesis of Cenozoic Basalts from Mongolia: Evidence for the Role of Asthenospheric versus Metasomatized Lithospheric Mantle Sources // *Journal Of Petrology*. 2003. V. 44, No. 1. pp. 55–91.
- Brey G.P., Köhler T. Geothermobarometry in 4-phase Iherzolites: 2. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers // *Journal of Petrology*. 1990. V. 31. pp. 1353–1378.
- Chauvel, Blichert-Toft. A hafnium isotope and trace element perspective on melting of the depleted mantle // *Earth and Planetary Science Letters*. 2001. 190. pp. 137–151.
- Fabries J. Spinel-olivine geothermometry in peridotites from ultramafic complexes // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 1979. V. 6. pp. 329–336.
- Hellebrand, E., Snow, J.E., Dick, H.J.B., Hofmann A. Coupled major and trace elements as indicators of the extent of melting in mid-ocean-ridge peridotites // *Nature*. 2001. pp. 677–681.
- Hou T., Zhang Zh., Encarnacion J., Santosh M. Petrogenesis and metallogenesis of the Taihe gabbroic intrusion associated with Fe-Ti-oxide ores in the Panxi district, Emeishan Large Igneous Province, southwest China // *Ore Geology Reviews*. 2012. V. 49. pp. 109–127.
- Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne W.C., Kato A., Kisch K.J., Krivovichev V.G., Lithout K., Laird J., Mandarino J.A., Maresch W.V., Nickel E.A., Rock N.M.S., Schumacher J.C., Smith D.C., Stephenson N.C.N., Ungaretti L., Whittaker E.J.W., Youzhi G. Nomenclature of amphiboles; report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association commission on new minerals and mineral names // *Canadian Mineralogist*. 1997. V. 35. pp. 219–246.
- McDonough W.F., Sun S.-s. The composition of the Earth // *Chemical Geology*. 1995. V. 120, Iss. 3–4. pp. 223–253
- Morimoto N. Nomenclature of pyroxenes // *Canadian mineralogist*. 1989. V. 27. pp. 143–156.
- Putirka K.D. Thermometers and barometers for volcanic systems // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2008. V. 69. pp. 61–120.
- Roeder R.L., Campbell I.H., Jamieson H.E. A reevaluation of the olivine-spinel geothermometer // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 1979. V. 68. pp. 325–334.
- Sun S., McDonough W.F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A.D. & Norry M.J. (eds) *Magmatism in the Ocean Basins* // Geological Society, London, Special Publications. 1989. 42. pp. 313–345.
- Weiblen P.W., Morey G.B. A summary of stratigraphy, petrology and structure of the Duluth complex // *American Journal of Science*. 1980. V. 280 A. pp. 88–133.
- Wells P.R.A. Pyroxene thermometry in simple and complex systems // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 1977. V. 62. pp. 129–139.

Информация об авторах:

Гатаулин Р.А., аспирант, младший научный сотрудник, лаборатория рудных месторождений, Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, Уфа, Россия.

E-mail: rusgatln97@gmail.com

Савельев Д.Е., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, лаборатория рудных месторождений, Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, Уфа, Россия.

E-mail: Savl71@mail.ru

Киселёва Д.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатории физических и химических методов исследования, Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварыцкого, УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

E-mail: Kiseleva@igg.uran.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Gataullin R.A., postgraduate student, Junior Researcher, Laboratory of Ore Deposits, Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre, RAS, Ufa, Russia.

E-mail: rusgatln97@gmail.com

Saveliev D.E., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher of Laboratory of Ore Deposits, Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre, RAS, Ufa, Russia.

E-mail: Savl71@mail.ru

Kiseleva D.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher of Laboratory of Physical and Chemical Research Methods, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, Ekaterinburg, Russia.
E-mail: Kiseleva@igg.uran.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.05.2024; одобрена после рецензирования 01.07.2024; принята к публикации 02.06.2025

The article was submitted 28.05.2024; approved after reviewing 01.07.2024; accepted for publication 02.06.2025

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Научная статья

УДК 553.3

doi: 10.17223/25421379/35/5

ГЕОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЦИРКОНА ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД, АССОЦИИРУЮЩИХ С РАЗНЫМИ ТИПАМИ ОРУДЕНЕНИЯ (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ): РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА И ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕТАЛЛОВ



Юрий Олегович Редин¹, Александра Владиславовна Малютина²,
Владислав Федорович Дульцев³

^{1,2,3} Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

¹ redin@igm.nsc.ru

² malyutina@igm.nsc.ru

³ dultsev@igm.nsc.ru

Аннотация. На представительном фактическом материале были установлены индикаторные особенности циркона из рудоносных комплексов Восточного Забайкалья, которые показали высокую эффективность в определении рудоносности гранитоидов. Значения аномалий Ce и Eu, а также Yb/Dy в цирконах могут быть использованы в качестве показателей степени окисленности магм. Так, рудоносными на «классический» порфировый тип оруденения в Восточном Забайкалье могут являться магматические породы $\text{Ce}/\text{Ce}^* > 100$, $\text{Eu}/\text{Eu}^* > 0,4$, $\text{Yb}/\text{Dy} > \sim 4,0\text{--}5,0$ и $(\text{Ce}/\text{Nd})/\text{Y} > 0,01$. Комплексное рассмотрение редкоземельного состава циркона и магнитной восприимчивости пород также можно использовать в качестве поискового критерия на порфировый тип, а также на некоторые другие типы оруденения. Как показывает исследование, высокие значения магнитной восприимчивости ($> 1,0 \times 10^{-3}$ SI) магматических пород указывают на окислительные условия их образования, благоприятные для формирования Au-Cu-Fe скарново-порфирового, порфирового и Au-полиметаллического типов оруденения.

Ключевые слова: рудоносность, типохимизм, циркон, магнитная восприимчивость, Восточное Забайкалье, условия формирования

Источник финансирования: исследование выполнено в рамках госзадания ИГМ СО РАН (122041400237-8) (петрографические исследования, и определение магнитной восприимчивости). Исследования цирконов методом LA-ICP-MS выполнены при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 13.1902.21.0018

Для цитирования: Редин Ю.О., Малютина А.В., Дульцев В.Ф. Геохимический состав циркона из различных магматических пород, ассоциирующих с разными типами оруденения (Восточное Забайкалье): разработка инновационных методов прогноза и поисков месторождений металлов // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 61–71. doi: 10.17223/25421379/35/5

Original article

doi: 10.17223/25421379/35/5

GEOCHEMICAL COMPOSITION OF ZIRCON FROM VARIOUS IGNEOUS ROCKS ASSOCIATED WITH DIFFERENT TYPES OF MINERALIZATION (EASTERN TRANSBAIKALIA): DEVELOPMENT OF INNOVATIVE METHODS FOR FORE CASTING AND SEARCHING FOR METAL DEPOSITS

Yury O. Redin¹, Alexandra V. Malyutina², Vladislav F. Dultsev³

^{1,2,3} V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Russia

¹ redin@igm.nsc.ru

² malyutina@igm.nsc.ru

³ dultsev@igm.nsc.ru

Abstract. The indicator features of zircon from the ore-bearing complexes of Eastern Transbaikalia were established relying on representative factual basis. These features were demonstrated to be highly efficient for determining the potential ore content of granitoids. The values of Ce and Eu anomalies, as well as Yb/Dy in zircons, may be used as indicators of magma oxidation level. Thus, the magmatic rocks of Eastern Transbaikalia with $\text{Ce}/\text{Ce}^* > 100$, $\text{Eu}/\text{Eu}^* > 0.4$, $\text{Yb}/\text{Dy} > \sim 4.0-5.0$ and $(\text{Ce}/\text{Nd})/\text{Y} > 0.01$ may be bearing the classical porphyry type of mineralization. The integrated consideration of the rare earth element composition of zircon and magnetic susceptibility of rocks also may be used as a criterion to search for porphyry type, as well as for some other types of mineralization. It is demonstrated that the high values of magnetic susceptibility ($> 1.0 \times 10^{-3} \text{ SI}$) of magmatic rocks point to the oxidative conditions of rock formation, favorable for the formation of Au-Cu-Fe skarn-porphyry, porphyry and Au-polymetallic types of mineralization.

Keywords: mineralization, typochimism, zircon, magnetic susceptibility, Eastern Transbaikalia, formation conditions

Source of financing: Determining petrographic studies was supported by state assignment of the VS Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS. The LA-ICP-MS study of zircons was carried out with the financial support of the project of the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 13.1902.21.0018 (agreement 075-15-2020-802).

For citation: Redin Yu.O., Malyutina A.V., Dultsev V.F. (2025). Geochemical composition of zircon from various igneous rocks associated with different types of mineralization (Eastern Transbaikalia): development of innovative methods for casting and searching for metal deposits. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research.* 2. pp. 61–71. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/35/5

Введение

В международном геологическом сообществе в течение последних лет активно обсуждается направление исследований (PIMS), нацеленное на выявление признаков фертильности (рудоносности) магматических образований. Комплексное исследование индикаторных особенностей элементного состава (типохимизма) обширного круга минералов является важным элементом генетических и прогнозно-поисковых моделей. К основным решаемым задачам относится определение индикаторных особенностей акцессорных минералов (циркона) рудоносных гранитоидных массивов на скарновый или совмещенный скарново-порфировый (Лугоканский, Култуминский, Быстринский массивы), порфировый (Бугдаинский и Шахтаминский массивы), редкометалльный грезейновый (Белухинский и Олдонинский массивы), золото-полиметаллический (Антиинский, Тургинский и Лугинский массивы) типы оруденения, а также «безрудных» гранитоидных массивов (массивы ундинского комплекса). В ряде вышедших в свет за последнее десятилетие работ приводятся статистически подтвержденные данные о специфических характеристиках циркона для различных типов месторождений, а также акцессорных Fe-содержащих минералов. К основным задачам относится сравнительный анализ состава акцессорных минералов рудоносных и «безрудных» гранитоидных массивов. Полученные данные будут «фундаментом» для решения основной цели, а именно разработки инновационных методов прогноза и поисков месторождений металлов, имеющих большое значение для высокотехнологической промышленности. Решение всех этих задач и определяет актуальность и новизну проводимых исследований.

Первостепенное внимание уделялось крупным комплексным месторождениям, которые могут рассматриваться как перспективные на обнаружение критических видов минерального сырья. К таким месторождениям относятся: Cu-Mo, Mo-W-золотосодержащие порфировые месторождения, которые потенциально могут служить одним из основных источников Re – металла, имеющего стратегическое значение для России. Руды этих типов месторождений потенциально перспективны и на многие другие критические металлы: Ga, Bi, In, Cd и др. Однако их содержания и запасы требуют уточнения.

Другие не менее важные типы – Fe-Cu-Au (Быстриńskое, Култуминское, Лугоканское и др.) и Pb-Zn-скарновые месторождения, которые являются центральным звеном в цепочке многочисленных скарновых месторождений и рудопроявлений Центрально-Азиатского подвижного пояса. Руды этих месторождений потенциально перспективны на РЗЭ и другие критические металлы [Бортников и др., 2016]. Еще одним перспективным типом главных промышленных поставщиков многих критических металлов (In, Cd, Ge, Ga, Te, Se) являются полиметаллические месторождения, некоторые из них связаны с порфировыми и скарновыми системами. Несколько крупных рудных районов с многочисленными месторождениями этого типа известны на территории Забайкальского края (Нерчинский, Газимуровский, Александрово-Заводский).

Методы исследований

Микрокомпонентный состав цирконов был определен методом LA-SF-ICP-MS на масс-спектрометре высокого разрешения Element XR (Thermo Fisher Scientific Ltd, США) с эксимерной системой лазерной

абляции Analyte Excite (Teledyne Cetac, США), оснащенной двухкамерной ячейкой HeEx II. Диаметр лазерного луча составлял 50 мкм, частота повторения импульсов 5 Гц и плотность энергии лазерного излучения 3 Дж/см². Параметры измерения масс-спектрометра оптимизировали для получения максимальной интенсивности сигнала ²⁰⁸Pb при минимальном значении ²⁴⁸ThO⁺/²³²Th⁺ (менее 2 %), используя стандарт NIST SRM612. Для U-Pb изотопного датирования измерения выполняли по массам ²⁰²Hg, ²⁰⁴(Pb⁺Hg), ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb, ²⁰⁸Pb, ²³²Th, ²³⁸U. Для определения микроэлементного состава цирконов сканирование выполняли по массам ³¹P, ⁴⁴Ca, ⁴⁹Ti, ⁸⁵Rb, ⁸⁸Sr, ⁸⁹Y, ⁹¹Zr, ⁹³Nb, ¹³⁸Ba, ¹³⁹La, ¹⁴⁰Ce, ¹⁴¹Pr, ¹⁴⁶Nd, ¹⁴⁷Sm, ¹⁵³Eu, ¹⁵⁷Gd, ¹⁵⁹Tb, ¹⁶³Dy, ¹⁶⁵Ho, ¹⁶⁶Er, ¹⁶⁹Tm, ¹⁷²Yb, ¹⁷⁵Lu, ¹⁷⁸Hf, ¹⁸¹Ta, ²³²Th, ²³⁸U. Съемка проводилась в режиме E-scan. Детектирование сигналов проводилось в режиме счета для всех изотопов, кроме ³¹P, ⁴⁴Ca, ⁸⁹Y, ⁹¹Zr, ¹⁷⁸Hf, ²³²Th и ²³⁸U, для которых использовался трехканальный режим работы. Zr использовался в качестве внутреннего стандарта с учетом стехиометрических значений циркона для калибровки концентраций микроэлементов в цирконах. Стандарты анализировались на протяжении всей съемки, чтобы обеспечить коррекцию дрейфа. Стандарт силикатного стекла NIST 610 использовался для мониторинга микроэлементного состава для оценки точности анализов.

Данные масс-спектрометрических измерений, в том числе расчет изотопных отношений, обрабатывали с помощью программы Glitter. Для учета элементного и изотопного фракционирования U-Pb изотопные отношения нормализовали на соответствующие значения изотопных отношений стандартных цирконов Plešovice. Расчет содержаний элементов в цирконах проводился с использованием внешней градуировки по стандарту NIST SRM610 и изотопа ⁹¹Zr в качестве внутреннего стандарта. Стандартный природный циркон GJ-1 использовался в качестве вспомогательного стандарта. Погрешности единичных анализов приведены на уровне 1σ.

Цирконы были выделены из магматических пород, развитых на Лугоканском, Култуминском, Быстрицком, Шахтаминском, Бугдаинском (как из вмещающей рамы, так и из потенциально рудоносных магматических пород шахтаминского комплекса), Антиинском, Ноцуйском, Лугинском, Белухинском, Антоновогорском месторождениях, а также из «безрудных» гранитоидных массивов ундинского комплекса. Для определения морфологии и внутреннего строения цирконов использовались катодолюминесцентные изображения (CL), полученные с помощью электронного микроскопа (LEO-1430VP). Содержания редких и редкоземельных элементов локально определялись методом LA-ICP-MS.

Оценка магматического происхождения анализируемых цирконов проводилась по визуальной оценке С1-нормированного спектра распределения РЗЭ [Lu et al., 2016]. Из 530 проанализированных цирконов в дальнейшем были исключены 100 анализов (согласно требованиям по [Lu et al., 2016]).

Содержание окисного и закисного железа было определено методом фотометрии «методом мокрая химия».

Геологический очерк

В пределах Восточного Забайкалья известно большое количество золоторудных, золотосодержащих, полиметаллических, редкометалльных и других месторождений и рудопроявлений. Особенности металлогенеза, проблемы генезиса различных типов месторождений этого региона исчерпывающе изложены во многих монографиях, статьях и фондовых материалах [Козлов, 2009; Берзина и др., 2013; Редин и др., 2017, 2018; Редина и др., 2019; Redin et al., 2022, 2023]. Ввиду этого мы дадим лишь краткий геологический очерк относительно изучаемых месторождений.

Шахтаминский интрузивный комплекс выделен Ю.А. Билибина и длительное время изучался многими геологами. К нему относятся штоки, лакколиты и дайкообразные тела умеренно кислого и среднего состава. Обычно это типично трещинные или полусогласные тела. Их размещение контролируется участками пересечения зон разрывных нарушений различного простирания. С магматическими породами шахтаминского комплекса многие исследователи связывают промышленное молибденовое, полиметаллическое, золото-полиметаллическое и золотое оруденение, а также проявления мышьяка, сурьмы и других металлов [Спиридовон и др., 2006]. Интрузивные образования шахтаминского комплекса широко распространены в пределах Аргунской и Агинской зон Забайкалья.

Агинская рудная зона. В пределах Агинской тектонической зоны расположен Кукульбейский рудный район (юго-восточное Забайкалье), рассматриваемый в качестве самостоятельной минерально-сырьевой базы вольфрама Забайкалья. В этом старейшем рудном узле в сороковых-пятидесятых годах эксплуатировались Букукинское, Белухинское, Антоновогорское и другие месторождения. Помимо редкометалльного оруденения в Кукульбейском районе также известны месторождения (Антиинское, Кирченовское и др.) и многочисленные рудопроявления золота, генетически связанные с магматическими породами шахтаминского комплекса.

Белухинское месторождение. Белухинское месторождение расположено в экзоконтактовой зоне

одноименного гранитного массива. Массив сложен преимущественно биотитовыми и амфибол-биотитовыми гранитами второй и третьей фазы шахтаминского комплекса, которые прорывают гранодиориты ундинского комплекса. Для исследований были отобраны цирконы из биотит-амфиболовых гранитов второй и третьей фазы шахтаминского комплекса, так и вмещающих гранодиоритов ундинского комплекса.

Антиинское месторождение. Антиинское золоторудное месторождение приурочено к одноименному массиву шахтаминского комплекса и находится

примерно в 40 км на юго-запад от Белухинского месторождения. Центральная и восточные части массива сложены граносиенитами и гранодиоритами с переходами до гранитов, а западная и северная – кварцевыми монцодиоритами и монцодиоритами. Для исследований были выделены цирконы из кварцевых монцодиоритов, отобранных в северной части (район Антиинского месторождения) Антиинского массива.

Ноцуйское месторождение аналогично Антиинскому и приурочено к граносиенитам и гранодиоритам шахтаминского комплекса.

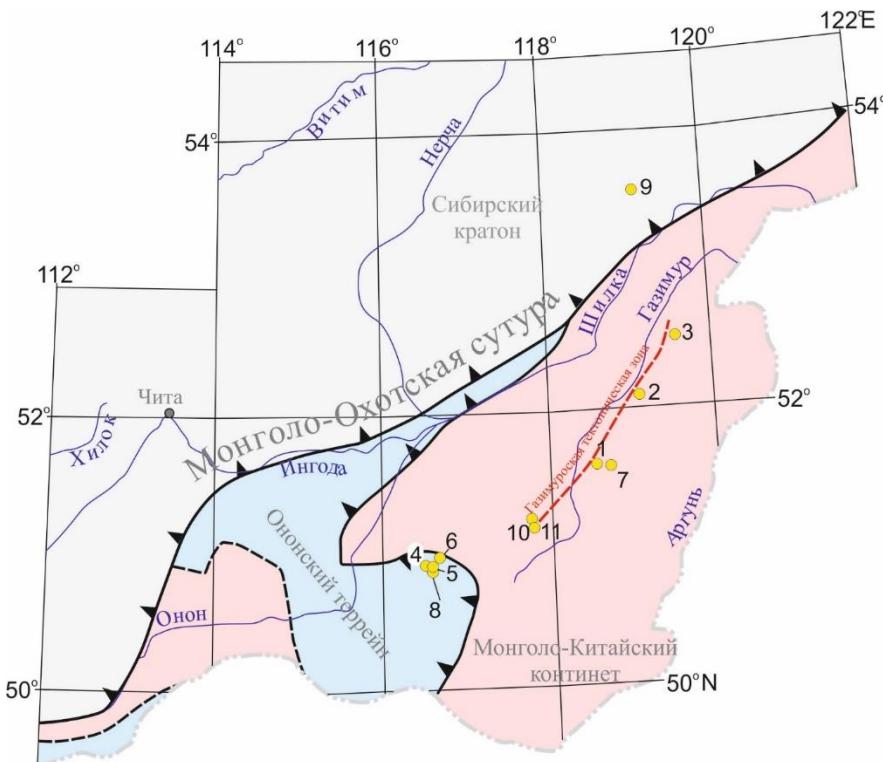


Рис. 1. Схема расположения исследуемых месторождений

1 – Быстринское; 2 – Култуминское; 3 – Лугоканское; 4 – Ноцуйское; 5 – Антоновогорское; 6 – Белухинское; 7 – Лугинское; 8 – Антиинское; 9 – Александровское; 10 – Шахтаминское; 11 – Бугдаинское

Fig. 1. Scheme of location of the studied deposits

1 – Bystrinskoye; 2 – Kultuminskoye; 3 – Lugokanskoye; 4 – Notsuyskoye; 5 – Antonovogorskoye; 6 – Belukhinskoye; 7 – Luginskoye; 8 – Antiinskoye; 9 – Aleksandrovskoye; 10 – Shakhtaminskoye; 11 – Bugdainskoye

Аргунская рудная зона. Территория Аргунской зоны характеризуется широким развитием в ее пределах золото-медно-железо-скарновых, порфировых (и комплексных, например, золото-порфировых) и золото-полиметаллических месторождений. Au-Cu-Fe-скарновые месторождения расположены главным образом в северо-восточной и юго-восточной частях Шилка-Аргунского междуречья. К наиболее крупным относятся Быстринское, Култуминское и Лугоканское месторождения. Все месторождения приурочены к Газимировской региональной тектонической

зоне и парагенетически связаны со становлением магматических пород шахтаминского комплекса.

Лугоканское месторождение. Месторождение приурочено к одноименному массиву шахтаминского комплекса. Вмещающие породы представлены карбонатно-терригенными отложениями нижнего кембрия (быстринская свита Σ_{1bs}). Оруденение приурочено к скarnам и в меньшей степени к карбонатным породам (подвергшимся интенсивной тектонической проработке), редко к гранодиорит-порфирам. Лу-

гоканский массив сложен преимущественно гранодиоритами и гранодиорит-порфирами второй фазы шахтаминского комплекса. Цирконы были выделены из гранодиоритов и гранодиорит-порфиров.

Быстринское месторождение. В геологическом строении месторождения принимает участие серия свит палеозойско-мезозойского возраста, которые прорываются средне-верхнеюрскими интрузивными породами шахтаминского комплекса. Рудовмещающими толщами являются кембрийские, девонские терригенно-карбонатные отложения и раннеюрские терригенные отложения. На контактах с интрузивными телами шахтаминского комплекса вмещающие известняки и доломиты скарнируются вплоть до образования гранатовых, пироксеновых, амфиболовых и флогопитовых скарнов. Основным рудоконтролирующим фактором на территории Быстринского месторождения является комплексная многоэтапная и разнорядковая система складчато-разрывных нарушений, выраженная серией протяжённых (простирающихся с севера на юг), долгоживущих разрывных нарушений и сложной системой оперяющих разломов меньшего порядка [Спиридов и др., 2006]. Быстринский массив сложен крупным штоком диоритов (монцонитов) первой фазы шахтаминского интрузивного комплекса (J_{2-3}) и относительно мелкими штокообразными телами гранодиорит-порфиров и диоритовыми порфирами второй фазы шахтаминского комплекса. Для исследований были отобраны несколько разновидностей магматических пород, широко развитых в пределах месторождения: монцониты, монцонит-порфиры, диорит-порфиры и гранодиориты.

Култуминское месторождение является одним из крупнейших и наиболее представительных месторождений Au-Cu-Fe-скарнов, расположенных в Восточном Забайкалье. Оно локализовано в пределах Газимурской металлогенической зоны и приурочено к одноименному массиву Шахтаминского комплекса, сложенному монцонит-порфирами второй фазы. Основное промышленное оруденение тяготеет к эндо- и экзоконтактовым зонам скарнов гранитоидного массива и ороговикованным и скарнированным терригенно-карбонатным породам быстринской свиты и ерниченской толщи.

К порфировым месторождениям относятся Шахтаминское и Бугдаинское месторождения.

Бугдаинское месторождение приурочено к центральной части очаговой вулкано-купольной структуры. Эта структура осложнена интерферирующими кольцевыми структурами меньшего диаметра, контролирующими положение рудных тел: штоками гранит-порфиров, которые относятся к шахтаминскому

интрузивному комплексу. Вмещающие породы представлены биотит-рогообманковыми гранитами и гранодиорит-порфирами ундинского комплекса. Рудоносными магматическими породами являются риолит-порфирь и гранит-порфиры шахтаминского комплекса. Цирконы для исследований были выделены из аляскит-порфиров шахтаминского комплекса (рудоносные) и вмещающих гранодиорит-порфиров ундинского комплекса.

Шахтаминское месторождение относится к группе существенно молибденовых месторождений Cu-Mo-порфировой формации. Пространственно и во времени оруденение связано с мелкими телами (штоками, дайками) порфиров, сформированных на завершающем этапе магматизма. В Шахтаминском массиве доминируют породы, варьирующие по составу от монцонитов до гранитов. Основное молибденовое оруденение представлено серией кварцевых жил близширокого простириания и прожилковой минерализацией штокверкового типа.

Луггинское месторождение расположено в Широкинском рудном поле. Месторождение приурочено к сравнительно узкой полосе юрских отложений шадоронской и онон-борзинской серий. В строении этих серий участвуют несколько свит, непосредственно на месторождении наблюдаются выходы двух из них: государевская свита (онон-борзинская серия), которая представлена песчаниками, алевролитами, аргиллитами и конгломератами, и кипринская свита (шадоронская серия), сложенная дацитами, андезибазальтами, туфами, прослоями туфопесчаников и туфоконгломерато-брекчиями. Субвулканические интрузии шадоронского комплекса на месторождении развиты повсеместно и представлены в основном андезито-дацитами, дацитами, кварцевыми диоритовыми порфиритами, гранодиорит-порфирами, дайками кварцевых диоритовых порфиритов, диоритовыми порфиритами. Вся гамма этих пород прорывается дайками гранит-порфиров и гранодиоритами шахтаминского рудоносного комплекса. Гранодиориты в юго-восточной части месторождения образуют крупный шток (Луггинский), границы которого выходят далеко за пределы месторождения. Минерализованные зоны приурочены к тектонически нарушенным и гидротермально измененным субвулканическим и вулканогенно-осадочным породам. Цирконы для исследований были выделены из биотит-рогообманковых гранитов, биотит-рогообманковых гранодиоритов и рогообманковых гранит-порфиров Луггинского массива.

Дайланор-Газимуровская-Олекминская минерагеническая зона. В этой зоне располагается

основная масса крупных рудных узлов Au, Mo, U, Pb-Zn, Cu и флюоритовой минерализацией.

Александровское месторождение расположено в пределах золото-молибденового пояса. Основную роль в геологическом строении играют гранитоидные породы палеозойского и мезозойского возраста. Породы рудоносного амуджикано-сретенского комплекса (J₂-K₁) представлены интрузиями порфировидных гранитоидов и умеренно щелочных крупно-порфировых гранитов и гранит-порфиров. Заключительная дайковая серия представлена протяженными крутопадающими телами северо-восточного, северо-западного и субширотного простириания. Среди них описаны гранит-порфиры, гранодиорит-порфиры, субщелочные лейкократовые гранит-порфиры и др. На месторождении золотое оруденение представлено серией золотосодержащих пирит-кварцевых жил, а также несколькими участками компактного распространения золотоносных турмалин-пирит-кварцевых, халькопирит-сфалерит-галенит-кварцевых жил и зон пиритизации в гидротермально измененных диоритах. Золотоносные жилы пространственно тяготеют к дайкам амуджикано-сретенского комплекса, имея с ними близкие элементы залегания. Молибденит-кварцевая ассоциация имеет незначительное распространение и представлена редкими прожилками мощностью до 1 см. Цирконы были отобраны из измененных магматических пород амуджикано-сретенского комплекса.

Обсуждение результатов

Как уже говорилось ранее, в последнее время для определения рудоносного потенциала магматических пород стали широко использоваться данные о химическом составе циркона (Ce/Ce*, Eu/Eu*, Yb/Dy, (Ce/Nd)/Y) (рис. 2). В частности, было установлено, что величина аномалий Ce и Eu изменяется в зависимости от fO_2 в расплаве и наиболее потенциально рудоносными на порфировый тип оруденения являются магматические породы с высокими значениями Ce/Ce* и Eu/Eu* [Ballard et al., 2002; Burnham, Berry, 2012; Dilles et al., 2015; Lu et al., 2016; Zhong et al., 2019; Wen et al., 2020]. Другими признаками, которые отражают окислительно-восстановительную обстановку формирования магматических пород, являются значения Fe₂O₃/FeO, акцессорные минералы (ильменит/магнетит) и магнитная восприимчивость пород. На основе первых двух параметров мы попытаемся разработать инновационные методы поиска и прогноза месторождений на различные типы. Для удобства разделим их на несколько групп: в первую группу будут входить собственно порфировые месторождения (Шахтаминское, Бугдаинское и Алексан-

дровское), во вторую – месторождения совмещённого типа, такие как скарново-порфировые (Лугоканское, Култуминское и Быстринское), в третью группу входят редкометалльные (грезейновые) (Белухинское и Антоновогорское) и в четвертую – Au-полиметаллические месторождения. Для сравнения мы берем условно безрудные гранитоиды ундинского комплекса.

Наиболее ярким представителем первой группы является Бугдаинское и Александровское месторождения (таблица).

На *Бугдаинском* месторождении были изучены две популяции цирконов – цирконы из вмещающих гранитоидов ундинского комплекса (в таблице выделены курсивом) и цирконы из шахтаминского комплекса.

Как видно из таблицы, цирконы из вмещающих гранитоидов характеризуются относительно низкими (здесь и далее приводятся средние значения по пробам) Eu/Eu* (0,21), и Ce/Ce* (126), в то время как для рудоносных гранитоидов установлено относительно высокое Eu/Eu* (0,57) и чуть более низкое Ce/Ce* (63).

Цирконы из магматических пород *Александровского* месторождения также имеют высокое Eu/Eu* – от 0,49 до 0,68 и высокое Ce/Ce* – от 202 до 372. В то же время цирконы, выделенные из магматических пород, развитых на *Шахтаминском* месторождении, имеют более низкие отношения Eu/Eu* 0,27 и Ce/Ce*. Низкие отношения Eu/Eu*, скорее всего, говорят о том, что данные породы не являются рудоносными на порфировый тип. На Шахтаминском месторождении развита большая гамма пород, и, по всей видимости, наши образцы были отобраны не из рудоносных разновидностей.

Резюмируя, можно отметить, что для цирконов из магматических пород, развитых на месторождениях Mo-(Au)-порфирового типа характерной чертой является высокое Eu/Eu* $> 0,4$, так же, как и для других порфировых месторождений мира, но более низкое отношение Yb/Dy < 5 . В этой связи индикаторное значением для данного типа месторождений является высокое Eu/Eu* отношение.

Ко второй группе относятся скарновые и скарново-порфировые месторождения. Рассмотрим их на примере Быстринского месторождения, где совмещены в пространстве два типа оруденения – скарновое и порфировое. Так, рудоносными на Au-Fe-Cu-порфировый тип являются породы, которые обладают высокими значениями Eu/Eu* ($> 0,4$), Ce/Ce*, Yb/Dy ($> 5,0$). В то время как магматические породы, ответственные за скарновое оруденение, характеризуются более низкими значениями Eu/Eu* ($< 0,4$), Ce/Ce*, Yb/Dy ($< 5,0$).

Эта закономерность наиболее ярко выражена на Быстриńskом месторождении. Для сравнения возьмем еще два ярких представителя скарновых месторождений – Култуминское и Лугоканское. Цирконы из магматических пород, указанных выше, характеризуются также низкими значениями Eu/Eu^* ($< 0,4$), Ce/Ce^* , Yb/Dy ($< 5,0$), что отражает окислительно-восстановительную обстановку формирования магматических пород – степень окисления расплавов не была достаточно высокой, чтобы сгенерировать продуктивную порфировую минерализацию. Обусловлено формирование наличие магматических пород с высокими значениями Eu/Eu^* ($> 0,4$), Ce/Ce^* , Yb/Dy ($> 5,0$) обусловило формирование комплексного скарново-порфирового оруднения.

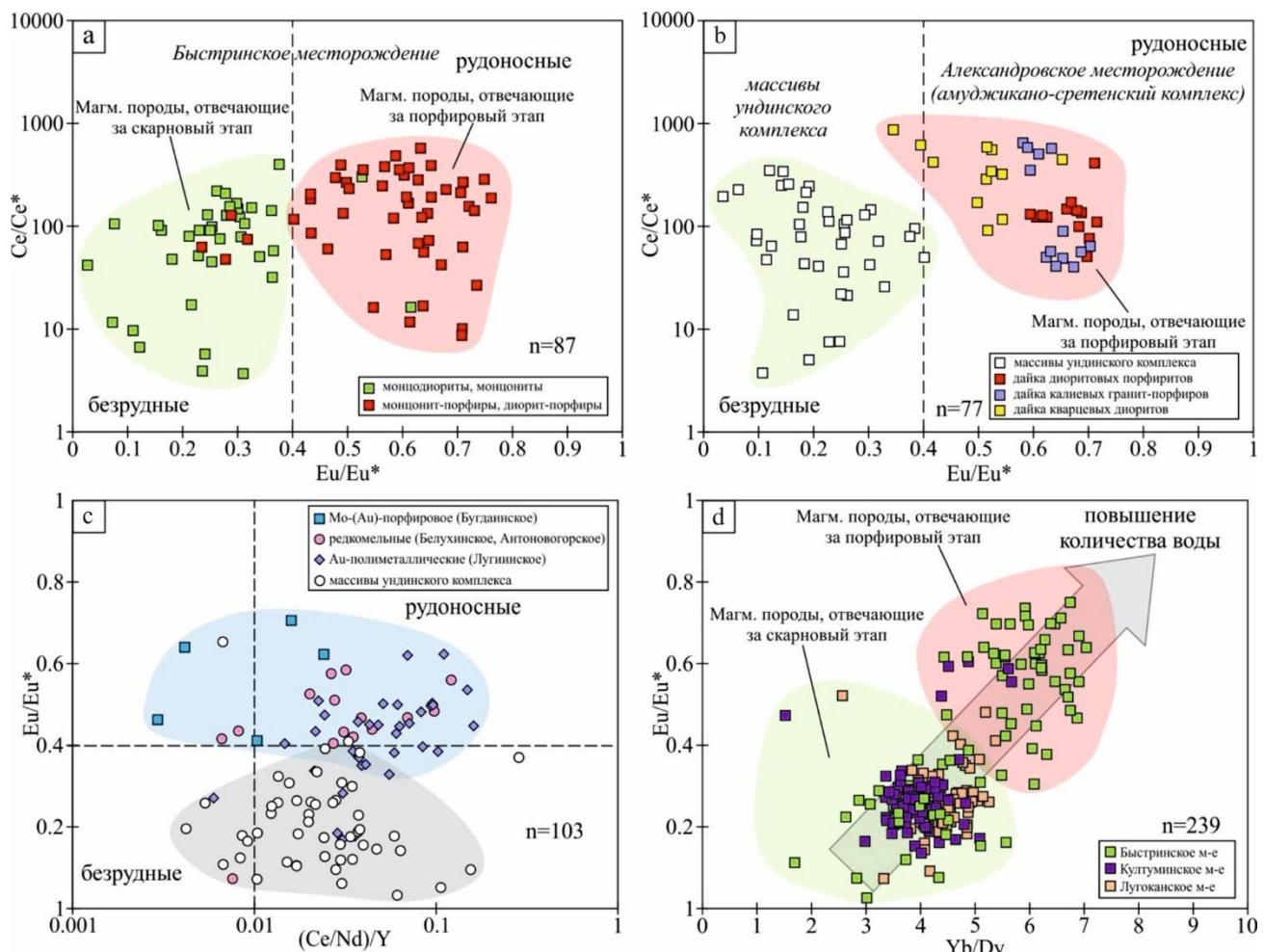


Рис. 2. Дискриминационные диаграммы для разделения магматических пород на рудоносные (фертильные) и безрудные

а–б – в координатах Ce/Ce^* vs Eu/Eu^* ; б–с – в координатах Eu/Eu^* vs $(\text{Ce/Nd})/\text{Y}$; д – в координатах Eu/Eu^* vs Yb/Dy [Ballard et al., 2002; Burnham, Berry, 2012; Dilles et al., 2015; Lu et al., 2016; Zhong et al., 2019; Wen et al., 2020]

Fig. 2. Discrimination diagrams for dividing igneous rocks into ore-bearing and non-ore-bearing
а–б – Ce/Ce^* vs Eu/Eu^* ; б–с – Eu/Eu^* vs $(\text{Ce/Nd})/\text{Y}$; д – Eu/Eu^* vs Yb/Dy [Ballard et al., 2002; Burnham, Berry, 2012; Dilles et al., 2015; Lu et al., 2016; Zhong et al., 2019; Wen et al., 2020]

К третьей группе относятся два месторождения – Белухинское и Антоновогорское. На Белухинском месторождении изучались две популяции цирконов: из вмещающих ундинских гранитоидов и рудоносных шахтминских гранитоидов. Так, биотит-амфиболовые граниты (ундинский комплекс) характеризуются низкими Eu/Eu^* , Ce/Ce^* и относительно высокими Yb/Dy значениями. В то время как рудоносные гранитоиды характеризуются $\text{Eu/Eu}^* > 0,4$ и относительно низкими Ce/Ce^* и Yb/Dy (в отличие от таковых для порфировых месторождений). В целом можно с уверенностью сказать, что для обоих месторождений индикаторными значениями являются $\text{Eu/Eu}^* > 0,4$.

Результаты LA-ICP-MS цирконов и «мокрая химия»

Zircon LA-ICP-MS Results and chemistry

Тип месторождения	Месторождение	Породы	Eu/Eu* (ср. зн.)	Ce/Ce* (ср. зн.)	Yb/Dy (ср. зн.)	Fe ₂ O ₃ /FeO
Au(±Mo,W)-Порфировые	Бугдаинское	Аляскит-порфиры	0,57	63,4	2,83	Нет данных
		<i>Bt-гранит</i>	0,26	76,3	2,7	Нет данных
		Монцодиориты	0,14	189,1	4,75	0
	Александровское	Диоритовые порфиры	0,49	372,1	3,48	Нет данных
		К-граниты	0,65	202	2,45	Нет данных
		Q-диориты	0,68	137	2,89	Нет данных
	Шахтаминское	Гранодиориты	0,27	126	3,54	Нет данных
Au-Cu-Fe-скарновые	Быстринское	Монцонит-порфиры	0,44	159	5,16	0,35
		Монцодиориты	0,3	122,2	3,51	Нет данных
		Монцодиорит-порфиры	0,64	138,1	5,87	0,55
		Тоналит-порфиры	0,6	176,5	5,79	0,44
		<i>Гранодиориты</i>	0,23	191,6	4,93	Нет данных
		Монцонит-порфиры	0,63	280,9	5,24	0,52
	Култуминское	Монцониты	0,22	36,8	4,14	Нет данных
		Монцонит-порфиры	0,22	98,7	3,49	0,21
		Монцонит-порфиры	0,19	100,2	3,42	0,27
	Лугоканское	Монцонит-порфиры	0,2	101,1	3,33	0,28
		Гранодиориты	0,29	48,3	4,28	0,17
		Гранодиорит-порфиры	0,25	43,5	4,48	0,1
		Гранодиорит-порфиры	0,32	29,2	4,1	0,18
		Гранодиориты	0,28	33,3	3,89	0,1
		Гранодиорит-порфиры	0,25	28,8	3,76	0,12
		Гранодиориты	0,3	21,4	3,88	0,17
Редкометалльные	Антоновогорское	Граниты	0,46	33,7	4,69	нет данных
	Белухинское	<i>Bt-Amp</i> -граниты	0,45	49,49	4,24	
		<i>Граниты</i>	0,15	180,4	4,4	нет данных
Au-полиметаллические	Лугинское	Bt-Hbl-гранодиорит	0,38	139,2	3,74	0,52
		Гранит-порфиры	0,4	110,9	4,13	0,44
		Bt-Hbl-граниты	0,47	130,1	5,68	0,52
	Антийское	Монцониты	0,31	30,47	2,61	нет данных
	Ноцуйское	Монцониты	0,25	83,3	5,19	нет данных

Примечание. Курсивом выделены магматические породы ундинского комплекса.

Note. Igneous rocks of the Undinsky complex are highlighted in italics.

В четвертую группу мы включили три месторождения: Антиинское, Ноцуйское и Лугинское. Монцониты, ответственные за Au (\pm Sb) оруденение на Антиинском месторождении, характеризуются низкими Eu/Eu*, Ce/Ce*, Yb/Dy. Схожая картина наблюдается на Ноцуйском месторождении, только с одним исключением: здесь установлено относительно высокое Yb/Dy (> 5). На Лугинском месторождении цирконы выделены из нескольких разновидностей магматических пород. Так одна разновидность биотит-рогообманковых гранитов характеризуются относительно высокими Eu/Eu* (в среднем 0,38) и Ce/Ce*, Yb/Dy. Гранит-порфиры характеризуются относительно высокими Eu/Eu* и Ce/Ce*, Yb/Dy. Вторая разновидность биотит-рогообманковых гранитов характеризуется высокими Eu/Eu* ($> 0,4$), Ce/Ce*, Yb/Dy, сравнимыми с таковыми на порфировых месторождениях. Здесь также к индикаторным показателям можно отнести высокие Eu/Eu* ($> 0,4$) и Yb/Dy (> 5). Что касается Ноцуйского и Антиинского месторождений, то слагающие их породы с низкими Eu/Eu*, Ce/Ce* и Yb/Dy не способствовали формированию крупных рудопроявлений на порфировый тип.

Также нами было определено содержание окисного и закисного железа в некоторых изучаемых породах (см. таблицу).

Сравнивая данные по геохимическому составу цирконов и $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$, видно, что цирконы из магматических пород с высоким Eu/Eu* обладают $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO} > 0,5$ (доминирующее число анализов), что

говорит об образовании магматических пород в условиях окисленной системы. Это подтверждается также преобладанием магнетита над ильменитом (акцессорные минералы). Наиболее хорошо это видно на примере Быстринского месторождения, в частности, на примере монцодиорит-порфиров и монцонит-порфиров. Также видно, что это характерно и для магматических пород, развитых на Лугинском месторождении. График, отражающий связь Eu/Eu* в цирконах и $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ в магматических породах, приводить в данном случае несоставлено, ввиду небольшого количества анализов магматических пород ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$).

Заключение

Оценка рудного потенциала различных гранитоидов на основе изучения геохимического состава циркона показала, что лучшими показателями потенциальной рудоносности магматических пород являются Ce/Ce*, Eu/Eu*, Yb/Dy, (Ce/Nd)/Y. Рудоносными на «классический» порфировый тип оруденения в Восточном Забайкалье могут являться магматические породы $\text{Ce/Ce}^* > 100$, Eu/Eu* $> 0,4$, Yb/Dy $> \sim 4,0\text{--}5,0$ и (Ce/Nd)/Y $> 0,01$. Значения аномалий Ce и Eu, а также Yb/Dy в цирконах являются хорошими показателями степени окисленности исходных магм. Магматические породы, развитые на Култуминском, Лугоканском, Антиинском и Ноцуйском месторождениях, являются производными слабоокисленных магм и не могут производить порфировое оруденение.

Список источников

- Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л., Викентьев И.В., Аристов В.В., Лаломов А.В., Мурашов К.Ю. Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58, № 2. С. 97–119.
- Берзина А.П., Берзина А.Н., Гимон В.О., Крымский Р.Ш., Ларионов А.Н., Николаева И.В., Серов П.А. Шахтаминская Mo-порфировая рудно-магматическая система (Восточное Забайкалье): возраст, источники, генетические особенности // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 6. С. 764–786.
- Козлов В.Д. Редкоземельные элементы как индикаторы источников рудного вещества, степени дифференциации и рудоносности интрузий редкометалльных гранитов (Восточное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 1. С. 38–53.
- Редин Ю.О., Редина А.А., Колпаков В.В. Минеральный состав и условия формирования руд Лугинского золото-полиметаллического месторождения (Восточное Забайкалье) // Разведка и охрана недр. 2017. № 8. С. 3–8.
- Редин Ю.О., Редина А.А., Мокрушинов В.П., Дульцев В.Ф. Антиинское рудопроявление – как пример рудообразующих систем, связанных с восстановленными интрузиями (Восточное Забайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 6. С. 17–29.
- Редина А.А., Мокрушинов В.П., Редин Ю.О. Условия формирования и возраст редкометального оруденения Кукульбейского рудного района (Восточное Забайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 9. С. 90–102.
- Спиридов А.М., Зорина Л.Д., Китаев Н.А. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. Новосибирск : Гео, 2006, 291 с.
- Lu Y.-J., Loucks R.R., Fiorentini M., Campbell McCuaig T., Evans N.J., Yang Zh.-M., Hou Z.-Q., Kirkland C.L., Parra-Avila L.A., Kobussen A. Zircon Compositions as a Pathfinder for Porphyry Cu \pm Mo \pm Au Deposits // Economic Geologists. 2016. Inc. Special Publication 19. Chapter 13. P. 329–347. doi: https://www.researchgate.net/publication/303386427_Zircon_compositions_as_a_pathfinder_for_porphyry_Cu_Mo_Au_deposits
- Ballard J.R., Palin M.J., Campbell L.H. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile // Contrib. Mineral. Petrol. 2002. V. 144. P. 347–364. doi: 10.1007/s00410-002-0402-5
- Burnham A.D., Berry A.J. An experimental study of trace element partitioning between zircon and melt as a function of oxygen fugacity // Geochim. Cosmochim. Acta. 2012. V. 95. P. 196–212. doi: 10.1016/j.gca.2012.07.034

Dilles J.H., Kent A.J.R., Wooden J.L., Tosdal R.M., Koleszar A., Lee R.G., Farmer L.P. Zircon compositional evidence for sulfur-degassing from ore-forming arc magmas // *Econ. Geol.* 2015. V. 110. P. 241–251. doi: 10.2113/econgeo.110.1.241

Redin Y.O., Redina A.A., Mokrushnikov V.P., Malyutina A.V., Dultsev V.F. The Kultuma Au–Cu–Fe-Skarn Deposit (Eastern Transbaikalia): Magmatism, Zircon Geochemistry, Mineralogy, Age, Formation Conditions and Isotope Geochemical Data // *Minerals*. 2022. V. 12. 12. doi: 10.3390/min12010012.

Redin Y.O., Redina A.A., Malyutina A.V., Dultsev V.F., Kalinin Y.A., Abramov B.N., Borisenko A.S. Rock-Forming (Biotite and Plagioclase) and Accessory (Zircon) Minerals Geochemistry as an Indicator of the Metal Fertility of Magmas by the Example of Au–Cu–Fe-Skarn Deposits in Eastern Transbaikalia // *Minerals*. 2022. V. 12. 50. doi: 10.3390/min12010050.

Redin Y.O., Redina A.A., Mokrushnikov V.P., Malyutina A.V., Dultsev V.F., Kalinin Yu., Abramov B., Borisenko A. Distinctive Features of the Major and Trace Element Composition of Biotite from Igneous Rocks Associated with Various Types of Mineralization on the Example of the Shakhtama Intrusive Complex (Eastern Transbaikalia) // *Minerals*. 2023. V. 13. 1334. doi: 10.3390/min13101334

Wen G., Zhou R.-J., Li J.-W., Chang J., Hu H., Yan D.-R., Wei K.-T., Jin S.-G. Skarn metallogenesis through zircon record: An example from the Daye Cu–Au–Fe–Mo district, eastern China // *Lithos*. 2020. V. 378–379. 105807. doi: 10.1016/j.lithos.2020.105807

Zhong S., Seltmann R., Qu H. et al. Characterization of the zircon Ce anomaly for estimation of oxidation state of magmas: a revised Ce/Ce* method // *Miner. Petrol.* 2019. V. 113. P. 755–763. doi: 0.1007/s00710-019-00682-y

References

Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov A.L., Vikentiev I.V., Aristov V.V., Lalomov A.V., Murashov K.Yu. Mineral resources of high-tech metals in Russia: state and development prospects // *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of ore deposits]. 2016. V. 58, No. 2. pp. 97–119. In Russian

Berzina A.P., Berzina A.N., Gimon V.O., Krymsky R.Sh., Larionov A.N., Nikolaeva I.V., Serov P.A. Shakhtama Mo-porphyry ore-magmatic system (Eastern Transbaikalia): age, sources, genetic features // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2013, V. 54, No. 6. pp. 764–786. In Russian

Kozlov V.D. Rare earth elements as indicators of sources of ore matter, the degree of differentiation and ore content of rare metal granite intrusions (Eastern Transbaikalia) // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2009. V. 50, No. 1. pp. 38–53. In Russian

Redin Yu.O., Redina A.A., Kolpakov V.V. Mineral composition and conditions for the formation of ores of the Lugiinsky gold-polymetallic deposit (Eastern Transbaikalia) // *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of subsoil]. 2017. No. 8. pp. 3–8. In Russian

Redin Yu.O., Redina A.A., Mokrushnikov V.P., Dultsev V.F. Antiinsky ore occurrence - as an example of ore-forming systems associated with restored intrusions (Eastern Transbaikalia) // *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]. 2018. V. 329, No. 6. pp. 17–29. In Russian

Redina A.A., Mokrushnikov V.P., Redin Yu.O. Conditions of formation and age of rare metal mineralization in the Kukulbey ore district (Eastern Transbaikalia) // *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]. 2019. V. 330, No. 9. pp. 90–102.

Spiridonov A.M., Zorina L.D., Kitaev N.A. Gold-bearing ore-magmatic systems of Transbaikalia. Novosibirsk, Academic Publishing House "Geo", 2006. 291 p.

Lu Y.-J., Loucks R.R., Fiorentini M., Campbell McCuaig T., Evans N.J., Yang Zh.-M., Hou Z.-Q., Kirkland C.L., Parra-Avila L.A., Kobussen A. Zircon Compositions as a Pathfinder for Porphyry Cu ± Mo ± Au Deposits//Economic Geologists. 2016. Inc. Special Publication 19. Chapter 13. pp. 329–347. https://www.researchgate.net/publication/303386427_Zircon_compositions_as_a_pathfinder_for_porphyry_Cu_Mo_Au_deposits

Ballard J.R., Palin M.J., Campbell L.H. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile. *Contrib. Mineral. Petrol.* 2002. V. 144. pp. 347–364. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0402-5>

Burnham A.D., Berry A.J. An experimental study of trace element partitioning between zircon and melt as a function of oxygen fugacity. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2012. V. 95. pp. 196–212. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.07.034>

Dilles J.H., Kent A.J.R., Wooden J.L., Tosdal R.M., Koleszar A., Lee R.G., Farmer L.P. Zircon compositional evidence for sulfur-degassing from ore-forming arc magmas. *Econ. Geol.* 2015. V. 110. pp. 241–251. <https://doi.org/10.2113/econgeo.110.1.241>

Redin Y.O., Redina A.A., Mokrushnikov V.P., Malyutina A.V., Dultsev V.F. The Kultuma Au–Cu–Fe-Skarn Deposit (Eastern Transbaikalia): Magmatism, Zircon Geochemistry, Mineralogy, Age, Formation Conditions and Isotope Geochemical Data. *Minerals*. 2022. V. 12. 12. <https://doi.org/10.3390/min12010012>

Redin Y.O., Redina A.A., Malyutina A.V., Dultsev V.F., Kalinin Y.A., Abramov B.N., Borisenko A.S. Rock-Forming (Biotite and Plagioclase) and Accessory (Zircon) Minerals Geochemistry as an Indicator of the Metal Fertility of Magmas by the Example of Au–Cu–Fe-Skarn Deposits in Eastern Transbaikalia. *Minerals*. 2022. V. 12. 50. <https://doi.org/10.3390/min12010050>

Redin Y.O., Redina A.A., Mokrushnikov V.P., Malyutina A.V., Dultsev V.F., Kalinin Yu., Abramov B., Borisenko A. Distinctive Features of the Major and Trace Element Composition of Biotite from Igneous Rocks Associated with Various Types of Mineralization on the Example of the Shakhtama Intrusive Complex (Eastern Transbaikalia). *Minerals*. 2023. V. 13. 1334. <https://doi.org/10.3390/min13101334>

Wen G., Zhou R.-J., Li J.-W., Chang J., Hu H., Yan D.-R., Wei K.-T., Jin S.-G. Skarn metallogenesis through zircon record: An example from the Daye Cu–Au–Fe–Mo district, eastern China. *Lithos*. 2020. V. 378–379. 105807. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105807>

Zhong S., Seltmann R., Qu H. et al. Characterization of the zircon Ce anomaly for estimation of oxidation state of magmas: a revised Ce/Ce* method // *Miner. Petrol.* 2019. V. 113. pp. 755–763. <https://doi.org/10.1007/s00710-019-00682-y>

Информация об авторах:

Редин Ю.О., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: redin@igm.nsc.ru

Малютина А.В., младший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: malyutina@igm.nsc.ru

Дульцев В.Ф. инженер, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: dultsev@igm.nsc.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Redin Yu.O., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: redin@igm.nsc.ru

Malyutina A.V., Junior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: malyutina@igm.nsc.ru

Dultsev V.F., Engineer, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: dultsev@igm.nsc.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 21.01.2024; одобрена после рецензирования 11.12.2024; принята к публикации 02.06.2025

The article was submitted 21.01.2024; approved after reviewing 11.12.2024; accepted for publication 02.06.2025

ГЛЯЦИОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.324

doi: 10.17223/25421379/35/6

ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕДНИКОВ КОРЯКСКОГО НАГОРЬЯ В ПЕРИОД С 1972 ПО 2019 г.



Мария Дмитриевна Ананичева¹, Юрий Михайлович Кононов²

^{1, 2} Институт географии РАН, Москва, Россия

¹ maranan@gmail.com

² jukon02@mail.ru

Аннотация. Изменения площади ледников Корякского нагорья были количественно оценены за период 1972–2019 гг. по данным дистанционного зондирования (спутниковые снимки Corona и Sentinel-2). За этот период площадь ледников сократилась почти вдвое, с 85,1 до 38,9 км². Средняя скорость изменения площади составила 0,98 км²/год. Убыль площади каждого ледника колебалась от 14,3 до 81,4 %. Ледники с восточной, северо-восточной и юго-западной экспозицией потеряли ~62 % своей площади, тогда как ледники северной, северо-западной и западной экспозиций потеряли ~57 %. Наименьшую потерю своей площади (в среднем 47,4 %) понесли небольшие ледники с южной экспозицией.

Ключевые слова: Северо-Восточная Азия, Корякское нагорье, горные ледники, дистанционное зондирование, изменение ледников, изменение климата

Благодарности: авторы благодарны А.А Алейникову (Группа компаний «СКАНЭКС») за помощь в обработке спутниковых снимков, использованных в данной работе.

Источник финансирования: исследование выполнено в рамках темы государственного задания Института географии РАН FMWS-2024-0004 (№ 41021051703465-1).

Для цитирования: Ананичева М.Д., Кононов Ю.М. Изменения ледников Корякского нагорья в период с 1972 по 2019 г. // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 72–88. doi: 10.17223/25421379/35/6

Original article

doi: 10.17223/25421379/35/6

GLACIER CHANGE ON THE KORYAK HIGHLANDS, NORTH-EAST ASIA, BETWEEN 1972 AND 2019

Maria D. Ananicheva¹, Yury M. Kononov²

^{1, 2} Institute of Geography, RAS, Moscow, Russia

¹ maranan@gmail.com

² jukon02@mail.ru

Abstract. The availability of satellite imagery offers the opportunity to view glacier changes for remote and inaccessible regions such as the Koryak Highlands (Northeastern Russia). In this study, multi-annual fluctuations of glacier area for this region were assessed for the period 1972–2019 based on different satellite images. Since study of the glaciers in the 20th century in this region was scarce and contradictory, the character of glacier changes and its relation to climate are poorly understood. There are not enough reliable data in the USSR Glacier Inventory compiled in the end of 1960s for this region, therefore a reassessment is necessary. For this purpose, Corona images offer a valuable opportunity to map margins of the glaciers around the 1970s. The state of glaciers in 2019 was obtained based on Sentinel-2 images. As a result, over the period from 1972 to 2019, the total surface area of glaciers in the Koryak Highlands decreased by almost half: from $85.1 \pm 0.9 \text{ km}^2$ in 1972 to $38.9 \pm 0.8 \text{ km}^2$ in 2019. The mean rate of area change was $0.98 \text{ km}^2 \text{ yr}^{-1}$ over the study period. The surface area loss of each glacier for 1972–2019 ranged from 14.3 to 81.4 %. Glaciers with an area of less than 0.2 km^2 lost on average 63.7% of their area. Glaciers with an area of 0.2 to 0.5 km^2 and from 0.5 to 0.1 km^2 lost 58.1 % and 53.9 % of their area, respectively, over the same period. The largest glaciers (more than 1 km^2) lost the least area (on average, 46.2 %). Glaciers with eastern, northeastern and southwestern aspects lost respectively 61.8 %, 60.4 % and 63.5 % of their area, while glaciers with northern, northwestern and western aspects lost respectively, 58.5 %, 56.6 % and 57.2 % of their area for 1972 to 2019. The small glaciers, which are few in number of the southern aspect showed the

least area loss (on average, 47.4 %). The degree of the glaciers preservation even with significant reduction in area points at more important role of the orographic factor (relief features) compared to climatic one. Glaciers of the Koryak and Chukotka highlands demonstrate approximately the same rate of reduction in percentage for the entire period from 1972/75 to 2019. However, compared to the glaciers of the Sredinny Range on Kamchatka, glaciation in the Koryak and Chukotka Highlands decreased faster.

Keywords: Northeastern Asia, Koryak Highlands, mountain glaciers, remote sensing, glacier change, climate change

Acknowledgments: The authors are grateful to A.A. Aleinikov (SCANEX Group of Companies) for his assistance in processing satellite images used in this work.

Source of financing: The study was carried out within the framework of the State Assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences FMWS-2024-0004 (No. 1021051703465-1).

For citation: Ananicheva M.D., Kononov Yu.M. (2025) Glacier change on the Koryak Highlands, north-east Asia, between 1972 and 2019. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2. 71–88. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/35/6

Введение

Ледники являются важным компонентом высокогорных ландшафтов [Oerlemans, 1994; Vaughan et al., 2014; Huss et al., 2017; Marzeion et al., 2018; Pepin et al., 2022]. Аккумулируя в себе значительные водные запасы, поступающие в виде атмосферных осадков, горные ледники оказывают определяющее воздействие на гидрологический режим близлежащих территорий [Barnett et al., 2005; Viviroli et al., 2011; Musselman et al., 2017; Huss, Hock, 2018; Zemp et al., 2019]. Кроме того, горные ледники часто могут способствовать возникновению опасных природных явлений, в первую очередь селевых потоков. В обоих случаях они выступают в роли весьма нестабильных природных объектов, которые откликаются на всевозможные изменения климатических условий. Таким образом, чувствительность оледенения к изменению климата и потенциально значительные для человечества последствия его деградации требуют надежных оценок изменения состояния ледников в условиях современного и ожидаемого в ближайшем будущем климата. Для получения таких оценок и анализа остающихся неопределенностей необходимы данные мониторинга оледенения в разных физико-географических условиях [Andreassen et al., 2005; Chinn et al., 2005; Kononov et al., 2005; Braithwaite, 2009; Takahashi et al., 2011; Bliss et al., 2014; Zemp et al., 2015; Das et al., 2023].

В континентальной части России находятся 18 горно-ледниковых систем. Первой системной оценкой оледенения на территории России является Каталог ледников СССР [1965–1982], по данным которого в середине XX в. на территории России насчитывалось свыше 8,5 тысяч ледников общей площадью около 6 тыс. км². Однако из-за труднодоступности некоторых регионов и недостаточной развитости методов дистанционного анализа эти материалы были не полными. К таким районам относится и Корякское нагорье, оледенению которого посвящено данное исследование.

Корякское нагорье расположено на северо-востоке Азиатской части России вдоль Берингова моря, между Анадырским заливом и п-ом Камчатка. Удалённость и труднодоступность объекта исследований создают серьёзное препятствие для организации наземных наблюдений. Поэтому основным инструментом изучения ледников здесь остается дистанционное зондирование. Вместе с тем наличие здесь переходных состояний и форм между классическими ледниками и каменными глетчерами затрудняет их идентификацию.

Первые сведения о ледниках Корякского нагорья были получены в 1937 г. во время геологической экспедиции [Николаев, Колосов, 1939]. В 1955 г. были получены первые подсчёты числа и площади ледников по данным аэрофотосъёмки [Васьковский, 1955]. Последующие исследования постепенно дополняли и уточняли информацию о числе и параметрах ледников Корякского нагорья [Сватков, 1965], и в наиболее полном виде она была представлена в отдельном томе Каталога ледников СССР [Виноградов и др., 1982]. Раздел, посвященный Корякскому нагорью, был составлен по картам издания 1952 г., созданным на основе аэрофотосъёмки 1949–1950 гг. Однако сложности в проведении полноценных полевых исследований не позволили обеспечить эти данные достаточной степенью надежности. Использовались снимки разного разрешения, полученные в разное время года. Разными были методы и подходы к процессу дешифрирования, а также анализу полученных результатов, что существенно затрудняет сравнительную оценку современного состояния ледниковых районов. В результате такой ценный ресурс, как Каталог ледников СССР, в части Корякского нагорья оказался малопригодным для оценки изменения горного оледенения указанного района за последние десятилетия [Седов, 2001; Ананичева, 2012; Ананичева и др., 2012; Носенко и др., 2022].

Первый сравнительный анализ параметров оледенения Корякского нагорья представленных в ката-

логе ледников СССР и данных дистанционного зондирования был предпринят нами в работе [Ананичева и др., 2023]. Основная цель представляемого здесь исследования – провести более детальную рецензию данных о числе и параметрах ледников Корякского нагорья [Виноградов и др., 1982], используя надежные материалы дистанционного зондирования, выполненные во время максимально близкое к составлению каталога. Мы привлекли набор архивных снимков Corona, датируемых 1967–1973 гг., доступ к которым появился в последнее время. Следующей основной задачей исследования было оценить изменения основных параметров оледенения

Корякского нагорья за последние десятилетия на фоне меняющегося климата.

Район исследований

Корякское нагорье занимает обширную территорию на крайнем северо-востоке Азиатской территории России (рис. 1). С юго-востока оно омывается Беринговым морем, на юго-западе – водами мелководного Пенжинского залива Охотского моря, на северо-востоке – также мелководным Анадырским заливом. Протяжённость его с юга на север порядка 800 км, ширина от 80 до 270 км.

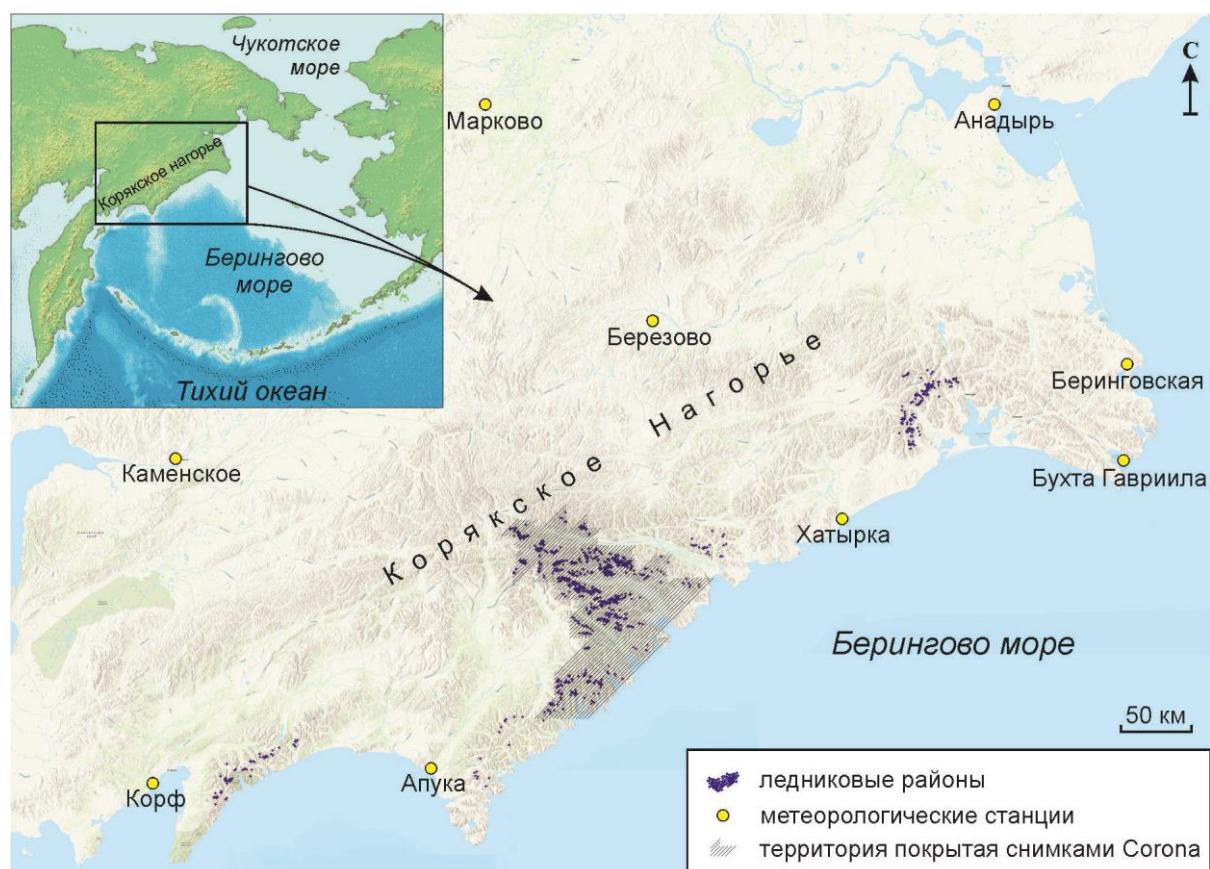


Рис. 1. Карта расположения Корякского нагорья с указанием района исследований и местоположением ледников

Fig. 1. Location map of the Koryak Highlands showing the region of study with glaciers areas

Корякское нагорье состоит из параллельных антиклинальных хребтов, ориентированных преимущественно с северо-востока на юго-запад. Хребты имеют хорошо выраженный альпийский характер с многочисленными карами и подвижными каменистыми осыпями. Диапазон преобладающих высот 600–1 800 м (высшая точка в центральной части – гора Ледяная, 2453 м над ур. м.).

Климат в районе нагорья морской, с муссонным характером. Лето короткое и прохладное, с затяжными дождями и туманами, возможны снегопады из-за преобладающего переноса воздуха с океана на сушу. Средняя температура июля составляет 9 °C. Зимой отмечаются сильные ветры при относительно небольших морозах. Средняя температура января от –14 °C на побережье до –24 °C в горах.

Осадки формируются при вторжении тихоокеанских циклонов. Годовое количество осадков – на юго-восточном склоне свыше 700 мм, на северо-западном – 400 мм. Основное количество твёрдых осадков выпадает в первую половину зимы, но их распределение по территории неравномерно. Частота и мощность их выпадения резко уменьшаются по мере удаления от побережья. Снег не тает в течение года на высотах свыше 1400 м на северных склонах и 1980 м – на южных. Ущелья северной и северо-западной части заполнены плотным снегом вплоть до августа.

Материалы и методы исследований

В данном исследовании использовались различные наборы данных для оценки изменений ледников в период с 1972 по 2019 г. В качестве основного источника данных дистанционного зондирования выступают спутниковые снимки Corona (1972 г.) и Sentinel-2 (2019 г.).

Данные дистанционного зондирования Corona – источник исторической спутниковой информации среднего и высокого разрешения, в свое время расекреченной Министерством обороны США и находящиеся в открытом доступе. Оригиналы плёнок хранятся в Службе архивов и записей США (National Archives and Records Administration, NARA), копии – в USGS EROS DataCenter, который и занимается сканированием и продажей данных.

Для Корякского нагорья в глобальном архиве имеются снимки за 1972 г. на время окончания периода аблации (конец июля – август). Снимки панхроматические, имеют довольно высокое пространственное разрешение (1,8–2,7 м). На данный район они не сканировались и не продавались. Снимки Corona представляют собой отсканированные пленочные изображения, которые нуждаются в тщательной пространственной привязке и ортотрансформации. В качестве базового рельефа для ортотрансформирования космических снимков Corona теперь была использована цифровая модель рельефа ArcticDEM с пространственным разрешением 10 м [Porter et al., 2018], а также на некоторые участки – SRTM с 30-метровым разрешением.

Привязка снимков Corona осуществлялась путём точного совмещения с космическим снимком Sentinel-2 по общим элементам рельефа, которые не были подвержены изменениям, таким как скальные выступы, горные гребни вершины гор, крупные груды камней, скальные обрывы берегов. Особенности ландшафта заключается в отсутствии надежных опорных точек, обычно используемых при привязке (пересечение дорог, мостов). Поэтому для обеспече-

ния точности привязки снимка приходилось выбирать свыше 50 опорных точек. А для корректного ортотрансформирования снимка Corona важно, чтобы опорные точки находились как на самых высоких частях (гребни хребтов), так и в долинах рек, у подножия склонов. Привязанный и ортотрансформированный снимок Corona соответствует пространственному разрешению 2 м.

По снимкам Corona 1972 г. анализировались ледники большой группы северной части Корякского нагорья и меньшей по количеству ледников южной части нагорья. Нам удалось получить снимки, покрывающие 619 объектов из 715 упомянутых в Каталоге ледников СССР как ледники [Виноградов и др., 1982]. Оценивались площади, длины, характерные высотные точки для определения высоты границы питания (equilibrium line altitude – ELA). Использовался пакет программ ArcGis, ArcMap, определение контуров ледников выполнялось в ручном режиме. Самое оптимальное время дешифрирования ледников для данного района – 10–20 августа по снимкам 1972 г. В более ранние сроки большое количество сезонного снега делает невозможным корректно определять контуры ледника. После 20 августа слишком большие тени от горных хребтов могут мешать дешифрированию, а позже 5 сентября выпадает свежий снег. Это окно может меняться год от года на несколько дней в зависимости от летних температур воздуха, количества накопившихся за предшествующий холодный сезон твёрдых осадков, облачности и других факторов.

Для дешифрирования ледников 2019 г. использовались снимки Sentinel-2A/2B. Данные Sentinel-2 представляются Европейским космическим агентством (European Space Agency, ESA) пользователям на бесплатной основе (<https://scihub.copernicus.eu>). В работе использовалась мозаика цифровой модели рельефа (ЦМР) ArcticDEM 3.0 с пространственным разрешением 2 м (<https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem>).

Что касается точности определения площадей ледников на 2019 г., то нами проведено сравнение ортофотопланов ледников, сделанных по аэрофото-снимкам с дрона (БПЛА) во время экспедиции 2020 г. и Sentinel-2 2019 г. для четырех ледников: № 678, 679, 680 и 685 (номера даны по Каталогу ледников СССР). Разница составила от 2 до 12 %, что может являться оценкой погрешности определения контуров ледников [Ananicheva, Aleinikov, 2022].

Для оценки общей тенденции динамики важных для ледников климатических параметров исследовались изменения годовой и средней летней температуры воздуха, а также общих осадков (в течение года), осадков холодного периода (когда темпера-

туры весь месяц были устойчиво ниже нуля) и осадков теплого периода по имеющимся данным метеостанций (табл. 1). Для их расчета использовался временной отрезок с 1966 (когда были исправлены показатели осадкометров на северных станциях РФ) по 2021 г. Метеопараметры были получены по метеостанциям (табл. 1) из базы данных [Булыгина и др., 2020, а, б].

Однако близко расположенных к району исследований метеостанций нет, но представление о характере изменений основных климатических факторов (летних температур воздуха и зимних осадков), влияющих на режим и баланс массы ледников, можно получить по данным реанализа ECMWF ERA5-land (<https://climate.copernicus.eu/>). Применение данных ERA5 обусловлено рядом достоинств: непрерывными рядами данных, высоким пространственным разрешением ($0,1^\circ \times 0,1^\circ$) с исходным разрешение 9 км. [Copernicus ...], а также высокой точностью описания температурного режима. Набор данных ERA5-Land, как и любое другое моделирование, дает

оценки, которые имеют некоторую степень неопределенности [Muñoz-Sabater et al., 2021]. Для выявления пространственной неоднородности и оценки погрешностей был проведен корреляционный анализ метеорологических показателей между метеостанциями и данными реанализа ERA5.

В качестве основного параметра, отражающего связь оледенения с климатом, используется высота границы питания (Equilibrium line altitude, ELA) – граница, разделяющая область аккумуляции от зоны аблации на леднике. Значения ELA рассчитаны по упрощенному методу Кировского для всех ледников [Калесник, 1963; Braithwaite, 2015]. Оценки этого параметра определяются с ошибкой от 5 до 15 % [Ananicheva et al., 2010]. Применяя методы Кировского – Гефера, мы получаем среднюю многолетнюю границу питания ледника для периода его сокращения. При наступлении ледника ошибки из-за допущения стационарности и линейности аблации имеют одинаковый знак, т.е. складываются, а в периоды сокращения ледника они имеют противоположный знак, т.е. компенсируют друг друга.

Метеостанции и их основные характеристики
Weather stations and their main parameters

Таблица 1
Table 1

№	Индекс ВМО	Название	Широта, С.	Долгота, В.	Высота, м над ур. м	Период наблюдений, годы
1	25954	Корф	60°21'	166°00'	2	1936–2021
2	25956	Апрука	60°26'	169°40'	3	1936–2021
3	25767	Хатырка	62°03'	175°12'	17	1955–2013
4	25777	Бухта Гавриила	62°25'	179°08'	4	1935–1995
5	25744	Каменское	62°29'	166°13'	35	1950–2021
6	25677	Беринговская	63°03'	179°19'	86	1944–1992
7	25656	Березово	63°27'	172°42'	200	1944–1994
8	25551	Марково	64°41'	170°25'	25	1895–2020
9	25563	Анадырь	64°47'	177°34'	64	1899–2021

Примечание. Начало наблюдений указано для измерения температуры воздуха. Измерение осадков для всех станций представлено с 1966 г.

Note. The start of observations is indicated for the air temperature. Precipitation measurements for all stations have been presented since 1966.

Результаты исследования и их обсуждение

Основные характеристики современного оледенения Корякского нагорья были подробно представлены в [Ananicheva, Aleinikov, 2022]. Эти данные использовались в настоящем исследовании для оценки динамики оледенения во времени. В этом подразделе представлены новые данные о состоянии оледенения Корякского нагорья в 1972 г., полученные по спутниковым снимкам Corona.

Нужно учитывать, что снимки Corona не покрывают 100 % территории распространения ледников, указанных в Каталоге ледников СССР. В общей

сложности на изображениях Corona от 1972 г. было выделено 175 ледников размером от 0,05 до 4,33 км². Причем большинство ледников имели площади до 2 км², и только один ледник занимал площадь более 4 км². Общая площадь оледенения в 1972 г. составила 85,14 км². Различные топографические параметры ледников разных размерных групп приведены в табл. 2. Подавляющее большинство ледников (156) Корякского нагорья имеют площадь от 0,1 до 1 км². На их долю приходится 68 % от общей площади оледенения. Почти половина ледников (83 или 47,4 %) входят в размерный класс 0,2–0,5 км², при этом на их долю приходится 32,5 % общей площади оледенения.

Количество ледников размерного класса $> 1 \text{ км}^2$ составляет всего 15 (8,6 %), однако они занимают 31,5 % общей площади оледенения. Ледники размерного класса $< 0,1 \text{ км}^2$ являются самыми малочисленными (4, или 2,3 %), и на их долю приходится лишь 0,4 % общей площади оледенения. Средняя высота отдельных ледников колеблется от 470 до 2050 м над ур. м, со средней высотой 1146 м над ур. м. Средняя минимальная и максимальная высота всех ледников составляет 999 м и 1293 м. Более крупные ледники ($> 1 \text{ км}^2$) имеют более широкий диапазон высот (532 м), а их зона аблации находится на более низких высотах по сравнению с более мелкими ледниками. В целом наблюдается закономерность – диапазон высот растет по мере увеличения

размерного класса ледниковых групп (табл. 2, рис. 2). Большинство ледников располагалось на склонах северной и северо-западной экспозиции. Примерно также была распределена и площадь оледенения. В 1972 г. на территории Корякского нагорья не было ни одного ледника юго-восточной экспозиции (рис. 2).

Как уже отмечалось выше, для анализа изменения оледенения Корякского нагорья во времени, наряду со снимками Corona от 1972 г. использовались материалы спутниковой съемки Sentinel-2 от 2019 г. (рис. 3). Общая площадь ледников сократилась с 85,1 км^2 в 1972 г. до 38,9 км^2 в 2019 г. Средняя скорость изменения площади составила 0,98 $\text{км}^2/\text{год}$ за исследуемый период.

Параметры ледников в 1972 г. в зависимости от размерной группы

Glaciers parameters according to different size classes for all glaciers in 1972

Таблица 2

Table 2

Показатель	Размерная группа, км^2					Все
	$< 0,1$	0,1–0,2	0,2–0,5	0,5–1	> 1	
Количество	4 (2,3 %)	39 (22,3 %)	83 (47,4 %)	34 (19,4 %)	15 (8,6 %)	175
Площадь, км^2	0,3 (0,4 %)	6,1 (7,1 %)	27,6 (32,5 %)	24,3 (28,5 %)	26,8 (31,5 %)	85,1
Средняя высота, м	1 234	1 079	1 090	1 257	1 358	1 146
Средняя минимальная высота, м	1 163	983	955	1 065	1 092	999
Средняя максимальная высота, м	1 306	1 174	1 225	1 448	1 624	1 293
Средний высотный интервал, м	143	191	271	383	532	294

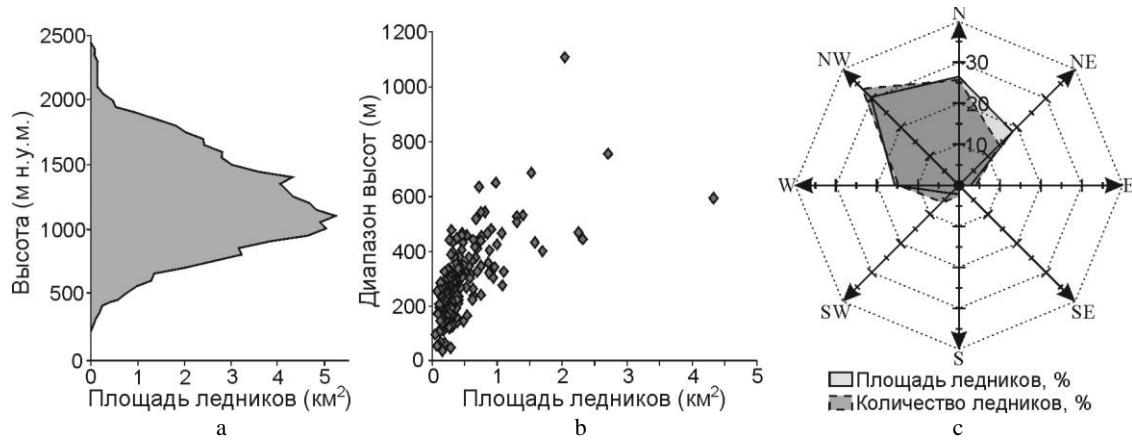


Рис. 2. Основные характеристики ледников Корякского нагорья в 1972 г.

а – распределение суммарной площади ледников по высоте; б – диаграмма разброса поверхности площади ледников в зависимости от диапазона высот; в – наследование ледников по экспозиции

Fig. 2. Glacier parameters for the Koryak Highlands in 1972

a – elevation-dependent glacier spreading; b – scatter plot of surface area with respect to the elevation range; c – distribution of glaciers by aspects

Значительное сокращение общей площади оледенения способствовало существенному изменению в распределении ледников по размерным классам. Особенно сильно это выражалось в размерных группах $< 0,1$ и 0,1–0,2 км^2 , в которые переместилось большинство ледников, имевших размеры площади от 0,2

до 1 км^2 в 1972 г. В размерном классе $< 0,1 \text{ км}^2$ в 2019 г. оказалось 69 ледников, а в 1972 г. их было только 4. Тем не менее они занимают только 9,6 % от общей площади оледенения 2019 г. Эта группа занимает первое место по количеству ледников, но последнее по площади оледенения. Убыль площади

каждого ледника за 1972–2019 гг. колебалась от 14,3 до 81,4 %. Ледники площадью менее 0,2 км² потеряли в среднем 63,7 % от своей площади. Ледники площадью от 0,2 до 0,5 км² и от 0,5 до 0,1 км² потеряли 58,1 и 53,9 % площади соответственно за тот же период. Самые крупные ледники (более 1 км²) потеряли, в процентном отношении меньше всего площади (в среднем 46,2 %), главным образом потому, что эти ледники имеют сравнительно большую площадь аккумуляции по сравнению с более мелкими ледниками. Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют о том, что более мелкие ледники потеряли большую долю площади по сравнению с более крупными ледниками (табл. 3, рис. 4, *a*). Ледники с восточной, северо-восточной и юго-западной экспозицией потеряли 61,8, 60,4 и 63,5 % своей площади соответственно в период с 1972 по 2019 г., тогда как ледники северной, северо-западной и западной экспозиции потеряли, соответственно, 58,5, 56,6 и 57,2 % своей площади. Наименьшую потерю своей площади (в среднем 47,4 %) понесли малочисленные и небольшие ледники южной экспозиции. Скорее всего, это связано с тем, что эти ледники сохраняются в силу благоприятных особенностей рельефа, которые защищают их от воздействия климата. Таким образом, экспозиция, как и высотное положение ледников, по-видимому, не играет значительной роли в изменении площади (рис. 4, *b*, *c*).

Ближайшие к Корякскому нагорью районы с развитым современным оледенением расположены к северу – Чукотское нагорье, и к югу – горные хребты Камчатки. Так же, как и в Корякском нагорье, комплексные исследования ледников этих районов началось со второй половины XX в. и были приурочены к составлению Каталога ледников СССР [Каталог..., 1965–1982].

Чукотское нагорье представляет собой систему средневысотных хребтов и низкогорных массивов. Для наиболее приподнятых участков нагорья характерно интенсивное расчленение и альпийские формы рельефа – цирки, кары, а также глубокие сквозные ледниковые долины. Ледники Чукотского нагорья представлены несколькими изолированными группами [Седов, 1997]. Три группы ледников располагаются в непосредственной близости от морского побережья. Четвёртая группа из четырёх каровых ледников находится в хр. Пекульней. Пять ледников пятой группы располагаются в Чантальском хребте в бассейне р. Амгуэма.

Согласно последним исследованиям, оледенение Чукотского нагорья в течение последних десятилетий

сокращается [Ананичева, Карпачевский, 2016; Ананичева и др., 2017; Ananicheva et al. 2020]. Со второй половины 1970-х гг. и до 2017 г. общая площадь ледников здесь сократилась с 17,4 до 12 км², или на 30 %. Средняя скорость сокращения была 0,14 км²/год. Скорость была неравномерной. До 2005 г. площади сокращались в среднем на 0,04 км² в год, а затем вплоть до 2017 г. уже со скоростью 0,26 км²/год.

Полуостров Камчатка расположен к югу от Корякского нагорья и имеет вытянутую в меридиональном направлении форму. Западное побережье полуострова омывает Охотское море, восточное – Тихий океан. Большая часть Камчатки имеет горный рельеф. Крупнейшее горное сооружение – Срединный хребет, который представляет собой цепь вулканов высотой 1700–2600 м над ур. м, тянувшуюся практически через весь полуостров с северо-востока на юго-запад. Большинство ледников приурочено к водоразделу северной части Срединного хребта. Кроме того, в центральной части Срединного хребта существуют относительно компактные узлы оледенения. Основной особенностью существования оледенения на Камчатке является высокая вулканическая активность.

Анализ изменений ледников [Муравьев, Носенко, 2013; Докукин и др., 2017; Муравьев, 2020а; Fukumoto et al., 2022] показал, что тенденция к сокращению их размеров, установившаяся во второй половине XX в., сохраняется и в настоящее время. Так, общее сокращение площади ледников Камчатки с 1950 по 2002–2015 гг. составило 10,6 %, или 82,81 км², однако в разных районах это происходит неодинаково. Больше всего сократились (27,6 %, или 24,6 км² за 1957–2013 гг.) ледники Кроноцкого полуострова, расположенного в средней части Тихоокеанского побережья. Существенно меньше сократились ледники северной части Срединного хребта (16,6 %, или 57,65 км² за 1950–2002 гг.) и вулканического массива Алней-Чашаконджа (19,5 %, или 11,8 км² за 1950–2010 гг.). Площадь оледенения Ичинского вулкана с 1950 по 2010–2014 гг. практически не изменилась благодаря мощному моренному покрову, бронирующему языки ледников. В пределах Ключевской группы вулканов, наоборот, наблюдается небольшой рост площади оледенения – 4,3 % (8,7 км²) с 1950 по 2010–2015 гг. Такая неоднородность в поведении ледников в разных районах Камчатки обусловлена разнообразием сочетаний форм макрорельефа, климатических характеристик и, в особенности, наличием (или отсутствием) современной вулканической активности [Докукин и др., 2017; Муравьев, 2020б; Fukumoto et al., 2022].

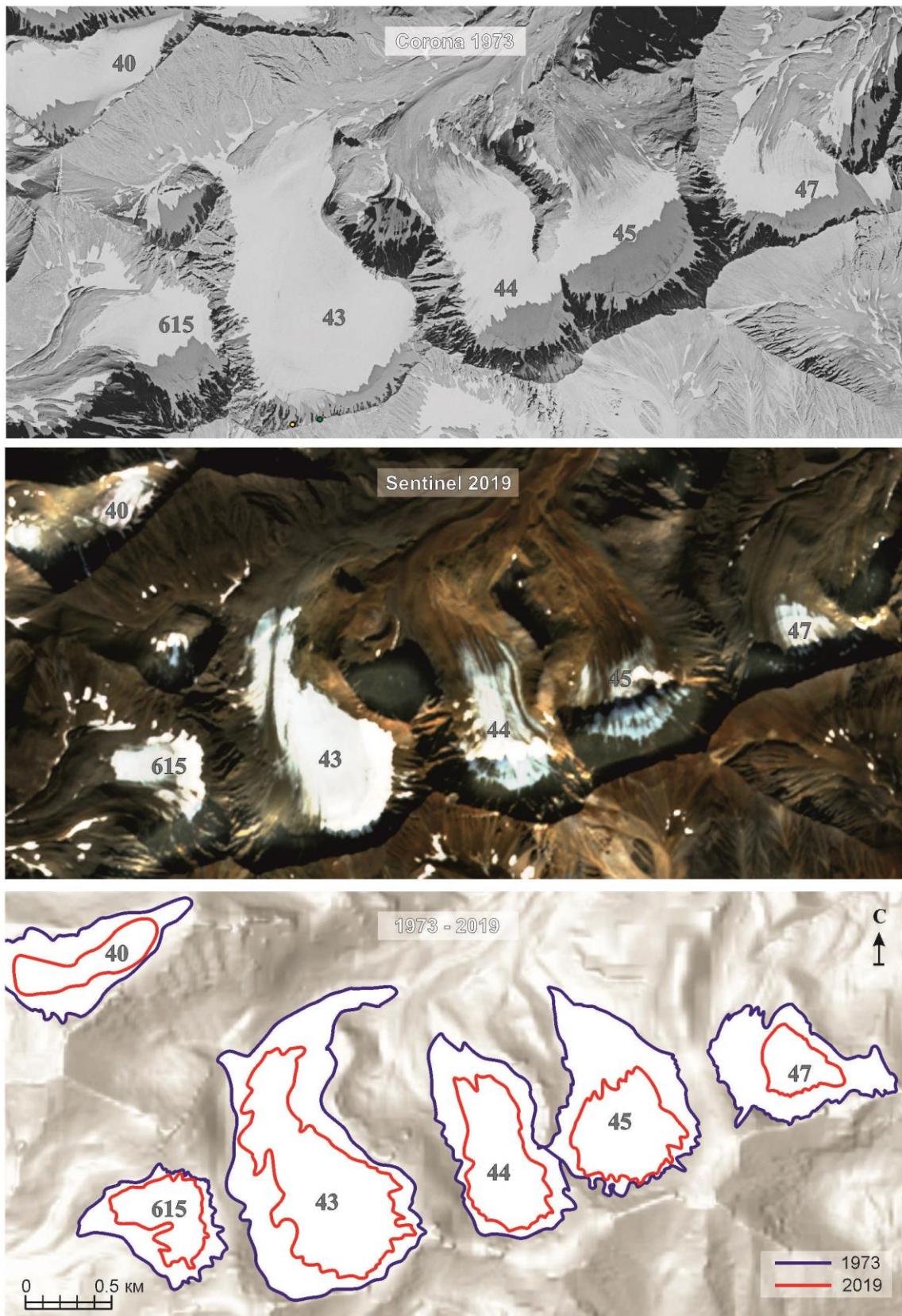


Рис. 3. Оцифровка контуров ледников по изображениям Corona (1972 г.) и Sentinel 2 (2019 г.).
Номера в пределах контуров ледников соответствуют номерам по Каталогу ледников СССР

Fig. 3. Digitization of glacier margins from Corona (1972) and Sentinel 2 (2019) images
Numbers of glaciers from the USSR Glacier Inventory are given on the glacier contours

Таблица 3

Изменение параметров ледников в период с 1972 по 2019 г. в зависимости от размеров ледников

Table 3

Glaciers parameters changes between 1972 and 2019 according to different size classes of the glaciers

Размерная группа, км ²	Общая площадь, км ²		Изменение площади, км ²
	1972	2019	
< 0,1	0,3	3,76	3,46
0,1–0,2	6,1	7,24	1,14
0,2–0,5	27,6	12,3	-15,3
0,5–1	24,3	6,5	-17,8
> 1	26,8	9,1	-17,7
Всего	85,1	38,9	-46,2

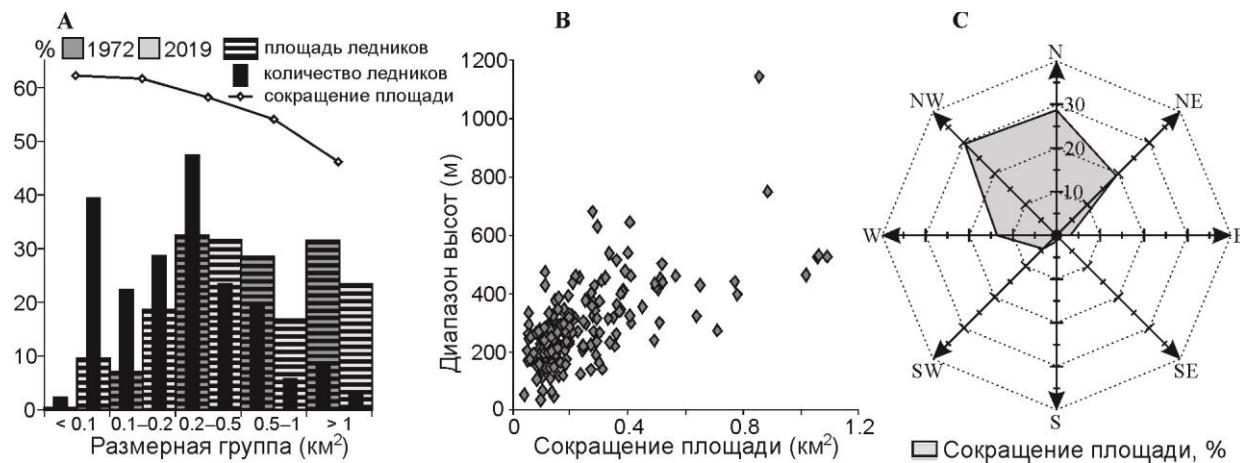


Рис. 4. Изменения ледников Корякского нагорья за период с 1972 по 2019 г. в зависимости от (а) размера, (б) диапазона высот и (с) экспозиции

Fig. 4. Glacier changes based on (a) size class, (b) elevation range, and (c) aspects in the Koryak Highlands between 1972 and 2019

Сравнительный анализ наших результатов показывает, что скорость сокращения относительной площади ледников за исследуемый период была почти одинакова для Корякского нагорья и Чукотского нагорья – 0,9 и 0,8 % в год соответственно. На Камчатке сокращение площади шло гораздо медленнее. Даже для района с самыми значительными потерями площади оледенения (Кроноцкий полуостров) их скорость убыли была 0,4 % в год, что почти в 2 раза ниже чем в Корякском нагорье и на Чукотке.

Вместе с тем скорость сокращения площадей ледников во всех упоминаемых районах не была равномерной за весь исследуемый период. В работе [Муравьев, 2020а] исследовались ледники Срединного хребта – района, где влияние вулканизма выражено в меньшей степени. В итоге автор отмечает, что потери за первые 15 лет XXI в. оказываются примерно равными общей сумме потерь за вторую половину XX в. Это означает, что в начале двадцатого века скорость сокращения ледников в 4,3 раза больше, т.е. около 1,45 % площади в год.

В работе [Ананичева, 2012] было проанализировано, в том числе, состояние отдельных ледников Корякского нагорья в 2003 г., используя спутниковые снимки Landsat MSS, TM и ETM+ и TerraLook ASTER. Здесь эти материалы использовались для определения скоростей изменения площадей ледников за периоды до начала XXI в. и после. Согласно этим исследованиям, сокращение ледников Корякского нагорья в последние десятилетия XX в. происходило со скоростью 0,25 км²/год. А уже в начале XXI в. деградация ледников замедлилась до 0,07 км²/год. В табл. 4 представлены результаты сравнения относительных величин сокращения оледенения соседних регионов за разные периоды. Как видно, оледенение Чукотки и Камчатки имеют схожую динамику деградации ледников. Оледенение Корякского нагорья, согласно анализируемым здесь данным, наоборот, в конце XX в. сокращалось гораздо стремительнее, чем в начале XXI в. Однако необходимо учитывать, что для сравнения с работой [Ананичева, 2012] мы имеем данные только для 24 ледников из 175.

Вполне возможно, что ситуация изменится, когда появится возможность использовать данные обо всех ледниках.

Для оценки пространственно-временной стабильности основных климатических параметров был проведен комплексный статистический анализ динамики температуры воздуха и атмосферных осадков по данным метеостанций и реанализа ERA5-land (табл. 5). Несмотря на значительные расстояния между метеостанциями и различия в абсолютной высоте, была выявлена значимая ($p < 0,01$) статистическая связь по температуре воздуха между всеми станциями за более чем 50-летний период. Атмосферные осадки изменялись во времени с большими различиями между метеостанциями, чем температура (табл. 5).

Для всего района исследований характерна общая закономерность в годовом распределении осадков. Максимальное количество осадков выпадает в конце лета, затем количество среднемесячных осадков постепенно сокращается, достигая минимума к концу весны. А уже с июня по август выпадение осадков резко усиливается. На всех метеостанциях среднемесячные значения температуры воздуха сохраняются

положительными с июня (иногда с мая) до сентября, не достигая 15 °C (рис. 5). Среднегодовая температура воздуха для всех метеостанций остается отрицательной. Учитывая, что все метеостанции находятся в предгорной части, мы можем предположить, что в высокогорье температура еще ниже, а осадков выпадает больше, как и их доля в твердом виде.

Как видно из рис. 6, на протяжении второй половины XX и начала XXI в. основные метеорологические показатели (температура и осадки) не испытывали значительных долгопериодных изменений. Тем не менее, согласно данным наблюдений, на метеостанции Апуха летняя температура воздуха за период с 1936 по 2021 г. повышалась со средней скоростью в 0,02 °C/год, а с 1947 г. потепление уже составляло 0,03 °C/год.

Атмосферные осадки, в частности за холодный период года, не имеют значимых трендов за весь период наблюдений (рис. 6). Таким образом, мы можем считать, что наибольший вклад в сокращение оледенения Корякского нагорья вносит повышение температуры воздуха летнего сезона.

Площади ледников и скорости их изменений в районах исследования
Glacier areas and rates of areal changes in the study regions

Район (источник)	Годы			Скорость изменения, %/год		
	t ₁	t ₂	t ₃	t ₁ – t ₂	t ₂ – t ₃	t ₁ – t ₃
Корякское нагорье (наше исследование и [Ананичева, 2012])	1972	2003	2019	-1,42	-0,39	-0,97
Чукотское нагорье [Ананичева и др., 2017]	1975	2005	2017	-0,20	-1,14	-0,59
Срединный хребет на Камчатке [Муравьев, 2020b]	1950	2002	2017	-0,34	-1,56	-0,54

Корреляция основных метеорологических параметров между метеостанциями и данными реанализа ERA5-land
Correlation of the main meteorological parameters between weather stations and ERA5-land reanalysis data

Метеостанция	Марково	Анадырь	Березово	Беринговская	Каменское	Хатырка	Бухта Гавриила	Корф	Апуха	ERA5-land
Марково	0,14	0,48	0,30	0,58	0,67	0,31	0,53	0,38	0,41	
Анадырь	0,70		0,35	0,23	0,11	0,23	-0,06	0,30	0,24	0,01
Березово	0,92	0,80		0,48	0,50	0,08	-0,06	0,20	0,25	0,17
Беринговская	0,81	0,81	0,87		0,12	0,07	-0,04	0,07	0,19	-0,11
Каменское	0,85	0,79	0,83	0,70		0,09	0,35	0,44	0,22	0,22
Хатырка	0,32	0,39	0,52	0,68	0,34		0,37	0,57	0,62	0,23
Бухта Гавриила	0,48	0,59	0,67	0,78	0,54	0,56		0,56	0,53	0,08
Корф	0,51	0,53	0,63	0,61	0,81	0,59	0,55		0,72	0,09
Апуха	0,64	0,70	0,70	0,76	0,83	0,68	0,67	0,86		0,13
ERA5-land	0,79	0,62	0,73	0,79	0,76	0,50	0,76	0,75	0,78	

Примечание. Коэффициенты корреляции температуры воздуха теплого сезона (среднемесячные значения выше нуля) представлены в нижней левой части таблицы. Коэффициенты корреляции атмосферных осадков холодного сезона (среднемесячные значения ниже нуля) представлены в верхней правой части таблицы. Жирным шрифтом выделены статистически значимые ($p < 0,01$) значения.

Note. Correlation coefficients for warm season air temperature (mean monthly values above zero) are presented in the lower-left part of the table. The correlation coefficients of atmospheric precipitation during the cold season (mean monthly values below zero) are in the upper-right part of the table. Statistically significant ($p < 0,01$) values are highlighted in bold.

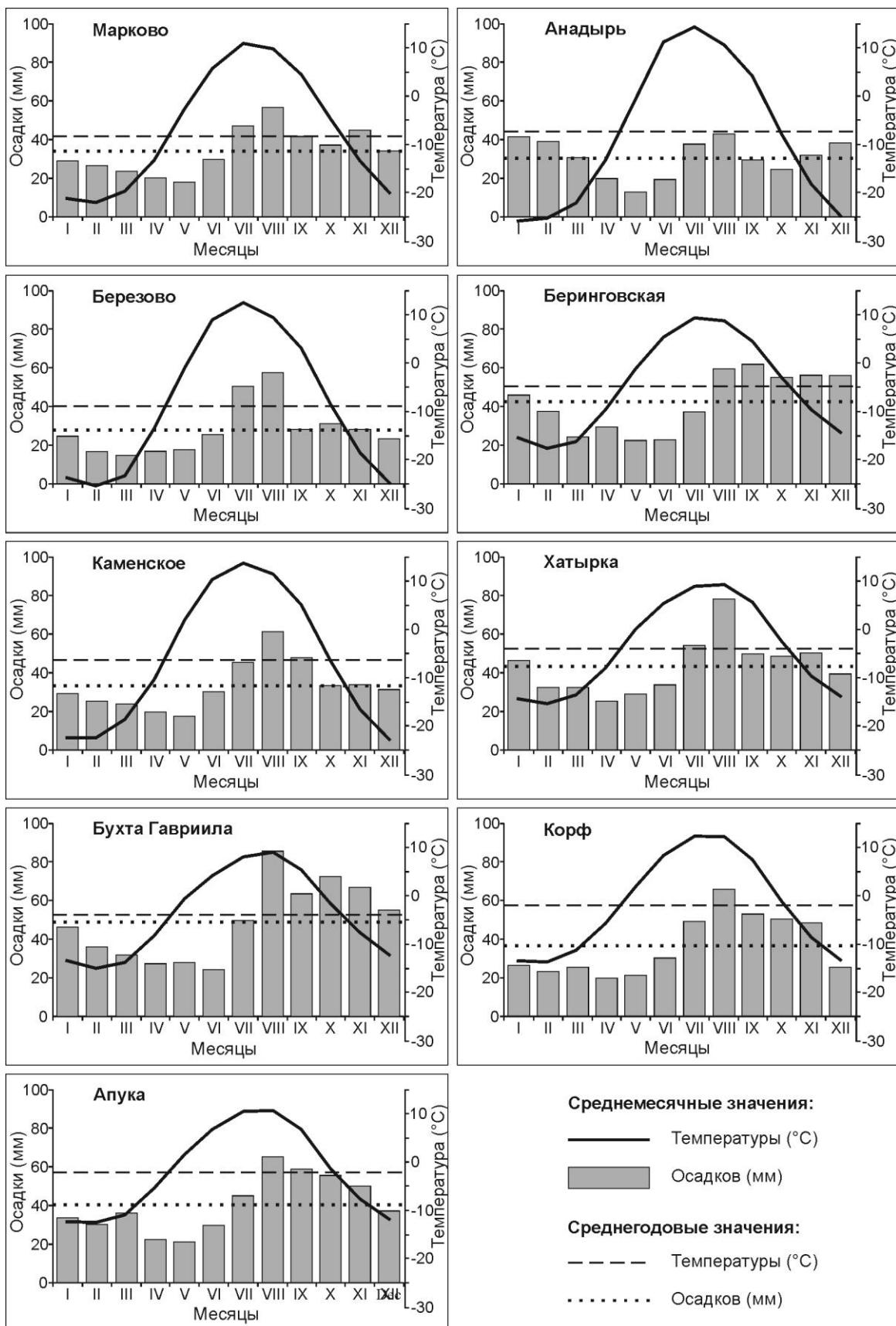


Рис. 5. Среднемесячная температура и осадки для района исследований, полученные по данным метеостанций

Fig. 5. Mean monthly temperature and precipitation for the study area derived from weather station data

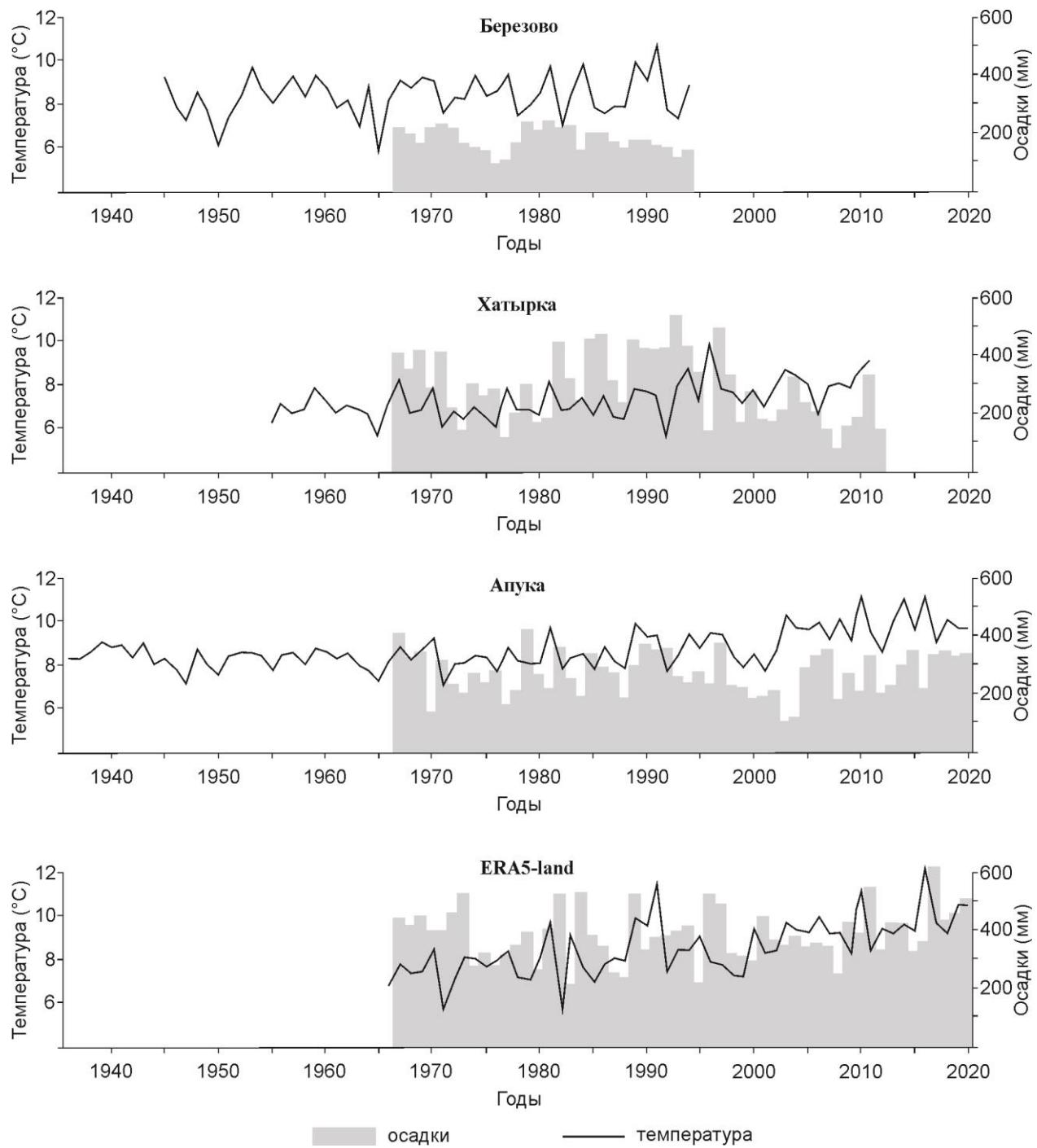


Рис. 6. Изменение средних летних температур воздуха (июнь–август) и суммы зимних осадков (октябрь–апрель) для района исследований по данным метеостанций (Березово, Хатырка, Апуга) и данным реанализа (ERA5-land)

Fig. 6. Changes in mean summer air temperatures (June–August) and total winter precipitation (October–April) in the region of study according to weather stations (Berezovo, Khatyrka, Apuka) records and reanalysis data (ERA5-land)

Как уже неоднократно отмечалось, ELA является важной гляциоклиматической характеристикой, отражающей состояние оледенения. Преобладающее из

года в год смещение ELA в ту или иную сторону указывает на предстоящее в ближайшее время наступление ледников или, наоборот, их деградацию.

Наиболее высоко ELA располагалась на ледниках с самой малой площадью ($< 0,1 \text{ км}^2$) и наибольшей ($0,5\text{--}1$ и $> 1 \text{ км}^2$) площадью. Также наибольшая ELA характерна ледникам южной экспозиции. За период с 1972 по 2019 г. ELA Корякского нагорья

поднялась в среднем на 30 м со скоростью 0,65 м/год. При этом изменения ELA были неравномерными. Рост ELA с 1972 по 2019 г. был заметно значительнее на ледниках большей площади (табл. 6).

Изменение ELA с 1972 по 2019 г. в зависимости от размера ледников и их экспозиции
Change in ELA from 1972 to 2019 depending on the size of glaciers and their aspect

Таблица 6

Table 6

Показатель		Положение ELA, м над ур. м		Изменение ELA, м	Скорость изменения ELA, м/год
Размерная группа, км^2	< 0,1	1972	1234	20	0,43
	0,1–0,2		1079	23	0,49
	0,2–0,5		1090	28	0,60
	0,5–1		1257	39	0,83
	> 1		1358	42	0,89
Экспозиция ледников	W	1092	1135	43	0,91
	NW	964	992	28	0,60
	N	1099	1130	31	0,66
	NE	1155	1194	39	0,83
	E	1285	1301	16	0,34
	SE	1300	1314	14	0,30
	S	1392	1422	30	0,64
	SW	1321	1361	40	0,85

Также наибольший подъем ELA был у ледников западной и северной экспозиций. При этом, учитывая низкую ELA этих ледников, очевидно, что они находятся в наиболее благоприятных климатических условиях. Ледники южных экспозиций, напротив, испытали наименьший подъем ELA за почти 50 лет. Соответственно, можно уверено предположить, что ледники южных экспозиций в течение длительного времени находятся в менее благоприятных климатических условиях и своим существованием в большей степени обязаны орографическому фактору. Именно поэтому эти ледники в меньшей степени реагируют на изменения климата.

Заключение

За период с 1972 по 2019 г. оледенение Корякского нагорья подверглось значительным изменениям. Общая площадь ледников сократилась почти вдвое, с $85,1 \text{ км}^2$ в 1972 г. до $38,9 \text{ км}^2$ в 2019. Хотя общее количество ледников осталось неизменным, произошло существенное перераспределение ледников по раз-

мерным классам. Большие ледники хоть и сократились больше, чем малые в абсолютных значениях, в относительном выражении потеряли меньшую долю своих площадей.

Сохранность ледников даже при значительном сокращении площади демонстрирует усиление орографического фактора (особенностей рельефа) по сравнению с климатическими условиями. При этом высотное положение и экспозиция ледников существенного значения не имеют. Сокращение оледенения Корякского и Чукотского нагорий в процентном выражении происходило примерно с одинаковой скоростью за весь период с 1972/75 до 2019 г. Однако по сравнению с ледниками Срединного хребта на Камчатке, оледенение Корякского и Чукотского нагорий сокращалось быстрее.

Исходя из различий в реакции на климатические изменения разных групп ледников, с большой долей уверенности мы можем предположить, что ледники южных экспозиций, особенно небольших размеров, своим существованием в большей степени обязаны удобным орографическим условиям и в меньшей степени подвержены влиянию изменений климата.

Список источников

- Ананичева М.Д. Современное состояние ледников Корякского нагорья и оценка их эволюции к середине текущего столетия // Лёд и Снег. 2012. № 1 (117). С. 15–23.
Ананичева М.Д., Капустин Г.А., Михайлов А.Ю. Ледники Мейныпильгынского хребта: современное состояние и сценарий эволюции ледниковых систем // Лёд и Снег. 2012. № 2 (118). С. 40–50.

- Ананичева М.Д., Карпачевский А.М.** Современное состояние ледников Чукотского и Колымского нагорий и прогноз эволюции ледниковых систем Чукотского нагорья // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 1. С. 64–83.
- Ананичева М.Д., Маслаков А.А., Антонов Е.В.** Деградация объектов криосферы в районе залива Лаврентия, Восточная Чукотка // Арктика и Антарктика. 2017. № 3. С. 17–29.
- Ананичева М.Д., Алейников А.А., Кононов Ю.М.** Проверка данных каталога ледников Корякского нагорья по архивным снимкам Corona и сравнение со снимками Sentinel-2 на фоне меняющегося климата // Криосфера Земли. 2023. Т. 27, № 5. С. 29–38. DOI: 10.15372/KZ20230503.
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В.** Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394 // Электронный ресурс. 2020а. URL: <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения: 25.11.2022).
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В.** Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 201462 // Электронный ресурс. 2020б. URL: <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных> (дата обращения: 25.11.2022).
- Васьковский А.П.** Современное оледенение Северо-Востока СССР // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР. 1955. № 9. С. 71–91.
- Виноградов О.Н., Коновалова Г.И., Сватков Н.М.** Каталог ледников СССР: Корякское нагорье. Т. 20, ч. 1. Л. : Гидрометеоиздат, 1982. 75 с.
- Докукин М.Д., Сейнова И.Б., Савернюк Е.А., Черноморец С.С.** О наступлении ледников в условиях вулканической деятельности вулкана Ключевской (Камчатка) // Лёд и Снег. 2017. № 57 (1). С. 10–24.
- Калесник С.В.** Очерки гляциологии. М. : Географгиз, 1963. 551 с.
- Каталог ледников СССР.** М. ; Л. : Гидрометеоиздат, 1965–1982.
- Муравьев А.Я., Носенко Г.А.** Изменения оледенения северной части Срединного хребта на Камчатке во второй половине XX в. // Лёд и Снег. 2013. № 53 (2). С. 5–11.
- Муравьев А.Я.** Сокращение ледников северной части Срединного хребта на Камчатке в период с 1950 по 2016–2017 гг. // Лёд и Снег. 2020а. № 60 (4). С. 498–512.
- Муравьев А.Я.** Распределение и морфология современных ледников Камчатки // Лёд и Снег. 2020б. № 60 (3). С. 325–342.
- Николаев И.Г., Колосов Д.М.** Современные ледники в Корякском хребте // Известия Государственного географического общества. 1939. Т. 71, № 8. С. 1154–1162.
- Носенко Г.А., Муравьев А.Я., Никитин С.А.** Баланс массы ледников Корякского нагорья Нежданний и Соседний за 1961–2016 гг. // Лёд и Снег. 2022. № 62(1). С. 5–16.
- Сватков Н.М.** Современное оледенение хребта Малиновского // Материалы гляциологических исследований. 1965. № 15. С. 111–119.
- Седов Р.В.** Ледники Чукотки // Материалы гляциологических исследований. 1997. № 82. С. 213–217.
- Седов Р.В.** Каталог ледников северо-восточной части Корякского нагорья // Материалы гляциологических исследований. 2001. № 91. С. 195–224.
- Ananicheva M.D., Krenke A.N., Barry R.G.** The Northeast Asia mountain glaciers in the near future by AOGCM scenarios // The Cryosphere. 2010. V. 4. P. 435–445. doi: 10.5194/tc-4-435-2010
- Ananicheva M., Kononov Yu., Belozerov E.** Contemporary state of glaciers in Chukotka and Kolyma highlands // Bulletin of Geography Physical Geography Series. 2020. V.19. P. 5–18. doi: 10.2478/bgeo-2020-0006
- Ananicheva M., Aleinikov A.** Glaciers of the Koryak Highlands: assessment of the state using satellite images and field studies // Bulletin of geography (Physical Geography Series). 2022. V. 22. P. 45–58. doi: 10.12775/bgeo-2022-0004
- Andreassen L.M., Elvehoy H., Kjollmoen B., Engeset R.V. Haakensen N.** Glacier mass balance and length variations in Norway // Annals of Glaciology. 2005. V. 42. P. 317–325. doi: 10.3189/172756405781812826
- Barnett T.P., Adam J.C., Lettenmaier D.P.** Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions // Nature. 2005. V. 438 (7066). P. 303–309. doi: 10.1038/nature04141
- Braithwaite R.J.** After six decades of monitoring glacier mass balance we still need data but it should be richer data // Annals of Glaciology. 2009. V. 50 (50). P. 191–197. doi: 10.3189/172756409787769573
- Braithwaite R.J.** From Doktor Kurowski's Schneegrenze to our modern glacier equilibrium line altitude (ELA) // The Cryosphere. 2015. V. 9. P. 2135–2148. doi: 10.5194/tc-9-2135-2015
- Bliss A., Hock R., Radić V.** Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2014. V. 119 (4). P. 717–730. doi: 10.1002/2013JF002931
- Chinn T., Winkler S., Salinger M.J., Haakensen N.** Recent glacier advances in Norway and New Zealand: a comparison of their glaciological and meteorological causes // Geografiska Annaler (Series A, Physical Geography). 2005. V. 87 (1). P. 141–157 doi: 10.1111/j.0435-3676.2005.00249.x
- Copernicus Climate Change Service.** ERA5 hourly data on single levels from 1966 to present. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview> (Date of accessed: 17.02.2022).
- Das S., Sharma M.C., Murari M.K., Nüsser M., Schmidt S.** Half-a-century (1971–2020) of glacier shrinkage and climatic variability in the Bhaga basin, western Himalaya // Journal of Mountain Science. 2023. V. 20 (2). P. 299–324. doi: 10.1007/s11629-022-7598-9
- Fukumoto S., Sugiyama S., Hata S., Saito J., Shiraiwa T., Mitsudera H.** Glacier mass change on the Kamchatka Peninsula, Russia, from 2000 to 2016 // Journal of Glaciology. 2022. V. 69 (274). P. 237–250. doi: 10.1017/jog.2022.50
- Huss M., Bookhagen B., Huggel C., Jacobsen D., Bradley R.S., Clague J.J., Vuille M., Buytaert W., Cayan D.R., Greenwood G., Mark B.G., Milner A.M., Weingartner R., Winder M.** Toward mountains without permanent snow and ice // Earth's Future. 2017. V. 5 (5). P. 418–435. doi: 10.1002/2016EF000514
- Huss M., Hock R.** Global-scale hydrological response to future glacier mass loss // Nature Climate Change. 2018. V. 8 (2). P. 135–140. doi: 10.1038/s41558-017-0049-x

- Kononov Y.M., Ananicheva M.D., Willis I.C.** High-resolution reconstruction of Polar Ural glacier mass balance for the last millennium // *Annals of Glaciology*. 2005. V. 42. P. 163–170. doi: 10.3189/172756405781812709
- Marzeion B., Kaser G., Maussion F., Champollion N.** Limited influence of climate change mitigation on short-term glacier mass loss // *Nature Climate Change*. 2018. V. 8(4). P. 305–308. doi: 10.1038/s41558-018-0093-1
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D.G., Piles M., Rodríguez-Fernández N.J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N.** ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // *Earth System Science Data*. 2021. V. 13. P. 4349–4383. doi: 10.5194/essd-13-4349-2021
- Musselman K.N., Clark M.P., Liu C., Ikeda K., Rasmussen R.** Slower snowmelt in a warmer world // *Nature Climate Change*. 2017. V. 7 (3). P. 214–219. doi: 10.1038/nclimate3225
- Orleman J.** Quantifying global warming from the retreat of glaciers // *Science*. 1994. V. 264 (5156). P. 243–245. doi: 10.1126/science.264.5156.243
- Pepin N.C., Arnone E., Gobiet A., Haslinger K., Kotlarski S., Notarnicola C., Palazzi E., Seibert P., Serafin S., Schöner W., Terzaghi S., Thornton J.M., Vuille M., Adler C.** Climate changes and their elevational patterns in the mountains of the world // *Reviews of Geophysics*. 2022. V. 60. e2020RG000730. doi: 10.1029/2020RG000730
- Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keesey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M.Jr., Williamson C.; Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D’Souza C., Cummens P., Laurier F., Bojesen M.** ArcticDEM, Version 3 // *Harvard Dataverse*. 2018. V. 1. doi: 10.7910/DVN/OHHUKH (Accessed: 17-24.07.2018).
- Takahashi S., Sugiura K., Kameda T., Enomoto H., Kononov Y., Ananicheva M. D., Kapustin G.** Response of glaciers in the Suntar-Khayata range, eastern Siberia, to climate change // *Annals of Glaciology*. 2011. V. 52 (58). P. 185–192. doi: 10.3189/172756411797252086
- Vaughan D.G., Comiso J.C., Allison I., Carrasco J., Kaser G., Kwok R., Mote P., Murray T., Paul F., Ren J., Rignot E., Solomina O., Steffen K., Zhang T.** Observations: Cryosphere. // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2014. P. 317–382. doi: 10.1017/CBO9781107415324.012
- Viviroli D., Archer D.R., Buytaert W., Fowler H.J., Greenwood G.B., Hamlet A.F., Huang Y., Koboltschnig G., Litaor M.I., López-Moreno J.I., Lorentz S., Schädler B., Schreier H., Schwaiger K., Vuille M., Woods R.** Climate change and mountain water resources: Overview and recommendations for research, management and policy // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011. V. 15(2). P. 471–504. doi: 10.5194/hess-15-471-2011
- Zemp M., Frey H., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Hoelzle M., Paul F., Haeberli W., Denzinger F., Ahlström A.P., Anderson B.** Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century // *Journal of Glaciology*. 2015. V. 61 (228). P. 745–762. doi: 10.3189/2015JoG15J017
- Zemp M., Huss M., Thibert E., Eckert N., McNabb R., Huber J., Barandun M., Machguth H., Nussbaumer S.U., Gärtner-Roer I., Thomson L., Paul F., Maussion F., Kutuzov S., Cogley J.G.** Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016 // *Nature*. 2019. V. 568 (7752). P. 382–386. doi: 10.1038/s41586-019-1071-0

References

- Ananicheva M.D. The current state of glaciers within the Koryak Highland and assessment of their development by the middle of this century // *Led i Sneg* [Ice and Snow]. 2012. 52(1). pp. 15–23. In Russian. doi: 10.15356/2076-6734-2012-1-15-23
- Ananicheva M.D., Kapustin G.A., Mikhailov A.Y. Glaciers in the Meynypilginsky range: current state and development forecast of glacier systems // *Led i Sneg* [Ice and Snow]. 2012. 52(2). pp. 40–50. In Russian.
- Ananicheva M.D., Karpachevskiy A.M. Current state of the Kolyma and Chukchi glaciers and projection of the evolution of Chukchi Highlands' glacial systems // *Fundamental and Applied Climatology*. 2016. 1. pp. 64–83. In Russian. doi: 10.21513/2410-8758-2016-1-64-83
- Ananicheva M.D., Maslakov A.A., Antonov E.V. Degradation of cryosphere objects in the region of Lawrence Bay, Eastern Chukotka // *Arctic and Antarctic*. 2017. 3. pp. 17–29. In Russian. doi: 10.7256/2453-8922.0.0.24204
- Ananicheva M.D., Aleinikov A.A., Kononov Yu.M. Revising the Catalog of the Koryak Highland glaciers using archival Corona images and comparison with Sentinel-2 images against the backdrop of changing climate // *Kriosfera Zemli – Earth's Cryosphere*. 2023. 27(5). pp. 29–38. In Russian. doi: 10.15372/KZ20230503
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Trofimenko L.T., Shvets N.V. Description of the data array of the mean monthly air temperature at the stations of Russia. 2020a. Certificate of state registration of the database No. 2014621485. <http://meteo.ru/data/156-temperature#description-mass-data> (Date of accessed on 23.11.2022).
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Shvets N.V. Description of the data array of monthly precipitation totals at Russian stations. Certificate of state registration of the database . 2020b No. 2015620394. <http://meteo.ru/data/158-totalprecipitation#description-mass-data> (Date of accessed on 23.1.2022).
- Vas'kovsky A.P. *Sovremennoe oledenenie Severo-Vostoka SSSR* [Modern glaciation of the North-East of the USSR] // *Materialy po geologii i poleznim iskopaemim Severo-Vostoka SSSR* [Materials of geology and mineral resources of the North-East of the USSR]. 1955. 9. pp. 71–91. In Russian
- Vinogradov O.N., Konovalova G.I., Svatkov N.M. *Katalog lednikov SSSR: Koryakskoe ngor'e* [USSR Glacier Inventory: Koryak Highlands]. V. 20(1). Leningrad: Hydrometeoizdat, 1982. 75 p. In Russian
- Dokukin M.D., Seynova I.B., Savernyuk E.A., Chernomorets S.S. On advancing of glaciers due to activity of the Klyuchevskaya Sopka volcano (Kamchatka) // *Led i Sneg* [Ice and Snow]. 2017. 57(1). pp. 10–24. In Russian. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-10-24
- Kalesnik S.V. *Ocherki glyatciologii* [Essays on glaciology]. Moscow: Publishing house “Geografgiz”. 1963. 551 p. In Russian
- Katalog lednikov SSSR* [USSR Glacier Inventory]. Moscow–Leningrad: Hydrometeoizdat, 1965–1982. In Russian

- Muraviev A.Ya., Nosenko G.A. Glaciation change in the northern part of the Middle Range on the Kamchatka Peninsula in the second half of the XX century // *Led i Sneg* [Ice and Snow]. 2013. 122 (2). pp. 5–11. In Russian. doi: 10.15356/2076-6734-2013-2-5-11
- Muraviev A.Ya. Degradation of glaciers in the northern part of the Middle Range on Kamchatka Peninsula along the period from 1950 over 2016–2017 // *Led i Sneg* [Ice and Snow]. 2020a. 60 (4). pp. 498–512. In Russian. doi: 10.31857/S2076673420040055
- Muraviev A.Ya. Distribution and morphology of present-day glaciers on Kamchatka // *Led i Sneg* [Ice and Snow]. 2020b. 60 (3). pp. 325–342. In Russian. doi: 10.31857/S2076673420030043.
- Nikolaev I.G., Kolosov D.M. *Sovremennye ledniki v Koryackom khrebrete* [Modern glaciers in the Koryatsky ridge] // *Izvestiya Gosudarstvennogo geograficheskogo obshchestva* [News of the State Geographical Society]. 1939. 71(8). pp. 1154–1162. In Russian
- Nosenko G.A., Muraviev A.Y., Nikitin S.A. Mass balance of the Nezhdanny and Sosedny glaciers of the Koryak Highlands in 1961–2016 // *Led i Sneg* [Ice and Snow]. 2022. 62(1). pp. 5–16. In Russian. doi: 10.31857/S2076673422010112
- Svatkov N.M. *Sovremennoe oledenie hrebeta Malinovskogo* [Modern glaciation of the Malinovsky ridge] // *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy* – [Data of Glaciological Studies]. 1965. 15. pp. 111–119. In Russian
- Sedov R.V. *Ledniki Chukotki* [Glaciers of Chukotka] // *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy* [Data of glaciological studies]. 1997. 82. pp. 213–217. In Russian
- Sedov R.V. *Katalog lednikov severo-vostochnoj chasti Koryakskogo ngor'ya* [Glacier Inventory of the North-Eastern part of the Koryak Upland] // *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy* [Data of Glaciological Studies]. 2001. 91. pp. 195–224. In Russian
- Ananicheva M.D., Krenke A.N., Barry R.G. The Northeast Asia mountain glaciers in the near future by AOGCM scenarios // *The Cryosphere*. 2010. 4. pp. 435–445. doi: 10.5194/tc-4-435-2010
- Ananicheva M., Kononov Yu., Belozero E. Contemporary state of glaciers in Chukotka and Kolyma highlands // *Bulletin of Geography (Physical Geography Series)*. 2020.19. pp. 5–18. dx: 10.2478/bgeo-2020-0006
- Ananicheva M., Aleinikov A. Glaciers of the Koryak Highlands: assessment of the state using satellite images and field studies // *Bulletin of geography (Physical Geography Series)*. 2022. 22. pp. 45–58. doi: 10.12775/bgeo-2022-0004
- Andreassen L.M., Elvehøy H., Kjollmoen B., Engeset R.V. Haakensen N. Glacier mass balance and length variations in Norway // *Annals of Glaciology*. 2005. 42. pp. 317–325. doi: 10.3189/172756405781812826
- Barnett T.P., Adam J.C., Lettenmaier D.P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions // *Nature*. 2005. 438(7066). pp. 303–309. doi: 10.1038/nature04141
- Braithwaite R.J. After six decades of monitoring glacier mass balance we still need data but it should be richer data // *Annals of Glaciology*. 2009. 50(50). pp. 191–197. doi: 10.3189/172756409787769573
- Braithwaite R.J. From Doktor Kurowski's Schneegrenze to our modern glacier equilibrium line altitude (ELA) // *The Cryosphere*. 2015. pp. 2135–2148. doi: 10.5194/tc-9-2135-2015
- Bliss A., Hock R., Radić V. Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2014. 119(4). pp. 717–730. doi: 10.1002/2013JF002931
- Chinn T., Winkler S., Salinger M.J., Haakensen N. Recent glacier advances in Norway and New Zealand: a comparison of their glaciological and meteorological causes // *Geografiska Annaler (Series A, Physical Geography)*. 2005. 87 (1). pp. 141–157 doi: 10.1111/j.0435-3676.2005.00249.x
- Copernicus Climate Change Service. ERA5 hourly data on single levels from 1966 to present. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview> (Accessed on 17 February 2022)
- Das S., Sharma M.C., Murari M.K., Nüsser M., Schmidt S. Half-a-century (1971–2020) of glacier shrinkage and climatic variability in the Bhaga basin, western Himalaya. *Journal of Mountain Science*. 2023. 20(2). pp. 299–324. doi: 10.1007/s11629-022-7598-9
- Fukumoto S., Sugiyama S., Hata S., Saito J., Shiraiwa T., Mitsudera H. Glacier mass change on the Kamchatka Peninsula, Russia, from 2000 to 2016 // *Journal of Glaciology*. 2022. 69 (274). pp. 237–250. doi: 10.1017/jog.2022.50
- Huss M., Bookhagen B., Huggel C., Jacobsen D., Bradley R.S., Clague J.J., Vuille M., Buytaert W., Cayan D.R., Greenwood G., Mark B.G., Milner A.M., Weingartner R., Winder M. Toward mountains without permanent snow and ice // *Earth's Future*. 2017. 5 (5). pp. 418–435. doi: 10.1002/2016EF000514
- Huss M., Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss // *Nature Climate Change*. 2018. 8(2). pp. 135–140. doi: 10.1038/s41558-017-0049-x
- Kononov Y.M., Ananicheva M.D., Willis I.C. High-resolution reconstruction of Polar Ural glacier mass balance for the last millennium // *Annals of Glaciology*. 2005. 42. pp. 163–170. doi: 10.3189/172756405781812709
- Marzeion B., Kaser G., Maussion F., Champollion N. Limited influence of climate change mitigation on short-term glacier mass loss // *Nature Climate Change*. 2018. 8(4). pp. 305–308. doi: 10.1038/s41558-018-0093-1
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D. G., Piles M., Rodríguez-Fernández N. J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // *Earth System Science Data*. 2021. 13. pp. 4349–4383. doi: 10.5194/essd-13-4349-2021
- Musselman K.N., Clark M.P., Liu C., Ikeda K., Rasmussen R. Slower snowmelt in a warmer world // *Nature Climate Change*. 2017. 7(3). pp. 214–219. doi: 10.1038/nclimate3225
- Oerlemans J. Quantifying global warming from the retreat of glaciers // *Science*. 1994. 264(5156). pp. 243–245. doi: 10.1126/science.264.5156.243
- Pépin N.C., Arnone E., Gobiet A., Haslinger K., Kotlarski S., Notarnicola C., Palazzi E., Seibert P., Serafin S., Schöner W., Terzaghi S., Thornton J.M., Vuille M., Adler C. Climate changes and their elevational patterns in the mountains of the world // *Reviews of Geophysics*. 2022. 60. e2020RG000730. <https://doi.org/10.1029/2020RG000730>
- Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keesey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M.Jr., Williamson C.; Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummens P., Laurier F., Bojesen M. (2018) ArcticDEM, Version 3, Harvard Dataverse, V1. doi: 10.7910/DVN/OHHUKH (Accessed on 17-24.07.2018).
- Takahashi S., Sugiura K., Kameda T., Enomoto H., Kononov Y., Ananicheva M. D., Kapustin G. Response of glaciers in the Suntar-Khayata range, eastern Siberia, to climate change // *Annals of Glaciology*. 2011. 52(58). pp. 185–192. doi: 10.3189/172756411797252086

Vaughan D.G., Comiso J.C., Allison I., Carrasco J., Kaser G., Kwok R., Mote P., Murray T., Paul F., Ren J., Rignot E., Solomina O., Steffen K. Zhang T. Observations: Cryosphere. // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. pp. 317–382. doi: 10.1017/CBO9781107415324.012

Viviroli D., Archer D.R., Buytaert W., Fowler H.J., Greenwood G.B., Hamlet A.F., Huang Y., Koboltschnig G., Litaor M.I., López-Moreno J.I., Lorentz S., Schädler B., Schreier H., Schwaiger K., Vuille M., Woods R. Climate change and mountain water resources: Overview and recommendations for research, management and policy // Hydrology and Earth System Sciences. 2011. 15 (2). pp. 471–504. doi: 10.5194/hess-15-471-2011

Zemp M., Frey H., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Hoelzle M., Paul F., Haeberli W., Denzinger F., Ahlstrøm A.P., Anderson B. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century // Journal of Glaciology. 2015. 61 (228). pp. 745–762. doi: 10.3189/2015JoG15J017

Zemp M., Huss M., Thibert E., Eckert N., McNabb R., Huber J., Barandun M., Machguth H., Nussbaumer S.U., Gärtner-Roer I., Thomson L., Paul F., Maussion F., Kutuzov S., Cogley J.G. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016 // Nature. 2019. 568 (7752). pp. 382–386. doi: 10.1038/s41586-019-1071-0

Информация об авторах:

Ананичева М.Д., кандидат географических наук, старший научный сотрудник, отдел гляциологии, Институт географии РАН, Москва, Россия.

E-mail: maranan@gmail.com

Кононов Ю.М., старший научный сотрудник, отдел палеогеографии четвертичного периода, Институт географии РАН, Москва, Россия.

E-mail: jukon02@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Ananicheva M.D., Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher, Department of glaciology, Institute of Geography, RAS, Moscow, Russia. E-mail: maranan@gmail.com

Kononov Yu.M., Senior Researcher, Department of Quaternary Paleogeography, Institute of Geography, RAS, Moscow, Russia. E-mail: jukon02@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.12.2024; одобрена после рецензирования 02.05.2024; принятая к публикации 03.06.2025

The article was submitted 24.12.2024; approved after reviewing 02.05.2024; accepted for publication 03.06.2025

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 556.561

doi: 10.17223/25421379/35/7

ВЛИЯНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА И СТЕПЕНИ ВЫГОРАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НА ВОДНО-ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД ПОСТПИРОГЕННЫХ БОЛОТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ



Юлия Александровна Харанжевская¹, Анна Алексеевна Синюткина²

^{1, 2} Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, Томск, Россия

¹ kharan@yandex.ru

² ankalaea@yandex.ru

Аннотация. Приведены результаты исследований изменений гидрологических характеристик и химического состава вод болот Западной Сибири под влиянием пирогенного фактора на микроуровне. Исследования показали, что после пожаров в связи с формированием гидрофобного слоя на поверхности отмечается снижение содержания в болотных водах O_2 , величин ОВП и, наоборот, повышение pH, EC, концентрации CO_2 и температуры. После пожара уровни болотных вод повышаются, а коэффициенты фильтрации и водоудерживающая способность верхнего слоя торфяной залежи снижаются.

Ключевые слова: болотные воды, микрорельеф, химический состав, характеристики, уровни болотных вод, коэффициент фильтрации, лесомелиорация, пирогенный фактор, Западная Сибирь

Источник финансирования: исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, № 22-77-10024.

Для цитирования: Харанжевская Ю.А., Синюткина А.А. Влияние микрорельефа и степени выгорания поверхности на водно-физические свойства торфяной залежи и характеристики химического состава вод постпирогенных болот Западной Сибири // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 89–100. doi: 10.17223/25421379/35/7

Original article

doi: 10.17223/25421379/35/7

MICROTOPOGRAPHY AND SURFACE BURNING EFFECTS ON PEAT HYDROPHYSICAL PROPERTIES AND WATER CHEMISTRY OF POSTPYROGENIC MIRES IN WESTERN SIBERIA

Yulia A. Kharanzhevskaya¹, Anna A. Sinyutkina²

^{1, 2} Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologie, RAS,
Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, Tomsk, Russia

¹ kharan@yandex.ru

² ankalaea@yandex.ru

Abstract. The paper analyzes changes in the hydrological characteristics and water chemistry of mires in the forest-tundra and taiga zones of Western Siberia under the influence of the pyrogenic factor at the microlevel. In the taiga zone, research was carried out in drained sites of the Bakchar Bog (spurs of the Great Vasyugan Mire) and Ust-Bakchar bog, in the forest-tundra on a pristine palsa near Pangody village. All studied mires burned out in 2014–2016. The studies were carried out on 12 model key plots with an area 25 m², where the water chemistry, hydraulic conductivity and water table levels were determined in 9 wells linked to the surface microtopography. The surface microtopography was surveyed using a SOKKIL CX-105 tacheometer with a step of 50 cm. The hydraulic conductivity was determined in the 0–50 cm and 50–100 cm layers by pumping using a Solinst 428 sampler. Analysis of the background sites showed initial differences in water chemistry characteristics, the bogs of the taiga zone were drained, as a result, higher O_2 content, pH values, Eh, EC, as well as temperature were noted in the samples due to a more southern location. The palsas near Pangody village were not drained, therefore, lower pH and EC were noted in the waters, but the CO_2 content was higher due to the active processes of decomposition of plant residues under leaching conditions. Studies have shown that after

fires, due to the formation of a hydrophobic layer on the surface, there is a decrease in the O₂ content and Eh values in waters, and vice versa, there is an increase in pH, EC, CO₂ concentration and temperature. Under background unburn conditions, the studied characteristics smoothly decrease from hummock to hollow, and under pyrogenic conditions, variations in pH, EC, T, Eh, CO₂, O₂ in waters strongly depend on the degree of burnout and the initial transformation of the surface under the influence of drainage. Under the influence of the pyrogenic factor, water table levels increase; with increasing thickness of the burnt layer, the correlation between the height of the surface and the position of water table levels decreases, since the water storage capacity of the upper layer of the peat deposit is disrupted. Hydraulic conductivity in peat deposits of burnt bogs in the taiga zone decrease due to disruption of the porous structure of the upper peat layer, and in the forest-tundra it increase as a result of transformation of the thermal regime. Higher hydraulic conductivity are observed in hollows and at the middle surface level, and, conversely, decrease in hummocks.

Keywords: mires, waters, chemical composition, microtopography, water table level, hydraulic conductivity, forest reclamation, pyrogenic factor, Western Siberia

Sour of financing: The research was supported by the Russian Science Foundation, project no. 22-77-10024.

For citation: Kharanzhevskaya Y.A., Sinyutkina A.A. (2025) Microtopography and surface burning effects on peat hydrophysical properties and water chemistry of mires in Western Siberia. *Geofernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2. pp. 89–100. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/35/7

Введение

Природные пожары являются одной из глобальных экологических проблем, а современные климатические изменения увеличивают продолжительность и тяжесть пожароопасного периода. Поэтому отмечается увеличение частоты и интенсивности природных пожаров, а болота становятся все более уязвимы для природных пожаров [Furdean et al., 2020; Ackley et al., 2021; Kharuk et al., 2021; Nelson et al., 2021].

Пожары оказывают влияние на гидрологический режим болот, отмечается формирование гидрофобного слоя на поверхности болота, что приводит к изменению величины испарения с болот и процесса инфильтрации атмосферных осадков [Thompson, Waddington, 2013]. После пожаров отмечается повышение отметок уровней болотных вод и увеличение амплитуды их колебаний [Харанжевская, 2023], меняются водно-физические свойства (плотность, коэффициент фильтрации, влажность) торфяной залежи [Holden et al., 2013; Sherwood et al., 2013; Ахметьева и др., 2020]. Некоторые данные показывают, что даже спустя более 20 лет сохраняется влияние пожара, которое выражается в более высоких уровнях болотных вод [Головацкая и др., 2023].

Пожары на болотах приводят к изменению их термического режима [Kettridge et al., 2012; Ackley et al., 2021], на выгоревших участках происходит более быстрое стаивание снега [Харанжевская, 2022]. Исследования показывают, что на пирогенных участках отмечается более глубокое распространение активных температур (T > 10 °C) более чем на 1 м, а температура торфяной залежи на пирогенном участке в среднем в 1,2–1,5 раза выше [Харанжевская, 2022].

После пожара в химическом составе болотных и речных вод отмечается увеличение концентраций Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, тяжелых

металлов, углеводородов [Sulwiński et al., 2020; Ахметьева и др., 2011; Rust et al., 2018; Ефремова и др., 2021; Kharanzhevskaya, Sinyutkina, 2021; Russkikh et al., 2021], в некоторых работах также отмечается, что пожары могут оказывать влияние на рост содержания С_{орг} в речных водах [Brown et al., 2015].

Часто степень выгорания поверхности болота носит весьма неоднородный характер, во многом зависит от микрорельефа болота, что в конечном итоге, оказывает влияние на химический состав болотных вод пирогенных участков. Согласно исследованиям [Thompson, Waddington, 2013], мочажины более восприимчивы к выгоранию в сравнении с положительными формами микрорельефа. К примеру, анализ спутниковых данных (Sentinel-2) по участку Ва-сюганского болота, выгоревшему в 2016 г., показал, что для большей части (84 %) пирогенного участка характерно частичное выгорание поверхности и только на 16 % территории полностью выгорела поверхность болота [Синюткина, Гашкова, 2022].

В целом следует отметить, что вопрос влияния микрорельефа поверхности и степени ее выгорания на изменение гидрологических характеристик и химического состава вод болот изучен весьма слабо. Поэтому целью данной работы является оценка постпирогенной динамики гидрохимических показателей болот на микроуровне на примере трех типичных болотных массивов, расположенных в лесотундровой и таежной зоне Западной Сибири.

Объекты и методы исследований

Исследования проводились в июле–августе 2022 г. в пределах трех ключевых участков болот (Бакчарское болото, Усть-Бакчарское болото и плоскобугристое болото в районе с. Пангоды), расположенных в лесотундровой и таежной зоне Западной Сибири, выгоревших в 2014–2016 гг.

В пределах Бакчарского болота (северо-восточные отроги Васюганского болота) исследования производились на его осушеннем северо-восточном участке в междуречье Бакчара и Иксы. Осушение участка проведено с целью лесоразведения в 1980-х гг. сетью открытых каналов с расстоянием 160–180 м. Выгорание участка Бакчарского болота произошло с августа по октябрь 2016 г., общая площадь пожара составила 5,54 км² [Sinyutkina et al., 2020]. Мощность торфяной

залежи исследуемого участка в среднем составляет 2,5–3 м. Торфяная залежь в слое 0–90 см представлена верховым фускум балтикум и магелланикум-торфом, степень разложения в среднем составила 11 %, а в верхних слоях пирогенных участков отмечено увеличение до 13–15 %. Зольность торфа в слое 0–90 см в среднем составила 2 %, а на выгоревших участках было отмечено увеличение до 9–17 % (рис. 1).

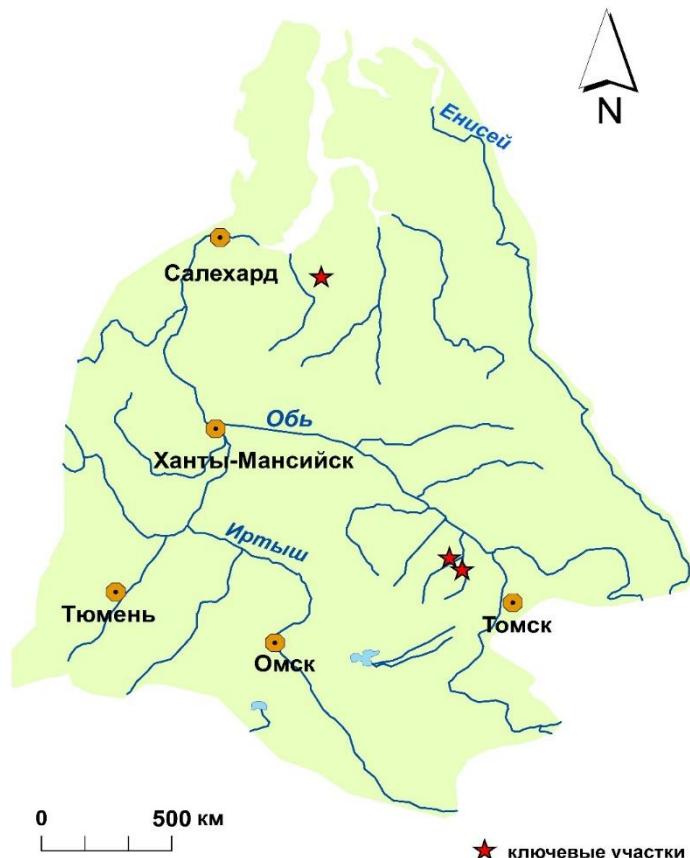


Рис. 1. Схема расположения ключевых участков полевых исследований в 2022 г.

Fig. 1. Location map of field research sites in 2022

Усть-Бакчарское болото расположено на левобережной террасе р. Бакчар и представляет собой небольшой болотный массив площадью 3,5 км² [Sinyutkina, 2021]. Болото было осушено с целью добычи торфа, расстояние между осушительными каналами составляет 40 м. Пожар на Усть-Бакчарском болоте произошел в 2014 г., и выгорела территория площадью 0,5 км². Мощность торфяной залежи составляет 3 м. Торфяная залежь в слое до 90 см представлена верховым балтикум и фускум-торфом, степень разложения в среднем составляет 10–13 %, а на пирогенных участках в слое 0–5 см отмечается увеличение до 20 %.

Зольность торфяной залежи до 90 см в среднем составила 2 % и увеличивалась до 6–4 % в поверхностном слое на выгоревших участках.

В лесотундровой зоне, где отмечается распространение многолетнемерзлых пород, исследования проводились на плоскобугристом болоте площадью 15,8 км² в районе с. Пангоды на междуречье рек Пур и Надым, выгоревшем в 2016 г. Общая площадь выгорания на междуречье составила более 4 тыс. км², площадь контура пожара в пределах болота составила 7 км². Мощность торфяной залежи варьировала от 0 см в мочажинах до 1 м на буграх, толщина выгоревшего слоя по данным полевых описаний 2022 г. составила 10 см.

Торфяная залежь в верхних слоях представлена в основном верховым фускум и балтикум-торфом, который сменяется на древесно-травяной в нижних слоях. Степень разложения торфа варьирует в значительном диапазоне от 5–7 % в слое 0–10 см и до 45 % в приграничном горизонте, а на пирогенном участке степень разложения в поверхностном слое увеличивается до 15 %. Зольность верхних слоев торфяной залежи в среднем составляет 2–6 %, а на выгоревших участках повышается до 7–10 %. Также следует отметить значительное увеличение зольности до 30–45 % в нижних слоях торфяной залежи на буграх. Для плоскобугристого болота было отмечено промерзание торфяной залежи.

Мерзлый слой на фоновой точке в дату проведения полевых исследований отмечен на глубине 50–90 см, со средним значением 64 см (по данным девяти определений). На постпирогенной точке глубина появления мерзлого слоя характеризуется большей пространственной неоднородностью (50–140 см) и большим средним значением в сравнении с фоновой точкой.

Для оценки пространственной неоднородности гидрохимических показателей болот на внутрифациальном уровне в болотных водах было проведено измерение температуры, pH, окислительно-восстановительного потенциала (ОВП), электропроводности, концентрации O_2 и CO_2 на модельной площадке 5×5 м методом конверта в девяти точках в слое 0–50 см (в слое 0–100 см на Усть-Бакчарском болоте) с привязкой к высоте микрорельефа и определением степени выгорания поверхности. Также проводилось определение коэффициентов фильтрации и отметок уровней болотных вод (УБВ). Определение растворенного O_2 в болотных водах проводилось с использованием оксиметра HI 9146-04 (HANNA Instruments, Германия). Величину pH измеряли с помощью полевого прибора pH-200 (HM Digital, Южная Корея), окислительно-восстановительный потенциал (Eh) определяли при помощи ORP-200 (HM Digital, Южная Корея). Электропроводность (ЕС) болотных вод измеряли с применением кондуктометра HI 8733 (HANNA Instruments, Германия).

Съемка микрорельефа поверхности проводилась с применением тахеометра SOKKIL CX-105 с шагом 50 см. В качестве средней поверхности принимался интервал высот от –5 см до +5 см. Высоты поверхности более +5 см принимались за кочки, а ниже –5 см характеризовались как мочажины.

Коэффициент фильтрации определен в полевых условиях для верхнего горизонта торфяной залежи путем фиксации времени наполнения пробоотборника заданного объема после откачки воды из скважины. Для этого была организована серия скважин с

установкой ПВХ труб с перфорацией через 5 см. Для проведения опыта использовался пробоотборник Solinst 428 (Solinst Canada Ltd, Канада). Коэффициент фильтрации определялся по слоям 0–50 см и 50–100 см на Бакчарском болоте, в пределах Усть-Бакчарского болота в связи с низким уровнем болотных вод определения проводили в слоях 0–50 см и (или) 0–100 см. На плоскобугристом болоте коэффициент фильтрации также определялся в слое 0–50 см из-за малой мощности торфяной залежи. Расчет коэффициентов фильтрации проводился согласно [Наставление..., 1990]. Итого было проведено 38 определений коэффициентов фильтрации. Всего в пределах Бакчарского болота было выполнено обследование пяти постпирогенных площадок (BF1, BF2, BF3, BF4, BF5) и одной фоновой (Вфон), на Усть-Бакчарском болоте исследования проводились на двух постпирогенных (UBF1, UBF2) и одной фоновой площадке (UBфон), на плоскобугристом болоте у с. Пангоды аналогично проводились исследования на двух постпирогенных (PF1, PF2) и одной фоновой площадке (Рфон).

Результаты

Анализ результатов показал, что в естественных условиях на фоновой площадке Бакчарского болота гидрохимические показатели плавно снижаются от кочки к мочажине, в пробах вод, отобранных в кочках, отмечается более высокое содержание CO_2 (74,1 мг/л), O_2 (3,72 мг/л), величина pH (4,60), ОВП (231 мВ), температура (14,6 °C), ЕС (117 μ S/см). В мочажинах фонового участка (Вфон) отмечается минимальное содержание CO_2 (58,3 мг/л), O_2 (0,88 мг/л), величина pH (4,42), ОВП (226 мВ) и температура (12,9 °C), повышается ЕС (112 μ S/см) (табл. 1).

В условиях пирогенной трансформации мочажины Бакчарского болота более подвержены пожару, в итоге в пробах, отобранных в понижениях микрорельефа (средняя поверхность и мочажины), отмечается повышение CO_2 в среднем до 84,5–121 мг/л, величины pH до 4,68. В кочках в условиях их меньшей трансформации под влиянием пожара сохраняется более высокий ОВП (235 мВ), температура (19,5 °C) и содержание O_2 (3,03 мг/л) в водах, и, наоборот, в мочажинах отмечается снижение ОВП (156–176 мВ), O_2 (1,42–1,47 мг/л) и температуры (17,6 °C) за счет существования горелого слоя на поверхности. Следует отметить несколько отличную тенденцию для ЕС вод. Повышение ЕС вод на пирогенных участках отмечается на кочках и в среднем составляет 119 μ S/см, а в понижениях микрорельефа (средняя поверхность и мочажины) величина ЕС снижается до 109 μ S/см.

Существенное снижение уровней вод и более значимая трансформация поверхности Усть-Бакчарского

болота в результате осушения способствовали тому, что на фоновой площадке в отличии от Бакчарского болота повышение концентраций CO_2 (147 мг/л) и O_2 (3,50 мг/л) отмечается в понижениях. И аналогично Бакчарскому болоту в кочках относительно других элементов микрорельефа отмечаются более высокие величины pH вод (4,42), ОВП (271 мВ), ЕС (111 $\mu\text{S}/\text{см}$), а в понижениях они немного снижаются.

На площадках Усть-Бакчарского болота под влиянием пирогенного фактора отмечается снижение содержания CO_2 и O_2 в 1,3–2 раза, увеличение pH до 4,62–

4,69, незначительное снижение ОВП вод (231 мВ) относительно фона и повышение ЕС до 116 $\mu\text{S}/\text{см}$.

Влияние микрорельефа поверхности на исследуемые гидрохимические показатели выражается в более высоком содержании CO_2 (111–116 мг/л) и ЕС (116–121 $\mu\text{S}/\text{см}$) в пробах, отобранных в кочках и на уровне средней поверхности (СП). Также на уровне СП отмечается более высокое содержание O_2 (1,94 мг/л), величина ОВП (238 мВ), pH (4,71) и температура воды (20,9 °C) (рис. 2).

Характеристика микрорельефа и средние гидрохимические показатели исследуемых площадок пирогенных участков болот

Таблица 1

Microtopography and average water chemistry parameters of the key plots in studied fire-event areas within mires

Площадка	CO_2 , мг/л	O_2 , мг/л	pH	ОВП, мВ	ЕС, $\mu\text{S}/\text{см}$	T, °C	УБВ, см	A, см	H, см	FA, %
BF1	96,6	1,53	4,53	215	122	20,6	-24	33	0,54	93
BF2	96,9	1,52	4,67	170	101	15,9	-19	42	0,92	67
BF3	107,0	2,13	4,37	186	114	16,9	-20	38	0,90	71
BF4	90,1	1,73	4,52	168	102	17,6	-27	34	0,70	97
BF5	89,3	2,04	4,33	177	108	18,8	-22	35	0,35	74
Вфон	66,2	2,26	4,47	219	109	13,8	-27	44	0	0
UBF1	103,4	2,11	4,62	243	101	25,0	-26	29	0,66	99
UBF2	111,2	1,39	4,69	227	116	15,7	-28	33	0,86	100
УВфон	142,0	3,09	4,39	258	104	15,1	-41	32	0	0
PF1	245,3	0,18	4,32	99	120	14,13	-14	81	5,9	76
PF2	81,5	1,03	3,53	174	62	7,78	-14	61	0,39	78
Рфон	145,7	2,25	3,60	175	77	9,84	-27	56	0	0

Примечание. А – амплитуда высот поверхности, Н – мощность горелого слоя, FA – степень выгорания площадки 5×5 м.

Note. A is the amplitude of surface heights, H is the thickness of the burnt layer, FA is the degree of burnout of a 5×5 m area.

Анализ изменения гидрохимических характеристик на площадках плоскобугристого болота у с. Пангоды в зависимости от микрорельефа поверхности показал некоторые различия. Так, для фонового участка в пробах, отобранных на бугре, в среднем отмечается более высокие концентрации CO_2 (165 мг/л), O_2 (6,13 мг/л), pH (3,70), средние величины ОВП сопоставимы на бугре и на уровне средней поверхности, а средняя величина ЕС достоверно не различается между элементами микрорельефа. В понижениях микрорельефа фонового участка CO_2 , O_2 и pH, ОВП снижаются в 1,1–5 раз. На пирогенных участках наоборот в понижениях микрорельефа отмечается повышение содержания CO_2 (165 мг/л), O_2 (0,93 мг/л), ОВП (137–147 мВ), ЕС (86–94 $\mu\text{S}/\text{см}$) и температуры вод (10–11,6 °C). Тогда как на бугре отмечается снижение характеристик в 1,2–2 раза. А величина pH достоверно не различается по элементам микрорельефа. В целом под влиянием пирогенного фактора в водах плоскобугристого болота отмечается повышение в среднем в 1,2–1,7 раза содержания CO_2

(245,3 мг/л), pH (4,32), ЕС (120 $\mu\text{S}/\text{см}$) и температуры (14,1 °C) в сравнении с фоновым участком и, наоборот, отмечается снижение концентрации O_2 (0,18 мг/л) и ОВП (99 мВ) на пирогенных участках.

Сопоставляя все участки, можно сразу отметить различие между фоновыми участками. Это обусловлено тем, что болота таежной зоны осушены, а плоскобугристое болото находится подзоне лесотундры на севере Западной Сибири, что определяет его температурный режим и интенсивность биогеохимических процессов в торфяной залежи. Бакчарское и Усть-Бакчарское болота характеризуются близкими величинами pH вод (4,47 и 4,39 соответственно), ОВП (219 и 258 мВ), ЕС (109 и 104 $\mu\text{S}/\text{см}$) и температуры (13,8 и 15,0 °C). Тогда как в водах плоскобугристого болота в сравнении с болотами таежной зоны отмечается снижение pH до 3,60, ОВП до 175 мВ, ЕС до 77 $\mu\text{S}/\text{см}$, температуры вод до 9,8 °C. Содержание CO_2 в водах плоскобугристого болота, наоборот, сопоставимо с Усть-Бакчарским болотом.

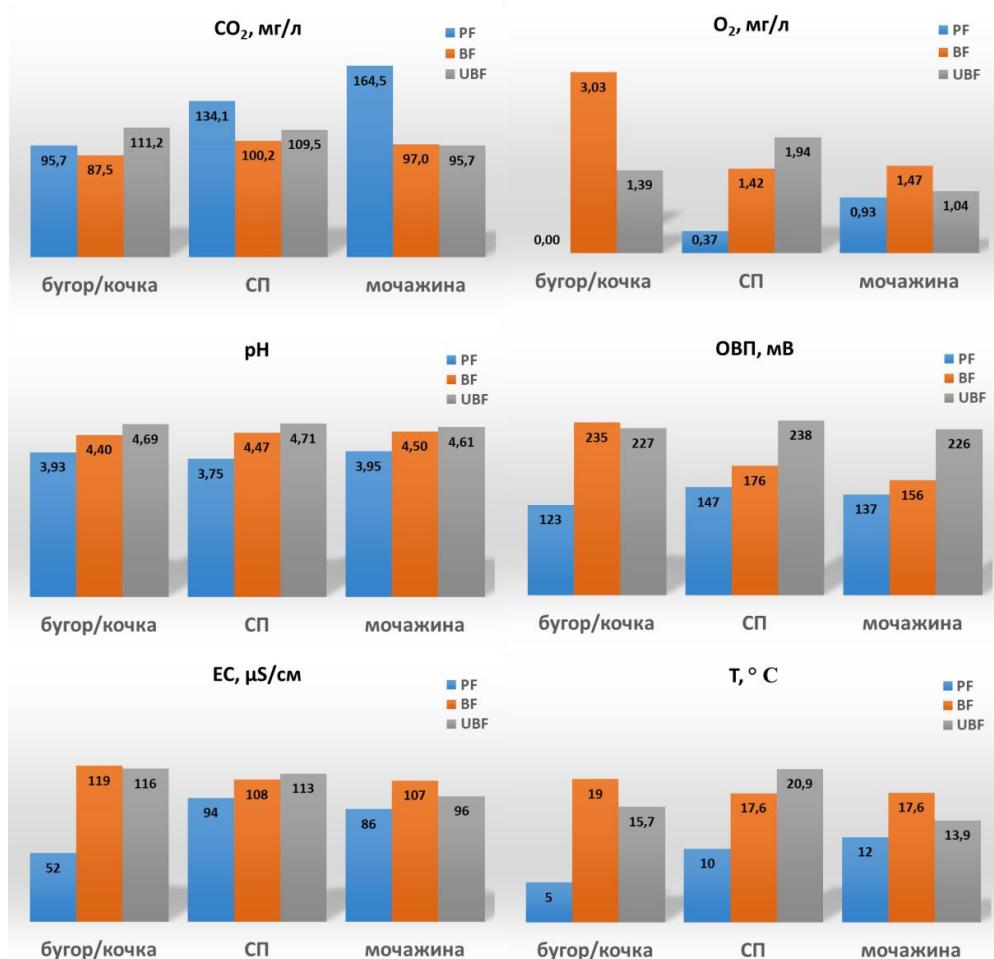


Рис. 2. Динамика гидрохимических характеристик пирогенных участков болот в зависимости от микрорельефа поверхности (бугор/кочка, средняя поверхность, мочажина)

Fig. 2. Dynamics of water chemistry characteristics of fire-event areas in mires in relation with microtopography (hummock, average surface, hollow)

В целом, несмотря на различия исследуемых участков, проведенный кластерный анализ на основании всех исследуемых характеристик химического состава болотных вод показал наличие трех кластеров. В первый кластер выделилась площадка PF1 плоскобугристого болота, которая наиболее пострадала от пожара. Во второй кластер выделились все площадки Усть-Бакчарского болота, а также фоновая площадка Бакчарского болота и BF1. В третий кластер выделились PF2 и фоновая Рфон, а также площадки Бакчарского болота BF2, BF3, BF4, BF5 (рис. 3).

Анализ данных по уровням болотных вод (УБВ) показал, что под влиянием пирогенного фактора отмечается повышение их отметок в результате выгорания поверхности болота и выполаживания микрорельефа. Так, на постпирогенных площадках Бакчар-

ского болота уровни в среднем составляют -22 см, тогда как на фоновой площадке УБВ в среднем снижаются до -27 см ниже поверхности, при этом статистический анализ с применением непараметрического критерия Манна–Уитни не показал значимых различий. Сопоставимые с фоном отметки уровней отмечаются только на площадке BF4, что связано с расположением площадки ближе к водораздельной части. Анализ изменения уровней в зависимости от микрорельефа поверхности показал, что на пирогенных участках отметки УБВ на кочках составили $-29\dots-33$ см, тогда как на фоновой площадке отмечается снижение до -37 см. В мочажинах пирогенных участков отметки УБВ составили $-10\dots-22$ см, тогда как на фоновой площадке снизились до -20 см. В целом следует отметить схожие вариации уровней на площадках BF4 и Вфон (рис. 4).

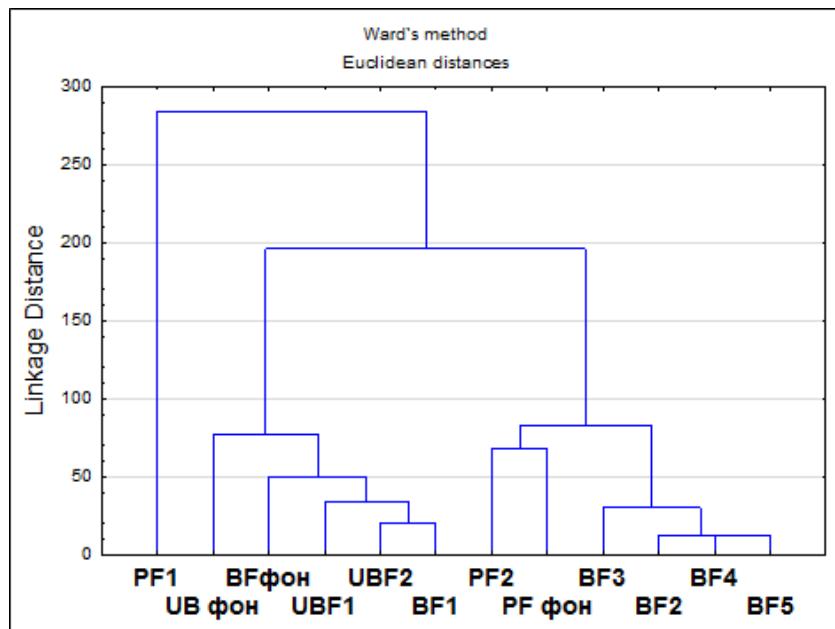


Рис. 3. Дендрограмма гидрохимических показателей пирогенных участков болот

Fig.3. Dendrogram of water chemistry characteristics of fire-event areas in mires

Анализ данных по Усть-Бакчарскому болоту показал достоверные различия в отметках уровней пирогенных площадок и фоновой по критерию Манна-Уитни. Для Усть-Бакчарского болота аналогично отмечается повышение отметок уровней болотных вод на постпирогенных участках. При этом площадка UBF1 характеризуется большей трансформацией поверхности под влиянием пирогенного фактора и осушения и более высокими отметками уровней (−19 см), тогда как фоновая площадка характеризуется снижением уровней в среднем до −41 см. Анализ изменения уровней в зависимости от микрорельефа поверхности показал на кочках снижение уровней до −28 см, на фоновой до −51 см. На средней поверхности на пирогенных участках УВ варьирует от −28 см до −30 см, а на фоновой снижается до −38 см. В мочажинах УВ на UBF1 снизился до −10 см, на UBF2 до −20 см, тогда как на фоновой площадке отмечено более значимое снижение уровней до −35 см.

Анализ результатов по плоскобугристому болоту у с. Пангоды показал одинаковые средние отметки уровней на обоих пирогенных площадках (−14 см), тогда как на фоновой площадке отмечены УВ в 2 раза ниже. Сопоставляя отметки уровней по элементам микрорельефа следует отметить их снижение на буграх до −34 см на пожаре и до −48 см на фоновом участке (Рфон). Положение уровней относительно

средней поверхности в условиях пирогенной нагрузки составляет −16...−23 см и −26 см в фоновых условиях. В мочажинах PF1 и PF2 отметки уровней составили −7 и −10 см соответственно, тогда как на Рфон снизились до −21 см.

Статистический анализ показывает положительную корреляцию уровней с высотой микрорельефа поверхности, что связано с формированием зоны капиллярной каймы над горизонтом уровня болотных вод. Вследствие чего в естественных условиях положение зеркала болотных вод повторяет поверхность болота [Романов, 1961]. В условиях пирогенной нагрузки эта связь нарушается, происходит снижение водоудерживающей способности верхних слоев торфяной залежи, формируется гидрофобный слой на поверхности болота [Kettridge et al., 2014]. Такая закономерность наблюдается на площадке BF2, где отмечается наибольшая мощность горелого слоя, а также на всех пирогенных площадках Усть-Бакчарского болота и плоскобугристого болота у с. Пангоды. Согласно данным [Kettridge et al., 2014] формирование гидрофобного слоя после пожаров на поверхности болота может способствовать снижению величины испарения и поддерживать повышенные отметки уровней, что в последствии приведет к изменению водного баланса в целом и увеличению слоев стока с болота (табл. 2).

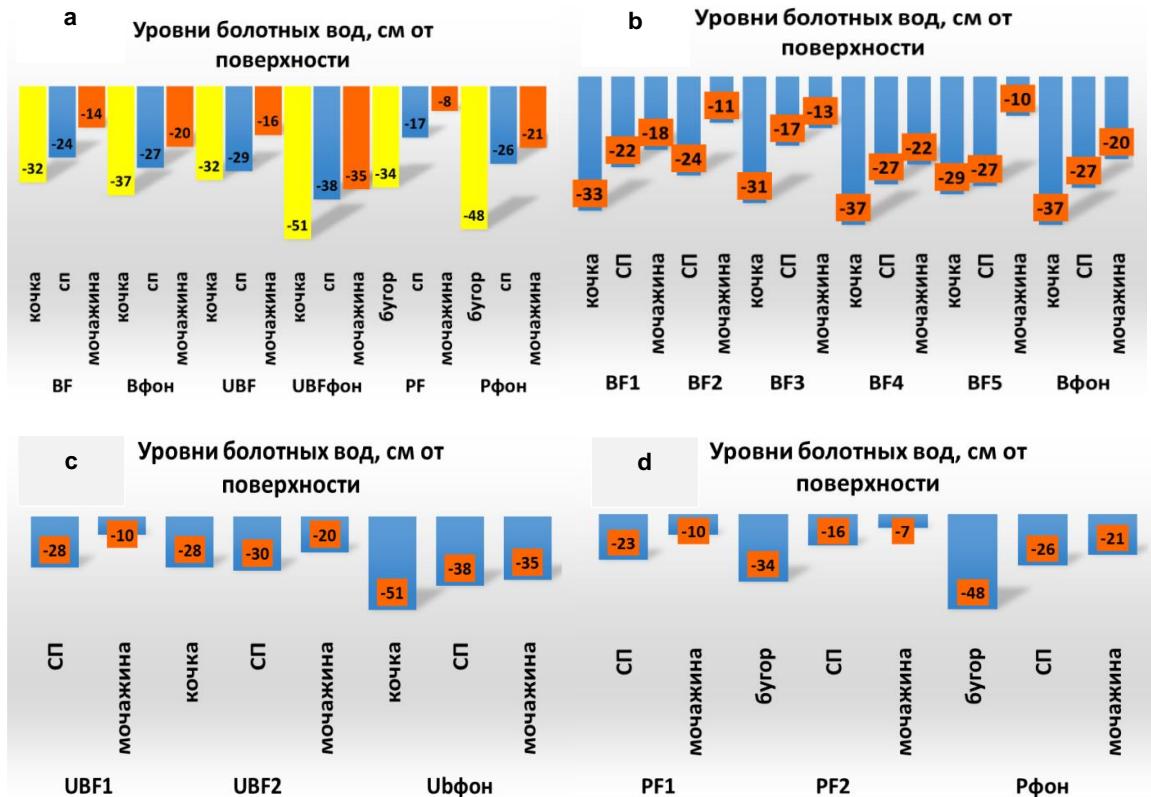


Рис. 4. Вариации уровней болотных вод в зависимости от микрорельефа поверхности пирогенных болот

а – сопоставление уровней по пирогенным и фоновым участкам Бакчарского, Усть-Бакчарского и плоскобугристого болот, б – Бакчарское болото, с – Усть-Бакчарское болото, д – плоскобугристое болото у с. Пангоды

Fig. 4. Water table levels variations in relation with microtopography of pyrogenic sites

а – water table level in pyrogenic and background areas of the Bakchar bog, Ust-Bakchar bog and palsa mire, б – Bakchar bog, с – Ust-Bakchar bog, д – palsa mire near Pangody village

В целом отмеченные закономерности изменения уровней вод на болотах Западной Сибири согласуются с результатами, полученными по выгоревшим болотам европейской территории России [Ахметьева и др., 2020]. В работе [Ахметьева и др., 2020] отмечено, что после пожаров сильно меняются водно-физические свойства торфяной залежи болот, значительно увеличивается коэффициент фильтрации, меняется гидрологический режим болот, повышаются уровни болотных вод. Исследования на выгоревшем болоте в Канаде показали, что после пожара усилилась реакция уровня болотных вод на выпадающие атмосферные осадки [Thompson, Waddington, 2013; Nelson et al., 2021].

В слое 0–50 см торфяной залежи пирогенных участков Бакчарского болота коэффициент фильтрации (k_f) изменяется от 0,054 до 0,85 м/сут (средний 0,26 м/сут), в слое 50–100 см – от 0,27 до 2,09 м/сут (средний 0,56 м/сут).

В сравнении с фоновым участком k_f в слое 0–50 см снижается в среднем в 2 раза.

В целом k_f в слое 0–100 см находится в обратной корреляционной зависимости с плотностью торфа (-0,54) и мощностью горелого слоя (-0,45). Площадки BF3 (0,59 м/сут) и BF5 (0,28 м/сут) характеризуются наименьшей трансформацией фильтрационных свойств, коэффициенты фильтрации в слое 0–50 см на этих площадках близки к фоновым. Коэффициент фильтрации на пирогенных участках Бакчарского болота в слое 0–50 см в сравнении со слоем 50–100 см снижается за счет понижения уровня болотных вод и выгорания поверхности. Наибольшее снижение k_f в верхних слоях отмечается на некоторых участках (BF1, BF2), где наблюдается более мощный горелый слой.

В целом проведенные исследования согласуются с данными полученными на выгоревших болотах северной Англии, которые показали, что после пожаров коэффициенты фильтрации были значительно ниже на 12–25 % [Holden et al., 2013].

Дальнейший анализ наших данных по болотам Западной Сибири показал, что коэффициент фильтрации

(k_f) значительно варьирует по территории исследуемых участков болот. Более высокие значения коэффициентов фильтрации отмечены на фоновых участках, в слое 0–50 см торфяной залежи Бакчарского болота k_f в среднем составляет 0,50 м/сут, в пределах Усть-Бакчарского болота снижается до 0,43 м/сут, а на плоскобугристом болоте он снижается в 7 раз (0,061 м/сут), и, наоборот, пирогенный участок характеризуется повышенными коэффициентами фильтрации.

Наши данные показывают, что спустя около 30 лет сохраняется влияние пожара на водоно-физические свойства торфяной залежи, а также на химический состав вод. На фоновой площадке Бакчарского

болота отмечено существенное повышение коэффициентов фильтрации в слое 50–100 см в сравнении с верхним слоем (Вфон, $k_f = 11$ м/сут). По результатам ретроспективного анализа космосников было отмечено, что данный участок также выгорел (примерно в 1990-х гг.), это и предопределило снижение водопроводимости верхнего 0–50 см слоя. Исследования фильтрационных свойств элементов микрорельефа поверхности пирогенных участков Бакчарского болота показали, что в связи с трансформацией верхних слоев торфяной залежи под влиянием осушения на кочках, более высокие коэффициенты фильтрации отмечаются на уровне средней поверхности и в мочажинах (0,29–0,35 м/сут).

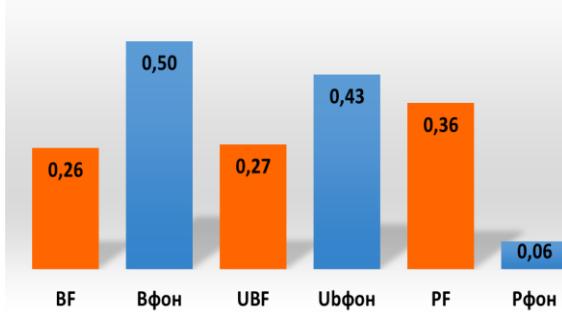
Таблица 2

Матрица коэффициентов корреляции уровня болотных вод с мощностью горелого слоя и высотой микрорельефа поверхности болота

Correlation matrix of water table levels with the burnt layer thickness and the height of the mire surface

Площадка	Мощность горелого слоя	Высота микрорельефа
BF1	0,46	0,43
BF2	-0,34	-0,50
BF3	0,71	0,41
BF4	0,90	0,41
BF5	0,49	0,42
Вфон	нет	0,57
UBF1	0,31	-0,31
UBF2	0,18	0,27
УВфон	нет	0,56
PF1	0,43	0,36
PF2	-0,01	-0,55
Рфон	нет	0,27

Коэффициент фильтрации в слое 0–50 см, м/сут



Коэффициент фильтрации в слое 0–50 см, м/сут

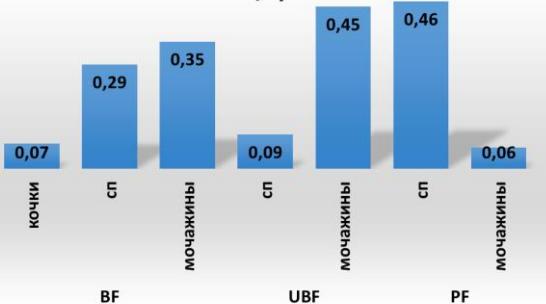


Рис. 5. Динамика коэффициентов фильтрации пирогенных и фоновых участков болот

Fig. 5. Hydraulic conductivity variation in fire-event and background areas of mires

На пирогенных площадках Усть-Бакчарского болота коэффициент фильтрации в слое 0–50 см составил 0,27 м/сут, что в 1,6 раза ниже, чем на фоновой площадке, но сопоставимо со значениями, полученными в среднем для пирогенных площадок Бакчарского болота. Исследования показали более высокий

коэффициент фильтрации в мочажинах (в среднем 0,45 м/сут), тогда на уровне средней поверхности отмечается их снижение в 5 раз. Статистический анализ не показал значимой корреляции k_f с плотностью верхнего слоя торфа и мощностью горелого слоя. Причиной этого, вероятно, является существенное

снижение уровней болотных вод под влиянием осушения, в результате чего произошла значительная трансформация порового пространства деятельного горизонта торфяной залежи, что и является ведущим фактором, определяющим изменения фильтрационных свойств. Так на UBF2 отмечается резкое увеличение плотности торфа в слое 0–100 см, в результате при полевых работах после выпадения атмосферных осадков было отмечено формирование двух горизонтов уровней болотных вод.

В торфяной залежи пирогенного участка плоскобугристого болота в лесотундре коэффициент фильтрации оказался в 6 раз выше, чем на фоновом участке. В целом коэффициент фильтрации в слое 0–50 см на пирогенных площадках болота у с. Пангоды варьирует от 0,034 до 1,24 м/сут, что сопоставимо с результатами, полученными в таежной зоне. Коэффициент фильтрации в слое 0–50 см торфяной залежи фоновой ненарушенной пожаром площадки оказался существенно ниже и составил 0,061 м/сут. Такая закономерность, вероятно, определяется распространением многолетнемерзлых пород и процессами промерзания болота, тогда как на пирогенных участках существенно меняется термический режим и происходит процесс оттаивания торфяной залежи, в результате коэффициент фильтрации увеличивается. Отмечены более высокие коэффициенты фильтрации на уровне средней поверхности, а в мочажинах они снижаются. Статистический анализ показал тесную корреляционную связь k_f с плотностью верхних слоев ($r = -0,55$) и слабую корреляцию с мощностью горелого слоя ($-0,31$).

Заключение

Таким образом, анализ фоновых площадок показал исходные различия в характеристиках химического состава болотных вод. Болота таежной зоны

осушены, в результате в пробах отмечено более высокое содержание O_2 , величины pH, ОВП, ЕС, а также температура за счет более южного расположения. Плоскобугристое болото не подвергалось осушению, поэтому в болотных водах отмечен более низкий pH и ЕС, но содержание CO_2 выше за счет активных процессов разложения растительных остатков в условиях промывного режима. Под влиянием пирогенного фактора и в связи с формированием гидрофобного слоя на поверхности отмечается снижение содержания в водах O_2 , величин ОВП, отмечается повышение pH, ЕС, концентрации CO_2 и температуры. В фоновых условиях исследуемые характеристики плавно снижаются от кочки к мочажине, в условиях пирогенного фактора вариация pH, ЕС, Т, ОВП, CO_2 , O_2 в водах сильно зависит от степени выгорания и исходной трансформации поверхности болота под влиянием осушения.

Под влиянием пирогенного фактора отметки уровней повышаются, более высокие уровни отмечены на плоскобугристом болоте (~14 см), на Бакчарском и Усть-Бакчарском болотах уровни в среднем составляют ~22 см и ~27 см соответственно. С ростом мощности горелого слоя корреляция между высотой поверхности и положением уровней воды снижается, так как нарушаются водоудерживающая способность верхнего слоя торфяной залежи.

Коэффициенты фильтрации в торфяной залежи выгоревших болот таежной зоны снижаются за счет нарушения пористой структуры деятельного горизонта. В лесотундре, наоборот, отмечено увеличение коэффициентов фильтрации, что связано с трансформацией термического режима болота под влиянием пирогенного фактора и оттаиванием торфяной залежи.

Список источников

- Ахметьева Н.П., Лапина Е.Е., Михайлова А.В.** Изменение химического состава болотных вод после пожаров 2010 года (на примере водосбора Иваньковского водохранилища) // Труды Инсторфа. 2011. № 4 (57). С. 12–16.
- Ахметьева Н.П., Михайлова А.В., Кричевец Г.Н., Беляев А.Ю.** Торфяные болота центральных областей Европейской части России: их трансформация за последние 100 лет. М. : ГЕОС, 2020. 134 с
- Головацкая Е.А., Никонова Л.Г., Калашникова Д.А., Симонова Г.В.** Изменение изотопного состава азота в процессе трансформации опада растений-торфообразователей на осушенных и постпирогенных участках олиготрофных болот // Почвы и окружающая среда. 2023. № 6 (4). e238. doi: 10.31251/pos.v6i4.238
- Ефремова Т.Т., Пименов А.В., Ефремов С.П., Аврова А.Ф., Ефимов Д.Ю.** Опыт оценки воздействия лесо-торфяных пожаров на гидрохимические свойства эутрофичных болот // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2021. № 5. С. 537–546.
- Наставления** гидрометеорологическим станциям и постам. Л. : Гидрометеоиздат, 1990. Вып. 8. 361 с.
- Романов В.В.** Гидрофизика болот. Л. : Гидрометеоиздат, 1961. 360 с.
- Синюткина А.А., Гашкова Л.П.** Оценка состояния и геоинформационное моделирование постпирогенной динамики участка Большого Васюганского болота // Региональные геосистемы. 2022. № 46 (3). С. 366–377.
- Харанижевская Ю.А.** Оценка постпирогенной трансформации водно-теплового режима участка Васюганского болота (Западная Сибирь) // Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии», 29 августа – 3 сентября 2022, Барнаул. Барнаул, 2022. Т. 2. С. 154–157.
- Харанижевская Ю.А., Синюткина А.А.** Динамика химического состава вод постпирогенных болот в условиях лесотундры и тайги Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 06. С. 193–203.

Ackley C., Tank S.E., Haynes K.M., Rezanezhad F., McCarter C., Quinton W.L. Coupled hydrological and geochemical impacts of wildfire in peatland-dominated regions of discontinuous permafrost // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 782. 15 August. 146841. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146841

Brown L.E., Holden J., Palmer S.M., Johnston K., Ramchunder S.J., Grayson R. Effects of fire on the hydrology, biogeochemistry, and ecology of peatland river systems // *Freshwater Science*. 2015. No. 34 (4). P. 1406–1425. doi: 10.1086/683426

Feurdean A., Florescu G., Tantau I., Vanniere B., Diaconu A.-C., Pfeiffer M., Warren D., Hutchinson S.M., Gorina N., Galka M., Kirpotin S. Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia // *Quaternary Science Reviews*. 2020. No. 244. 106495. doi: 10.1016/j.quascirev.2020.106495

Holden J., Wearing C., Palmer S., Jackson B., Johnston K., Brown L.E. Fire decreases near-surface hydraulic conductivity and macropore flow in blanket peat // *Hydrological Processes*. 2013. No. 28 (5). P. 2868–2876. doi: 10.1002/hyp.9875

Kettridge N., Thompson D.K., Waddington J.M. Impact of wildfire on the thermal behavior of northern peatlands: Observations and model simulations // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2012. No. 117 (G2). n/a–n/a. doi: 10.1029/2011jg001910

Kettridge N., Humphrey R.E., Smith J.E., Lukenbach M.C., Devito K.J., Petrone R.M., Waddington J.M. Burned and unburned peat water repellency: Implications for peatland evaporation following wildfire // *Journal of Hydrology*. 2014. No. 513. P. 335–341

Kharanzhevskaya Yu. A., Sinyutkina A.A. Effects of wildfire on the water chemistry of the northeastern part of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia) // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. No. 928. 012006. doi: 10.1088/1755-1315/928/1/012006

Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Dvinskaya M.L., Coogan S.C., Flannigan M.D. Wildfires in the Siberian taiga // *Ambio*. 2021. No. 50. P. 1953–1974. doi: 10.1007/s13280-020-01490-x, 2021

Nelson K., Thompson D., Hopkinson C., Petrone R., Chasmer L. Peatland-fire interactions: A review of wildland fire feedbacks and interactions in Canadian boreal peatlands // *Science of The Total Environment*. 2021. No. 769. 145212. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145212

Russkikh I.V., Strel'nikova E. B., Serebrennikova O.V., Kharanzhevskaya Yu.A. Post-fire composition of lipids in waters and plants of Great Vasyugan Mire // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. No. 928. 012010. doi: 10.1088/1755-1315/928/1/012010

Rust A.J., Hogue T.S., Saxe S., McCray J. Post-fire water-quality response in the western United States // *International Journal of Wildland Fire*. 2018. No. 27 (3). P. 203. doi: 10.1071/wf17115

Sherwood J.H., Kettridge N., Thompson D.K., Morris P.J., Silins U., Waddington J.M. Effect of drainage and wildfire on peat hydrophysical properties // *Hydrological Processes*. 2013. No. 27 (13). P. 1866–1874. doi: 10.1002/hyp.9820

Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Koronatova N.G., Maloletko A.A., Mironycheva-Tokareva N.P., Russkikh I.V., Serebrennikova O.V., Strel'nikova E.B., Vishnyakova E.K., Kharanzhevskaya Yu.A. Post-fire ecological consequences within the drained site of the Great Vasyugan Mire: retrospective water-thermal regime and pyrogenic disturbance estimation // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. V. 408. 012037. doi: 10.1088/1755-1315/408/1/012037

Sinyutkina A.A. Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the south-eastern part of Western Siberia: Peat accumulation and vegetation dynamics // *Catena*. 2021. No. 205. 105464. doi: 10.1016/j.catena.2021.105464

Sulwiński M., Mętrak M., Wilk M., Suska-Maławska M. Smouldering fire in a nutrient-limited wetland ecosystem: Long-lasting changes in water and soil chemistry facilitate shrub expansion into a drained burned fen // *Science of The Total Environment*. 2020. No. 746. 141142. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141142

Thompson D.K., Waddington J.M. Wildfire effects on vadose zone hydrology in forested boreal peatland microforms // *Journal of Hydrology*. 2013. No. 486. P. 48–56. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.01.014

References

Akhmeteva N.P., Lapina E.E., Mikhailova A.V. Changes in the chemical composition of mire waters after the fires of 2010 (on the example of the watershed of the Ivankovo reservoir) // *Proceedings of Instorf*. 2011. No. 4 (57). pp. 12–16. In Russian.

Akhmet'yeva N.P., Mikhaylova A.V., Krichevets G.N., Belyayev A.Yu. *Torfyanyye bolota tsentral'nogo okhvata chastei Rossii: ikh transformatsiya za posledniye 100 let* [Peat bogs in the central regions of the European part of Russia: their transformation over the past 100 years]. Moscow: GEOS, 2020. 134 p. In Russian

Golovatskaya E.A., Nikanova L., Kalashnikova D.A., Simonova G.V. Changes in the nitrogen isotopic composition during the transformation of peat-forming plant litter at dried and post-pyrogenic sites of oligotrophic bogs. The Journal of Soils and Environment. 2023. 6(4). e238. doi: 10.31251/pos.v6i4.238 In Russian

Efremova T.T., Pimenov A.V., Efremov S.P., Avrova A.F., Efimov D.Yu. Experience in assessing the impact of forest-peat fires on the hydrochemical properties of eutrophic bogs // *Izvestia of the Russian Academy of Sciences. Biological series*. 2021. No. 5. pp. 537–546. In Russian

Nastavleniye gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam [Instructions for hydrometeorological stations and posts]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. V. 8. 361 p. In Russian

Romanov V.V. *Gidrofizika bolot* [Hydrophysics of peatlands]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1961. 360 p. In Russian

Sinyutkina A.A., Gashkova L.P. *Otsenka sostoyaniya i geoinformatsionnoye modelirovaniye postpirogennoy dinamiki uchastka Bol'shogo Vasyuganskogo bolota* [State assessment and GIS-modeling of post-pyrogenic dynamics of the Great Vasyugan Mire area] // *Regional Geosystems*. 2022. 46(3). pp. 366–377. In Russian

Kharanzhevskaya Yu.A. *Otsenka postpirogennoy transformatsii vodno-teplovogo rezhima uchastka Vasyuganskogo bolota (Zapadnaya Sibir')* [Assessment of post-pyrogenic transformation of the water-thermal regime of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia)] // Materials of the IV All-Russian scientific conference with international participation “Water and environmental problems of Siberia and Central Asia”, August 29 – September 3, 2022, Barnaul. Barnaul, 2022. T 2. pp. 154–157. In Russian

Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A. Wildfire-related changes of mire water chemistry in forest-tundra and taiga zones of Western Siberia // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2023. V. 334. № 6. pp. 193–203. In Russian

Ackley C., Tank S.E., Haynes K.M., Rezanezhad F., McCarter C., Quinton W.L. Coupled hydrological and geochemical impacts of wildfire in peatland-dominated regions of discontinuous permafrost // *Science of the Total Environment*. 2021. V. 782. 15 August. 146841 doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146841 In Russian

Brown L.E., Holden J., Palmer S.M., Johnston K., Ramchunder S.J., Grayson R. Effects of fire on the hydrology, biogeochemistry, and ecology of peatland river systems // *Freshwater Science*. (2015). 34(4). 1406–1425. doi: 10.1086/683426

Feurdean A., Florescu G., Tantau I., Vanniere B., Diaconu A.-C., Pfeiffer M., Warren D., Hutchinson S. M., Gorina N., Gałka M., Kirpotin S. Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia // *Quaternary Science Reviews*. 2020. № 244. 106495. doi: 10.1016/j.quascirev.2020.106495

Holden J., Wearing C., Palmer S., Jackson B., Johnston K., Brown L. E. Fire decreases near-surface hydraulic conductivity and macropore flow in blanket peat // *Hydrological Processes*. 2013. 28(5). 2868–2876. doi: 10.1002/hyp.9875

Kettridge N.; Thompson D.K.; Waddington J.M. Impact of wildfire on the thermal behavior of northern peatlands: Observations and model simulations // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012. 117(G2), n/a–n/a. doi: 10.1029/2011jg001910

Kettridge N., Humphrey R.E., Smith J.E., Lukenbach M.C., Devito K.J., Petrone R.M., Waddington J.M. Burned and unburned peat water repellency: Implications for peatland evaporation following wildfire // *Journal of Hydrology*. 2014. № 513. pp. 335–341.

Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A. Effects of wildfire on the water chemistry of the northeastern part of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia) // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. 928. 012006. doi: 10.1088/1755-1315/928/1/012006

Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Dvinskaya M.L., Coogan S.C., and Flannigan M. D. Wildfires in the Siberian taiga // *Ambio*. 2021. 50. pp. 1953–1974. doi: 10.1007/s13280-020-01490-x

Nelson K., Thompson D., Hopkinson C., Petrone R., Chasmer L. Peatland-fire interactions: A review of wildland fire feedbacks and interactions in Canadian boreal peatlands // *Science of The Total Environment*. 2021. 769. 145212. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145212

Russkikh I.V., Strel'nikova E. B., Serebrennikova O.V., Kharanzhevskaya Yu.A. Post-fire composition of lipids in waters and plants of Great Vasyugan Mire // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 928. 2021. 012010. doi: 10.1088/1755-1315/928/1/012010

Rust A. J., Hogue T. S., Saxe S., McCray J. Post-fire water-quality response in the western United States // *International Journal of Wildland Fire*. 2018. 27(3). 203. doi: 10.1071/wf17115

Sherwood J.H., Kettridge N., Thompson D.K., Morris P.J., Silins U., Waddington J.M. Effect of drainage and wildfire on peat hydro-physical properties // *Hydrological Processes*. 2013. 27(13). 1866–1874. doi: 10.1002/hyp.9820

Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Koronatova N.G., Maloletko A.A., Mironycheva-Tokareva N.P., Russkikh I.V., Serebrennikova O.V., Strel'nikova E.B., Vishnyakova E.K. Kharanzhevskaya Yu.A. Post-fire ecological consequences within the drained site of the Great Vasyugan Mire: retrospective water-thermal regime and pyrogenic disturbance estimation // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 408. 012037. doi: 10.1088/1755-1315/408/1/012037

Sinyutkina A.A. Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the south-eastern part of Western Siberia: Peat accumulation and vegetation dynamics // *Catena*. 2021. № 205. 105464. doi: 10.1016/j.catena.2021.105464

Sulwiński M., Mętrak M., Wilk M., Suska-Malawska M. Smouldering fire in a nutrient-limited wetland ecosystem: Long-lasting changes in water and soil chemistry facilitate shrub expansion into a drained burned fen // *Science of The Total Environment*. 2020. 746. 141142. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141142

Thompson D.K., Waddington J.M. Wildfire effects on vadose zone hydrology in forested boreal peatland microforms // *Journal of Hydrology*. 2013. 486. 48–56. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.01.014

Информация об авторах:

Харанжевская Ю.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, Томск, Россия.

E-mail: kharan@yandex.ru

Синюткина А.А., кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, Томск, Россия.

E-mail: ankalaeva@yandex.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Kharanzhevskaya Yu.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies, RAS, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, Tomsk, Russia.

E-mail: kharan@yandex.ru

Sinyutkina A.A., Cand. Sci. (Geography), Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies, RAS, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, Tomsk, Russia.

E-mail: ankalaeva@yandex.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.01.2024; одобрена после рецензирования 12.03.2024; принята к публикации 02.06.2025

The article was submitted 30.01.2024; approved after reviewing 12.03.2024; accepted for publication 02.06.2025

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 504.1(571.55)
doi: 10.17223/25421379/35/8

ТЕХНОЗЕМЫ ХВОСТОХРАНИЛИЩ ВОЛЬФРАМОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ: ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ, ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ



Баир Намжилович Абрамов¹, Тимур Гармажапович Цыренов²

^{1,2} Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия

¹ b_abramov@mail.ru

² master.of.pistols@mail.ru

Аннотация. В техноземах вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья, по данным рентгенофлуоресцентного метода, выявлены следующие значения превышения ПДК почв: As (14–169), Pb (1,0–36,7), Zn (3,5–39,13), Cu (2,7–110,6). Выявлено, что по показателю загрязненности почв населенные пункты, связанные с отработкой вольфрамовых месторождений, относятся к низкой степени загрязненности ($Z_c < 16$). Установлено, что среди хвостохранилищ вольфрамовых месторождений наибольшей токсичностью характеризуются техноземы хвостохранилища Букубинского месторождения ($G\bar{r} = 1818$), наименьшей токсичностью – хвостохранилища Спокойнинского месторождения ($G\bar{r} = 98$). При этом токсичность техноземов хвостохранилищ вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья, по оценке потенциальной токсичности рудных месторождений, соответствует токсичности вольфрамовых месторождений.

Ключевые слова: вольфрамовые месторождения, хвостохранилище, концентрации вольфрама, техногенные месторождения, токсичность, Восточное Забайкалье

Источник финансирования: работа выполнена в рамках государственного задания ИПРЭК СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FUFR2021-0006.

Для цитирования: Абрамов Б.Н., Цыренов Т.Г. Техноземы хвостохранилищ вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья: геохимические особенности, воздействие на окружающую среду // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 101–113. doi: 10.17223/25421379/35/8

Original article
doi: 10.17223/25421379/35/8

TECHNOZEMS OF TUNGSTEN DEPOSIT TAILINGS DUMPS IN EASTERN TRANSBAIKALIA: GEOCHEMICAL FEATURES, ENVIRONMENTAL IMPACT

Bair N. Abramov¹, Timur G. Tsyrenov²

^{1,2} Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, SB RAS, Chita, Russia

¹ b_abramov@mail.ru

² master.of.pistols@mail.ru

Abstract. The analysis of elemental composition concentrations in the tailings of tungsten deposits showed significant exceedances of MPC of toxic elements of the first and second hazard class. The following exceedances of MPC were obtained: As (14–169), Pb (1–36.7), Zn (3.5–39.13), Cd (8.0–7.5), Cu (2.7–110.6). At the same time, in soil samples the same elements have the following exceedances of MPC: As (0–15), Pb (0.7–1.1), Zn (2.1–3.1), Cd (0–27), Cu (6–10). Calculation of potential toxicity of technozems of tungsten deposits by the method according to R.V. Goleva et al. [Goleva et al., 2001] showed that the greatest environmental hazard is characterised by the tailing dump of Bukukinsky deposit ($G\bar{r} = 1596$), the lowest – by the tailing dump of Spokoininsky deposit ($G\bar{r} = 95$). In drainage waters of Bukukinsky and Antovogorsky deposits significant excess of values of ratios of average contents of elements to their contents in leaching waters was revealed. Thus, in drainage waters of Bukukinsky deposit the following excesses were obtained: Cd – 306 times, Zn – 289, Pb – 75,3; of Antovogorsky deposit – Cd – 241,5 times, Zn – 84,4; Pb – 5,7. It is explained by more intensive transition into solution by oxidative dissolution of Cd and Zn sulphides in comparison with other sulphides. Calculations show that the total soil contamination indices of settlements associated with the mining of tungsten deposits have low values of soil contamination degree ($Z_c < 16$). High concentrations of tungsten (more than 0.01%) in tailing dumps, except for Spokoininsky deposit, allow to consider as technogenic deposits of tungsten.

Keywords: tungsten deposits, tailing dump, tungsten concentrations, technogenic deposits, toxicity, Eastern Transbaikalia

Source of financing: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Natural Resources and Ecology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FUFR2021-0006.

For citation: Abramov B.N., Tsyrenov T.G. (2025) Technozems of tungsten deposit tailings dumps of the Eastern Transbaikalia: geochemical features, environmental impact. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2. pp. 101–113. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/35/8

Введение

На территории Восточного Забайкалья известно несколько сотен месторождений и рудопроявлений вольфрама, наиболее крупные из них – Антоновогорское, Спокойнинское, Букукинское, Белухинское и Бом-Горхонское (рис. 1).

В металлогении Восточного Забайкалья месторождения вольфрама занимают одно из ведущих мест, что связано с широким развитием на его территории вольфрамоносных гранитоидов кукульбейского комплекса (J_3). Значительная часть этих место-

рождений уже отработана, некоторые из них отрабатываются в настоящее время, являясь источником постоянного техногенного загрязнения окружающей среды. Так, отработка Букукинского месторождения велась с 1915 по 1962 г., Белухинского – с 1926 по 1962 г., Антоновогорского – с 1940 по 1960 г., Бом-Горхонского – с 1986 по 2020 г., Спокойнинского месторождения – с 1940 г. до начала текущего столетия, затем после непродолжительного перерыва вновь была возобновлена в 2011 г. Населенные пункты (н.п.) в районах Белухинского и Букукинского месторождений отсутствуют.

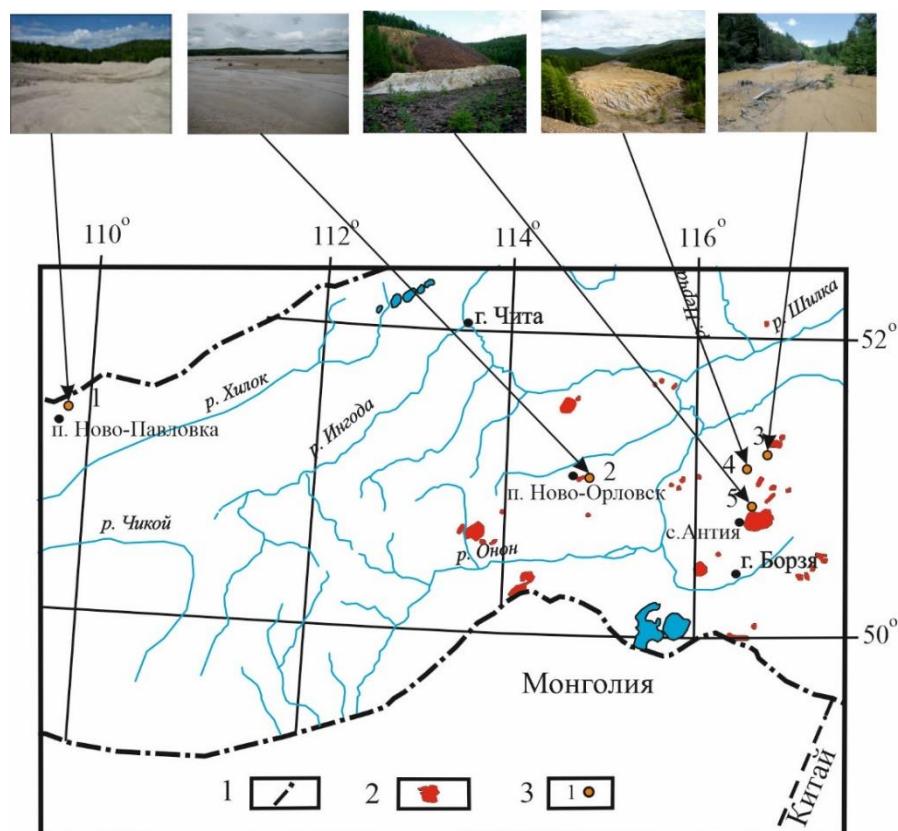


Рис. 1. Схема размещения выходов вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья

1 – государственные и административные границы; 2 – выходы интрузий кукульбейского комплекса (J_3); 3 – вольфрамовые месторождения: 1 – Бом-Горхонское, 2 – Спокойнинское, 3 – Белухинское, 4 – Букукинское, 5 – Антоновогорское

Fig. 1. Outcrops location scheme of tungsten deposits in Eastern Transbaikalia

1 – state and administrative boundaries; 2 – outcrops of intrusions of the Kukulbey complex (J_3); 3 – tungsten deposits: 1 – Bom- Gorkhon- sky, 2 – Spokoininsky, 3 – Belukhinsky, 4 – Bokukinsky, 5 – Antonovogorsky

Хвостохранилища отходов рудообогащения вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья являются как объектами повышенной экологической опасности, так и вероятными источниками рудного минерального сырья. В процессе длительного периода отработки вольфрамовых месторождений

образовались значительные по объему отходы деятельности горно-обогатительных комбинатов (ГОК), значительная часть которых, сконцентрирована в хвостохранилищах (табл. 1). Между тем отвалы вольфрамовых месторождений можно использовать в качестве вторичных ресурсов для извлечения ценных металлов.

Хвостохранилища рудных месторождений Восточного Забайкалья [Юргенсон, 1999; данные территориального геологического фонда по Забайкальскому краю (г. Чита)]

Tailings dumps of ore deposits in Eastern Transbaikalia [Yurgenson, 1999; data of the territorial geo-logical fund for the Transbaikal Territory (Chita)]

Таблица 1

Table 1

Месторождение	Площадь, га	Объем объекта тыс. м ³ /тыс. т	Среднее содержание WO ₃ , %
Антоновогорское	0,3	12/26,4	0,121
Белухинское	0,3	7,5/16,5	0,136
Букукинское	3,6	252/544,5	0,128
Бом-Горхонское	3	117/313,5	0,4
Спокойнинское	100	5115/8180	0,041

Изучением влияния хвостохранилищ рудных месторождений на экологическое состояние окружающей природной среды Восточного Забайкалья занимались многие исследователи. Известно, что многолетнее воздействие рудного материала хвостохранилищ (в т.ч. и вольфрамовых месторождений) на прилегающие территории привело к изменению химического состава элементов окружающей природной среды [Барабанов, 1975; Шварцев, 1998; Юргенсон, 1999; Харитонов и др., 2002; Михайленко, 2006; Мязин, Михайлутина, 2006; Михайлутина, 2007; Пузанов и др., 2012; Птицын, 2014; Абдрахманов, Ахметов, 2016; Винокуров и др., 2016; Чечель, 2017; Абрамов, 2018; Абрамов, Цыренов, 2019; Абрамов, Эпова, Манзырев, 2019; Абрамов и др., 2020; Чечель, Замана, 2020].

Зарубежный опыт изучения хвостохранилищ аналогичных вольфрамовых месторождений по всему миру, в том числе в Китае и Швеции, на предмет потенциального воздействия на окружающую среду, показывает комплексность проблемы влияния рудного материала хвостохранилищ, включая возможность потенциального использования как самого материала хвостов (в качестве строительного материала), так и возможность повторного извлечения вольфрама из хвостохранилищ, а также потенциальные способы рекультивации [Clemente et al., 1993; Han et al., 2012; Lin et al., 2014; Liu et al., 2015; Peng, Yang, Ouyang, 2015; Figueiredo et al., 2018; Mulenshi et al., 2019; Hui et al., 2021; Msumange et al., 2023].

Задачи и методы исследований

Основной задачей исследования является установление особенностей распределения химических элементов в техноземах хвостохранилищ вольфрамовых

месторождений Восточного Забайкалья, расчет их потенциальной экологической опасности на окружающую среду, а также расчет концентраций ценных компонентов в техноземах хвостохранилищ с целью возможности их извлечения. Сведения по концентрациям химических элементов в рудах, техноземах хвостохранилищ и в почвах населенных пунктов получены при проведении исследований по базовым проектам Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН с 2000 по 2023 г. Кроме того, использованы опубликованные данные и сведения территориального геологического фонда по Забайкальскому краю (г. Чита). Ввиду отсутствия опубликованных данных по фоновым концентрациям элементов в почвах Восточного Забайкалья, в качестве фоновых образцов были использованы концентрации элементов в почвах, отобранных вне зоны влияния техногенных объектов – на удалении от них от нескольких сотен метров до 2 км в водораздельных частях ландшафтов. Глубина отбора проб составляла 10–25 см. Вес грунтовой пробы составлял 1,0 кг.

Для определения элементного состава в пробах использован рентгенофлуоресцентный метод исследования в аналитических лабораториях Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ), ISP-MS ЗАО «SGS Vostok Limited» (г. Чита). Изучение минерального материала хвостохранилищ проводилось с использованием оптического поляризационного микроскопа Zeiss AXIO ScopeAI (Германия). Для гранулометрического анализа проб хвостохранилищ использовались навески от 20–50 до 300 г. В общей сложности было проведено 56 измерений. Замеры производились на электронных лабораторных весах САРТОГОСМ ВР2100.

В рамках гранулометрического анализа был произведен ситовой анализ комплектом из девяти лабораторных сит из оцинкованной нержавеющей стали фирмы «Виброгрохот» (Россия). Размеры ячеек сит, использованных в анализе, были следующими, мм: 5; 4; 3; 2; 1; 0,5; 0,4; 0,2; 0,094.

Краткие данные о минеральном составе руд и техноземов вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья

В Восточном Забайкалье образование вольфрамовых связано, главным образом, с процессами формирования интрузий позднемезозойского кукульбейского комплекса (J_3), развитых южнее Монголо-Охотского глубинного разлома. Изотопный возраст гранитов кукульбейского комплекса колеблется в диапазоне 150–145 млн лет (J_3) [Козлов, 2011].

Формирование вольфрамового оруденения на месторождениях Восточного Забайкалья проходило в несколько стадий. На Букукинском, Антоновогорском и Белухинском вольфрамовых месторождениях выделяются три стадии оруденения: первая стадия – кварц-вольфрамитовая, вторая – кварц-сульфидная, третья – хальцедоновидного кварца [Смирнов, 1978]. На Спокойнинском месторождении выделяются два

основных типа оруденения. Ранняя стадия представлена вольфрамоносными и бериллиевыми грейзенами в апикальной части Спокойнинского массива, поздняя стадия – кварц-вольфрамитовыми жилами. Наличие нескольких стадий оруденения свидетельствует о пульсирующем характере формирования рудоносных растворов.

Рудные тела вольфрамовых месторождений представлены кварцево-жильными жилами и зонами грейзенизации. Основными рудными минералами являются вольфрамит, пирит, сфалерит. Второстепенные рудные минералы представлены галенитом, пирротином, халькопиритом, арсенопиритом, молибденитом [Барабанов, 1975].

Из техноземов хвостохранилищ был выделен тяжелый шлак. Изучение минералов тяжелого шлака по микроскопом показало, что размер зерен сульфидов и вольфрамитов в основном составляет десятые и сотые доли миллиметров (рис. 2). Преобладающий размер частиц рудных минералов составляет 0,01–0,05 мм. Редко отмечаются зерна размерами около 1 мм. Отмечаются следующие рудные минералы по степени распространенности: пирит (75 %), вольфрамит (15 %), менее распространены – халькопирит, галенит, сфалерит, арсенопирит и другие минералы (рис. 2).

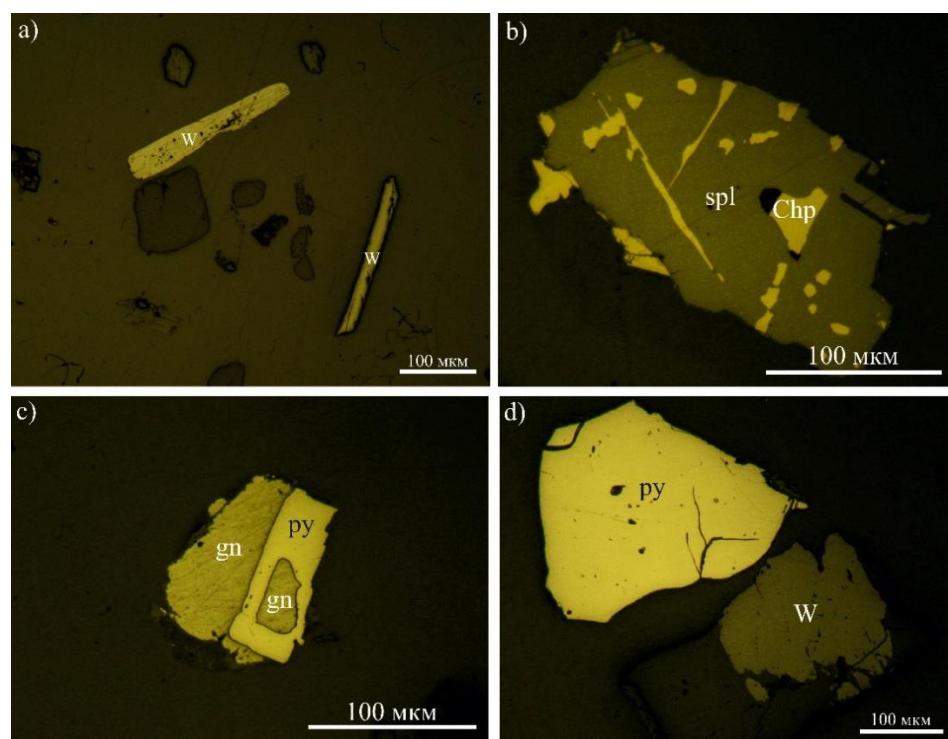


Рис. 2. Рудные минералы техноземов хвостохранилищ вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья
а – зерна вольфрамита (W), б – структуры распада твердого раствора халькопирита (Chp) в сфалерите (spl), в – включения галенита (gn) в пирите (py), д – зерна пирита (py) и вольфрамита (W)

Fig. 2. Ore minerals of technozems of tailings of tungsten deposits of Eastern Transbaikalia

а – grains of wolframite (W), б – decomposition structures of solid solution of chalcopyrite (Chp) in sphalerite (spl), в – inclusions of galenite (gn) in pyrite (py), д – grains of pyrite (py) and wolframite (W)

По существу остающиеся в хвостах минералы вольфрама – главным образом мелкие и ультрадисперсные фракции, что затрудняет их переработку. Гранулометрический состав техноземов исследуемых хвостохранилищ показывает, что частицы данного размера встречаются в различных соотношениях от измеряемой навески (в %). Для техноземов Белухинского месторождения частицы размерностью 0,2–0,094 и <0,094 мм в среднем составляют 18,34 %, Букукинского месторождения – 11,91 %, Антоновогорского месторождения – 14,31 %, Спокойнинского месторождения – 42,94% от измеряемой навески. Частицы размерностью от 0,2 до 1 мм составляют 54,53; 50,82; 52,34 и 55,5 % соответственно. В тяжелых шлихах соотношения частиц несколько отличается – частицы размерностью 0,2–0,094 и <0,094 мм в среднем составляют от 2 до 7 %, а 0,2–1 мм – от 70 до 80–85 % от навесок. Примечателен разброс между максимальными и минимальными соотношениями частиц в пробах технозема. Например, частицы хвостохранилища Антоновогорского месторождения размером 0,2–0,094 мм и менее находятся в диапазоне 3,33–29,7 %, в то время как разброс частиц технозема Спокойнинского месторождения составляет 21,07–80 %. Вероятно, подобный разброс обусловлен как качеством отработки добываемого материала месторождений (три из четырех исследованных на гранулометрический состав хвостохранилищ месторождений отрабатывались до 1960-х гг.), так и непосредственно минеральным составом техноземов.

Геохимические особенности природно-техногенных комплексов вольфрамовых месторождений, оценка их воздействий на окружающую среду

Природно-техногенные комплексы вольфрамовых месторождений включают в себя природные и техногенные (созданные человеком) составляющие окружающей среды. Техногенными составляющей вольфрамовых месторождений являются территории, изменённые в результате деятельности горно-обогатительных комбинатов. Рассмотрим распределение химических элементов в техноземах вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья. Техноземы хвостохранилищ относительно предельно-допустимых концентраций (ПДК) элементов характеризуются повышенными содержаниями многих, в том числе токсичных элементов (табл. 2). Значения отношений содержаний элементов в техноземах имеют существенные различия. Это объясняется нормативами извлечения (и потерь) ценных элементов при переработке минерального сырья горно-обогатитель-

ными комбинатами. Так, процент извлечения вольфрамита (гюбнерита, ферберита) при гравитационном обогащении составляет для крупно-вкрашенных руд 70–85 %, для средне- и мелковкрашенных – 52–70 % [Методические рекомендации..., 2007].

Значительная разница содержаний элементов в техноземах хвостохранилищ объясняются, главным образом, окислительными процессами преобразования сульфидов под воздействием водных потоков, циркулирующих в хвостохранилищах. При этом выделяются следующие стадии трансформации сульфидов в зоне окисления: сульфиды – сульфаты – карбонаты (окислы). Минералы сульфатной стадии обладают повышенной растворимостью и представляют наибольшую опасность для окружающей среды.

Большая часть химических элементов II и III классов опасности в почвах в ГОСТ Р 70281-2022 отсутствует, несмотря на наличие их в ныне недействующем МУ 2.1.7.730099. Для составления более комплексного вывода об экологическом состоянии почв н.п. дополнительно воспользуемся ссылкой на ныне недействующий нормативный акт, что существенно не отразится на полученных результатах. По классу опасности химические элементы подразделяются на три класса: I класс – As, Cd, Hg, Pb, Zn; II класс – Co, Ni, Mo, Cu, Sn, Sb, Cr; III класс – Ba, V, W, Mn, Sr [ГОСТ Р 70281-2022; МУ 2.1.7.730099].

Сульфиды различных минералов при окислительном растворении имеют разную интенсивность перехода в раствор. Этим объясняются значительные различия средних значений элементов в техноземах хвостохранилищ. Среди рассматриваемых месторождений наибольшими значениями сумм отношений средних содержаний к ПДК (Х/ ПДК) категорий I и II опасности характеризуется техноземы хвостохранилища Букукинского месторождения ($\sum X / ПДК$) – 618,1; минимальными значениями техноземы хвостохранилища Спокойнинского месторождения – 36,2 (табл. 3). Среди почв населенных пунктов суммы отношений $\sum X / ПДК$ (по убыванию) распределены следующим образом – н.п. Антия (412,5) > н.п. Новоорловск (388,2) > н.п. Новопавловка (154,2).

Установлено, что, при окислительном растворении сульфидов в отвалах, Zn и Cd более интенсивно переходят в раствор, чем Pb [Пузанов и др., 2012]. Данная закономерность подтверждается повышенными значениями концентраций Zn, Cd, Cu и других элементов в водах вытекающих из штолен вольфрамовых месторождений. Относительно среднего химического состава вод выщелачивания, в порядке убывания содержания элементов в водах штолневых дренажей имеет следующий вид: Cd > Cu > Zn > Co > Ni > Pb > U > Fe > Sr > W > Mo [Шварцев, 1998; Чечель, 2017].

Значения ПДК элементов в техноземах зависят от содержаний в них определенных видов рудных минералов, в состав которых входят токсичные элементы.

Руды рассматриваемых месторождений представлены следующими основными рудными минералами: пирит (FeS_2), вольфрамит ($Fe, Mn WO_4$), арсенопирит $Fe(AsS)$, халькопирит ($CuFeS_2$), сфалерит (ZnS), галенит (PbS), молибденит (MoS_2), антимонит (Sb_2S_3), кассiterит (SnO_2), блеклые руды (теннантит Cu_3AsS_3 , тетраэдрит Cu_3SbS_3). Кадмий входит в виде изоморфной примеси в минералы цинка. Расчеты выявили в техноземах следующие значения превышения ПДК: As (14–169), Pb (1–36,7), Zn (3,5–39,1), Cd (2,5–8), Cu (2,7–181). При этом в пробах почв те же элементы имеют следующие превышения ПДК: As (0–15), Pb (0,7–1,1), Zn (2,1–3,1), Cd (0–27), Cu (6–10).

Рассчитаем токсичность техноземов вольфрамовых месторождений, используя формулу расчета токсичности рудных месторождений по Р.В. Головой и др. [Голова и др., 2001]. Потенциальная токсичность рудного месторождения рассчитывается по формуле (1):

$$\Gamma_{\text{Эр}} = \sum_{i=1}^n (T_{\text{л}} \times B)_i + \dots + (T_{\text{л}} \times B)_n, \quad (1)$$

где $\Gamma_{\text{Эр}}$ – потенциальная токсичность рудного месторождения; $T_{\text{л}}$ – коэффициент литотоксичности элемента; $B = X/Q$, где X – концентрации элемента, Q – содержание элемента в окружающей среде. При этом коэффициенты литотоксичности ($T_{\text{л}}$) элементов сгруппированы авторами следующим образом: чрезвычайно опасные (супертоксичные) $T_{\text{л}} = 15$: Hg, Cd, Tl, Sr, Ba, Be, U, Ra, Rn, Cs; высокой опасности $T_{\text{л}} = 10$: Pb, Se, Te, As, Sb, B, F, Th, V, Cr, Ru, Co, Ni; средней опасности $T_{\text{л}} = 5$: Cu, Zn, S, Bi, Ag, Ba, Mo, In, Ge, Sr, W, Al, Li, Mn, Cs, Cl, Sn, P; незначительной опасности $T_{\text{л}} = 1$: Nb, Zr, Ti, Na, K, Ta, Ca, Si, Mg, Th.

Средние содержания элементов в природно-техногенных комплексах вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья, г/т

Таблица 2

Average content of elements in natural and technogenic complexes of tungsten deposits in Eastern Transbaikalia, ppm

Э	As	Pb	Zn	Cd	Cu	Sn	Mo	Sb	W	Bi	Ba	Sr
КО		I				II				III		
Ф	14	24	57	–	22	13	108	–	385	2,2	609	308
Тл	10	10	5	15	5	5	5	10	5	5	15	15
ПДК	2	32	23	2	3	4,5	0,4	4,5	–	–	–	–
Антоновогорское: руды (n = 12) $\Gamma_{\text{Эр}} = 2582$												
X1	198	120	2741	230	1292	96	17	4	26206	650	22	10
X1/Ф	14,1	5,0	48,1	–	58,7	7,4	0,2	–	68,1	295,5	0,04	0,03
Хвостохранилище (n = 14) $\Gamma_{\text{Эр}} = 851$												
X2	137	109	47	15	332	119	20	7	3020	237	115	25
X1/ X2	1,4	1,1	58,3	15,3	3,9	0,8	0,9	0,6	8,7	2,7	0,2	0,4
X2/Ф	9,8	4,5	0,8	–	15,1	9,2	0,2	–	7,8	107,7	0,2	0,1
I _{geo}	2,71	1,60	–0,86	–	3,33	2,61	–3,02	–	2,39	6,17	–2,99	–4,21
X2/ПДК	68,5	3,4	2,04	7,5	110,7	26,4	50	1,6	–	–	–	–
н.п. Антия (n = 2) $Z_c = 2,68$ Число жителей – 243												
X3	30	22	48	–	30	10	153	–	504	2	621	306
X3/Ф	2,1	0,9	0,8	–	1,4	0,8	1,4	–	1,3	0,9	1,0	1,0
X3/ ПДК	15,0	0,7	2,1	–	10,0	2,2	382,5	–	–	–	–	–
Букукинское: руды (n = 12) $\Gamma_{\text{Эр}} = 7273$												
X1	192	9957	9727	291	2294	487	370	102	30872	441	104	54
X1/Ф	13,7	414,9	170,7	–	104,3	37,5	3,4	–	80,2	200,5	0,2	0,2
Хвостохранилище (n = 15) $\Gamma_{\text{Эр}} = 1596$												
X2	337	1174	429	13	290	119	91	165	2017	296	350	104
X1/ X2	0,6	8,5	22,7	22,4	7,9	4,1	4,1	0,6	15,3	1,5	0,3	0,5
X3/Ф	24,1	48,9	7,5	–	13,2	9,2	0,8	–	5,2	134,6	0,6	0,3
I _{geo}	4,00	5,03	2,33	–	3,14	2,61	–0,83	–	1,80	6,49	–1,38	–2,15
X2/ПДК	168,5	36,7	18,7	6,5	96,7	26,4	227,5	36,7	–	–	–	–
Спокойнинское: руды (n = 5) $\Gamma_{\text{Эр}} = 3749$												
X1	61	2253	236	19	16	45	–	9	1629	1189	62	11
X1/Ф	4,4	93,9	4,1	–	0,7	3,5	–	–	4,2	540,5	0,1	0,04
Хвостохранилище (n = 9) $\Gamma_{\text{Эр}} = 95$												
X2	28	31	80	–	8	45	2	–	579	11	52	42
X1/ X2	2,2	72,7	3	–	2	1	–	–	2,8	108,1	1,2	0,3
X2/Ф	2,0	1,3	1,4	–	0,4	3,5	0,02	–	1,5	5,0	0,1	0,1
I _{geo}	0,39	–0,25	–0,13	–	–2,07	1,18	–6,37	–	–0,03	1,71	–4,16	–3,49
X2/ПДК	14,0	1,0	3,5	–	2,7	10,0	5,0	–	–	–	–	–

Э	As	Pb	Zn	Cd	Cu	Sn	Mo	Sb	W	Bi	Ba	Sr
КО	I				II				III			
п. Новоорловск (n = 4) $Z_c = 1,42$ Число жителей – 3084												
X3	14	34	50	54	18	–	138	–	495	–	597	236
X3/Ф	1,0	1,4	0,9	–	0,8	–	1,3	–	1,3	–	1,0	0,8
X3/ПДК	7,0	1,1	2,2	27,0	6,0	–	345,0	–	–	–	–	–
Бом-Горхонское: руды (n = 5) ГЭр = 12854												
X1	626	626	19347	167	612	30	141	–	175633	3524	42	24
X1/Ф	44,7	26,1	339,4	–!	27,8	2,3	1,3	–	456,2	1602	0,1	0,1
Хвостохранилище (n = 3) 1083												
X2	78	86	900	16	270	109	68	–	2687	333	524	24
X1/ X2	8,0	7,3	21,5	10,4	2,3	0,3	2,1	–	65,4	10,6	0,1	1
X2/Ф	5,6	3,6	15,8	–	12,3	8,4	0,6	–	7,0	151,4	0,9	0,1
I_{geo}	1,89	1,26	3,40	–	3,03	2,48	–1,25	–	2,22	6,66	–0,80	–4,27
X2/ПДК	39,0	2,7	39,1	8,0	90,0	24,2	170,0	–	–	–	–	–
п. Новопавловка (n = 4) $Z_c = 2,70$ Число жителей – 3768												
X3	–	27	72	–	22	13	56	–	183	7	693	308
X3/Ф	–	1,1	1,3	–	1,0	1,0	0,5	–	0,5	3,2	1,1	1,0
X3/ПДК	–	0,8	3,1	–	7,3	2,9	140,0	–	–	–	–	–
Белухинское: хвостохранилище (n = 10) ГЭр = 1103												
X2	143	109	157	5	544	58	91	22	973	334	415	188
X2/Ф	10,2	4,5	2,8	–	24,7	4,5	0,8	–	2,5	151,8	0,7	0,6
I_{geo}	2,77	1,60	0,88	–	4,04	1,57	–0,83	–	0,75	6,66	–1,14	–1,30
X2/ПДК	71,5	3,4	6,8	2,5	181,3	12,9	228	4,9	–	–	–	–

Примечание: x – среднее арифметическое, s – стандартное отклонение, n – число анализов, прочерк – нет данных, Тл – литотоксичность [Голева и др., 2001], Ф – фоновые пробы [Войткевич и др., 1977], ПДК – предельно допустимые концентрации в почвах, мг/кг [СанПиН 1.2.3685-21], КТ – класс токсичности, ГЭр – потенциальная токсичность [Голева, 2001], I_{geo} – индекс геоаккумуляции [Muller, 1969].

Note: x – arithmetic mean, s – standard deviation, n - number of analyses. dash – no data, Tl – lithotoxicity [Goleva et al., 2001], F – background samples [Voytkevich et al., 1977], MPC – maximum permissible concentrations in soils, mg/kg [SanPiN 1.2.3685-21], CT – toxicity class, GEr – potential toxicity [Goleva, 2001], I_{geo} – geoaccumulation index [Muller, 1969].

Отмечена следующая закономерность: с увеличением значений отношений содержаний элементов в рудах к содержанию их в техноземах уменьшается токсичность хвостохранилищ, что объясняется процессами перехода элементов в раствор. Данная закономерность в целом подтверждается увеличением суммы отношений средних содержаний токсичных элементов первого, второго и частично третьего класса токсичности элементов в рудах к таковым в техноземах. Такая последовательность наблюдается от Букуунского к Спокойнинскому месторождениям: Букуинское (ГЭр = 1596) $\sum 87,59$ → Бом-Горхонское (ГЭр = 1083) $\sum 127,8$ → Антоновогорское (ГЭр = 851) $\sum 93,74$ → Спокойнинское (ГЭр = 95) $\sum 191,71$ (табл. 3).

Степень потенциальной токсичности исследуемых вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья в целом по методике Р.В. Голевой и соавт. [Голева и др., 2001] соответствует степени токсичности вольфрамовых месторождений.

Для изучения степени влияния отдельных тяжелых металлов на химический состав хвостохранилищ рассчитаем индексы геоаккумуляции (I_{geo}) по методике, предложенной Мюллером [Muller, 1969]. Для вычислений применялась следующая формула (2):

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1,5B_{E_n}}, \quad (2)$$

где C_n – измеренная концентрация соединений тяжелых металлов в образце; B_{E_n} – среднее геохимическое фоновое значение измеряемых элементов.

Значения индекса подразделяются следующим образом: $I_{geo} \leq 0$ – практически незагрязненный; $0 < I_{geo} \leq 1$ – незагрязненный до умеренно загрязненного; $1 < I_{geo} \leq 2$ – умеренно загрязненный; $2 < I_{geo} \leq 3$ – средне загрязненный; $3 < I_{geo} \leq 4$ – сильно загрязненный; $4 < I_{geo} \leq 5$ – сильно загрязненный до чрезмерно загрязненного; $I_{geo} > 5$ – чрезмерно загрязненный.

Согласно проведенным расчетам, в техноземах Букуинского и Бом-Горхонского месторождений к категориям от «умеренно загрязнённые» до «чрезмерно загрязненные» относятся семь элементов из изучаемой подборки, в то время как в техноземах Спокойнинского месторождения – два элемента. Во всех исследуемых хвостохранилищах расчеты индекса показали наибольшее влияние Bi на изменение химического состава исследованных проб техноземов. Несмотря на принадлежность данного элемента к III классу токсичности, его накопление в больших количествах в минеральном материале хвостохранилищ может говорить о значительном потенциале

вредного воздействия на почвы прилегающих территорий. Следует отметить, что рассмотренные в исследовании тяжелые металлы I, II и III классов токсичности (As, Pb, Zn, Cu, Sn и W) также оказывают значительное воздействие на химический состав хвостохранилищ, что потенциально приводит к загрязнению почв прилегающих территорий. Исключением является минеральный материал хвостохранилища Спокойнинского месторождения – расчеты показали низкие относительно прочих объектов значения индекса, при этом наибольшую способность к накоплению показали Bi и Sn – здесь полученные индексы были отнесены к категории «умеренно загрязненные».

Для оценки показателя загрязнения почв в населенных пунктах рассчитан суммарный показатель загрязнения (Z_c) (3):

$$Z_c = K_{ci} + \dots + K_{cn} - (n - 1), \quad (3)$$

где n – количество учитываемых химических элементов; K_{ci} – коэффициент концентрации i -го компонента загрязнения, превышающий единицу. $K_{ci} = C_i/C_{\phi i}$, где C_i – фактическое содержание i -го химического элемента в почвах и грунтах, мг/кг; $C_{\phi i}$ – фоновое содержание i -го химического элемента в почвах и грунтах, мг/кг. Значения, характеризующие суммарное загрязнение Z_c по степени опасности, имеют следующие диапазоны: $Z_c < 16$ – низкий уровень; $16 < Z_c < 32$ – средний, умеренно опасный; $32 < Z_c < 64$ – высокий, опасный; $64 < Z_c < 128$ – максимальный, чрезвычайно опасный [СанПиН 1.2.3685-21].

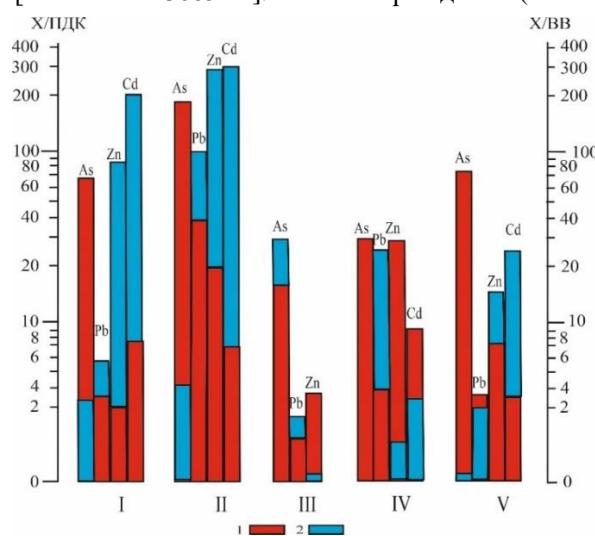


Рис. 3. Гистограмма распределения отношений средних значений элементов в техноземах хвостохранилищ к ПДК грунтов (Х/ПДК) и отношений средних значений элементов в дренажных водах к средним значениям элементов в водах выщелачивания (Х/ВВ) вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья

Месторождения: I – Антоновогорское, II – Букубинское, III – Спокойнинское, IV – Бом-Горхонское, V – Белухинское. Содержания элементов: 1 – в техноземах хвостохранилищ, 2 – в дренажных водах

Fig. 3. Histogram of distribution of ratios of average values of elements in technozems of tailings ponds to MPC of soils (X/MPC) and ratios of average values of elements in drainage water to average values of elements in leaching water (X/BB) of tungsten deposits of Eastern Transbaikalia

Deposits: I – Antonovogorsky, II – Bukukinsky, III – Spokoininsky, IV – Bom-Gorkhonsky, V – Belukhinsky. Elemental contents: 1 – in tailing pond soils, 2 – in drainage water

Выявлено, что показатели загрязненности почв населенных пунктов, связанных с отработкой вольфрамовых месторождений, соответствуют низким степеням загрязненности ($Z_c < 16$). Так, загрязненность почв н.п. Новоорловск, расположенного в 1,3 км от хвостохранилища Спокойнинского месторождения, составляет $Z_c = 1,42$; н.п. Антия, расположенного в 11,6 км от хвостохранилища Антоновогорского месторождения, составляет $Z_c = 2,68$; н.п. Новопавловка, находящегося в 6,5 км от хвостов обогащения Бом-Горхонского месторождения, $Z_c = 2,70$.

Для техногенных потоков рассеяния вольфрамовых месторождений характерны преимущественно сульфатный и гидрокарбонатно-сульфатный анионный состав и снижение значений pH в слабокислую и кислую область. Наиболее низкие значения pH характерны для дренажных стоков месторождений (2,9–5,7 Антонова Гора; 2,1–7,0 – Букука) [Чечель, 2021]. В пределах Спокойнинского месторождения формируются преимущественно слабощелочные воды с минерализацией (pH – 6,6–8,8) [Чечель, 2021].

Среди рассматриваемых месторождений наибольшими значениями отношений сумм отношений средних содержаний элементов I и II классов опасности в водах дренажных стоков (Х/ВВ) характеризуются дренажные стоки Букубинского месторождения (Х/ВВ – 683,3), наименьшими значениями дренажные воды Белухинского (Х/ВВ – 38,4) и Спокойнинского месторождений (Х/ВВ – 76,1) (рис. 3).

Распределение отношений средних содержаний элементов токсичных элементов первого класса опасности в техноземах хвостохранилищ к значениям ПДК этих элементов показывает следующее их расположение в порядке убывания: Антоновогорское As > Cd > Pb > Zn; Букубинское As > Pb > Zn > Cd; Спокойнинское As > Zn > Pb; Бом-Горхонское As > Zn > Cd > Pb; Белухинское As > Zn > Pb > Cd. Анализ данной последовательности свидетельствует о значительных превышениях ПДК в техноземах хвостохранилищ вольфрамовых хвостохранилищ As, Pb и Zn.

Отношения средних содержаний элементов в дренажных водах к средним значениям элементов в водах выщелачивания по данным месторождениям выглядят следующим образом: Антоновогорское Cd > Zn > Pb > As; Букубинское Cd > Zn > Pb > As; Спокойнинское As > Pb > Zn; Бом-Горхонское Pb > Cd > Zn; Белухинское Cd > Zn > Pb > As. Рассмотрение данной последовательности указывает на значимые способности перехода в раствор при окислении сульфидов Cd относительно других элементов. Установлено, что при окислительном растворении сульфидов в отвалах Zn и Cd более интенсивно переходят в раствор, чем Pb [Пузанов и др., 2012]. Данная закономерность подтверждается повышенными значениями концентраций Zn, Cd, Cu и других элементов в водах вытекающих из штолен вольфрамовых месторождений. Относительно среднего химического состава вод выщелачивания, в порядке убывания, содержания элементов в водах штольневых дренажей имеют следующий вид: Cd > Cu > Zn > Co > Ni > Pb > U > Fe > Sr > W > Mo [Шварцев, 1998; Чечель, 2017]. Анализ содержаний вольфрама в техноземах рассматриваемых месторождений, кроме Спокойнинского, позволяет рассматривать их как техногенные месторождения вольфрама. В мировой практике из хвостохранилищ вольфрамовых месторождений с содержаниями вольфрама 0,01 % и выше происходит добыча вольфрама. Добыча вольфрама из хвостохранилищ производят в следующих месторождениях: Ляньхуашань (Китай), Маунт Карбин (Австралия) [Han et al., 2021].

Обсуждение результатов исследований

Проведенный анализ концентраций элементного состава хвостохранилищ вольфрамовых месторождений, также расположенных поблизости населенных пунктов показал значительные превышения ПДК токсичных элементов первого и второго класса токсичности. Расчеты выявили, что в отличие от хвостохранилищ рудников, в селитебных почвах превышения ПДК для тех же элементов выглядят следующим образом: As (0–15), Pb (0,7–1,1), Zn (2,1–3,1), Cd (0–27), Cu (6–10). Подобные отличия в превышениях можно

объяснить их разной способностью элементов к отложению в почвенных средах.

Не установлено прямой зависимости степени загрязненности почв н.п. от удаленности от хвостохранилищ вольфрамовых месторождений. Это возможно объяснить особенностями геологического строения в районах н.п., почвы которых были образованы за счет выветривания различных по составу пород. Исходя из данных о химическом составе селитебных почв, отмечено увеличение степени загрязненности почв н.п., расположенных вблизи хвостохранилищ в сравнении с н.п., расположенными на удалении от хвостохранилищ. Однако расчеты суммарного показателя загрязнения почв Z_c населенных пунктов находятся в отрицательном диапазоне значений, а также показывают обратную зависимость от расстояния до хвостохранилищ.

Расчет потенциальной токсичности техноземов вольфрамовых месторождений по методу по Р.В. Головой и соавт. [Голова и др., 2001] показал, что наибольшей экологической опасностью характеризуются хвостохранилища Букубинского месторождения ($\Gamma_{\text{Эр}} = 1596$), наименьшими значениями – Спокойнинского ($\Gamma_{\text{Эр}} = 95$). Подсчитанные индексы геоаккумуляции для техноземов показывают, что изменению химического состава также больше подвержены более удаленные от населенных пунктов хвостохранилища.

В дренажных водах Букубинского и Антоновогорского месторождений выявлено значительное превышение значений отношений средних содержаний элементов к содержаниям их в водах выщелачивания. Так, превышение следующих элементов в дренажных водах Букубинского месторождения составляет: Cd в 306 раз, Zn – 289, Pb – 75,3; Антоновогорского месторождения – Cd в 241,5 раза, Zn – 84,4; Pb – 5,7. Это объясняется более интенсивным переходом в раствор при окислительном растворении сульфидов Cd и Zn в сравнении с другими сульфидами.

Высокие концентрации вольфрама (более 0,01 %) в хвосторанилищах, кроме Спокойнинского месторождения, позволяют рассматривать как техногенные месторождения вольфрама. Минералогический анализ показал, что преобладающий размер частиц рудных минералов в техноземах составляет 0,01–0,05 мм.

Заключение

Выявлено, что показатели загрязненности почв населенных пунктов, связанных с отработкой вольфрамовых месторождений, соответствуют низким степеням загрязненности почв ($Z_c < 16$).

В процессе исследований проведен сравнительный анализ распределения элементов в техноземах хвостохранилищ вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья. Выявлено, что концентрации элементов в техноземах хвостохранилищ имеют существенные различия. Выявлено, что наиболее значимыми превышениями ПДК элементов в почвах характеризуются техноземы Букукинского и Антоновогорского месторождений. Среди рассматриваемых элементов наиболее значимые превышения ПДК характеризуются As, Cu, Zn, значения которых составляют: As в 169 раз, Cu в 96,7 (Букукинское месторождение); Zn в 39,1 раза (Бом-Горхонское месторождение).

В дренажных водах рассматриваемых месторождений отмечается значительное превышение отношений средних концентраций Cd, Zn к средним значениям вод выпадаивания, что объясняется более интенсивным переходом в раствор Cd, Zn при окислении

рудных частиц в сравнении с другими сульфидами.

Согласно результатам проведенной оценки воздействия хвостохранилищ на окружающую среду, выявлено увеличение степени загрязненности почв н.п., расположенных на удалении от хвостохранилищ, в сравнении с н.п., находящимися вблизи хвостохранилищ.

Это можно объяснить разной геологической обстановкой в рассматриваемых н.п., почвы которых сформированы за счет выветривания различных по составу пород.

Концентрации вольфрама (более 0,01 %) в хвостохранилищах вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья, кроме Спокойнинского месторождения, соответствуют вольфрамовым техногенным месторождениям, что предполагает возможность их отработки.

Список источников

- Абдрахманов Р.Ф., Ахметов Р.М.** Гидрохимия горнорудных районов // Геохимия. 2016. № 9. С. 829–840.
- Абрамов Б.Н.** Концентрации тяжелых металлов в техногенных ландшафтах Акатаевского полиметаллического месторождения (Восточное Забайкалье) // Вестник Воронежского государственного университета: География. Геоэкология. 2018. № 4. С. 67–71.
- Абрамов Б.Н., Еремин О.В., Филенко Р.А., Цыренов Т.Г.** Оценка потенциальной экологической опасности природно-техногенных комплексов рудных месторождений Восточного Забайкалья // Геосферные исследования. 2020. № 2. С. 64–67.
- Абрамов Б.Н., Цыренов Т.Г.** Оценка экологической опасности на окружающую среду хвостохранилищ некоторых сульфидных месторождений Восточного Забайкалья // Успехи современного естествознания. 2019. № 5. С. 35–41.
- Абрамов Б.Н., Эпова Е.С., Манзырев Д.В.** Геоэкологические проблемы отработки рудных месторождений золота в Восточном Забайкалье // География и природные ресурсы. 2019. № 2. С. 103–111.
- Барабанов В.Ф.** Минералогия вольфрамитовых месторождений Забайкалья. Т. 2. Л. : Изд-во ЛГУ, 1975. 360 с.
- Винокуров С.Ф., Гурбанов А.Г., Богатиков О.А., Карамурзов Б.С., Газеев В.М., Лексин А.Б., Шевченко А.В., Долов С.М., Дударов З.И.** Содержания, сезонные колебания и формы миграции макро- и микроэлементов в поверхностных водах в районе деятельности Тырныаузского вольфрамово-молибденового комбината (ТВМК) и прилегающих территорий (Кабардино-Балкарская Республика) и меры по восстановлению экологической среды // Доклады Академии наук. 2016. Т. 467, № 4. С. 436–467.
- Войткевич Г.В., Мирошников А.Е., Поваренных А.С., Прохоров В.Г.** Краткий справочник по геохимии. М. : Недра, 1977. 184 с.
- Голева Р.В., Иванов В.В., Куприянова И.И., Маринов Б.Н., Новикова М.И., Шпанов Е.П., Шурига Т.Н.** Экологическая оценка потенциальной токсичности рудных месторождений (методические рекомендации). М. : РИЦ ВИМС, 2001. 53 с.
- ГОСТ Р 70281-2022** Охрана окружающей среды. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. Официальное издание. М. : РСТ, 2022. 8 с.
- Козлов В.Д.** Особенности редкоэлементного состава и генезиса гранитоидов шахтаминского и кукульбейского редкометальных комплексов Агинской зоны Забайкалья // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 5. С. 676–688.
- Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Вольфрамовые руды.** М. : Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых (ФГУ ГКЗ), 2007. 42 с.
- Михайленко В.Н.** Проблема техногенных отходов горного производства в России // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 2. С. 121–123.
- Михайлутина С.И.** Комплексная эколого-геохимическая оценка загрязнения тяжелыми металлами компонентов природной среды горнорудных поселений Восточного Забайкалья : автореф. дис. канд. техн. наук. Иркутск, 2007. 21 с.
- МУ 2.1.7.730099** Почва, очистка населенных мест, бытовые и промышленные отходы, санитарная охрана почвы. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. М. : Федеральный центр гигиенического контроля Минздрава России, 1999. 20 с.
- Мязин В.П., Михайлутина С.И.** Комплексная оценка техногенного загрязнения почв и продуктов питания тяжелыми металлами при размещении хвостохранилищ в Восточном Забайкалье // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 9. С. 164–170.
- Птицын А.Б.** Проблемы освоения техногенных месторождений Забайкалья // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № S3-2. С. 128–130.
- Пузанов А.В., Бабошкина С.В., Горбачев И.В.** Особенности миграции тяжелых металлов в природно-техногенных аномалиях Северо-Западной части Алтая // Геохимия. 2012. № 4. С. 393–402.
- СанПиН 1.2.3685-21** Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?section=text> (дата обращения: 12.02.2024).

- Смирнов В.И.** Рудные месторождения СССР. Т. 3. М.: Недра, 1978. 496 с.
- Харитонов Ю.Ф., Васильев Д.А. и др.** Эколого-экономическая оценка горнопромышленного комплекса Читинской области // Ресурсы Забайкалья. Спец. вып. Чита, 2002. С. 42–47.
- Чечель Л.П.** Эколого-гидрогохимические последствия отработки вольфрамовых и молибденовых месторождений Восточного Забайкалья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 6. С. 52–63.
- Чечель Л.П.** Формирование гидрогохимических полей вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья под влиянием природных и антропогенных факторов : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 2021. 21 с.
- Чечель Л.П., Замана Л.В.** Геохимическая типизация техногенно-трансформированных вод Бом-Горхонского вольфрамового месторождения (Восточное Забайкалье) // Материалы четвертой Всероссийской конференции с международным участием «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами». Улан-Удэ, 2020. С. 408–412.
- Шварцев С.Л.** Гидрогохимия зоны гипергенеза. 2-е изд., испр. и доп. М. : Недра, 1998. 366 с.
- Юргенсон Г.А.** Геологические исследования и горнопромышленный комплекс Забайкалья: История, современное состояние, проблемы, перспективы развития. К 300-летию основания Приказа рудокопных дел. Новосибирск : Наука, 1999. 574 с.
- Clemente D., Newling P., Botelho D.S.A., Lejeune G., Barber S., Tucker P.** Reprocessing slimes tailings from a tungsten mine // Miner. Eng. 1993. V. 6. P. 831–839.
- Figueiredo J., Vila M.C., Matos K., Martins D., Futuro A., Dinis M.d.L., Góis J., Leite A., Fiúza A.** Tailings reprocessing from Cabeço do Pião dam in Central Portugal: A kinetic approach of experimental data // J. Sustainable Min. 2018. V. 17 (3). P. 139–144.
- Han Z., Golev A., Edraki M.A.** Review of Tungsten Resources and Potential Extraction from Mine Waste // Minerals. 2021. V. 11 (7). P. 701.
- Hui W., Hao Z., Hongyan T., Wen J., Li A.** Heavy metal pollution characteristics and health risk evaluation of soil around a tungsten-molybdenum mine in Luoyang, China // Environ. Earth Sci. 2021. V. 80. P. 293.
- Liu W., Wu T., Li Z., Hao X., Lu A.** Preparation and characterization of ceramic substrate from tungsten mine tailings // Construction and Building Materials. 2015. V. 77. P. 139–144. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.094
- Lin C., Li R., Cheng H., Wang J., Shao X.** Tungsten Distribution in Soil and Rice in the Vicinity of the World's Largest and Longest-Operating Tungsten Mine in China // PLoS One. 2014. V. 9 (3). e91981.
- Msumange D.A., Msumange J.A., Bru K., Bourgeois F.** Tungsten tailings issues and reprocessing solutions // Miner. Miner Mater. 2023. V. 2 (14).
- Mulenshi J., Khavari P., Chehreh Chelgani, S., Rosenkranz J.** Characterization and Beneficiation Options for Tungsten Recovery from Yxsjöberg Historical Ore Tailings // Processes. 2019. V. 7 (12). P. 895.
- Müller G.** Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River // GeoJournal. 1969. V. 2(3). P. 108–118.
- Peng K., Yang H., Ouyang J.** Tungsten tailing powders activated for use as cementitious material // Powder Technol. 2015. V. 286. P. 678–683.

References

- Abdrakhmanov R.F., Akhmetov R.M. Hydrogeochemistry at mining districts // Geokhimiya [Geochemistry International]. 2016. 54 (9). pp. 829–840. In Russian
- Abramov B.N. Konsentratsii tyazhelykh metallov v tekhnogennykh landshaftakh Akatuevskogo polimetallicheskogo mestorozh-deniya (Vostochnoe Zabaykal'e) [The concentrations of heavy metals in the Akatuyevskoye polymetallic deposit technogenic land-scapes (Eastern Transbaikalia)] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta: Geografiya. Geoekologiya. 2018. 4. pp. 67–71. In Russian
- Abramov B.N., Eremin O.V., Filenko R.A., Tsyrenov T.G. Otsenka potentsial'noy ekologicheskoy opasnosti prirodno-teknogennykh kompleksov rudnykh mestorozhdeniy Vostochnogo Zabaykal'ya [Assessment of potential environmental hazards of natural and man-made complexes of ore deposits (Eastern Transbaikalia, Russia)] // Geosfernye issledovaniya [Geosphere Research]. 2020. 2. pp. 64–75. In Russian. doi: 10.17223/25421379/15/5
- Abramov B.N., Tsyrenov T.G. Otsenka ekologicheskoy opasnosti na okruzhayushchuyu sredu khvostokhranilishch nekotorykh sul'fidnykh mestorozhdeniy Vostochnogo Zabaykal'ya [Environmental hazard assessment on the environment of tailings of some sul-fide deposits of Eastern Transbaikalia] // Uspekhi sovremennoego estestvoznaniya [Advances in current natural sciences]. 2019. 5. pp. 35–41. In Russian. doi: 10.18411/1681-7494-2019-5-35-41
- Abramov B.N., Epova E.S., Manzyrev D.V. Geoekologicheskie problemy otrabotki rudnykh mestorozhdeniy zolota v Vostochnom Zabaykal'e [Geoecological problems of mining gold ore deposits in Eastern Transbaikalia] // Geografiya i prirodyne resursy [Geography and natural resources]. 2019. 2. pp. 110–113. In Russian. doi: 10.21782/GIPRO206-1619-2019-2(103-111)
- Barabanov V.F. Mineralogiya volframitovyh mestorozhdeniy Vostochnogo Zabaykaliya. Tom 2 [Mineralogy of tungsten deposits of East Transbaikalia. Volume 2]. Leningrad: LSU Publishing House. 1975. 360 p. In Russian
- Vinokurov S.F., Gurbanov A.G., Bogatikov O.A., Karamurzov B.S., Gazeev V.M., Leksin A.B., Shevchenko A.V., Dolov S.M., Dudarov Z.I. Contents, seasonal variations, and forms of migration of major and minor elements in surface waters in the area of the Tyrnyauz tungsten–molybdenum combine (TTMC) and adjacent areas (Kabardino-Balkarian republic, Russian Federation) and actions for recovery of the ecological environment // Doklady Earth Sciences. 2016. 467 (2). pp. 436–467. In Russian.
- Voytkevich G.V., Miroshnikov A.E., Povarennykh A.S., Prokhorov V.G. Kratkiy spravochnik po geokhimiya [Geochemistry Quick Guide]. Moscow: Nedra. 1977. 184 p. In Russian
- Goleva R.V., Ivanov V.V., Kupriyanova I.I., Marinov B.N., Novikova M.I., Shpanov E.P., Shuriga T.N. Ekologicheskaya otsenka potentsial'noy toksichnosti rudnykh mestorozhdeniy (metodicheskie rekomendatsii) [Environmental assessment of potential toxicity of ore deposits (methodological recommendations)]. Moscow: RITSVIMS.2001. 53 p. In Russian
- GOST R 70281-2022. Okhrana okruzhayushchey sredy. Pochvy. Klassifikatsiya khimicheskikh veshchestv dlya kontrolya zagryazneniya. Ofitsial'noe izdanie [State Standard 70281-2022 Environmental protection. Soils. Classification of chemical substances for pollution control]. Moscow: Russian Standards Publ. 2022. 8 p. In Russian

Mikhailenko V.N. *Problema tekhnogennykh otkhodov gornogo proizvodstva v Rossii* [The problem of technogenic wastes of mining production in Russia] // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin]. 2006. 2. pp. 121–126. In Russian

Mikhailutina S.I. *Kompleksnaya ekologo-geokhimicheskaya otsenka zagryazneniya tyazhelymi metallami komponentov prirodnykh sredy gornorudnykh poseleniy Vostochnogo Zabaykal'ya: avtoreferat dissertatsii* [Complex ecological and geochemical assessment of heavy metal pollution of environmental components of mining settlements in Eastern Transbaikalia: dissertation abstract]. Irkutsk. 2007. 21 p. In Russian

MU 2.1.7.730099 *Pochva, ochistka naselennykh mest, bytovye i promyshlennye otkhody, sanitarnaya okhrana pochvy. Gigienicheskaya otsenka kachestva pochvy naselennykh mest* [Methodological guidelines 2.1.7.730-99 Soil, cleaning of settlements, domestic and industrial waste, sanitary protection of soil. Hygienic assessment of the quality of soil in populated areas]. Moscow, Federal Centre of Gosanepidnadzor of the Ministry of Health of Russia Publ. 1999. 20 p. In Russian

Myazin V.P., Mikhailutina S.I. *Kompleksnaya otsenka tekhnogenного загрязнения почв и продуктов питания тяжелыми металлами при размещении хвостокхранилищ в Восточном Забайкалье* [Complex assessment of technogenic pollution of soils and foodstuffs with heavy metals at the location of tailing dumps in Eastern Transbaikalia] // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin]. 2006. 9. pp. 164–170. In Russian

Pitsyn A.B. *Problemy osvoeniya tekhnogennykh mestorozhdeniy Zabaykal'ya* [Problems of technogenic deposits development in Transbaikalia] // *Geologiya i mineral'no-syrye resursy Sibiri* [Geology and mineral resources of Siberia]. 2014. S3-2. pp. 128–130. In Russian

Puzanov A.V., Baboshkina S.V., Gorbachev I.V. Characteristics of heavy metal migration in the natural anthropogenic anomalies of the North-Western Altai // *Geokhimiya* [Geochemistry International]. 2012. 50 (4). pp. 393–402. In Russian

SanPiN 1.2.3685-21 Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya [SanPiN 1.2.3685-21 Hygienic norms and requirements to ensure safety and (or) harmlessness to humans of environmental factors] [Electronic resource]. 2021. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?section=text> (Date of accessed 12.02.2024). In Russian

Smirnov V.I. *Rudnye mestorozhdeniya SSSR. Tom 3* [Ore deposits of the USSR. Volume 3]. Moscow: Nedra. 1978. 496 p. In Russian

Kharitonov Yu.F. Vasiliev D.A. et al. *Ekologo-ekonomicheskaya otsenka gornopromyshlennogo kompleksa Chitinskoy oblasti* [Ecological and economic assessment of the mining complex of Chita region]. *Resursy Zabaykal'ya. Spets.vyp.* – Resources of Transbaikalia. Special issue. 2002. pp. 42–47. In Russian

Chechel' L.P. *Ekologo-gidrogeokhimicheskie posledstviya otrabotki vol'framovykh mestorozhdeniy Vostochnogo Zabaykal'ya* [Ecological and hydrochemical consequences of mining tungsten and molybdenum deposits of the eastern Transbaikalia]. *Izvestiya tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]. Geo Assets Engineering. 2017. 328 (6). pp. 52–63. In Russian

Chechel' L.P. *Formirovaniye gidrogeokhimicheskikh poley vol'framovykh mestorozhdeniy Vostochnogo Zabaykal'ya pod vliyaniem prirodnykh i antropogennykh faktorov: avtoreferat dissertatsii* [Hydrogeochemical field forming of tungsten deposits in Eastern Transbaikalia under the influence of natural and anthropogenic factors: dissertation abstract]. Tomsk, 2021. 21 p. In Russian

Chechel' L.P., Zamana L.V. *Geokhimicheskaya tipizatsiya tekhnogenno-transformirovannykh vod Bom-Gorkhonskogo vol'framovogo mestorozhdeniya (Vostochnoe Zabaykal'e)* [Geochemical typification of the Bom-Gorkhon tungsten deposit technogenic-transformed waters (East Transbaikalia)]. *Materialy chetyvertoy Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeystviya vody s gornymi porodami»* – Proceedings of the fourth all-Russian scientific conference with international participation «Water-Rock Interaction: Geological Evolution». 2020. pp 408–412. In Russian. doi: 10.31554/978-5-7925-0584-1-2020-408-412

Shvartsev, S.L. *Gidrogeokhimiya zony gipergeneza: 2-e izd., ispravl. i dop.* [Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone: 2nd edition, corrected and supplemented.]. Moscow: Nedra. 1998. 366 p. In Russian

Yurgenson G.A. *Geologicheskie issledovaniya i gorno-promyshlennyy kompleks Zabaykal'ya: Istoriya, sovremennoe sostoyanie, problemy, perspektivy razvitiya. K 300-letiyu osnovaniya Prikaza rudokopnykh del* [Geological researches and mining industrial complex of Transbaikalia: History, current state, problems, prospects of development. To the 300th anniversary of the foundation of the Order of Mining]. Novosibirsk: Nauka. 1999. 574 p. In Russian

Clemente D, Newling P, Botelho d.S.A, Lejeune G, Barber S, Tucker P. Reprocessing slimes tailings from a tungsten mine. Miner. Eng. 1993. 6. pp. 831–839. doi:10.1016/0892-6875(93)90057-T

Figueiredo J, Vila M.C., Matos K., Martins D., Futuro A., Dinis M.d.L., Góis J., Leite A., Fiúza A. Tailings reprocessing from Cabeço do Pião dam in Central Portugal: A kinetic approach of experimental data. J. Sustainable Min. 2018. 17(3). pp. 139–144. doi: 10.1016/j.jsm.2018.07.001

Han Z., Golev A., Edraki M.A. Review of Tungsten Resources and Potential Extraction from Mine Waste. Minerals. 2021. 11(7): 701. doi: 10.3390/min11070701

Hui W., Hao Z., Hongyan T., Wen J., Li A. Heavy metal pollution characteristics and health risk evaluation of soil around a tungsten-molybdenum mine in Luoyang, China. Environ. Earth Sci. 2021. 80: 293. doi: 10.1007/s12665-021-09539-0

Liu W., Wu T., Li Z., Hao X., Lu A. Preparation and characterization of ceramic substrate from tungsten mine tailings. Construction and Building Materials. 2015. 77. pp. 139–144. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.094

Lin C., Li R., Cheng H., Wang J., Shao X. Tungsten Distribution in Soil and Rice in the Vicinity of the World's Largest and Longest-Operating Tungsten Mine in China. PLoS ONE. 2014. 9(3): e91981. doi: 10.1371/journal.pone.0091981

Msumange D.A., Msumange J.A., Bru K., Bourgeois F. Tungsten tailings issues and reprocessing solutions. Miner. Miner Mater. 2023. 2:14. doi: 10.20517/mmm.2023.21

Mulenshi J., Khavari P., Chehreh Chelgani, S., Rosenkranz J. Characterization and Beneficiation Options for Tungsten Recovery from Yxsjöberg Historical Ore Tailings. Processes. 2019. 7(12): 895. doi: 10.3390/pr7120895

Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. GeoJournal. 1969. V. 2(3). pp. 108–118.

Peng K., Yang H., Ouyang J. (2015) Tungsten tailing powders activated for use as cementitious material. Powder Technol. 286. pp. 678–683. doi: 10.1016/j.powtec.2015.09.012

Информация об авторах:

Абрамов Б.Н., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория геохимии и рудогенеза, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия.

E-mail: b-abramov@mail.ru

Цыренов Т.Г., младший научный сотрудник, лаборатория геохимии и рудогенеза, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия.

E-mail: master.of.pistols@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Abramov B.N., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Laboratory of Geochemistry and Ore Genesis, In-Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, SB RAS, Chita, Russia.

E-mail: b-abramov@mail.ru

Tsyrenov T.G., Junior Researcher, Laboratory of Geochemistry and Ore Genesis, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, SB RAS, Chita, Russia.

E-mail: master.of.pistols@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.02.2024; одобрена после рецензирования 07.04.2025; принята к публикации 02.06.2025

The article was submitted 14.02.2024; approved after reviewing 07.04.2025; accepted for publication 02.06.2025

Original article
doi: 10.17223/25421379/35/9

RIVER BASINS OF THE CRIMEAN PENINSULA: SPATIAL DIFFERENTIATION IN AGROECOLOGICAL STATE AND RISKS OF SOIL DEGRADATION

Zhanna A. Buryak¹, Anastasia G. Narozhnyaya², Arseniy O. Poletaev³



¹ Kazan (Volga Region) Federal University, Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management, Kazan, Russia

^{2, 3} Belgorod State National Research University, Institute of Earth Science, Belgorod, Russia

¹ buryakzh@gmail.com

² narozhnyaya_a@bsu.edu.ru

³ poletaev@bsu.edu.ru

Abstract. The article is devoted to the study of the agroecological state of the river basins of the Crimean Peninsula's agricultural zone and their typification by the occurrence of soil degradation processes and the degree of the anthropogenic impact using the basin approach. The basins of fourth order (according to the Straler-Filosofov system) were used as the basic assessment units (with the exception of the territory of Mountainous Crimea and the Southern Coast basins). Using geoinformation systems and remote sensing data, an analysis of the spatial distribution of eight indicators was carried out: forest cover, pressure coefficient, erodedness coefficient, the share of saline soils, karst cavities areas density, LS-factor, elevation difference, and drainage density. For an objective identification of basin types, the kernel K-means clustering method was chosen implemented in the ArcGIS software. It has been found out that two key attributes of soil degradation, including erodedness and salinity levels, have a strong influence on distinction of groups from each other. Forest cover and geomorphological factors (LS-factor and elevation difference) have a noticeable influence. Pressure coefficient and karst cavities areas density does not have a significant impact on the identification of types.

As a result, four spatially homogeneous basin groups were identified. Basins with soil salinization (34 % of the study area) are located east of the Bakal Peninsula along the northern border of Crimea, including the Syvash region and the entire Kerch Peninsula. It is characterized by the biggest share of saline soils (92,2 %) with a minimum erodedness coefficient (0,02) in the soil cover structure and low forest cover (0,6 %). Basins with maximum agricultural load (38 %) are located in the central part of the Crimean Plain. These territories are more involved in crop production than the other areas due to favorable geomorphological and soil and climatic conditions. It has been found that 77 % of the territory of this type is plowed up or allocated to gardening and viticulture. Basins with water erosion risk (21 %) are located predominantly along the foot of the northwestern macroslope of the Crimean Mountains and in northwestern Crimea. It is most eroded one compared with the (0,25), and geomorphological conditions create increased risks of water erosion processes, as evidenced by high values of the LS-factor (0,9) and elevation difference (75,3 m). For basins with an increased risk of exogenous geomorphological processes (7 %) characterized by the greatest distribution of karst. Specific land use problems have been identified for each type of basin, and ways to address them have been proposed. In terms of the land management, the identified territorial groups of basins can serve as primary differentiation units for priority soil protection measures.

Keywords: river basin, Crimea, typification, soil degradation, land use, GIS

Source of financing: This research was funded by the Strategic Academic Leadership Program "Priority 2030" of the Kazan Federal University and by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of State Assignment No. FZWG-2023-0011.

For citation: Buryak Zh.A., Narozhnyaya A.G., Poletaev A.O. (2025) River basins of the Crimean Peninsula: Spatial differentiation in agroecological state and risks of soil degradation. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2. pp. 114–125. doi: 10.17223/25421379/35/9

Научная статья

УДК 504.062

doi: 10.17223/25421379/35/9

РЕЧНЫЕ БАССЕЙНЫ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА: ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ПО АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ И РИСКАМ ПОЧВЕННОЙ ДЕГРАДАЦИИ

Жанна Аркадьевна Буряк¹, Анастасия Григорьевна Нарожняя², Арсений Олегович Полетаев³

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт экологии, биотехнологии и природопользования, Казань, Россия

^{2,3} Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Институт наук о Земле, Белгород, Россия

¹ buryakzh@gmail.com

² narozhnyaya_a@bsu.edu.ru

³ poletaev@bsu.edu.ru

Аннотация. Исследовано агроэкологическое состояние речных бассейнов земледельческой зоны Крыма и их типизация по проявлению почвенно-деградационных процессов и степени антропогенной нагрузки с использованием бассейнового подхода. Выполнен анализ пространственного распределения почвенных, геоморфологических и эколого-хозяйственных показателей. Проведена группировка бассейнов, которая может быть использована для планирования по эколого-реабилитационного землепользования.

Ключевые слова: речные бассейны, Крым, типизация, деградация почв, землепользование, ГИС

Источник финансирования: работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» Казанского (Приволжского) федерального университета и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № FZWG-2023-0011.

Для цитирования: Buryak Zh.A., Narozhnyaya A.G., Poletaev A.O. River basins of the Crimean Peninsula: Spatial differentiation in agroecological state and risks of soil degradation // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 114–125. doi: 10.17223/25421379/35/9

Introduction

Over the past decade, the state of the Crimean agricultural sector has undergone significant transformations under conditions of the changing socio-economic situation. The high agro-climatic potential of the peninsula brings about favorable conditions for development of crop production, which has resulted a high degree of the agricultural development: a third of Crimea's land is allocated for the cultivation of field crops, orchards, and vineyards. Even the closure of the North-Crimean Canal which provided up to 85 % of the Crimean Peninsula's water demand did not lead to the crop production area reduction. This is connected with the overall economic growth and the absorption of unused lands: there was an increase in the farmland area by 14 % from 2015 to 2020.

Alongside the intensive development of the agricultural sector in the peninsula, conditions are brought about for risky farming associated with the strengthening of soil degradation processes [Ergina et al., 2023], including those which have intensified during the period of the fresh water shortage [Tabunshchik et al., 2021]. Negative changes in the Crimean soil resources are caused by intensive plowing, leaving the surface without vegetation, irrigation without drainage systems, non-compliance with the balance of nutrients, and the use of heavy cultivating

equipment. Meanwhile, there are also problems in the spatial land use management in: the system of land use is disrupted, all the previously used lands are not absorbed, stripped farming, curvedness, complex configuration, wedging, outland, and interspersion have been found.

Soil degradation is included in the list of key threats in the Strategy for Environmental Security of the Russian Federation until 2025. This is also reflected in the Strategy of Social and Economic Development of the Republic of Crimea until 2030, which states that the soil fertility decline and reforestation work extent reduction impedes the formation of a sustainable natural environment. However, soil management practice often underestimates the significance of the declared threats. Thus, according to Rosstat, environment protection costs in the agricultural sector of the Republic of Crimea have decreased 5 times since 2015, and in 2021 they constituted less than 0,1 % of the total costs of environmental protection activities in the region.

With the rapid development of the agricultural sector in the region, a balanced approach is required to solving soil and water protection problems and forming a sustainable land use. Various methods of rational territorial organization and its assessment were previously proposed for the Crimean territory, such as land zoning according to agro-ecological characteristics [Badenko et al., 2020;

Melnichuk, Zackalichnaya, 2021], landscape planning within the boundaries of administrative-territorial entities [Kalinchuk, Kudrian, 2019], as well as the basin approach [Ivankova, 2020; Buryak, 2021; Tabunshchik et al., 2022].

We see the basin approach as the most optimal way to solve the problems of preserving the soil and water resources of the territory. The basin concept of nature use combines the principles of landscape planning with keeping track of the hydrological features of the catchment basin [Lisetskii, 2021; Dmitrieva, Zhigulina, 2020]. This approach provides the implementation of comprehensive solutions to protect soils and water in entire river basins, including through regulation of surface water drainage, the water flow through soils, and soil erosion in agricultural landscapes [Lisetskii, Buryak, 2023].

When carrying out land management activities, the zoning of the territory is especially important. Fundamental zoning units include ecological and economic zones, similar areas in terms of ecological and economic characteristics, and homogeneous areas [Komarov et al., 2019; Nabati et al., 2020]. An important feature of identifying agroecological areas of the same type is that their boundaries are brought to light not by random or statistical, but by genetically predetermined features of the territory, which bring about the natural and historical interconnection of individual parts of the same type of area and their interdependence in the chain of economic ties. A river basin can be such a unit.

The river basin as an integral natural formation, which is a meeting point for flows of substances and energy, is to be considered from the perspective of operational territorial units of integrated environmental monitoring. In recent years, sustainable land use has been justified not for individual economic areas but within the boundaries of complete basins that integrate separate subsystems of landscape architecture according to common features of hydrofunctioning [Mukharamova et al., 2020; Yermolaev et al., 2022; Buryak et al., 2022].

When zoning, agroecological resources should be reviewed in close connection with forest, water, recreational, managerial and business resources to reflect the set of all conditions for the development of the agroindustrial complex [Novikov, Novikov, 2021]. The objective of environmental zoning is to identify the compliance of the proposed land use options with their natural potential. Zoning should establish the environmental priorities and constraints that should be followed when using them in order to prevent the occurrence of environmental problems.

The purpose of the study was an integral assessment of the environmental and resource condition of the Crimean Peninsula using the basin approach, typification of river basins by the agroecological state and development

of degradation processes to substantiate soil and water protection measures.

Materials and methods

The study area. Provide The Crimean Peninsula in the south of the East European Plain with a relatively small area (about 27,000 square kilometers) is characterized by a high natural and landscape diversity (Fig. 1). The barrier effect of the Crimean Mountains in the south of the peninsula forms a sort of “reverse” zonality of the Plain Crimea: in the north of the peninsula, there are semi-desert steppe locations: further to the south, typical steppe, then forest-steppe and forest locations are found landscapes [Pozachenyuk, 2019]. The history of agrarian development of Crimea lands is as long as several thousand years. There was a significant change, especially in the natural landscapes on the peninsula during the Great Greek Colonization of Northern Black Sea coast, when several major agricultural zones emerged in Crimea and the subsequent agricultural impacts on the soils continued for a millennium [Lisetskii, 2019].

The study covered the basins where land use was dominated by the arable farming sector: the Plain Crimea (including North Crimean Lowland steppe, Tarkhankut Upland, Central Crimean Plain steppe and Kerch hilly-ridged steppe) and Foothill forest-steppe. The Crimean Mountains and South Coast of Crimea were not analyzed in this study since they have more tourist and recreational specificity of land use.

The authors analyzed Crimea's basin structure [Lisetskii, et al., 2020] by using GIS based on the processing of *SRTM* (Shuttle radar topographic mission) data with a resolution of 3 arc seconds with detailing by using topographic maps at a scale of 1 : 100,000. *SRTM* resolution is suitable for studies of this scale, and its spatial analysis provides the necessary details and helps to define accurately the boundaries of the basins [Esin et al., 2021] and its morphometric characteristics.

The automatic analysis of the digital elevation model (*DEM*) identified 6 000 erosional forms of various hierarchies. Their watersheds were grouped at the level of 4th order basins (according to the Straler-Filosofov system) (Fig. 2).

For the Crimean Plain, permanent watercourses function, starting mainly from the 4th basin order, which occupy 52 % of the territory of the peninsula. In addition to the 4th basin order, individual basins of 1st-3rd order (if the mouth of the main erosional form was adjacent to the coastline) and the 5th and 6th order territories situated near the riverbed were identified. The coastline also has areas with runoff towards the sea without a pronounced main erosion form, which were not involved in the analysis.

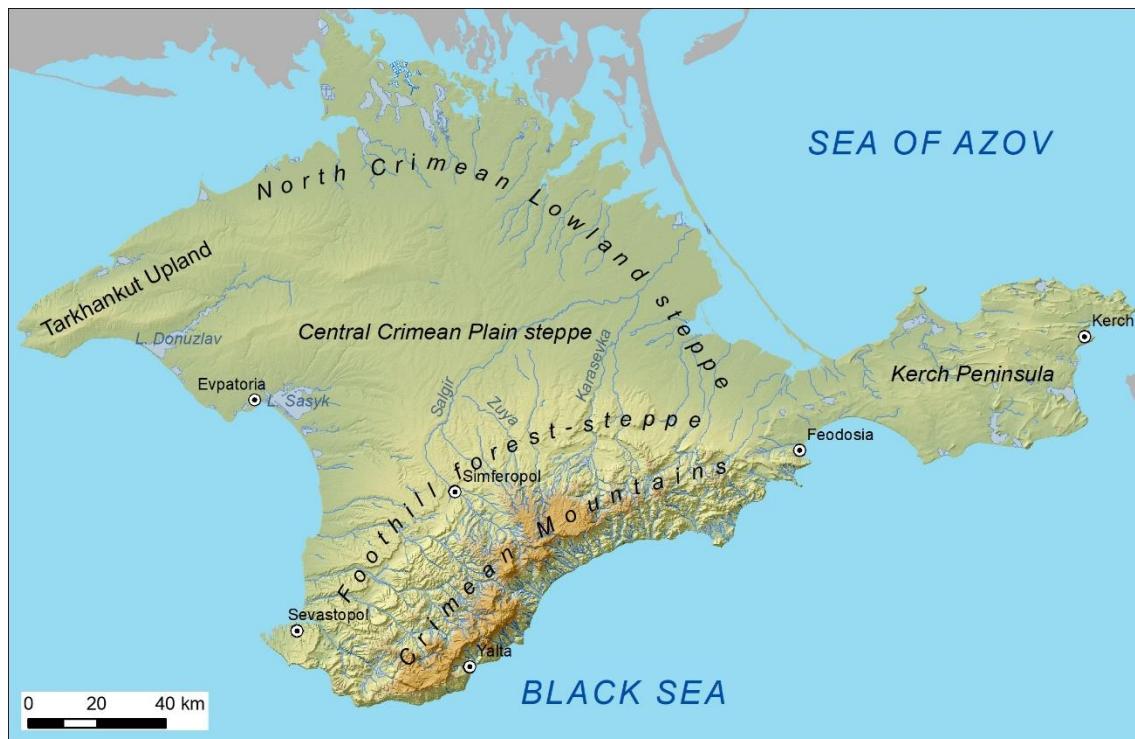


Fig. 1. Physical map of the Crimean Peninsula

Рис. 1. Физическая карта полуострова Крым

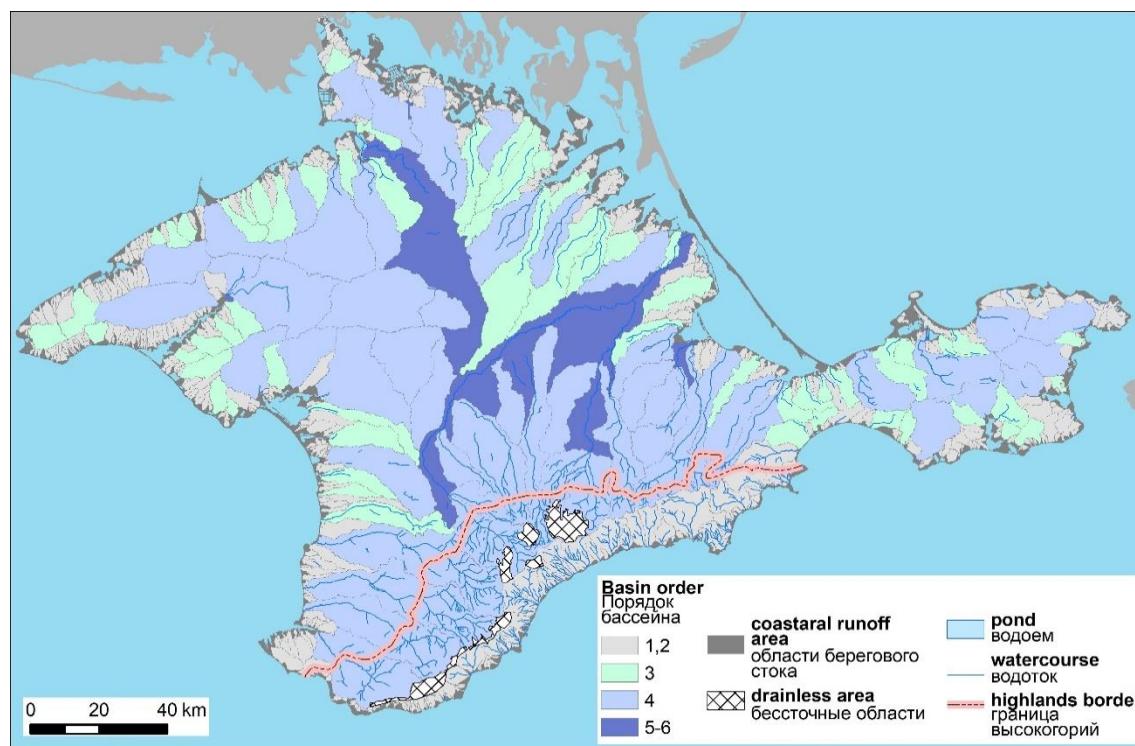


Fig. 2. The river basins structure of the Crimean Peninsula

Рис. 2. Структура речных бассейнов полуострова Крым

Note that the basins of the northwestern macroslope of the Crimean Mountains have very different land use specifics depending on the landscape zone. In such cases,

averaging of the evaluation parameters across the entire territory of the basin may decrease the accuracy of the typification results. Therefore, such basins were divided

into a piedmont-plain part, where the main areas of anthropogenically transformed lands are concentrated, and a mountain part, which was not included in the analysis.

Typification methodology. A geodata base was generated for Crimea territory based on remote sensing data and the global digital elevation model [Buryak, 2021]. Using the spatial analysis, a component-by-component assessment of the natural and economic conditions in the Crimean river basins was carried out. The general scheme of the study is presented in figure 3.

To identify the main groups of basins with similar specific features of degradation processes, geomorphological conditions, and the degree of anthropogenic transformation of landscapes, eight indicators were selected, including forest cover, pressure coefficient, erodedness coefficient, the share of saline soils, karst cavities areas density, LS-factor, elevation difference, and drainage density.

High-resolution satellite images from the Google Earth resource were used to analyze the agricultural land structure.

After interpretation and vectorization, the land cover types were identified: arable farming (farmland, former paddy fields, orchards and vineyards), buildings (settlements, garden areas with buildings, industrial facilities, roads, individual complexes of structures, and other facilities), natural agricultural areas (herbaceous vegetation, trees and shrubs), water bodies, disturbed lands (quarries, dumps and cemeteries).

The forest cover indicator is expressed as a share of the area covered with trees and shrubs (including forest belts) of the total basin area. The pressure coefficient K [Kochurov, 1999; Chibilyov et al., 2022], expresses the ratios of farmland types, i.e. anthropogenically transformed territories, to the ecological fund lands, affecting the stability of the natural environment (1):

$$K = S_1/S_2, \quad (1)$$

where S_1 – area of destabilizing land (building land, disturbed land, farmland, orchards and vineyards); S_2 – area of stabilizing lands (forests, shrubs, herbaceous vegetation, swamps, and water bodies).

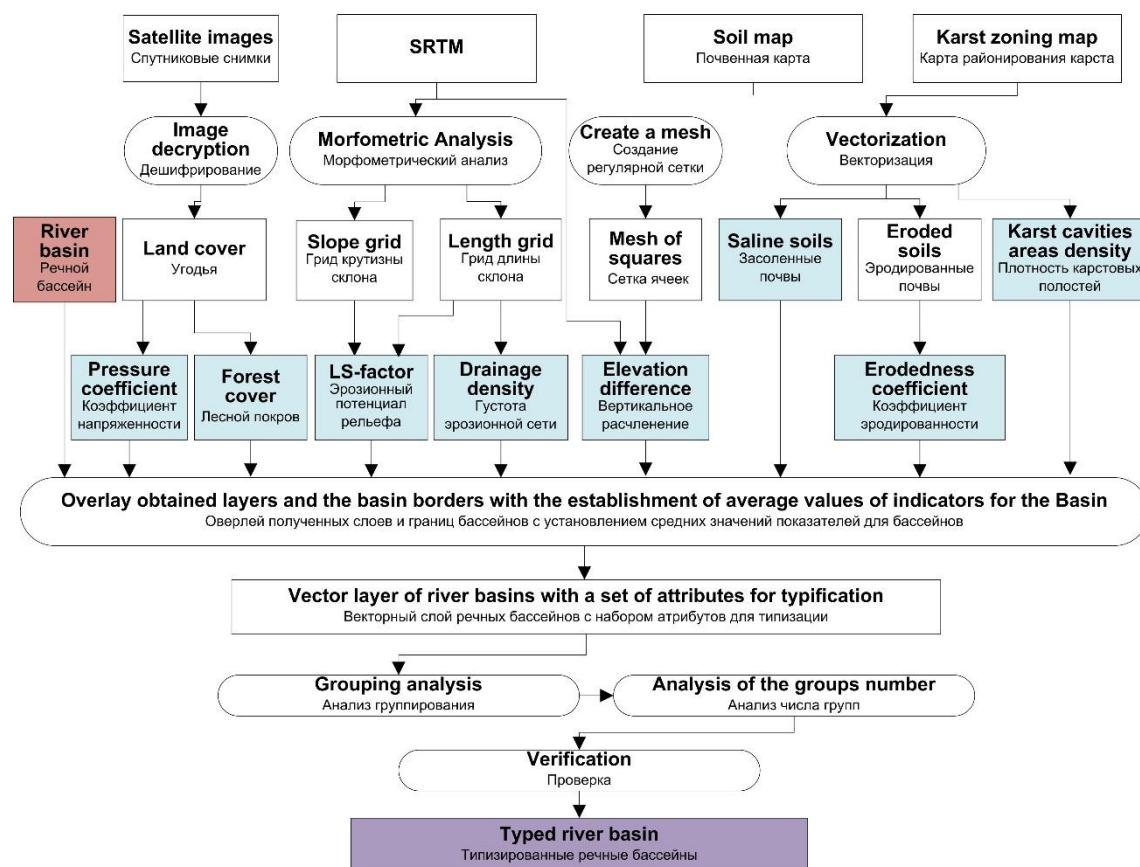


Fig. 3. The GIS-analysis scheme for river basins typification

Рис. 3. Схема ГИС-анализа для типизации речных бассейнов

To determine the share of saline soils and degree of erosion, a vector soil map [Soil map..., 2023] of the Ukrainian SSR in 1967 at a scale of 1:200,000 was used.

The nomenclature of the map makes it possible to determine the share of erosion in each soil contour and the presence of salinization processes. The total areas of soils

subject to salinization of different intensity were calculated for each basin. To demonstrate the degree of erosion, a more differentiated approach was used, which took into account the contribution of soils with different degrees of erosion to the decrease in the potential fertility level. The calculation is based on summarizing the results of more than twenty studies of changes in soil properties and crop yields under the impact of erosion [Lisetskii et al., 2012]. According to them, the decrease in the grain crop yields on soils with a weak, medium and strong degree of erosion is on average 19, 36 and 54 %, respectively. For each basin, the shares of soils corresponding to the erosion degree were calculated and the weighted average erodedness coefficient was also calculated, which shows the yield decrease percentage depending on the soil erosion.

The distribution of karstic phenomena was estimated based on the previously conducted regional zoning and the inventory of karst cavities [Vakhrushev et al., 2022]. For 1604 areas of karst process occurrence with a total length of 118,3 km, the density of karst cavities was estimated for each basin (in km per sq km).

SRTM data with a resolution of 3 arc seconds were selected as the initial elevation data. The LS-factor is a relief potential for water erosion, it combines slope length and slope angle influence on soil loss in the *USLEM* empirical model [Morgan, 2005] according to the formula (2):

$$LS = \frac{\sqrt{L}}{100} (1.38 + 0.965 \cdot S + 0.138 \cdot S^2), \quad (2)$$

where LS – relief erosion potential; L – slope length, m; S – slope steepness, degrees.

The value of elevation difference was calculated as the weighted average difference between the maximum and minimum values of the absolute height across the basin. For this purpose, a grid of 3×3 km squares was built. The choice of the cells size is substantiated by the minimum mean normalized error compared with other square sizes. The elevations for each square were calculated using *SRTM*. Next, we took the kriging interpolation method as a basis to construct a vertical terrain dissection map based on elevation difference within a cell.

The analysis of the drainage density was carried out according to the runoff accumulation model, which shows the number of cells up the slope from which the runoff can flow into each subsequent lower cell. Cells with a total runoff of 200 or more cells (126 ha of the overlying catchment area for *SRTM* resolution) were identified as erosion network elements. The results were updated by using topographic maps on a scale of 1 : 100,000, with special attention to the Syvash area basin. The drainage density for each basin was calculated as the ratio of the total length of its erosion network to the basin area.

Among many methods of clustering algorithms [Ezugwu et al., 2022], the clustering algorithm based on partition, in particular, the K-means algorithm, is most suitable for the purposes of typification in this study. The basic idea of kernel K-means is to take advantage of the kernel method and the original clustering algorithm, transforming the original data into a high dimensional feature space by nonlinear kernel function in order to carry out the original clustering algorithm. The work [Różcka, Migoń, 2021] describes the stages of using the method for river basins, including the selection and assessment of indicators, correlation analysis, re-selection of indicators, the grouping procedure, and grouping verification and evaluation. Using this approach helped qualitatively identify significantly different groups.

This clustering model was implemented in *ArcGIS* 10.5, software package, which was used in the study. *Grouping Analysis* tool of *Clustering Calculation* subset of the *Spatial Statistics* toolbox was used. The vector layer of river basins with the entered parameters for each indicator was used as input data. No spatial constraints were applied for the objects when setting the parameters. It means that the basins do not have to be located next to each other to be included in the same group. When grouping, the calculation algorithm standardizes the values in the analysis fields, since variables with a high degree of variability have a greater impact on clustering than variables with less variability. Standardization involves a z-transformation, where each value is subtracted from the mean of all values and divided by the standard deviation of all values. Standardization allows using different types of input data, such as coefficients, shares, and absolute indicators. The optimal number of groups to classify best the similarities and differences of objects was measured using Calinski-Harabasz pseudo F-statistics, which also reflects the similarity of objects within a group and the difference between groups.

Results and discussion

Analysis of typification indicators. The total forest cover of Crimea, including woodlands, trees and shrubs and man-made forests, is about 12 %. The forest cover of the basins decreases naturally from the foothills to the plain. If the high-mountainous areas and the southern coast of Crimea are excluded from the total forest cover analysis, the indicator for the agrarian developed territory will be 3,3 %.

In terms of the land cover ratios, most of the peninsula (62 %) is characterized by the high pressure ($K > 2,4$) (Fig. 4, d). It is represented by the agricultural basins in the central part of the peninsula, where the anthropogenic load is formed by plowed areas. The pressure close to the optimal one ($K = 0,7-1,3$) is typical for the Kerch Peninsula and Tarkhankut, which is explained by the extensive

areas of natural herbaceous vegetation and fallow lands not used in agriculture. The basins of the mountainous zone have the highest environmental stability, since the share of anthropogenically transformed lands here is reduced to a minimum.

In total, 35 % of the Crimean territory (9,000 sq km of soils) are exposed to salinization processes of different intensity (Fig. 4, b). These soils are represented by chernozems, kastanozems and fluvisols of varying degree of salinity. In addition, 5,4 % of the soil cover is represented by solonetz and solonchak soils. Basins with a high share of salinated soils form a belt from the Bakal Peninsula along the northern border of Crimea, including the Syvash region and the entire Kerch Peninsula.

Eroded agricultural landscapes occupy 13,200 sq km, which amounts to 52 % of the peninsula area (Fig. 4, a). The agricultural lands in Crimea are prone predominantly to wind deflation; their area is 5,6 times larger than that of lands with water erosion degradation [Ergina et al., 2023]. Deflation processes are typical of areas with insufficient moistening and low relative air humidity (southern and dry steppe). The most eroded basins are at Foothill forest-steppe and Tarkhankut elevated Plain.

The combination of insignificant elevations and flat surfaces in the plain part forms low values of the LS-factor averaging 0,61 (Fig. 4, c). The basins of western Tarkhankut have a higher LS of 0,7. In the Foothills, the relief function is the highest one (2,2), but does not reach the critical values (4,3–5,2) set in [Malyshev, Goleusov, 2019].

On average, the drainage density of the territory is $0,61 \pm 0,19$ km/sq km. In the plain part of Crimea, the erosion network consists of hollows, shallow ravines and gullies, and rivers. The northern part of the peninsula has a lower erosion network density and, therefore, a higher probability of replenishment or of a potential groundwater zone existence. The insignificant the erosion network density leads to a coarse texture of the basin with highly permeable soil and relatively better vegetation cover and low relief. In the central and western part of the Crimean Plain there is a developed ravine-beam network with low values of the river network density, i.e. a large amount of precipitation does not stop in this area. When designing basin natural resource management, it is important to prevent the development of ravine and gully networks and to preserve as much soil moisture as possible for agricultural production.

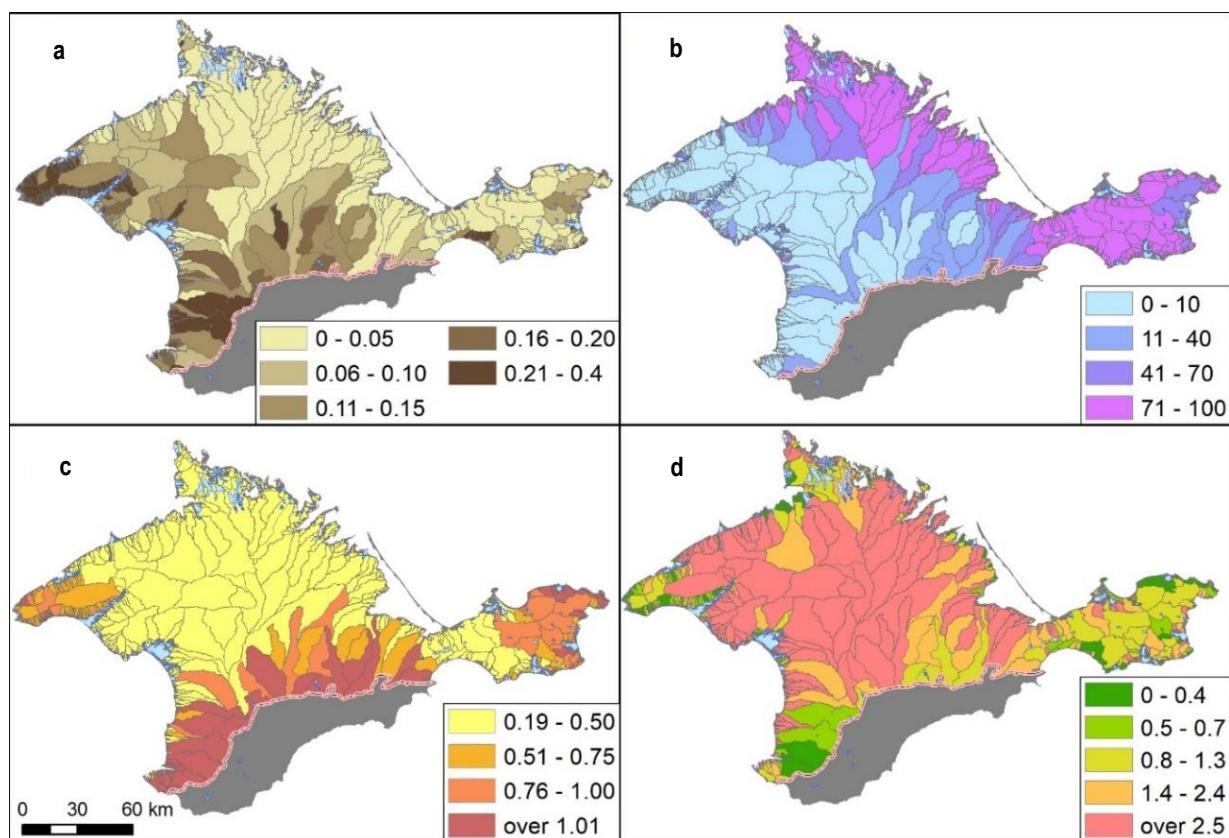


Fig. 4. Distribution of the key typification indicators within the boundaries of the Crimean river basins
Legend: a – erodedness coefficient; b – the share of saline soils, %; c – LS-factor; d – pressure coefficient

Рис. 4. Распределение ключевых показателей типизации в границах речных бассейнов Крыма

Условные обозначения: а – коэффициент эродированности; б – доля засоленных почв; в – эрозионный потенциал рельефа; д – коэффициент напряженности

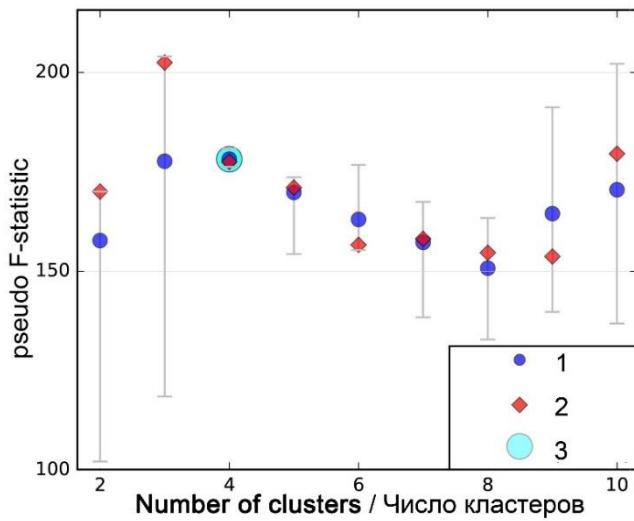


Fig. 5. Calinski–Harabasz pseudo F-statistics plot

Legend: 1 is mean; 2 is median; 3 is max mean

Рис. 5. График псевдо-F-статистики Калински–Харабаза

Условные обозначения: 1 – среднее; 2 – медиана; 3 – максимальное среднее

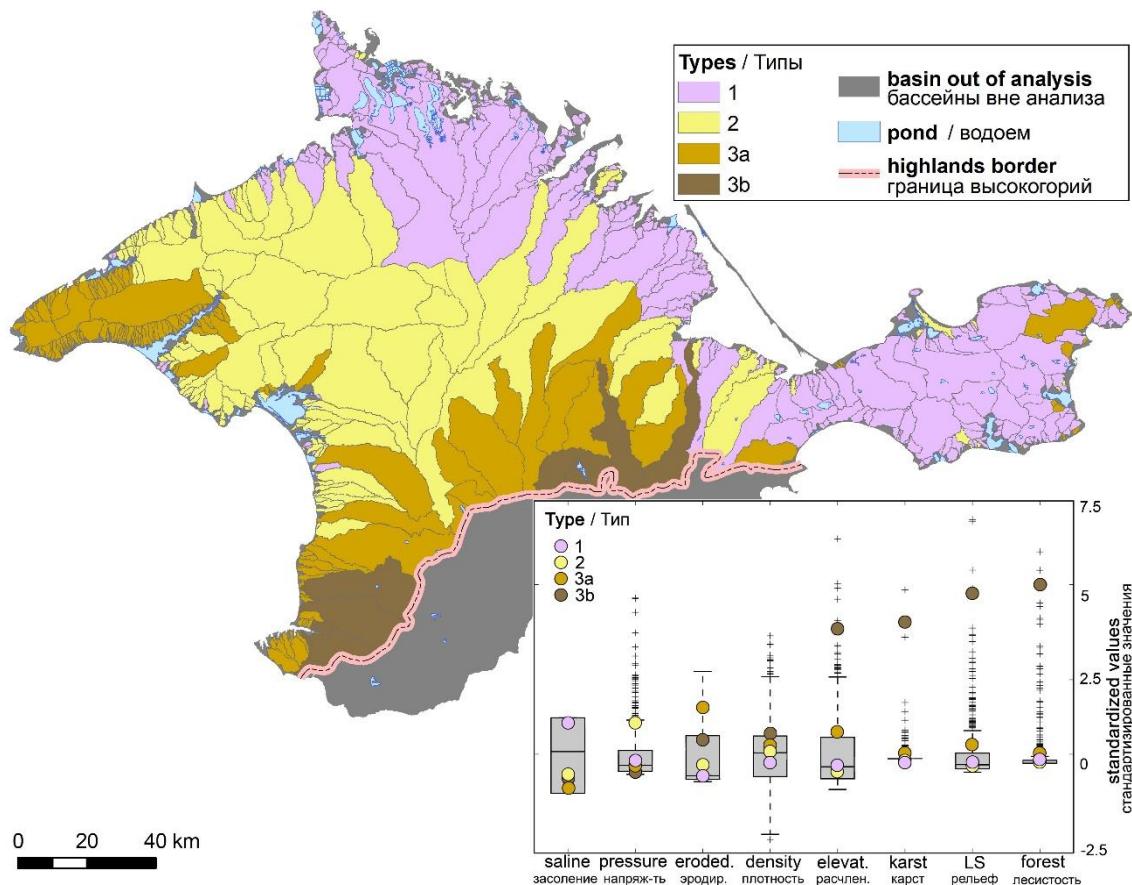


Fig. 6. Typed basins of Crimea by agroecological condition and development of soil degradation processes

Рис. 6. Типизация бассейнов Крыма по агроэкологическому состоянию и развитию почвенно-деградационных процессов

Values of the typification parameters for the selected basin types

Значения параметров типизации для выделенных типов бассейнов

Typification parameters	R ²	Types			
		1	2	3a	3b
Forest cover, %	0,59	0,6±2,4	0,7±2,7	1,9±4,8	35,6±18,7
Pressure coefficient	0,27	2,6±2,9	10,7±11,7	1,6±2,0	0,5±0,4
Erodedness coefficient	0,75	0,02±0,03	0,06±0,05	0,25±0,08	0,14±0,09
Saline soils, %	0,78	92,2±15,1	23,0±33,6	5,7±15,3	19,7±28,0
Karst cavity density, km/sq km	0,36	0,12±0,04	0,12±0,03	0,30±0,43	5,7±7,2
LS-factor	0,58	0,5±0,4	0,4±0,1	0,9±0,6	4,9±2,4
Elevation difference, m	0,54	33,7±31,8	27,7±11,1	75,3±28,9	201,2±45,6
Drainage density, km/sq km	0,06	0,55±0,19	0,62±0,20	0,66±0,26	0,74±0,16
Area, thou sq km	—	7,0	7,7	4,4	1,4
Number of basins	—	272	130	152	13

Note. The color highlight of cells shows parameters that define the features of each identified group.

Примечание. Цветное выделение ячеек указывает на главные параметры, определяющие особенности каждой выделенной группы.

Five stages of elevation difference have been identified for plain zone. The maximum values are on the Tarhankut and Kerch peninsulas, while the minimum values are in the eastern and northern parts of the North Crimean lowland.

The overwhelming majority of karst cavities are located within Ai-Petrinskaya, Yaltinskaya, Nikitskaya Yailas, Babugan-yaila, Chatyr-Dag Yaila, Demerdzhii-yaila, Dolgorukovskaya Yaila and Karabi-yaila. In agriculturally developed basins, karst processes are found only in the Foothills area; the average karst cavity density ranges from 1 to 4 km/sq km. In the Plain Crimea, karst cavities also exist; their average density is 0,12 km/sq km.

Typification results. The results of calculating Czajinski-Harabasz pseudo F-statistics show that pseudo F-statistics reach the highest values for 4 groups (see Fig. 5). Therefore, clustering was carried out for this number of types.

The results of the basin type spatial distribution and the analysis of their values of the indicators are given in figure 6 and table.

The analysis shows that the strongest effect ($0,7 < R^2 < 0,9$) on the difference of groups from each other is provided by two key signs of soil degradation, i.e. soil erodedness and salinization. Slightly less, but noticeable ($0,5 < R^2 < 0,7$) influence has the forest cover and geomorphological factors, i.e. LS-factor and elevation difference. The intensity coefficient and karst cavity density do not significantly affect the group identification. And the drainage density parameter can be excluded from the analysis.

The types of basins shaped spatially rather homogeneous groups, despite the fact that this criterion was deliberately not set in the analysis. In some cases, the basins

are isolated from the main massif of their type; the reason for this is the wide variety of soil and geomorphological conditions of the peninsula. We will consider below the features of the identified types of basins.

Type 1 – Basins with soil salinization. This type is located east of the Bakal Peninsula along the northern border of Crimea, including the Syvash region and the entire Kerch Peninsula (34 % of the study area). It is characterized by the biggest share of saline soils (92,2 %) with a minimum erodedness coefficient (0,02) in the soil cover structure and low forest cover (0,6 %). When developing soil and water protection facilities in the territory, it is necessary to pay attention to reclamation and agro-engineering measures aimed at combating salinization, especially with an increasing share of irrigation in these areas. Efficiency is increased by the combined implementation of various actions. Comparison of ameliorative effects and duration of after effects showed their increase in the following order: chemical reclamation of irrigation water, chemical land reclamation and ameliorative plowing.

Type 2 – Basins with the maximum agricultural pressure. This largest group of basins occupies 38 % of the study area and is located in the central part of the Crimean Plain. These territories are more involved in crop production than the other areas due to favorable geomorphological and soil and climatic conditions. It has been found that 77 % of the territory of this type is plowed up or allocated to gardening and viticulture. As a consequence, the highest pressure coefficient of 10,7 is set for this type. The share of afforestation is 0,7 %, including field protective forests, which is insufficient to preserve soil fertility. The priority task for these basins should be to reduce the anthropogenic load through the use of soil-protective crop rotations on degraded arable lands or their

conservation, reclamative afforestation, including planting windbreaking forest belts and increasing the water protection forest cover along the banks of rivers and water bodies. In some basins of this type, it is also necessary to take reclamation measures to prevent salinization, including the secondary one (23 % of soils are exposed to salinization).

Type 3 – Basins with water erosion risk. Basins of this type occupy 28 % of the study area and form two clusters: along the foot of the northwestern macroslope of the Crimean Mountains and in northwestern Crimea (west of the Tarkhankut Peninsula and the southern shore of Lake Donuzlav). There are also separate basins in the east of the Kerch Peninsula.

Subtype 3a is the most eroded one compared with the (0,25), and geomorphological conditions create increased risks of water erosion processes, as evidenced by high values of the LS-factor (0,9) and elevation difference (75,3 m). The territories are used quite actively in agricultural production (32 %) and require widespread anti-erosion actions. They include the contour organization of the ploughland, the surface runoff control, anti-erosion forest belt planting, the grassing of hollows on the ploughland.

Subtype 3b – Basins with increased risk of exogenous geomorphological processes. This is the smallest group of basins occupying 7 % of the territory and has only 13 facilities. In terms of all manifestations of negative processes taken together, it is very similar to subtype 3a. However, it has its own distinctive features: the basins of

this subtype are located on elongated forested (35,6 %) mountain spurs, so extremely high average indicators of LS-factor (4,9) and elevation difference (201,2 m) are set here. This particular subtype is characterized by the greatest occurrence of karst processes. Therefore, special attention should be paid to combating water erosion and karst formation on the few lands used for agriculture (25 % of the territory).

Conclusions

Data on soil degradation processes and land use features of the Crimean river basins are summarized. The advantage of the study is using the clustering algorithm kernel K-means method, which allows to identify in a balanced manner groups of objects that are homogeneous in terms of the totality of indicators. This helped identify four types of basins with a common specific characteristics of degradation processes and the degree of anthropogenic transformation of landscapes based on the ratio of geomorphological, soil, and environmental conditions. Specific land use problems have been identified for each type of basin, and ways to address them have been proposed. In terms of the land management, the identified territorial groups of basins can serve as primary differentiation units for priority soil protection measures. The results of the study can serve as the basis for developing standard scenarios of soil and water protection arrangement of the Crimean agricultural territory.

References

- Badenko V., Topaj A., Medvedev S., Zakharova E., Dunaeva I. Estimation of agro-landscape productivity in regional scale using dynamic crop models in a GIS-environment / Landscape Modelling and Decision Support. Innovations in Landscape Research, Ed. Mirschel, W., Terleev, V., Wenkel, KO. Cham, Springer, 2020. pp. 545–566. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37421-1_28
- Buryak Z., Lisetskii F., Gusarov A., Narozhnyaya A., Kitov M. Basin-scale approach to integration of agro- and hydroecological monitoring for sustainable environmental management: a case study of Belgorod oblast, European Russia // Sustainability. 2022. V. 14(2). pp. 927. <https://doi.org/10.3390/su14020927>
- Buryak Zh. The geographic information system on the environmental and economic state of the river basins of the Crimea // 21th International Multidisciplinary Scientific GeoConference – SGEM 2021. Conference proceedings. Water resources, forest, marine and ocean ecosystems. Iss. 3.1. Vienna, 2021. pp. 369–376. <https://doi.org/10.5593/sgem2021/3.1/s12.46>
- Chibilyov A.A. (jr.), Gulyanov Yu.A., Meleshkin D.S., Grigorevsky D.V. An assessment of landscape-ecological stability in agricultural regions of Ural and West Siberia // South of Russia: Ecology, Development. 2022. V. 17(1). pp. 109–118. In Russian <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2022-1-109-118>
- Dmitrieva V.A., Zhigulina E.V. *Dinamika vodnosti malykh vodotokov Verkhnedonskogo basseyna i yeye rol' v strukturno-dinamicheskoy organizatsii landshaftov* [Water dynamics of small water currents of the Upper Don basin and its role in the structural-dynamic organization of landscapes] // Regional Geosystems. 2020. V. 44. No. 4. pp. 404–414. In Russian. <https://doi.org/10.18413/2712-7443-2020-44-4-404-414>
- Ergina E.I., Gorbunov R.V., Tabunschik V.A., Petlyukova E.A. *Pochvennoye raznoobraziyе territorii Krymskogo poluostrova* [Soil diversity of the Crimean Peninsula] // Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences. 2023. V. 217. N. 1. pp. 61–69. In Russian. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-1-61-69>
- Esin A.I., Akgul M., Akay A.O., Yurtseven H. Comparison of LiDAR-based morphometric analysis of a drainage basin with results obtained from UAV, TOPO, ASTER and SRTM-based DEMs // Arabian Journal of Geosciences. 2021. V. 14. pp. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06705-3>
- Ezugwu A.E., Iketun A.M., Oyelade O.O., Abualigah L., Agushaka J.O., Eke C.I., Akinyelu A.A. A comprehensive survey of clustering algorithms: State-of-the-art machine learning applications, taxonomy, challenges, and future research prospects // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2022. V. 110. pp. 104743. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.104743>
- Ivankova T. Problem of environmental remediation of the river runoff of basin ecosystem of the small river Alma (Republic of Crimea) // E3S Web of Conferences. Innovative Technologies in Science and Education. V. 210. Divnomorskoe village, 2020. pp. 07007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021007007>

Kalinchuk I.V., Kudrian E.A. *Landshaftnoye planirovaniye territorii Krasnogvardeyskogo rayona Respubliki Krym* [Landscape planning of Krasnogvardeysky district of the Republic of Crimea] // Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions. 2019. V. 5, No. 3. pp. 283–294. In Russian

Kochurov B.I. Ecological evaluation and mapping for the tasks of balanced regional development // Mapping Sciences and Remote Sensing. 1999. V. 36(3). pp. 176–185. <https://doi.org/10.1080/07493878.1999.10642119>

Komarov S.I., Antropov D.V., Varlamov A.A., Galchenko S.A., Zhdanova R.V. Zoning as a tool of land management // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019th International Symposium on Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects. Vol. 350. Moscow, 2019. pp. 012060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/350/1/012060>

Lisetskii F. Rivers in the focus of natural-anthropogenic situations at catchments // Geosciences. 2021. V. 11(2). pp. 63. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020063>

Lisetskii F.N. Nature's use in Antiquity and its evidence in sediments on archaeological monuments of Crimea // Crimea: The History of Interaction between Man and Nature. Series: Environmental Research Advances, Russian Political, Economic, and Security Issues, Ed. F. Lisetskii. New York: Nova Science Publishers, 2019. pp. 79–106.

Lisetskii F.N., Buriak Zh.A., Marinina O.A., Poletaev A.O. *Basseynovaya differentsiatsiya landshaftov Ravninnogo Kryma kak osnova proyektov pochvovodookhrannyykh sistem zemledeliya* [Basin differentiation of Plain Crimea as the basis for projects of soil-preserved agriculture systems] // Landscape Science and Landscape Ecology: Coadaptation of Landscape and Economic Activity, Simferopol, 22–25 September 2020. Simferopol, 2020. pp. 42–47. In Russian

Lisetskii F.N., Buryak Z.A. Runoff of water and its quality under the combined impact of agricultural activities and urban development in a small river basin // Water. 2023. V. 15. pp. 2443. <https://doi.org/10.3390/w15132443>

Lisetskii F.N., Chernyi S.G., Svetlitchnyi A.A. *Sovremennye problemy eroziovedeniya* [Recent Developments in Erosion Science]. Belgorod, Konstanta, 2012. 456 p. In Russian. <https://doi.org/10.13140/2.1.1029.9682>

Malyshov A.V., Goleusov P.V. *Kriticheskoye znachenije faktora rel'yefa i erozionnaya opasnost' agrolandshaftov Belgorodskoy oblasti* [The critical value of the relief factor and the erosion hazard of the agricultural landscapes of the Belgorod region] // Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences Series. 2019. V. 43. No. 1. pp. 63–75. In Russian. <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2019-43-1-63-75>

Melnichuk A.Yu., Zackalichnaya O.V. *Formirovaniye sistemy ustoychivogo zemlepol'zovaniya v usloviyakh Kryma* [Sustainable land use in Crimea] // Land Management, Monitoring and Cadastre. 2021. No. 9. pp. 657–665. In Russian <https://doi.org/10.33920/sel-4-2109-02>

Morgan R.P.C. Soil Erosion and Conservation. Oxford, Blackwell Publishing, 2005. 304 p. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.0756f.x>

Mukharamova S., Ivanov M., Yermolaev O. Assessment of anthropogenic pressure on the Volga Federal District territory using river basin approach // Geosciences. 2020. V. 10. pp. 139. <https://doi.org/10.3390/geosciences10040139>

Nabati J., Nezami A., Neamatollahi E., Akbari M. GIS-based agro-ecological zoning for crop suitability using fuzzy inference system in semi-arid regions // Ecological Indicators. 2020. V. 117. pp. 106646. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106646>

Novikov D.V., Novikov A.V. *Vidy zonirovaniy, primenayemye pri organizatsii ispol'zovaniya zemel'* [Types of zoning used in the organization of land use] // Moscow Economic Journal. 2021. V. 1. pp. 44–55. In Russian. <https://doi.org/10.24412/2413-046X-2021-10031>

Pozachen'yuk E.A. Contemporary landscapes of Crimea // Crimea: The History of Interaction between Man and Nature. Series: Environmental Research Advances, Russian Political, Economic, and Security Issues, Ed. F. Lisetskii. New York: Nova Science Publishers, 2019. pp. 1–28.

Rózycka M., Migoń P. Morphometric properties of river basins as indicators of relative tectonic activity – Problems of data handling and interpretation // Geomorphology. 2021. V. 389. pp. 107807. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107807>

Soil map of Crimea. URL: <http://maps.bsu.edu.ru/soil/> (Date of accessed: 15.12.2023)

Tabunshchik V., Gorbunov R., Gorbunova T. Anthropogenic transformation of the river basins of the northwestern slope of the Crimean Mountains (The Crimean Peninsula) // Land. 2022. V. 11. pp. 2121. <https://doi.org/10.3390/land11122121>

Tabunshchik V.A., Kalinchuk I.V., Galkina M.V., Vlasova A.N., Nikiforova A.A. Water shortage and water management balance in the Republic of Crimea: Current values and forecast for 2030 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. V. 839. Krasnoyarsk, 2021. pp. 32026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/3/032026>

Vakhrushev B.A., Amelichev G.N., Tokarev S.V., Samokhin G.V. The main problems of karst hydrogeology in the Crimean Peninsula // Water Resources. 2022. V. 49(4). pp. 595–604. <https://doi.org/10.1134/s0097807822040182>

Yermolaev O., Mukharamova S., Maltsev K., Ivanov M., Gafurov A., Ermolaeva P., Saveliev A., Shynbergenov E., Yantsitov R., Bodrova A. Geography and geoecology of Russia in the mosaic of river basins // Conference Abstracts of the 5th International Conference "Resources, Environment and Regional Sustainable Development in Northeast Asia". Irkutsk, 2022. pp. 170.

Information about the authors:

Buryak Zh.A., Cand. Sci. (Geography), Leading Researcher, Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: buryakzh@gmail.com

Narozhnyaya A.G., Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Department of Environmental Management and Land Cadastre, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia.

E-mail: narozhnyaya_a@bsu.edu.ru

Poletaev A.O., Cand. Sci. (Geography), Senior Lecturer, Department of Geography, Geoecology and Life Safety, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia.

E-mail: poletaev@bsu.edu.ru

Author contributions:

Buryak Zh.A. – defined the idea of the study, selected and processed source data, structured the results of the study, formulated the main conclusions, and wrote the manuscript.

Narozhnyaya A.G. – determined the research methods, selected and processed the source data, and performed data analysis, and make proofread the manuscript.

Poletaev A.O. – participated in the design of cartographic and graphic material, and selected bibliographic sources.

Информация об авторах:

Буряк Ж.А., кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт экологии, биотехнологии и природопользования, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия.

E-mail: buryakzh@gmail.com

Нарожняя А.Г., кандидат географических наук, доцент, кафедра природопользования и земельного кадастра, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия.

E-mail: narozhnyaya_a@bsu.edu.ru

Полетаев А.О., кандидат географических наук, старший преподаватель, кафедра географии, геоэкологии и безопасности жизнедеятельности, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия.

E-mail: poletaev@bsu.edu.ru

Вклад авторов:

Буряк Ж.А. – определила идею исследования, подбирала и обрабатывала исходные данные, структурировала результаты исследований, сформулировала основные выводы, написала рукопись.

Нарожняя А.Г. – определила методы исследования, подбирала и обрабатывала исходные материалы, выполняла анализ данных, выполнила корректирующую рукописи.

Полетаев А.О. – участвовал в оформлении картографического и графического материала, подбирал библиографические источники.

Статья поступила в редакцию 09.01.2024; одобрена после рецензирования 26.07.2024; принята к публикации 02.06.2025

The article was submitted 09.01.2024; approved after reviewing 26.07.2024; accepted for publication 02.06.2025

Научная статья
УДК 551.583+551.583.15+911.2
doi: 10.17223/25421379/35/10

**АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЗОНОВ ГОДА
В АРКТИЧЕСКОЙ ТУНДРЕ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ РАВНИНЫ
В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА**

**Екатерина Альбертовна Косова¹, Лариса Борисовна Филандышева²,
Елизавета Павловна Макаренко³**



^{1, 2, 3} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ katerina5427@mail.ru

² filandyshева@yandex.ru

³ makarenkotsu@yandex.ru

Аннотация. На основе естественной сезонной климатической ритмики, установленной с использованием комплексно-генетического подхода, рассмотрены региональные особенности динамики временных характеристик (дат начала и конца, продолжительности) сезонов года в условиях глобального изменения климата, обоснованы границы периодов, использованных для сравнительного анализа, показаны положительные и негативные стороны воздействия потепления климата в Арктике на природные процессы и жизнедеятельность человека.

Ключевые слова: изменение климата, арктическая тундра, временные характеристики, сезоны года, Западно-Сибирская равнина

Для цитирования: Косова Е.А., Филандышева Л.Б., Макаренко Е.П. Анализ динамики временных характеристик сезонов года в арктической тундре Западно-Сибирской равнины в условиях глобального изменения климата // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 126–138. doi: 10.17223/25421379/35/10

Original article
doi: 10.17223/25421379/35/10

**ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF TEMPORAL CHARACTERISTICS OF THE SEASONS
OF THE YEAR IN THE ARCTIC TUNDRA OF THE WEST SIBERIAN PLAIN
UNDER THE CONDITIONS OF GLOBAL CLIMATE CHANGE**

Ekaterina A. Kosova¹, Larisa B. Filandysheva², Elizaveta P. Makarenko³

^{1, 2, 3} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹ katerina5427@mail.ru

² filandyshева@yandex.ru

³ makarenkotsu@yandex.ru

Abstract. At present, the Arctic regions are receiving increased attention from the country's leadership because of the importance of these territories not only for ensuring Russia's geopolitical and geo-economic positions in the world, but also for its internal development [Arctika..., 2020]. The paper considers regional peculiarities of the dynamics of temporal characteristics (start and end dates, duration) of the seasons of the year under global climate change on the basis of natural seasonal climatic rhythmic established by the complex-genetic method. The analysis is based on daily surface air temperature data from the VNIIGMI-MCD database and the pogodaiklimat.ru website for the period from 1934 to 2020 for the M.V. Popov weather station (Bely Island, Arctic tundra). The annual seasonal structure of the annual cycle was determined using valid criteria and the temporal characteristics of climatic rhythms were calculated. The obtained materials, in accordance with the objectives of the study, were grouped into four periods: the first – from 1934 to 2020, the second – from 1934 to 1979, the third – from 1980 to 2020, the fourth – from 2001 to 2020. Each of the periods has its own dynamic features in the course of temperatures, reflecting their regional trends against the background of global changes. Regularities of temporal dynamics of thermal regime and climatic indicators of seasonal rhythms were studied by methods of mathematical statistics.

The analysis of changes in mean monthly and annual surface air temperatures during the 86-year period showed that the climate in the Arctic zone of the West Siberian Plain (WSP) in the conditions of global change began to change towards warming starting from 1980 and especially rapidly since the beginning of the 2000s.

Temperature growth led to a shift in the boundaries and duration of seasons. Thus, the summer and spring seasons began to begin earlier than in the first period (from 1934 to 1979), and the winter and spring seasons ended earlier. The winter and autumn seasons began to come later than in the first period, and the summer and autumn seasons ended later. Due to the change in the dates

of the beginning and end of seasons, their duration has also changed: the proportion of the summer season of the year in the structure of the annual cycle has significantly increased, while the duration of the other three seasons (winter, spring and autumn) has decreased.

Evaluation of temporal characteristics, as well as data on the percentage of seasons of the year in the structure of the annual cycle are presented in the paper in the form of tables and diagrams. The obtained quantitative information on changes in the natural seasonal rhythm of climate for this territory is new and can be useful in developing a strategy of response of various sectors of the economy and socio-economic life of the population of the North to the ongoing changes in the natural environment.

Keywords: climate change, Arctic tundra, temporal characteristics, seasons of the year, Western Siberia

For citation: Kosova E.A., Filandysheva L.B., Makarenko E.P. (2025) Analysis of the dynamics of temporal characteristics of the seasons of the year in the arctic tundra of the West Siberian plain under the conditions of global climate change. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research.* 2. pp. 126–138. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/35/10

Введение

Изменение климата на планете в сторону потепления в последние десятилетия на фоне естественных процессов усугубляется антропогенным фактором [State..., 2023]. Об этом говорят научные результаты, представленные в Шестом оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, 2023 г.), которые позволяют утверждать, что разогрев атмосферы, океана и суши произошел в значительной степени под воздействием хозяйственной деятельности человека [IPCC..., 2023]. По данным исследований, глобальная температура за последние 44 года (1976–2020 гг.) выросла на 0,8 °C при скорости роста +0,18 °C/10 лет [Доклад..., 2021]. В России практически за такой же период времени (с 1976 по 2021 г.) этот показатель составил +0,49 °C/10 лет [Доклад... 2022], что в 2,7 раза превышает средний мировой показатель.

В настоящее время значительное внимание уделяется проблеме изменения климата в северных широтах. Арктические регионы Западно-Сибирской равнины (ЗСР) испытывают большое воздействие хозяйственной деятельности человека, связанной с освоением природных богатств. Наблюданное потепление климата делает природу этих территорий особенно уязвимой, требующей постоянного мониторинга и изучения, в том числе на основе сезонной ритмики климата, свойственной зональным ландшафтам. Использование естественного сезонного подхода к характеристике ландшафтных комплексов разного уровня и изучение временной изменчивости позволяют более глубоко оценить их современное состояние и устойчивость к происходящим климатическим изменениям [Окишева, Филандышева, 2015].

Арктика продолжает нагреваться более быстрыми темпами, чем остальная часть земного шара, особенно в арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ), где положительный тренд составил +0,71 °C/10 лет [Третий..., 2022]. Потепление в морской Арктике сопровождается сокращением площади и толщины морского льда, а также изменением температуры и солености морской воды [Доклад..., 2022]. Так, в Карском

море температура воды повысилась на 0,8–0,9 °C, а соленость на 0,5–0,6 %. Во Втором оценочном докладе Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2014 г.) сказано, что во всех морях за период с 2001–2011 гг. продолжительность ледового периода уменьшилась в среднем до 284 суток, что на 40 суток меньше, чем за отрезок времени с 1965 по 1975 г. Замерзание в арктических морях стало происходить позже, чем в указанный период, на 12 суток, а в юго-западной части Карского моря на 21–22 суток [Второй..., 2014].

Наиболее заметные негативные последствия, связанные с изменением климата, происходят в прибрежной зоне и на островах арктических морей, расположенных в высоких широтах [Конышев, Лагутина, 2021]. На значительном протяжении арктического побережья отмечается разрушение береговой линии со средней скоростью 0,5 м/год, на отдельных участках скорость отступания может достигать 3 м/год и больше [Ванштейн и др., 2020].

Природные экосистемы суши также испытывают серьезные преобразования. В арктической зоне Российской Федерации наблюдается изменение границ тундровых биомов, сопровождающееся повышением продуктивности экосистем. По некоторым оценкам [Третий..., 2022], перестройки арктических экосистем в результате совместного действия природных и антропогенных изменений к настоящему времени охватили 10–20 % площади. В горных районах АЗРФ за последний внутривековой цикл потепления верхняя граница леса поднялась на 15–50 м, потеснив тундровый пояс [Тишков и др., 2020]. В XXI в. в Арктике ожидается сокращение площади тундры на 42 % [Второй..., 2014].

Западно-Сибирская равнина – одна из крупнейших низких равнин мира. Характерной особенностью природы ЗСР является ярко выраженная широтная зональность [Окишева, Филандышева, 2015]. Тундровые экосистемы занимают более 340 тыс. км² территории ЗСР [Голубятников и др., 2015]. Южная граница тундры проходит в Западной Сибири севернее полярного круга, в южной части Ямала, Тазовского и Гыданского полуостровов, разделенных заливами

Карского моря. Согласно ботанико-географической зональности Западно-Сибирской равнины, тундровая зона этого региона подразделяется на арктическую, типичную и южную подзоны [Гвоздецкий, Михайлов, 1978]. Основной целью данного исследования поставлено изучение особенностей динамики временных показателей сезонных ритмов в арктической тундре Западной Сибири по данным метеостанции (мст.) им. М.В. Попова, располагающейся на о. Белый (рис. 1). В экономико-географическом отноше-

нии о. Белый относится к Ямalo-Ненецкому автономному округу, находится в Карском море и отделен от полуострова Ямал узким проливом Малыгина. Выбор объекта исследования обусловлен тем, что вышеупомянутая мст. им. М.В. Попова действует на о. Белый с ноября 1933 г. База накопленных метеорологических данных позволяет рассмотреть динамику климатических показателей за большой период времени (более чем за 80 лет). Кроме того, метеостанция расположена в северо-западной части острова, в 800 м от берега Карского моря.



Рис. 1. Обзорная карта-схема сети метеорологических станций тундровой зоны Западно-Сибирской равнины [Окишева, Филандышева, 2015]

Fig. 1. Map of meteorological stations of the tundra zone of the West Siberian Plain [Okisheva, Filandysheva, 2015]

Таблица 1

Климатические критерии границ сезонов года (составлена по материалам [Рутковская, 1980, 1983; Окишева, 1984])

Table 1

Climatic criteria for the boundaries of the seasons of the year based on the materials by [Rutkovskaya, 1980, 1983; Okisheva, 1984]

Зоны	Арктическая тундра (мст. им. М.В. Попова)	Типичная тундра (мст. Марре-Сале)	Южная тундра (мст. Новый Порт)	Лесотундра (мст. Салехард)
1. Осень				
Начало	Устойчивый переход средней суточной температуры воздуха (на спаде) через ($^{\circ}\text{C}$):			
	+4	+5	+7	+8
Конец	Начало устойчивых морозов и образование устойчивого снежного покрова			Устойчивый переход средней суточной температуры через -8°C на ветви спада температур, образование устойчивого снежного покрова
2. Зима				
Начало	Совпадает с критериями конца осени			
Конец	Конец устойчивых морозов			Устойчивый переход средней суточной температуры через -8°C на ветви роста температур
3. Весна				
Начало	Совпадает с критериями конца зимы			
Конец	Устойчивый переход средней суточной температуры воздуха (на подъеме) через ($^{\circ}\text{C}$):			
	+4	+4	+5	+8
4. Лето				
Начало	Совпадает с критериями конца весны			
Конец	Совпадает с критериями начала осени			

Это дает основание считать, что установленные тенденции о динамике временных характеристик сезонов года будут в той или иной степени показательны и для процессов, происходящих в арктических водах, так как полярная станция находится в непосредственной близости от колоссального объема холодных водных масс [Косова, Филандышева, 2021].

Для каждой природной зоны и подзоны характерен свой естественный климатический ритм (см. табл. 1) [Галахов, 1959; Окишева и др., 2015]. Обычно формальные границы сезонов года (в календарных сроках) не совпадают с реальным течением природных процессов. Изучение сезонов в их естественных границах более показательно, так как они согласуются с развитием живой и неживой природы [Ромашова и др., 2017; Филандышева и др., 2021]. В данной работе для выделения сезонов года и изучения их временной динамики, что является основной целью исследования, использован комплексно-генетический метод, разработанный Н.Н. Галаховым [Галахов, 1959] и дополненный в работах Н.В. Рутковской, Л.Н. Окишевой, Л.Б. Филандышевой, Т.В. Ромашовой [Рутковская, 1980; Окишева, 1984; Филандышева и др., 2021]. Дан-ный метод учитывает особенности хода ведущих климатообразующих факторов (солнечной радиации, циркуляции атмосферы, характера подстилающей поверхности) и связанных с ними фенологических явлений.

Как видно из табл. 1, в критериях начала и конца сезонов года подзон и зон арктического севера ЗСР имеются различия, особенно между тундрой и лесотундрой.

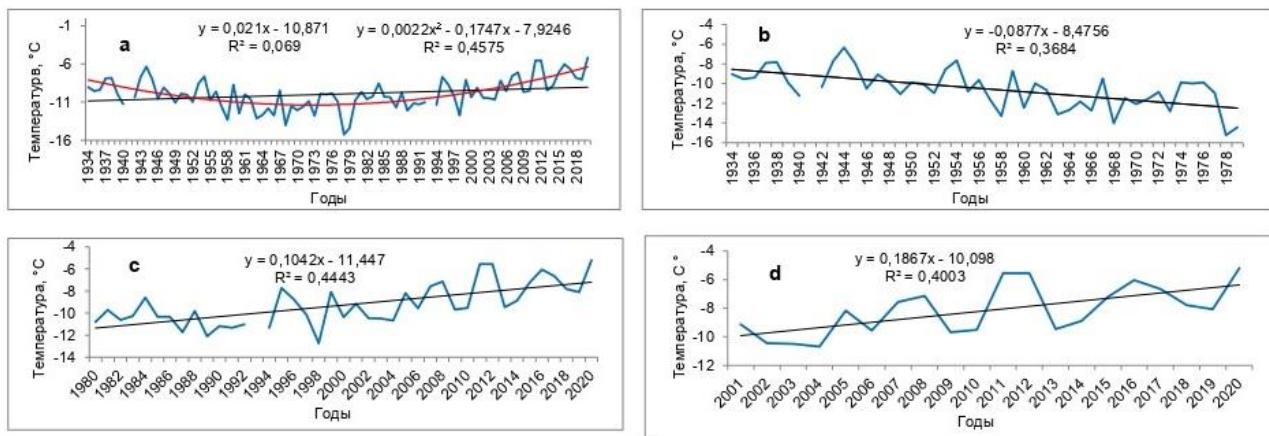
В годовом цикле структурными единицами первого порядка являются холодно-снежная (ХСЧГЦ) и вегетационная части (ВЧГЦ). Их выделение объясняется тем, что растения, являющиеся одними из важных индикаторов происходящих в природе процессов, находятся в состоянии покоя либо в состоянии вегетации в зависимости от климатических условий. Арктическая тундра, в пределах которой расположен о. Белый, относится к природным зонам с продолжительными зимними процессами, где снежный покров является устойчивым фактором ландшафтной дифференциации. При определении границ сезонов зоны арктической тундры мы пользовались критериями, обоснованными в работах Н.В. Рутковской для ХСЧГЦ [Рутковская, 1980; Рутковская и др., 1989] и Л.Н. Окишевой для ВЧГЦ [Окишева, 1984] для данной территории. Это обеспечило преемственность исследований.

За основу анализа взяты данные температуры (средней, минимальной и максимальной) приземного слоя воздуха суточного, месячного и годового разрешения из базы данных ВНИИГМИ-МЦД и за период с 1934 по 2020 г. по мст. им. М.В. Попова (о. Белый) и дополнениями с сайта pogodaiklimat.ru.

С использованием обоснованных в работах указанных выше авторов критериев деления на сезоны нами была установлена ежегодная сезонная структура годового цикла, рассчитаны временные характеристики климатических ритмов. Полученные материалы в соответствии с целью исследования были сгруппированы в четыре периода: первый – с 1934 по 2020 г., второй – с 1934 по 1979 г., третий – с 1980 по 2020 г., четвертый – с 2001 по 2020 г. Каждый из них имеет свои динамические особенности в ходе температур, отражающие их региональные тенденции на фоне глобальных перемен (рис. 2) [Косова, Филандышева, 2021; Косова, 2022].

Для описания тенденции средних годовых температур 86-летнего временного отрезка (с 1934 по 2020 г.) нами были рассчитаны значения тренда температуры в виде линейной функции (полином первой степени), а также полином второй степени, с помощью которого, как известно, целесообразно описывать тенденцию рядов, в которых убывание значений ряда сменяется последующим возрастанием, что отчетливо прослеживается на рис. 2, а: с 1934 до 1979 г. – ветвь спада, в дальнейшем – роста. За границу между вторым и третьим периодами нами был взят 1980 г., так как именно с этого времени на территории о. Белый начался устойчивый рост температуры, пришедший на смену периоду с самыми низкими температурами за всю историю метеонаблюдений на станции им. М.В. Попова (1961–1980 гг.). Это двадцатилетие обозначено нами как «холодное ядро» с минимальными значениями средней годовой температуры в 1978 г. ($-15,3^{\circ}\text{C}$) и 1979 г. ($-14,5^{\circ}\text{C}$) [Косова, Филандышева, 2021]. Для анализа интенсивности изменения климата за последние два десятилетия (время наиболее выраженного потепления) также был выделен период с 2001 по 2020 г.

Закономерности временной динамики термического режима и климатических показателей сезонных ритмов изучались методами математической статистики: проводилась оценка нормы и изменчивости статистических рядов, применялся корреляционный метод и тренд-анализ. Линейные тренды характеризуют тенденцию (среднюю скорость) изменений рассматриваемой величины за указанный период. Значимость линейных трендов устанавливалась по уровню значимости 5% ($\alpha = 0,05$). Такой уровень значимости считается довольно надежным. Для оценки значимости применялись критерий Фишера (F-критерий) и t-критерий Стьюдента. Проверка критерия Фишера показала, что для всех четырех периодов наблюдаемые значения (F-наблюдаемое) превышают табличные (F-табличное): по первому периоду на 2,25, по второму – на 20, по третьему – на 27,7, по четвертому – на 7,6. Это свидетельствует о том, что полученные модели являются статистически значимыми.



**Рис. 2. Изменение средних годовых температур приземного слоя воздуха
(по данным мст. им. М.В. Попова, о. Белый)**

Периоды: а – с 1934 по 2020 г.; б – с 1934 по 1979 г.; в – с 1980 по 2020 г.; г – с 2001 по 2020 г.; черная линия – линейный тренд; красная линия – полином 2-й степени

**Fig. 2. Variation of mean annual surface air temperature
(from M.V. Popov meteorological station's data, Bely Island)**

Periods: a – 1934 to 2020; b – 1934 to 1979; c – 1980 to 2020; d – 2001 to 2020; black line – linear trend; red line – 2nd degree polynomial

Оценка коэффициента a линейного тренда средних годовых температур воздуха по критерию Стьюдента так же показала, что наблюдаемые значения превышают табличные на 0,5 (1934–2020 гг.), 2,88 (1934–1979 гг.), 3,62 (1980–2020 гг.) и 1,37 (2001–2020 гг.), что говорит о статистической значимости коэффициента a . Коэффициенты линейных трендов от одного периода к другому меняют знак, что указывает на временную изменчивость климатических параметров.

Результаты и их обсуждение

Для выявления вопроса о проявлении глобального потепления климата в арктической тундре Западно-Сибирской равнины на первом этапе были проанализированы средние годовые и средние месячные температуры приземного слоя воздуха, осредненные по сравниваемым периодам, и построены графики изменения средних годовых температур, получены линейные тренды по четырем указанным выше отрезкам времени (см. рис. 2). В результате было установлено, что за весь 86-летний период наблюдений отмечается положительная тенденция в изменении температуры приземного слоя воздуха с коэффициентом линейного тренда $+0,21^{\circ}\text{C}/10$ лет (рис. 2, а). От начала тренда к его концу температура выросла на $1,4^{\circ}\text{C}$ при среднем уровне температуры данного отрезка $-9,9^{\circ}\text{C}$ [Косова, Филандышева, 2021].

Однако внутри 86-летнего периода знак тенденции в ходе средних годовых температур менялся. Так,

в период с 1934 по 1979 г. (рис. 2, б) он был отрицательным с коэффициентом линейного тренда $-0,88^{\circ}\text{C}/10$ лет, когда температура от начала тренда к его концу понизилась на $3,8^{\circ}\text{C}$. После 1980 г. наблюдается устойчивый рост температуры с коэффициентом линейного тренда $+1,0^{\circ}\text{C}/10$ лет. От начала тренда к его концу на этом отрезке температура выросла на $4,3^{\circ}\text{C}$ [Косова, Филандышева, 2021].

При этом следует особо отметить, что с 2001 г. рост температур происходит в более быстром темпе с коэффициентом линейного тренда $+1,87^{\circ}\text{C}/10$ лет. За последние 20 лет средняя годовая температура выросла согласно тренду от -10°C в его начале до $-6,2^{\circ}\text{C}$ в его конце, т.е. на $3,8^{\circ}\text{C}$ [Косова, Филандышева, 2021].

Из анализа многолетних значений средней суточной, максимальной и минимальной температуры воздуха на мст. им. М.В. Попова следует, что за все месяцы от первого периода ко второму и четвертому наблюдается их рост (табл. 2). Повышение температур на исследуемой территории характерно в течение всего года, но наиболее значительный их рост наблюдается в зимние месяцы. Следует отметить, что в данной работе за зимние месяцы мы принимали период с октября по май, а за летние, соответственно, с июня по сентябрь. От периода 1934–1979 гг. к периоду 2001–2020 гг. разница у средних многолетних средних месячных температур увеличилась, и в зимние месяцы повышение составило $+2,6^{\circ}\text{C}$ (с максимумом в марте $+3,7^{\circ}\text{C}$), а в летние $+2,3^{\circ}\text{C}$ (при максимуме в сентябре $+3,3^{\circ}\text{C}$). Такая же тенденция к увеличению

наблюдается в зимние месяцы у максимальных ($+2,1^{\circ}\text{C}$) и минимальных температур ($+2,0^{\circ}\text{C}$), а в летние $+1,7^{\circ}\text{C}$ и $+1,5^{\circ}\text{C}$, соответственно [Косова, 2022].

Полученные данные о климате арктической зоны ЗСР согласуются с выводами, представленными в Шестом оценочном докладе МГЭИК [IPCC..., 2023] и Третьем оценочном докладе Росгидромета (2022) о том, что с 1980-х гг. рост глобальной температуры

стал устойчивым и в дальнейшем каждое последующее десятилетие было теплее предыдущего.

Для анализа динамики временных характеристик климатических сезонов года за период с 1934 по 2020 г. ежегодные значения были сгруппированы нами так же в три периода (1934–1979, 1980–2020, 2001–2020 гг.), целесообразность выделения которых показана выше [Косова, Филандышева, 2021].

Средние месячные температуры воздуха за периоды с 1934 по 2020 г. и разница между ними
(мст. имени Попова, о. Белый) [Косова, 2022]

Таблица 2

Mean annual monthly air temperatures for the periods from 1934 to 2020 and the difference between them
(M.V. Popov meteorological station, Bely Island) [Kosova, 2022]

Table 2

Период	Месяц*											Год	
	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август		
Средняя суточная температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$													
1934–1979 гг. (первый)	-6,9	-14,1	-18,7	-23,6	-25,0	-23,7	-16,6	-7,4	-0,3	+4,0	+4,6	+0,4	-10,6
1980–2020 гг. (второй)	-5,2	-14,2	-19,2	-22,4	-22,8	-20,0	-15,5	-6,6	+0,2	+5,4	+5,8	+2,4	-9,2
Разн. 1 и 2	+1,7	-0,1	-0,5	+1,2	+2,2	+3,7	+1,1	+0,8	+0,5	+1,4	+1,2	+2,0	+1,4
2001–2020 гг. (третий)	-3,4	-12,4	-17,4	-21,0	-21,2	-20	-14	-5,8	0,9	6,3	6,7	3,7	-8,1
Разн. 1 и 3	+3,5	+1,7	+1,3	+2,6	+3,8	+3,7	+2,6	+1,6	+1,2	+2,3	+2,1	+3,3	+2,5
Максимальная температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$													
1934–1979 гг. (первый)	-3,8	-10,9	-14,9	-18,7	-20,5	-19,0	-12,0	-4,7	+1,3	+6,9	+7,2	+3,4	-7,3
1980–2020 гг. (второй)	-2,4	-10,4	-15,0	-18,5	-18,9	-16,0	-11,2	-4,2	+1,9	+8,3	+7,9	+4,2	-6,1
Разн. 1 и 2	+1,4	+0,5	+0,1	+0,2	+1,6	+3,0	+0,8	+0,5	+0,6	+1,4	+0,7	+0,8	+1,2
2001–2020 гг. (третий)	-1,4	-9,1	-13,7	-16,8	-17,2	-15,9	-10,0	-3,5	+2,6	+9,0	+8,8	+5,1	-5,2
Разн. 1 и 3	+2,4	+1,8	+1,2	+1,9	+3,3	+3,1	+2,0	+1,2	+1,3	+2,1	+1,6	+1,7	+2,1
Минимальная температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$													
1934–1979 гг. (первый)	-9,1	-17,9	-23,0	-27,6	-29,0	-27,7	-20,9	-11,3	-2,3	+1,7	+3,0	+0,3	-14,0
1980–2020 гг. (второй)	-6,7	-17,2	-22,9	-26,7	-27,3	-24,7	-20,1	-10,0	-1,4	+3,1	+3,9	+1,0	-12,3
Разн. 1 и 2	+2,4	+0,7	+0,1	+0,9	+1,7	+3,0	+0,8	+1,3	+0,9	+1,4	+0,9	+0,7	+1,7
2001–2020 гг. (третий)	-6,3	-16,8	-22,6	-26,0	-26,5	-24,0	-18,8	-9,6	-1,0	+3,6	+4,6	+1,4	-11,8
Разн. 1 и 3	+2,8	+1,1	+0,4	+1,6	+2,5	+3,7	+2,1	+1,7	+1,3	+1,9	+1,6	+1,1	+2,2

Примечание. Разн. 1 и 2 – разница между первым и вторым периодом; Разн. 1 и 3 – разница между первым и третьим периодом; * – порядок расположения месяцев соответствует сезонному ходу температуры воздуха и начинается с холодно-снежной части годового цикла; «-» – понижение средней месячной температуры воздуха по отношению к сравниваемому периоду; «+» – повышение средней месячной температуры воздуха по отношению к сравниваемому периоду.

Note. Difference. Разн. 1 and 2 – difference between the first and second period; Difference Разн. 1 and 3 – difference between the first and the third period; * – the order of months corresponds to the seasonal course of air temperature and starts from the cold-snow part of the annual cycle; “-” – decrease in mean monthly air temperature relative to the compared period; “+” – increase in mean monthly air temperature relative to the compared period.

**Временные характеристики сезонов года в арктической тундре ЗСР
(по данным мст. им. М.В. Попова)**

**Temporal characteristics of the seasons in the Arctic tundra of the West Siberian Plain
(according to the M.V. Popov meteorological station)**

Table 3

Период (годы)	Осенний сезон			Зимний сезон		Весенний сезон		Летний сезон	
	Дата начала	Дата конца	Δl в днях	Дата конца	Δl в днях	Дата конца	Δl в днях	Дата конца	Δl в днях
Первый (1934–1979)	30.08	10.10	42	27.05	229	19.07	53	29.08	41
Второй (1980–2020)	04.09	16.10	43	21.05	217	08.07	48	03.09	57
Третий (2001–2020)	14.09	18.10	35	19.05	213	04.07	46	13.09	71

Примечание. Δl – продолжительность сезона в днях.

Note. Δl – season duration in days.

Результаты анализа динамических изменений дат начала, конца и продолжительности сезонов года начнем с осеннеого сезона.

Осень является переходным климатическим сезоном года, когда происходит разрушение летней структуры ландшафта и становление зимней. В это время происходит изменение всех климатических показателей, появляется временный снежный покров, прекращается вегетация растений и начинается переход их в конце сезона в состояние покоя. На осень приходится граница между холодно-снежной частью годового цикла (ХСЧГЦ) и вегетативной частью годового цикла (ВЧГЦ) [Окишева, 1984]. Датой начала осеннеого сезона в арктической тундре является переход средней суточной температуры воздуха через $+4^{\circ}\text{C}$ на ветви спада температур, а окончанием – начало устойчивых морозов [Рутковская, 1980; Окишева, 1984; Рутковская и др., 1989]. Динамические изменения временных характеристик осеннеого сезона рассматриваемых временных промежутков следующие: по сравнению с первым периодом дата начала осени к третьему периоду стала наступать позже на 16 дней (14 сентября в сравнение с 30 августа), дата конца осени также сместились на более поздние сроки (с 10 октября на 18 октября, т.е. на 9 дней) (см. табл. 3). Связано это с повышением уровня температур воздуха второй половины сентября (начало осени) и второй декады октября (конец осени) [Косова, 2022]. Продолжительность осеннеого сезона сократилась от второго периода к третьему с 42 до 35 дней (на 7 дней).

Зима является основным сезоном года в арктических регионах и составляет около 2/3 годового цикла. Погодные условия именно этого сезона из-за его продолжительности определяют особенности функцио-

нирования природных геосистем, а также организацию жизнедеятельности людей. Зимний сезон начинается с даты начала устойчивых морозов (с даты, когда температура воздуха была ниже 0°C как по минимальному термометру, так и за отдельные сроки наблюдений) и образования устойчивого снежного покрова и завершается датой окончания устойчивых морозов [Рутковская, 1980].

Из данных табл. 3 следует, что продолжительность зимнего сезона к концу 86-летнего периода значительно уменьшилась – с 229 дней в первый период до 213 дней в третий. Во втором периоде она стала короче на 12 дней, в третьем на 16 дней по сравнению с первым. Это связано как со смещением даты начала сезона на более поздние сроки (что было показано при анализе окончания осени), так и даты его конца на более ранние (с 27 мая первого на 19 мая третьего периода), т.е. на 9 дней в первом и во втором случае. Более позднее начало зимнего сезона объясняется повышением температуры воздуха в октябре с $-6,9^{\circ}\text{C}$ в первом периоде до $-5,2^{\circ}\text{C}$ ($+1,7^{\circ}\text{C}$) во втором и до $-3,4^{\circ}\text{C}$ ($+3,5^{\circ}\text{C}$) в третьем [Косова, 2022].

Весна – это переходный сезон, в течение которого происходит разрушение зимнего состояния ландшафта и переход к летнему. Она характеризуется нарастанием солнечного тепла, поступающего на земную поверхность, увеличением продолжительности светлой части суток, таянием и ликвидацией снежного покрова, оттаиванием, а затем и прогреванием почвогрунтов [Филандышева и др., 2021]. За дату начала весеннеого сезона принимается дата прекращения устойчивых морозов и постепенного разрушения снежного покрова, за дату конца сезона – переход средней суточной температуры через $+4^{\circ}\text{C}$

на ветви роста температур [Окишева, 1984; Рутковская, 1980].

Выше были описаны изменения дат конца зимы, которые знаменуют начало следующего сезона – весны, поэтому их анализ мы повторять не будем, отметим только, что более раннее начало весенних процессов произошло в связи с ростом температуры воздуха в мае с $-7,4^{\circ}\text{C}$ в первом периоде до $-6,6^{\circ}\text{C}$ ($+0,8^{\circ}\text{C}$) во втором и до $-5,8^{\circ}\text{C}$ ($+1,6^{\circ}\text{C}$) в третьем периоде [Косова, 2022]. Рассмотрим динамику сроков окончания весны. На более ранние сроки сместилась и дата конца весеннего сезона – с 19 июля в первый период на 4 июля в третий. Таким образом, в арктической тундре Западно-Сибирской равнины во втором и третьем периодах весенние процессы стали на 7–9 дней раньше начинаться, и также заканчиваться в среднем на 12–16 дней. Продолжительность весны в течение исследуемого временного отрезка уменьшилась с 53 дней первого периода до 48 во втором (стала короче на 5 дней) и до 46 в третьем периоде (сократилась на 7 дней, или 13 %).

Летний сезон в пределах арктической тундры короткий, однако в течение этого времени года создаются благоприятные условия для биотического компонента экосистемы, несмотря на невысокие положительные температуры (около $+5\dots+6^{\circ}\text{C}$). Продолжительный световой день (полярный день в арктических широтах) и большое количество часов солнечного сияния наряду с благоприятными для арктической биоты температурными условиями делают летний сезон наиболее комфортным и для осуществления хозяйственной деятельности человека, связанной с открытым воздухом. Началу и концу лета соответствует переход средней суточной температуры через $+4^{\circ}\text{C}$ (на ветви подъема и спада средних суточных температур соответственно) [Окишева, 1984].

Особенности динамических изменений дат начала летнего сезона показаны при характеристике окончания весеннего сезона, а конца – начала осеннего, со смещением которых произошли существенные изменения продолжительности данного сезона. С 1980-х гг. она увеличилась на 16 дней (с 41 до 57 дней). Если сравнить последние двадцать лет с первым периодом, то лето стало длиннее на 30 дней, или на 42 % в относительных величинах. Следует отметить, что дата начала лета в третьем периоде по сравнению с первым стала наступать в более ранние сроки: 5 июля против 20 июля (раньше на 16 дней), что связано с повышением уровня температуры воздуха в первой декаде июля с $+2,9^{\circ}\text{C}$ (1934–1979 гг.) до $+4,7^{\circ}\text{C}$ (2001–2020 гг.). За счет значительного роста температуры воздуха во второй декаде сентября дата конца летнего сезона отступила к третьему периоду на 16 дней (с 29 августа к 13 сентября) [Косова, 2022].

Заключение

В ходе проведенного анализа временных характеристик сезонов года в арктической тундре Западно-Сибирской равнины, рассчитанных за три периода (1934–1979 гг., 1980–2020 гг., 2001–2020 гг.), были выявлены следующие тенденции (рис. 3):

1. Смещение дат начала зимнего сезона на более поздние сроки, а его конца на более ранние, в результате чего зима на исследуемой территории в целом стала короче. В процентном соотношении доля зимы в период с 1934 по 1979 г. составляла 63 % от всего годового цикла, в период с 1980 по 2020 гг. она сократилась до 60 %, а в 2001–2020 гг. до 58 %.

2. Летний сезон значительно увеличился, теплый период стал раньше начинаться и позже заканчиваться. Доля данного сезона в годовом цикле выросла, соответственно, с 11,2 % в первый период до 15,6 % во второй и 19,5 % в третий, т.е. в 2001–2020 гг. летний сезон стал занимать около 1/5 года.

3. Весенний сезон стал наступать и заканчиваться раньше, сократилась его продолжительность. В процентном соотношении доля весны от первого периода к третьему сократилась менее всего, примерно на 2 % (с 14,5 до 12,6 %).

4. Осенний сезон стал начинаться и заканчиваться позже, его продолжительность от первого периода к третьему, соответственно, уменьшилась. Доля осени в структуре годового цикла сократилась с 11,5 до 9,6 %.

Динамические изменения продолжительности сезонов года по данным мст. им. М.В. Попова (о. Белый) иллюстрирует рис. 3.

Установленные изменения в климатических характеристиках сезонов года не могут не сказаться на состоянии природных ландшафтов. В сплошной криолитозоне (Арктика и Субарктика) Западной Сибири суммарная площадь термокарстовых озер увеличилась в среднем на 9,6 % за период с 1973 по 2006 г. [Кирпотин и др., 2008]. Изменяется продуктивность тундровых ландшафтов: максимальное значение NDVI (нормализованного разностного вегетационного индекса) в 2022 г. было самым высоким за всю историю наблюдений (1982–2022 гг.) [Thoman et al., 2023]. В Российской Арктике запасы фитомассы с 1982 г. выросли в среднем на 15–30 %. Вслед за растительностью меняется и фауна: было отмечено сокращение численности и ареала распространения типичных видов арктических млекопитающих (песец, белый медведь), прекратились циклические вспышки численности леммингов и т.д. Напротив, ареал распространения таежных (boreальных) видов, таких как рысь и бурый медведь, на сотни километров сместился к северу [Тишкин и др., 2018].

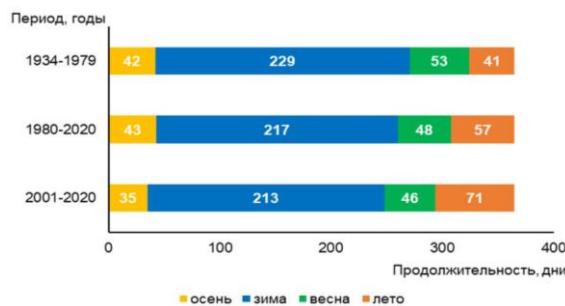


Рис. 3. Изменение продолжительности сезонов года по периодам в арктической зоне ЗСР (по данным мст. им. М.В. Попова)

Fig. 3. Change in the duration of seasons by periods in the Arctic tundra of the West Siberian Plain (according to M.V. Popov meteorological station)

Полученная количественная информация о климатических режимах структурных единиц годового цикла и их тенденциях для арктической тундры Западно-Сибирской равнины является новой и может быть полезной при разработке стратегии реагирования различных отраслей хозяйства и социально-экономической жизни населения Севера на происходящие изменения природной среды.

Следует сказать, что тундра Арктической зоны, протянувшаяся от Скандинавского до Чукотского полуострова, была заселена еще 20–30 тыс. лет назад, главным фактором заселения являлись постоянные перемещения людей на огромные расстояния. Таким образом, современные финно-угорские и самодийские народы сформировались из аборигенных племен охотников, рыболовов и кочевников-скотоводов [Мажаров, Сморчкова, 2007].

Основу традиционного уклада жизни северных народов составляет оленеводство, состояние которого на сегодняшний момент неоднозначно. Это связано не только с социально-экономическим развитием АЗРФ и изменениями традиционного быта коренного населения, но также и с тенденцией изменения климата. Потепление климата влияет на жизнедеятельность коренных народов, поскольку значительно меняет среду обитания и, как следствие, традиционный образ жизни. Угрозы связаны, прежде всего, с деградацией вечной мерзлоты. Так, большие территории подвергаются заболачиванию и затоплению, возрастают мощности весенних паводков, что ведет к сокращению площади тундры и, соответственно, пастбищ северных оленей. Помимо этого, зимние потепления проводят к формированию ледяной корки, которой покрывается тундра, что также ведет к гибели оленей от голода, учитывая и уменьшающееся количество пастбищ, и их доступность [Конышев, Лагутина, 2021]. На последнюю влияет просадка грунта в результате таяния вечной мерзлоты

и разрушение промышленных объектов, мостов и дорог. В 2013 г. из-за бескорницы на Ямале погибло 61 тыс. голов северных оленей из 340 тыс. [Жилина, 2021].

Изменение водного режима способствует бактериальному загрязнению ручьев и озер, что также негативно влияет на здоровье людей и животных. Деградация вечной мерзлоты, в которой находятся скотомогильники, в 2016 г. привела к самой масштабной вспышке сибирской язвы за последние несколько десятков лет на Ямале. Тогда погибло более 2 500 оленей. Заболевания наблюдались и среди людей [Конышев, Лагутина, 2021]. В 2018 г. в Ямало-Ненецком автономном округе была создана электронная карта территорий, зараженных сибирской язвой, чтобы обезопасить население и животных [Электронную..., 2018]. Однако стоит отметить высокую степень адаптивности коренных жителей АЗРФ, которая позволяла им выживать в таких суровых условиях не одну сотню лет.

Страны, имеющие арктические территории, обсуждали возможность развития арктических судоходных путей с начала XXI в. В настоящее время Арктика вызывает интерес у многих стран как регион, богатый природными ресурсами [Lasserre, 2022]. Этот интерес усиливается наблюдаемыми климатическими изменениями, связанными в первую очередь с таянием морских льдов и мерзлоты, что делает Арктику более доступной для освоения. Арктический регион является стратегически важной зоной для Российской Федерации, поскольку здесь сосредоточены значительные запасы нефти и газа, а также проходит трасса Северного морского пути (СМП) – важнейшей транспортной коммуникации между Европой и Азией [Арктика..., 2020]. Именно поэтому дальнейшее социально-экономическое развитие и безопасность России будут связаны с укреплением позиций в Арктике, развитием инфраструктуры СМП, строительством новых ледоколов и портов [Иванова и др., 2022].

Результаты проведенного исследования показали, что потепление в арктической зоне ЗСР протекает с довольно большой скоростью и уже привело к изменениям климатических характеристик сезонных ритмов, с которыми связаны условия функционирования и

устойчивость ландшафтной структуры, знание которых позволяет предвидеть положительные и негативные стороны воздействия изменения климата в Арктике на природные процессы, жизнедеятельность человека и соответствующим образом реагировать на них.

Список источников

- Арктика:** стратегическое значение для России // Институт международных политических и экономических решений. 2020. URL: <https://russtrat.ru/reports/20-dekabrya-2020-1614-2511> (дата обращения: 12.02.2024).
- Ванштейн Б.Г., Стрелецкая И.Д., Письменюк А.А.** Геосистемы берегов Карского моря в условиях изменяющегося климата // Арктика: экология и экономика. 2020. № 3 (39). С. 73–86. doi: 10.25283/2223-4594-2020-3-73-86
- Второй** оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). М., 2014. 93 с. URL: http://downloads.igcse.ru/publications/OD_2_2014/v2014/pdf/resume_teh.pdf (дата обращения: 15.01.2023).
- Галахов Н.Н.** Изучение структуры климатических сезонов года. М. : Изд-во АН СССР, 1959. 213 с.
- Гвоздецкий Н.А., Михайлов Н.И.** Физическая география СССР. Азиатская часть : учебник для студентов геогр. фак. ун-тов. М. : Мысль, 1978. 512 с.
- Голубятников Л.Л., Заров Е.А., Казанцев В.С., Филиппов И.В., Гаврилов Г.О.** Анализ структуры ландшафтов тундровой зоны Западной Сибири на основе спутниковых данных // Исследование Земли из космоса. 2015. № 3. С. 4–14. doi: 10.7868/S0205961415030057
- Доклад** об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М., 2021. 104 с. URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/doklad_klimat2020.pdf (дата обращения: 04.01.2023).
- Доклад** об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М., 2022. 104 с. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/images/news/20220324/4/Doklad.pdf> (дата обращения: 04.01.2023).
- Жилина И.Ю.** Потепление в Арктике: возможности и риски // Экономические и социальные проблемы России. 2021. № 70. С. 66–87.
- Иванова М.В., Данилин К.П., Кошарев М.В.** Северный морской путь как пространство согласования интересов для устойчивого социально-экономического развития Арктики // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12, № 4. С. 538–550. doi: 10.25283/2223-4594-2022-4-538-550
- Кирпотин С.Н., Полищук Ю.М., Брыксина Н.А.** Динамика площадей термокарстовых озер в сплошной и прерывистой криолитозонах Западной Сибири в условиях глобального потепления // Вестник Томского государственного университета. 2008. № 311. С. 185–190.
- Конышев В.Н., Лагутина М.Л.** Безопасность человека в Арктике: угрозы сквозь призму «северного менталитета» // Арктика и Север. 2021. № 45. С. 85–112. doi: 10.37482/issn2221-2698.2021.45.85
- Косова Е.А.** Региональные особенности изменения термического режима в Арктической зоне Западно-Сибирской равнины на примере острова Белый // Симпозиум «Междисциплинарные подходы в биологии, медицине и науках о Земле: теоретические и прикладные аспекты» : материалы симпозиума XVII (XLIX) Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Образование, наука, инновации: вклад молодых исследователей». Кемерово : КемГУ, 2022. Вып. 23. С. 36–39.
- Косова Е.А., Филандышева Л.Б.** Об изменении термического режима в арктической тундре Западной Сибири и его влиянии на организацию туризма // Материалы Всероссийской конференции «Динамика и взаимодействие геосфер Земли». Томск, 2021. С. 256–259.
- Мажаров А.В., Сморчкова В.И.** Развитие традиционного хозяйствования коренных малочисленных народов Арктики в современных условиях. М. : РАГС, 2007. 136 с.
- Окишева Л.Н.** Пространственно-временной анализ климатических условий сезонной ритмики геосистем Обь-Енисейского Севера : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Новосибирск, 1984. 17 с.
- Окишева Л.Н.** Сезонные ритмы природы Субарктики: методика поиска критериев и характеристики : учеб.-метод. пособие. Томск : Печатник, 2008. 120 с.
- Окишева Л.Н., Филандышева Л.Б.** Временная динамика и функционирование ландшафтов Западной Сибири / под ред. П.А. Окишева. Томск : Издательский Дом ТГУ, 2015. 328 с.
- Ромашова Т.В., Филандышева Л.Б., Юркова К.Д.** Анализ динамики временных характеристик сезонов года в подтайге Западно-Сибирской равнины за период с 1936 по 2015 г. // Геосферные исследования. 2017. № 3. С. 16–25.
- Рутковская Н.В.** Исследование структуры холодно-снежной части годового цикла Таз-Турюханской подзоны северо-таежных лесов Западно-Сибирской равнины // Вопросы географии Сибири. Вып. 14. Томск : Томский государственный университет, 1983. С. 15–25.
- Рутковская Н.В.** Структура и типы холодно-снежных частей года в тундре Западно-Сибирской равнины // Вопросы географии Сибири. Вып. 13. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1980. С. 103–111.
- Рутковская Н.В., Ащеулов А.В.** Анализ погодных условий тундры Западно-Сибирской равнины в сезонном аспекте для медицинских целей // Вопросы географии Сибири. Вып. 18. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1989. С. 57–67.
- Тишкин А.А., Белоновская Е.А., Вайсфельд М.А., Глазов П.М., Кренке А.Н., Тертицкий Г.М.** «Позеленение» тундры как драйвер современной динамики арктической биоты // Арктика: экология и экономика. 2018. № 2 (30). С. 31–44. doi: 10.25283/2223-4594-2018-2-31-44
- Тишкин А.А., Белоновская Е.А., Глазов П.М., Кренке А.Н., Пузаченко А.Ю., Тертицкий Г.М., Титова С.В.** Тундра и лес российской Арктики: вектор взаимодействия в условиях современного потепления климата // Арктика: экология и экономика. 2020. № 3 (39). С. 48–61. doi: 10.25283/2223-4594-2020-3-48-61

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Наукомкие технологии, 2022. 124 с. URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf (дата обращения: 04.01.2023).

Филандышева Л.Б., Ромашова Т.В., Юркова К.Д. Географические особенности г. Томска и динамика сезонных ритмов в условиях глобального изменения климата. Томск : Издательство Томского государственного университета, 2021. 254 с.

Электронную карту мест массового падежа оленей от сибирской язвы создали на Ямале // Информационное агентство ТАСС. 2018. URL: <https://tass.ru/obschestvo/5071560> (Дата обращения: 09.02.2024).

IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 p. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Lasserre Frédéric Arctic Seaways in the Age of Climate Change // Georgetown Journal of International Affairs. 2022. URL: <https://gjia.georgetown.edu/2022/04/18/arctic-seaways-in-the-age-of-climate-change/> (дата обращения: 20.01.2024).

State of the Global Climate 2022 // World Meteorological Organization (WMO). 2023. № 1316. 55 p. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11593 (дата обращения 07.06.2023).

Thoman R.L., Moon T.A., Druckenmiller M.L. Arctic report card 2023. 2023. 115 p. URL: https://arctic.noaa.gov/wp-content/uploads/2023/12/ArcticReportCard_full_report2023.pdf (дата обращения 04.01.2024). doi: 10.25923/5vfa-k694

References

Arktika: strategicheskoe znachenie dlya Rossii [The Arctic: strategic significance for Russia] [Electronic resource]: Institute for International Political and Economic Solutions. 2020. URL: <https://russtrat.ru/reports/20-dekabrya-2020-1614-2511> (Date of accessed: 12.02.2024). In Russian

Vanshteyn B.G., Streletskaia I.D., Pis'menyuk A.A. *Geosistemy beregov Karskogo morya v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata* [Geosystems of the Kara Sea shores under changing climate] // *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: ecology and economy]. 2020. 3(39). pp. 73–86. In Russian. doi: 10.25283/2223-4594-2020-3-73-86

Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Tekhnicheskoe rezyume [Second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Technical Summary]. [Electronic resource]: *Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy (Rosgidromet)* [Federal Agency for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet)]. Moscow. 2014. 93 p. URL: http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/pdf/resume_teh.pdf (Date of accessed: 15.01.2023). In Russian

Galakhov N.N. *Izuchenie struktury klimaticeskikh sezonov goda* [Study of the structure of the climatic seasons of the year] Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences. 1959. 213 p. In Russian

Gvozdetskiy N.A., Mikhaylov N.I. *Fizicheskaya geografiya USSR. Azjatskaya chast': Uchebnik dlya studentov geograficheskikh fakul'tetov universitetov*. [Physical Geography of the USSR. Asian part: Textbook for students of geographical faculties of universities]. Moscow: *Mysl'*. 1978. 512 p. In Russian

Golubyatnikov L.L., Zarov E.A., Kazantsev V.S., Filippov I.V., Gavrilov G.O. *Analiz struktury landshaftov tundrovoy zony Zapadnoy Sibiri na osnove sputnikovykh dannykh* [Analysis of landscape structure in the tundra zone of Western Siberia based on satellite data] // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa* [Earth exploration from space]. 2015. 3. pp. 4–14. In Russian. doi: 10.7868/S0205961415030057

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2020 god [Report on Climate Features on the Territory of the Russian Federation for 2020] [Electronic resource]: Moscow. 2021. 104 p. URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/doklad_klimat2020.pdf (Date of accessed: 04.01.2023). In Russian

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2021 god [Report on Climate Features on the Territory of the Russian Federation for 2021] [Electronic resource]: Moscow. 2022. 104 p. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/images/news/20220324/4/Doklad.pdf> (Date of accessed: 04.01.2023). In Russian

Zhilina I.Yu. (2021) *Poteplenie v Arktike: vozmozhnosti i riski* [Warming in the Arctic: Opportunities and Risks] // *Ekonomicheskie i sotsial'nye problemy Rossii* [Economic and social problems of Russia]. 70. pp. 66–87. In Russian

Ianova M.V., Danilin K.P., Koshkarev M.V. *Severnyy morskoy put' kak prostranstvo soglasovaniya interesov dlya ustoychivogo sotsial'no-ekonomiceskogo razvitiya Arktiki* [The Northern Sea Route as a space of harmonization of interests for sustainable socio-economic development of the Arctic] // *Arktika: ekologiya i ekonomika* [The Arctic: ecology and economy]. 2022. V. 12(4). pp. 538–550. In Russian. doi: 10.25283/2223-4594-2022-4-538-550

Kirpotin S.N., Polishchuk Yu.M., Bryksina N.A. *Dinamika ploshchadey termokarstovykh ozer v sploshnoy i preryvistoy kriolitozonakh Zapadnoy Sibiri v usloviyakh global'nogo potepleniya* [Dynamics of thermokarst lake areas in continuous and discontinuous cryolithozones of Western Siberia under global warming conditions] // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University]. 2008. 311. pp. 185–190. In Russian

Konyshov V.N., Lagutina M.L. *Bezopasnost' cheloveka v Arktike: ugrozy skvoz' prizmu «severnogo mentaliteta»* [Human security in the Arctic: threats through the prism of the "northern mentality"] // *Arktika i Sever* [The Arctic and North]. 2021. 45. pp. 85–112. In Russian. doi: 10.37482/issn2221-2698.2021.45.85

Kosova E.A. *Regional'nye osobennosti izmeneniya termicheskogo rezhima v Arkticheskoy zone Zapadno-Sibirskoy ravniny na primere ostrova Belyy* [Regional peculiarities of thermal regime changes in the Arctic zone of the West Siberian Plain on the example of Bely Island]. *Simpozium «Mezhdisciplinarnye podkhody v biologii, meditsine i naukakh o Zemle: teoreticheskie i prikladnye aspekty»: materialy simpoziuma XVII (XLIX) Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh «Obrazovanie, nauka, innovatsii: vklad molodykh issledovatelyeley»*. Kemerovskiy gosudarstvennyy universitet [Symposium "Interdisciplinary Approaches in Biology, Medicine and Earth Sciences: Theoretical and Applied Aspects": Materials of the Symposium XVII (XLIX) International Scientific Conference of Students and Young Scientists "Education, Science, Innovation: Contribution of Young Researchers". Kemerovo State University]. Kemerovo: KemSU. 2022. V. 23. pp. 36–39. In Russian.

Kosova E.A., Filandysheva L.B. *Ob izmenenii termicheskogo rezhima v arktilcheskoy tundre Zapadnoy Sibiri i ego vliyanii na organizatsiyu turizma* [Changes in the thermal regime in the Arctic tundra of Western Siberia and its impact on the organization of

tourism]. *Materialy Vserossiyskoy konferentsii «Dinamika i vzaimodeystvie geosfer Zemli»* [Materials of the National Russian Conference "Dynamics and Interaction of the Earth's Geospheres"]. Tomsk: Tomsk CNTI Publishing House, 2021. pp. 256–259. In Russian.

Mazharov A.V., Smorchkova V.I. *Razvitiye traditsionnogo khozyaystvovaniya korennykh malochislennykh narodov Arktiki v sovremennykh usloviyakh* [Development of traditional economic activities of Arctic indigenous minorities in modern conditions]. Moscow: Russian Academy of Public Administration. 2007. 136 p. In Russian.

Okisheva L.N. *Prostranstvenno-vremennoy analiz klimaticeskikh usloviy sezonnnoy ritmiki geosistem Ob'-Eniseyskogo Severa: avtoreferat dissertatsii kandidata geograficheskikh nauk* [Spatial and temporal analysis of climatic conditions of seasonal rhythm of geosystems of the Ob-Yenisei North: abstract of the dissertation of the candidate of geographical sciences]. Novosibirsk. 1984. 17 p. In Russian.

Okisheva L.N. *Sezonnye ritmy prirody Subarktiki: metodika poiska kriteriev i kharakteristiki: ucheb.-metod. Posobie* [Seasonal rhythms of nature in the Subarctic: methodology of criteria search and characterization: Textbook]. Tomsk: Prichatnik. 2008. 120 p. In Russian.

Okisheva L.N., Fylandysheva L.B. *Vremennaya dinamika i funktsionirovaniye landshaftov Zapadnoy Sibiri* [Temporal dynamics and functioning of landscapes of Western Siberia]. Tomsk: TSU Publishing House. 2015. 328 p. In Russian.

Romashova T.V., Fylandysheva L.B., Yurkova K.D. *Analiz dinamiki vremennyykh kharakteristik sezonnov goda v podtayge Zapadno-Sibirskoy ravniny za period s 1936 po 2015 gg.* [Analysis of the dynamics of temporal characteristics of the seasons of the year in the subtaiga of the West Siberian Plain for the period from 1936 to 2015] // *Geosfernye issledovaniya* [Geosphere Research]. 2017. 3. pp. 16–25. In Russian

Rutkovskaya N.V. *Struktura i tipy kholodno-snezhnykh chastej goda v tundre Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Structure and types of cold-snow parts of the year in the tundra of the West Siberian Plain]. *Voprosy geografii Sibiri* [Issues of Siberian geography]. Tomsk: Tomsk University Publishing House. 1980. V. 13. pp. 103–111. In Russian

Rutkovskaya N.V. *Issledovanie struktury kholodno-snezhnoy chasti godovogo tsikla Taz-Turukhanskoy podzony severo-taehzhnykh lesov Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Investigation of the structure of the cold-snow part of the annual cycle of the Taz-Turukhan subzone of the North taiga forests of the West Siberian Plain] // *Voprosy geografii Sibiri* [Issues of Siberian geography]. Tomsk: Tomsk University Publishing House. 1983. V. 14. pp. 15–25. In Russian

Rutkovskaya N.V., Ascheulov A.V. *Analiz pogodnykh usloviy tundry Zapadno-Sibirskoy ravniny v sezonnom aspekte dlya meditsinskikh tseley* [Analysis of weather conditions of the tundra of the West Siberian Plain in seasonal aspect for medical purposes]. *Voprosy geografii Sibiri* [Issues of Siberian geography]. Tomsk: Tomsk University Publishing House. 1989. V. 18. pp. 57–67. In Russian

Tishkov A.A., Belonovskaya E.A., Weisfeld M.A., Glazov P.M., Krenke A.N., Tertitsky G.M. *«Pozelenenie» tundry kak drayver sovremennoy dinamiki arkticheskoy bioty* ["Greening" of tundra as a driver of modern dynamics of Arctic biota] // *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: ecology and economics]. 2018. 2(30). pp. 31–44. doi: 10.25283/2223-4594-2018-2-31-44. In Russian

Tishkov A.A., Belonovskaya E.A., Glazov P.M., Krenke A.N., Puzachenko A.Y., Tertitsky G.M., Titova S.V. *Tundra i les rossiyskoy Arktiki: vektor vzaimodeystviya v usloviyakh sovremennoy potepleniya klimata* [Tundra and forest of the Russian Arctic: vector of interaction under the conditions of modern climate warming] // *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: ecology and economics]. 2020. 3(39). pp. 48–61. doi: 10.25283/2223-4594-2020-3-48-61. In Russian

Tretiy otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Obshcheye rezume. [Third Assessment Report on Climate Change and its Impacts on the Territory of the Russian Federation. General summary] [Electronic resource]. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii. 2022. 124 p. URL: https://www.meteorf.gov.ru/_upload/pdf_download/compressed.pdf (Date of accessed: 04.01.2023). In Russian

Fylandysheva L.B., Romashova T.V., Yurkova K.D. *Geograficheskie osobennosti g. Tomsk i dinamika sezonnnykh ritmov v usloviyakh global'nogo izmeneniya klimata* [Geographical features of Tomsk and dynamics of seasonal rhythms under global climate change]. Tomsk: Tomsk State University Publishing House. 2021. 254 p.

Elektronnyu kartu mest massovogo padezha oleney ot sibirskoy yazyvy sozdali na Yamale [An electronic map of places of mass grazing of reindeer due to anthrax has been created in Yamal]. TASS News Agency. 2018. URL: <https://tass.ru/obschestvo/5071560> (Date of accessed: 09.02.2024). In Russian

IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 p. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Lasserre Frédéric Arctic Seaways in the Age of Climate Change // Georgetown Journal of International Affairs. 2022. URL: <https://gjia.georgetown.edu/2022/04/18/arctic-seaways-in-the-age-of-climate-change/> (Date of accessed: 20.01.2024).

State of the Global Climate 2022 // World Meteorological Organization (WMO). 2023. № 1316. 55 p. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11593 (Date of accessed 07.06.2023).

Thoman R.L., Moon T.A., Druckenmiller M.L. Arctic report card 2023. 2023. 115 p. URL: https://arctic.noaa.gov/wp-content/uploads/2023/12/ArcticReportCard_full_report2023.pdf (Date of accessed 04.01.2024). doi: 10.25923/5vfa-k694

Информация об авторах:

Косова Е.А., аспирант, старший лаборант, кафедра краеведения и туризма; инженер-исследователь проблемной научно-исследовательской лаборатории гляциоклиматологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: katerina5427@mail.ru

Филандышева Л.Б., кандидат географических наук, доцент, кафедра краеведения и туризма, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: filandysheva@yandex.ru

Макаренко Е.П., кандидат географических наук, доцент, заведующая кафедрой краеведения и туризма, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: makarenkotsu@yandex.ru

Вклад авторов:

Косова Е.А. – статистический анализ климатических характеристик; временной анализ изменения сезонных ритмов создание таблиц и диаграмм; написание исходного текста; итоговые выводы.

Филандышева Л.Б. – научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, статистический анализ и обобщение динамики сезонных ритмов, работа над текстом, итоговые выводы.

Макаренко Е.П. – обобщение материала по динамике ландшафтов в условиях изменения климата, доработка текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Kosova E.A., postgraduate student, Senior Laboratory Assistant, Department of Local History and Tourism; research engineer of the Problem Research Laboratory of Glacioclimatology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: katerina5427@mail.ru

Filandysheva L.B., Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Department of Local History and Tourism, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: filandysheva@yandex.ru

Makarenko E.P., Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Head of the Department, Department of Local History and Tourism, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: makarenkotsu@yandex.ru

Contribution of the authors:

Kosova E.A. – statistical analysis of climatic characteristics; temporal analysis of changes in seasonal rhythms creation of tables and diagrams; writing the draft; final conclusions.

Filandysheva L.B. – scientific management, research concept; methodology development, statistical analysis and generalization of the dynamics of seasonal rhythms, work on the text, final conclusions.

Makarenko E.P. – generalization of material on landscape dynamics in the context of climate change, follow-on revision of the text; final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.02.2024; одобрена после рецензирования 25.04.2024; принята к публикации 02.06.2025

The article was submitted 24.02.2024; approved after reviewing 25.04.2024; accepted for publication 02.06.2025

Научная статья

УДК 332.12.620.9:504.06

doi: 10.17223/25421379/5/11

СТРУКТУРА ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ОТ ОБЪЕКТОВ ДОБЫЧИ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В РЕГИОНАХ РОССИИ

Елена Петровна Майсюк¹, Ирина Юрьевна Иванова², Борис Григорьевич Санеев³



^{1, 2, 3} Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия

¹ maysyuk@isem.irk.ru

² nord@isem.irk.ru

³ saneev@isem.irk.ru

Аннотация. Представлен расчет выбросов парниковых газов по федеральным округам России от добычи топливно-энергетических ресурсов: угля и углеводородов. Расчетный совокупный выброс по России оценивается в 208 млн т СО₂-экв, с преимущественной долей в 67 % от добычи углеводородов. Оценка пространственного распределения выбросов парниковых газов при добыче топливно-энергетических ресурсов показала, что доминирующими поставщиками являются Уральский и Сибирский федеральные округа – до 74 % от российских показателей.

Ключевые слова: уголь, углеводороды, метан, диоксид углерода, добыча, коэффициент эмиссии, регионы России

Источник финансирования: работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0004) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038).

Для цитирования: Майсюк Е.П., Иванова И.Ю., Санеев Б.Г. Структура выбросов парниковых газов от объектов добычи топливно-энергетических ресурсов в регионах России // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 139–153. doi: 10.17223/25421379/35/11

Original article

doi: 10.17223/25421379/35/11

STRUCTURE OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM FOSSIL FUEL PRODUCTION FACILITIES IN RUSSIAN REGIONS

Elena P. Maysyuk¹, Irina Yu. Ivanova², Boris G. Saneev³

^{1, 2, 3} Melentiev Energy Systems Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia

¹ maysyuk@isem.irk.ru

² nord@isem.irk.ru

³ saneev@isem.irk.ru

Abstract. The development of measures and technologies for reduction of greenhouse gas emissions requires assessing the existing emission sources and obtaining a quantitative estimate of the emissions. A significant contribution to greenhouse gas emissions is made by the energy sector, which includes not only generation facilities that burn fossil fuels to produce heat and electricity but also enterprises engaged in their extraction. As an approach for calculating greenhouse gas emissions from the extraction of fuel and energy resources, the methods developed at the Institute of Global Climate and Ecology named after Yu.A. Israel. These methods for quantifying greenhouse gas emissions are based on the Guidelines of the Interstate Group of Experts on climate change from 2006, supplemented by national methodological developments, taking into account domestic experience in conducting inventories and scientific research. To estimate greenhouse gas emissions, national emission coefficients were used, taking into account the territorial aspect. Such coefficients are developed for different types of fuels based on their physico-chemical properties used in various fields of activity. The calculation of greenhouse gas emissions from the extraction of fuel and energy resources includes an assessment of emissions into the atmosphere directly from the extraction of coal and hydrocarbons, as well as subsequent operations with resources. The calculation of the amount of greenhouse gas emissions (carbon dioxide and methane) during coal mining was carried out taking into account the open and closed production methods. Estimates of greenhouse gases entering the atmosphere during hydrocarbon production take into account certain types of activities: drilling, testing and maintenance of existing oil wells; extraction and primary processing of natural gas; transportation of hydrocarbons; storage of natural gas; gas distribution; flaring of petroleum (associated) gas; gas disposal during oil and gas production; natural gas flaring during gas extraction and primary processing.

An assessment of the spatial distribution of greenhouse gas emissions made it possible to identify the main activities that cause greenhouse gas emissions during the extraction of energy resources and to determine which Federal Districts of Russia are the major contributors. As a result, it is obtained that the total estimated greenhouse gas emissions in Russia from the extraction of fuel and energy resources are estimated at 208 million tons of CO₂-eq, with a predominant share of 67 % from activities in the field of hydrocarbon production (oil, condensate and natural gas).

In spatial distribution the estimations of greenhouse gas emissions from the extraction of fossil energy resources show the significant predominance of the emissions in the Urals and Siberian Federal Districts, which account for 74 % of the Russian indices. That being said, whereas coal-mining emissions prevail in the Siberian Federal District, hydrocarbon production emissions predominate in the Urals Federal District.

Keywords: coal, hydrocarbons, methane, carbon dioxide, emission factor

Source of financing: The research was carried out under State Assignment Project (no. FWEU-2021-0004) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030 and partly supported by the Russian Foundation of Basic Research, Grant No. 21-03-12345 using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no 13.CKP.21.0038).

For citation: Maysyuk E.P., Ivanova I.Yu., Saneev B.G. (2025) Structure of greenhouse gas emissions from fossil fuel production facilities in Russian regions. *Geofernye issledovaniya – Geosphere Research.* 2. pp. 139–153. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/35/11

Введение

Интерес к проблемам безуглеродного или низкоуглеродного развития экономики пусть и несколько снизился, однако все еще остается в повестке дня как развитых, так и развивающихся стран мира. В России принята Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. [О Стратегии..., 2021], в которой в соответствии с требованиями Парижского соглашения [Парижское соглашение..., 2015] за базовый год официально принят 1990 г. и Россией взяты обязательства к 2030 г. снизить выбросы до 70 % от уровня 1990 г. с учетом поглощений в лесном хозяйстве и при землепользовании.

Как показано в статье [Порфириев и др., 2021], имеются ключевые риски реализации стратегии, которые связаны с трудностями импорта низкоуглеродных технологий и оборудования из развитых стран, с непризнанием поглощающей способности российских лесов, безуглеродности атомных и гидроэлектростанций и ростом требований по еще более радикальному снижению эмиссий.

Основным источником эмиссии парниковых газов как в мире, так и России является сектор энергетики, который поставляет в атмосферу до 78 % совокупных выбросов парниковых газов [Национальный доклад, 2023]. Необходимо напомнить, что в соответствии с классификацией Межправительственной группы экспертов по изменению климата и Рамочной конвенции ООН об изменении климата к сектору «Энергетика» отнесены – независимо от того в каких отраслях экономики они происходят – выбросы от сжигания всех видов ископаемого топлива, а также от процессов, приводящих к утечкам и технологическим выбросам газообразных топливных продуктов в атмосферу [МГЭИК, 2006].

Учеными рассматриваются различные сценарии декарбонизации экономики и энергетики, например, с использованием существующих нефтегазодобывающих мощностей для генерации водорода, использованием для захоронения CO₂ масштабных технологий существующей инфраструктуры нефтедобывающей отрасли и (или) созданием сети карбоновых полигонов и ферм для секвестрации углерода биологическими системами [Нургалиев и др., 2021].

Анализ прогнозов развития мировой энергетики показывает, что сценарии перспективного развития глобальной энергетики зависят от идеологии, которая в них закладывается правительствами стран, их разрабатывающими [Мастепанов, 2021]. Понятно, что скорость и уровни перехода к безуглеродной энергетике для разных стран будут разными в зависимости от степени сложности преодоления их внутренних и внешних социально-экономических, территориально-пространственных и геополитических особенностей.

Для разработки сценариев низкоуглеродного развития энергетики основой является существующий уровень поступления парниковых газов в атмосферу. В структуре выбросов парниковых газов в секторе энергетики преобладают выбросы от сжигания топлива – порядка 90 %. И с точки зрения функционирования топливно-энергетического комплекса оставшаяся часть приходится на выбросы, которые обусловлены добычей, первичной переработкой, транспортировкой и использованием природного топлива (нефти, природного и нефтяного (попутного) газов, угля, торфа и др.) и продуктов его переработки.

Рассматривая топливно-энергетический комплекс в целом, важно оценивать не только выбросы парниковых газов в результате производства электрической и тепловой энергии, но и оценить объемы и структуру эмиссии от добычи топливно-энергетических ресурсов (ТЭР): углеводородов и угля.

Актуальность исследования продиктована проблемами изучения вклада добывающих ТЭР отраслей в выбросы парниковых газов и роли их в глобальном изменении климата.

В данном исследовании поставлена цель – определить вклад в совокупную (диоксида углерода и метана) эмиссию парниковых газов в секторе энергетики России от добычи топливно-энергетических ресурсов: угля и углеводородов (нефти, газового конденсата, природного газа), оценить пространственное распределение этих выбросов по регионам Российской Федерации. Аналогичное исследование авторами проведено для оценки регионального распределения выбросов парниковых газов от генерации тепловой и электрической энергии в России [Санеев и др., 2022].

В соответствие с Федеральным законом РФ «Об ограничении выбросов парниковых газов» российским правительством утвержден перечень парниковых газов, в отношении которых осуществляется учет и ведение кадастра выбросов [Распоряжение..., 2021]. Перечень включает семь основных парниковых газов: диоксид углерода, метан, закись азота, гексафторид серы, трифтогид азота, перфторуглероды и их производные, гидрофторуглероды и их производные.

К совокупным выбросам парниковых газов при добыче топливно-энергетических ресурсов относятся диоксид углерода (CO_2), метан (CH_4), закись азота (N_2O) и предшественники озона (NO_x , CO), неметановые летучие органические соединения (НМЛОС). В представленных исследованиях в оценку включены диоксид углерода и метан, остальные составляющие парниковых газов не рассчитывались из-за их незначительных величин.

Оценка пространственного распределения по регионам России выбросов парниковых газов от топливно-энергетического комплекса позволяет выявить территории, в которых эмиссия наибольшая, и определить структуру по видам деятельности в добывающих отраслях.

Методы исследования

В качестве подхода для расчетов эмиссии парниковых газов при добыче ТЭР приняты методические основы, разработанные в Национальном кадастре антропогенных выбросов России [Национальный доклад..., 2023].

Расчет выбросов парниковых газов при добыче ТЭР включает оценку эмиссии в атмосферу непосредственно от добычи и последующих операциях с ресурсами:

- угля в зависимости от способа добычи: подземный или открытый;
- нефти и газового конденсата;

– природного газа.

При добыче угля в соответствии с руководящими принципами Международной группой экспертов по изменению климата [МГЭИК, 2006] расчет проводится только для метана, который возможно оценить в зависимости от способа добычи и географическому расположению месторождений. Считается, что выбросы диоксида углерода при добыче угля не производятся или ничтожно малы.

Оценка выбросов метана проводится для двух видов деятельности при добыче угля: 1) непосредственно добыча (извлечение угля из недр, как открытым, так и подземным способом); 2) последующее обращение с углем, включающее складирование и транспортировку угля.

В соответствие с Национальным кадастром [Национальный доклад, 2023] расчет выбросов при угледобыче проводится по формуле (1), рекомендованной МГЭИК:

$$E_{\text{CH}_4} = \sum (AD_r \cdot EF_{\text{CS}} \cdot CF_{\text{CH}_4}), \quad (1)$$

где: E_{CH_4} – величина выброса метана, тыс. т; AD_r – годовой объем добычи угля в зависимости от региона, млн т; EF_{CS} – коэффициент эмиссии метана в зависимости от региона добычи и вида деятельности, $\text{m}^3/\text{т}$; CF_{CH_4} – коэффициент пересчета объемных долей метана в весовые ($0,67 \times 10^{-6}$ тыс. т/ m^3) при плотности в условиях $T = 20^\circ\text{C}$ и давлении 1 атм. В соответствии с руководящими принципами МГЭИК [МГЭИК, 2006].

По данным о метаноносности пластов, разрабатывавшихся в угольных бассейнах Российской Федерации, с 1990 г. для каждого из федеральных округов определены национальные коэффициенты эмиссии метана (табл. 1).

Оценка выбросов парниковых газов при добыче и операциях с углеводородами основывается на расчетах по различным видам деятельности отдельно по парниковым газам (CO_2 и CH_4) и проводится по рекомендованной МГЭИК формуле (2):

$$E_{\text{газ, нефть сегмент отрасли}} =$$

$$= A_{\text{сегмент отрасли}} \cdot EF_{\text{газ, нефть сегмент отрасли}}, \quad (2)$$

где: $E_{\text{газ, нефть сегмент отрасли}}$ – величина годовой эмиссии парникового газа в рассматриваемом сегменте отрасли, тыс. т; $A_{\text{сегмент отрасли}}$ – величина данных о деятельности (например, объем добычи нефти, природного газа и пр.), единиц деятельности; $EF_{\text{газ, нефть сегмент отрасли}}$ – коэффициент эмиссии, тыс. т на единицу деятельности.

В методике расчетов эмиссии парниковых газов при добыче углеводородов рассмотрены три основные составляющие: 1) операции с нефтью и газовым конденсатом; 2) операции с природным газом; 3) сжигание углеводородов при операциях с нефтью и природным газом (сжигание на факелях). В каждом из сегментов отрасли определены виды деятельности по разным парниковым газам отдельно.

Коэффициенты эмиссии метана при добыче и последующем обращении с углем по федеральным округам России в зависимости от способа добычи, м³/т

Таблица 1

Methane emission factors during extraction and subsequent handling of coal in the federal districts of Russia, depending on the method of extraction, m³/t

Table 1

Федеральный округ	Угольный бассейн	Вид деятельности			
		добыча		Последующее обращение	
		П*	О**	П*	О**
Центральный	Подмосковный	8,0	2,0	0,6	0,1
Северо-Западный	Печорский	32,1	6,0	1,1	0,2
Южный	Донецкий	283,4	—	7,3	—
Приволжский	Кизеловский, Урало-Каспийский, Южно-Уральский	13,8	2,0	0,6	0,1
Уральский	Махневско-Каменский и Челябинский	13,8	2,0	0,6	0,1
Сибирский	Горловский, Иркутский, Канско-Ачинский, Кузнецкий, Минусинский, Таймырский, Тунгусский, Улухемский	15,7	5,5	3,0	0,2
Дальневосточный	Беринговский, Буреинский, Западно-Камчатский, Зырянский, Ленский, Омсукчанский, Партизанский, Раздольненский, Сахалинский, Угловский, Ханкайский, Южно-Уссурийский, Южно-Якутский	18,9	5,6	2,6	0,2

Примечание. *П – подземный способ добычи; **О – открытый способ добычи.

Note. * – underground mining method; ** – open mining method.

В расчетах выбросов диоксида углерода (CO₂) при операциях с нефтью и газовым конденсатом учитывались следующие виды деятельности:

- бурение, опробование и обслуживание действующих нефтяных скважин;
- добыча нефти и газового конденсата (совместно);
- транспорт нефти и газового конденсата.

В расчетах эмиссии метана (CH₄) при операциях с нефтью дополнительно учитывался вид деятельности – первичная переработка нефти.

В расчетах выбросов парниковых газов (и диоксида углерода, и метана) при операциях с природным газом учитывались:

- добыча и первичная переработка природного газа;
- транспорт газа по магистральным трубопроводам;
- хранение природного газа (товарный газ);
- газораспределение.

Сжигание углеводородов при операциях с нефтью и природным газом (сжигание на факелях) предполагает расчет выбросов диоксида углерода и метана:

- от сжигания на факелях нефтяного (попутного) газа;

– газоотведения при добыче нефти и газа;

– сжигания природного газа на факелях при добыче и первичной переработке газа.

Для расчета выбросов парниковых газов при операциях с нефтью используются рекомендуемые МГЭИК для развитых стран коэффициенты эмиссии. Однако при оценке выбросов парниковых газов, связанных с операциями по добыче и подготовке природного газа, учитывались скорректированные значения национальных коэффициентов эмиссии. Эти национальные коэффициенты отражают стандартные условия, принятые в российской нефтегазовой отрасли, и получены на основе официально опубликованных данных ПАО «Газпром» об измерениях утечек метана на газотранспортных объектах в период с 2016 по 2019 г. По расчетам, выполненным в Национальном кадастре [Национальный доклад, 2023], коэффициенты выбросов диоксида углерода и метана от добычи, первичной переработки и транспорта природного газа соответствуют требованиям МГЭИК [МГЭИК, 2006].

Значения национальных коэффициентов эмиссии и рекомендованных МГЭИК, которые используются для расчета выбросов метана и диоксида углерода, приведены в соответствующих таблицах: при операциях

с нефтью и газовым конденсатом (табл. 2) [МГЭИК, 2006]; операциях с природным газом (табл. 3) [Национальный доклад, 2023]; при сжигании углеводородов на факелах (табл. 4) [Национальный доклад, 2023].

В территориальном разрезе эти коэффициенты одинаковы для всех регионов РФ.

Расчет эмиссии парниковых газов от добычи ТЭР включает и совокупную оценку путем приведения выбросов отдельных ингредиентов (двуокиси углерода и метана) к СО₂-экв. В целом суммарные выбросы парниковых газов по категориям источников рассчитываются

с учетом потенциалов глобального потепления парниковых газов через сопоставимые им объемы углекислого газа, поскольку он обладает наименьшей парниковой активностью и выражаются в СО₂ эквиваленте (формула 3) [Методические указания, 2015]:

$$E_{\text{CO}_2 \text{ экв, у}} = \sum_{i=1}^n (E_{i,y} \cdot GWP_i), \quad (3)$$

где WP_i – потенциал глобального потепления, т СО₂-экв/т; $E_{i,y}$ – эмиссия i -го парникового газа от вида деятельности y , т; n – количество видов выбранных парниковых газов; i – парниковый газ.

Таблица 2

Коэффициенты эмиссии для расчета выбросов парниковых газов при операциях с нефтью и газовым конденсатом, рекомендованные МГЭИК, тыс. т/тыс. м³

Emission factors for calculating greenhouse gas emissions from oil and gas condensate operations recommended by the IPCC, thousand tons/thousand m³

Вид деятельности (источник выбросов)	Диоксид углерода	Метан
Бурение скважин	$1,0 \times 10^{-4}$	$3,30 \times 10^{-5}$
Опробование скважин	$9,0 \times 10^{-3}$	$5,10 \times 10^{-5}$
Обслуживание действующих нефтяных скважин	$1,9 \times 10^{-6}$	$1,10 \times 10^{-4}$
Добыча нефти и газового конденсата	$1,3 \times 10^{-4}$	$1,80 \times 10^{-3}$
Транспорт нефти	$4,9 \times 10^{-7}$	$5,40 \times 10^{-6}$
Транспорт газового конденсата	$7,2 \times 10^{-6}$	$1,10 \times 10^{-4}$
Первичная переработка нефти	–	$2,18 \times 10^{-5}$

Таблица 3

Коэффициенты эмиссии для расчета выбросов парниковых газов при операциях с природным газом, тыс. т/млн м³

Emission factors for calculating greenhouse gas emissions from natural gas operations, thousand tons/million m³

Вид деятельности (источник выбросов)	Диоксид углерода	Метан
Добыча и первичная переработка природного газа*	$4,29 \times 10^{-6}$	$2,13 \times 10^{-4}$
Транспорт газа по магистральным трубопроводам с 2017 г.**	$7,38 \times 10^{-6}$	$1,84 \times 10^{-3}$
Хранение природного газа (товарный газ)	$1,1 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^{-5}$
Газораспределение	$5,1 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-3}$

Примечание. * – национальный коэффициент эмиссии охватывает выбросы в результате утечек и газоотведения при бурении, опробовании и обслуживании газовых скважин, а также добыче и первичной переработке добывшего газа; ** – национальный коэффициент эмиссии охватывает выбросы в результате утечек и газоотведения при транспорте газа по магистральным трубопроводам [Национальный доклад, 2023].

Note. * – the national emission factors covers emissions from leaks and gas disposal during drilling, testing and maintenance of gas wells, as well as extraction and primary processing of extracted gas; ** – the national emission factors covers emissions from leaks and gas disposal during gas transportation via main pipelines [National Report, 2023].

Таблица 4

Коэффициенты эмиссии для расчета выбросов парниковых газов при сжигании в факелах от добычи нефти и природного газа, тыс. т/м³

Table 4

Emission factors for calculating greenhouse gas emissions from flaring from oil and natural gas production, thousand tons/m³

Вид деятельности (источник выбросов)	Диоксид углерода	Метан
Газоотведение при добыче нефти и газового конденсата	$9,5 \times 10^{-8}$	$7,2 \times 10^{-7}$
Сжигание в факелах при добыче и первичной переработке газа	$5,68 \times 10^{-10}$	$1,01 \times 10^{-13}$
Сжигание в факелах нефтяного (попутного) газа	$2,0 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-8}$

В данном исследовании рассмотрено два парниковых газа: диоксид углерода и метан, потенциал глобального потепления которых равен 1 и 25 т СО₂-экв/т соответственно.

Результаты исследования

Расчеты эмиссии парниковых газов проведены для 2019 г., поскольку данные за этот год являются наиболее статистически обеспеченными по показателям деятельности предприятий, осуществляющих добычу и преобразование топливно-энергетических ресурсов в разрезе федеральных округов России. На основе изложенного выше подхода и математических зависимостей к оценке эмиссии парниковых газов проведены соответствующие расчеты выбросов: от добычи угля, операций с нефтью и газовым конденсатом, от сжигания углеводородов в факелах при операциях с нефтью и природным газом и операций с природным газом.

Добыча угля. Для проведения расчетов эмиссии парниковых газов от добычи угля и последующего

обращения с ним использовались коэффициенты эмиссии метана [Национальный доклад, 2023] (см. табл. 1).

Исходными данными для количественной оценки эмиссии парниковых газов от добычи угля явились объемы добычи как открытым, так и закрытым способом по субъектам РФ (Данные Минэнерго России и ФГБУ «ЦДУ ТЭК»). Следует отметить, что не во всех регионах России в 2019 г. велась добыча угля, соответственно, эти регионы из расчетов опущены (Приволжский и Уральский федеральные округа).

По формулам (1) и (3) с использованием коэффициентов эмиссии метана проведен расчет эмиссии парниковых газов от добычи угля (табл. 5).

Результаты расчета показывают, что наибольший выход метана происходит от непосредственной добычи угля – до 91 %. В пространственном распределении выделяется Сибирский федеральный округ, в котором сосредоточена основная добыча угля РФ. С учетом потенциала глобального потепления метана, его эмиссия от добычи углей в России оценивается в 69,7 млн т СО₂-экв.

Таблица 5
Результаты расчета выброса метана по федеральным округам РФ от добычи угля (состоит на 2019 г.)

Table 5

Results of calculation of methane emissions by federal districts of the Russian Federation from coal mining (state of 2019)

Федеральный округ, Россия	тыс. т метана		млн т СО ₂ -экв	
	Добыча	Последующее обращение с углем	Добыча	Последующее обращение с углем
Центральный	0,3	0,01	0,007	0
Северо-Западный	208,9	7,2	5,2	0,2
Южный	102,8	26,4	2,6	0,6
Сибирский	1875,4	208,8	46,9	5,2
Дальневосточный	339,3	19,5	8,5	0,5
Россия, всего	2526,7	261,9	63,2	6,5

Добыча углеводородов. Для расчетов выбросов парниковых газов от деятельности, связанной с добычей углеводородов в России, проведена отдельная большая работа по сбору, обработке и систематизации различной информации, как статистической, так и отчетной, за 2019 г.

Так, данные о добыче углеводородов, транспорте углеводородов в магистральных нефте- и газопроводах, а также объемах сожженного газа в факелах при газодобыче по федеральным округам России выбраны из Единого архива экономических и социологических данных на сайте Высшей школы экономики России [Единый архив, 2019–2020]. Информация об объемах первичной переработки нефти и сжигании попутного нефтяного газа в

факелах принята из Российского статистического ежегодника [Российский статистический ежегодник, 2021].

Оценка объемов газораспределения проведена исходя из данных о потреблении горючего и попутного газа в соответствии с формами статотчетности «Сведения об использовании топливно-энергетических ресурсов» [Форма 4-ТЭР, 2019].

Данные об объемах хранения товарного газа в подземных хранилищах по регионам России представлены на официальном сайте ПАО «Газпром» России [Подземное хранение, 2020].

Расчеты эмиссии парниковых газов – и диоксида углерода, и метана при операциях с нефтью – включают выбросы: от бурения и обслуживания нефтяных

скважин; добычи, транспорта нефти и газового конденсата. Выбросы при первичной переработке нефти рассчитываются только для метана.

Расчетная эмиссия парниковых газов по видам деятельности при операциях с нефтью показывает, что наибольший вклад в выбросы диоксида углерода вносит бурение, опробование и обслуживание действующих нефтяных скважин, а в выбросы метана – добыча нефти и газового конденсата от совокупных выбросов России (табл. 6).

Все полученные значения выбросов диоксида углерода и метана пересчитаны в совокупный выброс в виде СО₂-экв, анализ которого показал, что наибольший вклад в суммарную эмиссию парниковых газов в

России вносят Уральский (56 %) и Приволжский (21 %) федеральные округа (табл. 7).

Территориальное распределение по федеральным округам ингредиентной структуры эмиссии парниковых газов (диоксида углерода и метана) представлено на рис. 1.

Совокупные расчетные выбросы парниковых газов (диоксида углерода и метана) от сжигания на факелях при операциях с нефтью и природным газом от соответствующих видов деятельности (сжигание на факелях нефтяного попутного газа; газоотведение при добыче нефти и газового конденсата; сжигание газа на факелях при добыче и первичной переработке газа) в России составляют 58,6 млн т СО₂-экв (табл. 8).

Вклад отдельных видов деятельности при операциях с нефтью в расчетный выброс парниковых газов России (составление на 2019 г.)

Contribution of different types of oil production activities to the estimated greenhouse gas emissions in Russia (state of 2019)

Вид деятельности	Вклад в выброс парниковых газов, %	
	Диоксид углерода	Метан
Бурение, опробование и обслуживание действующих нефтяных скважин	98,5	9
Добыча нефти и газового конденсата	1,5	90
Транспорт нефти и газового конденсата и первичная переработка нефти	0,001	1

Расчетный совокупный выброс парниковых газов при операциях с нефтью по федеральным округам РФ

Estimated shared greenhouse gas emissions from oil operations by federal districts of the Russian Federation

Федеральный округ, Россия	млн т СО ₂ -экв
Северо-Западный	2,1
Южный	1,0
Северо-Кавказский	0,1
Приволжский	8,2
Уральский	21,3
Сибирский	3,4
Дальневосточный	2,2
Россия, всего	38,4

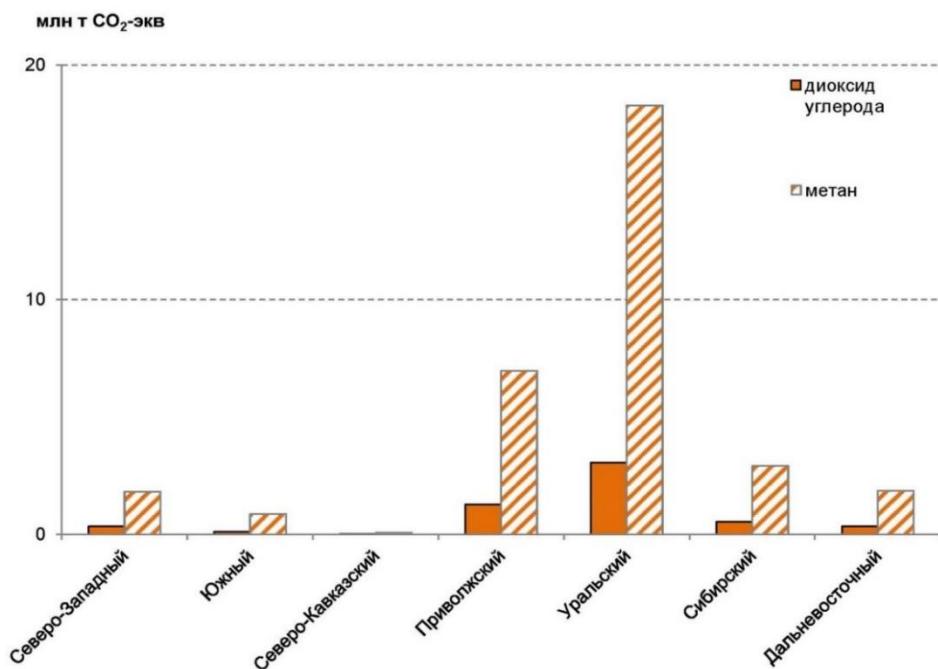


Рис. 1. Территориальное распределение ингредиентной структуры расчетных выбросов парниковых газов при операциях с нефтью

Fig. 1. Territorial distribution of the ingredient structure of estimated greenhouse gas emissions from oil operations

Расчетные выбросы парниковых газов от сжигания на факелях при операциях с нефтью и природным газом по федеральным округам

Таблица 8

Estimated greenhouse gas emissions from flaring operations with oil and natural gas by federal districts

Table 8

Федеральный округ, Россия	диоксид углерода, тыс. т	метан, тыс. т	млн т СО2-экв
Северо-Западный	832	31	1,6
Южный	199	14	0,5
Северо-Кавказский	70	1	0,1
Приволжский	2583	115	5,5
Уральский	10773	327	18,9
Сибирский	21847	173	26,2
Дальневосточный	4403	53	5,7
Россия, всего	40707	714	58,6

Рассматривая расчетные выбросы парниковых газов от сжигания на факелях при операциях с нефтью и природным газом по видам деятельности, следует выделить сжигание нефтяного попутного газа и газоотведение при добыче нефти и газового конденсата. Эти виды деятельности поставляют наибольшие выбросы как диоксида углерода (при сжигании на факелях попутного нефтяного газа), так и метана от газоотведения при добыче нефти.

Так, расчетный выброс парниковых газов при сжигании на факелях нефтяного попутного газа по федеральным округам России представлен на рис. 2, где явным лидером является Сибирский федеральный округ с совокупным выбросом диоксида углерода и метана в 25 млн т СО₂-экв., или 54 % от всего выброса РФ в 46,7 млн т СО₂-экв.

Если сравнить два вида деятельности от сжигания на факелях при операциях с нефтью и природным газом: газоотведение и сжигание на факелях нефтяного

попутного газа, то территориальное распределение выбросов различно. Так, расчетные выбросы метана от газоотведения преобладают в Уральском ФО, а от сжигания на факелях – в Сибирском ФО (рис. 3).

Результаты расчетов выбросов парниковых газов от операций с природным газом по федеральным округам представлены в табл. 9.

Наибольший выброс соответствует Уральскому ФО – 77 % от российского показателя.

При операциях с природным газом преобладают выбросы метана, расчетные выбросы диоксида углерода не превышают 30 тыс. т в целом по России.

Наибольший вклад в совокупные выбросы парниковых газов происходит от транспорта газа по магистральным газопроводам преимущественно в европейской части России (с преобладанием Уральского и Приволжского федеральных округов) и газораспределения (табл. 10).

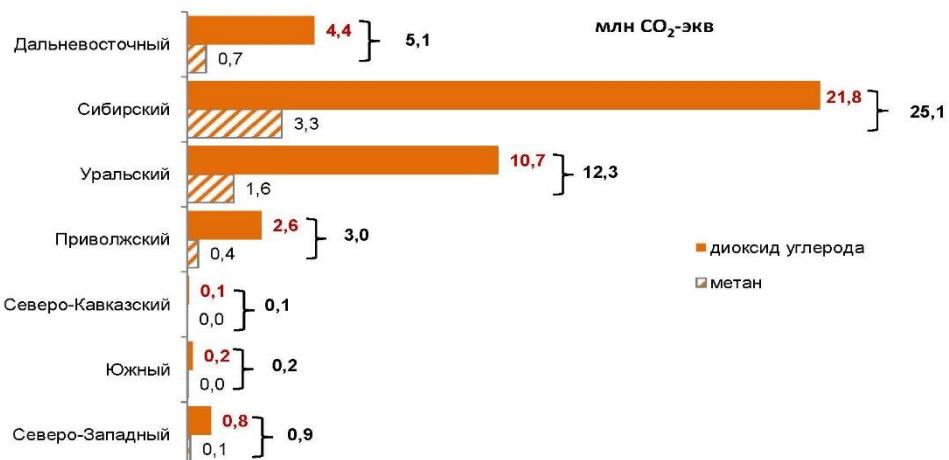


Рис. 2. Территориальное распределение расчетных выбросов парниковых газов при сжигании на факелях нефтяного попутного газа

Fig. 2. Territorial distribution of estimated greenhouse gas emissions from flaring of associated petroleum gas

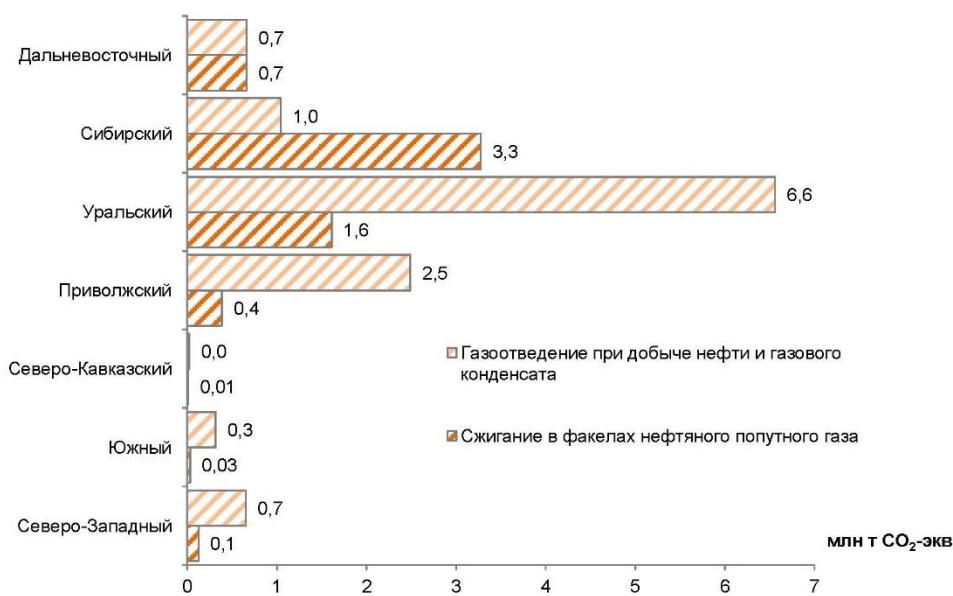


Рис. 3. Территориальное распределение расчетных выбросов парниковых газов при сжигании на факелях нефтяного попутного газа

Fig. 3. Territorial distribution of estimated methane emissions from flaring during operations with oil and natural gas, depending on the types of activities

Таблица 9

Расчетные выбросы парниковых газов при операциях с природным газом по федеральным округам России

Table 9

Estimated greenhouse gas emissions from natural gas operations by federal districts of Russia

Федеральный округ, Россия	млн т СО ₂ -экв
Центральный	2,2
Северо-Западный	1,4
Южный	0,9
Северо-Кавказский	0,3
Приволжский	3,2
Уральский	31,8
Сибирский	0,8
Дальневосточный	0,7
Россия, всего	41,5

Таблица 10

Вклад отдельных видов деятельности в расчетный выброс парниковых газов России при операциях с природным газом (2019 г.)

Table 10

Contribution of certain types of activities to Russia's estimated greenhouse gas emissions from natural gas operations (2019)

Вид деятельности	Вклад в выброс парниковых газов, %
Добыча и первичная переработка газа	7,9
Транспорт по магистральным газопроводам	62
Хранение (товарный газ)	0,1
Газораспределение	30

Обсуждение территориальной структуры совокупных выбросов парниковых газов

Добыча угля. Результаты проведенных расчетов выбросов метана при добыче угля и последующим с ним обращении по федеральным округам России представлены в табл. 11, в которой обозначены лишь те округа, в которых в 2019 г. велась добыча угля. Совокупный выброс парниковых газов в России от добычи угля оценивается примерно в 70 млн т СО₂-экв.

Как показано выше, основной вклад в совокупный выброс при операциях с углем происходит за счет добычи.

Оценивая роль регионов в эмиссию по показателям открытого и закрытого способа добычи с учетом деятельности по обращению с углем, видно, что наибольший вклад в суммарный выброс вносят восточные регионы России: 75 % – Сибирский федеральный округ и 13 % – Дальневосточный ФО (рис. 4).

Таблица 11

Расчетные выбросы метана от добычи угля по федеральным округам РФ

Table 11

Estimated methane emissions from coal mining by federal districts of the Russian Federation

Федеральный округ, Россия	Метан, тыс. т	млн т СО ₂ -экв
Центральный	0,3	0,007
Северо-Западный	216	5,4
Южный	129	3,2
Сибирский	2084	52,1
Дальневосточный	359	9,0
Россия, всего	2788	69,7

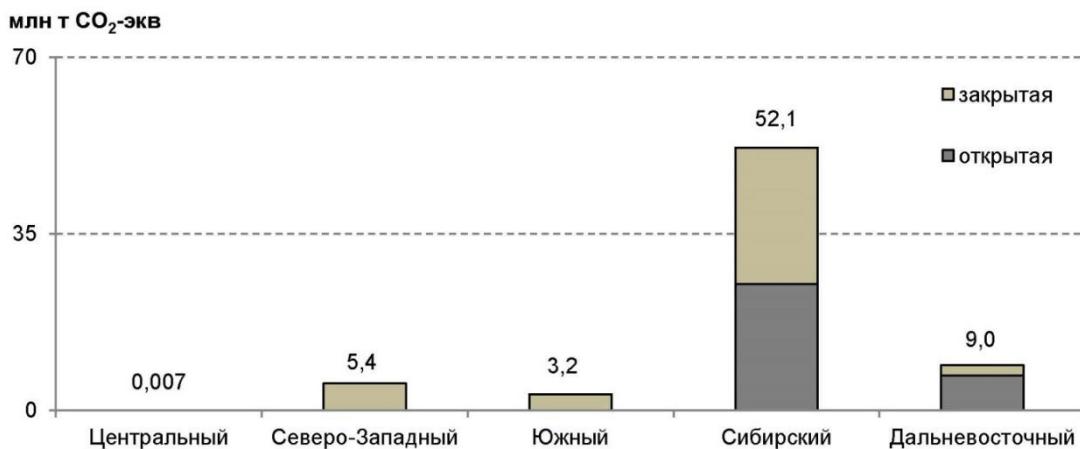


Рис. 4. Территориальное распределение расчетных выбросов парниковых газов от добычи угля с учетом способа добычи

Fig. 4. Territorial distribution of estimated greenhouse gas emissions from coal mining, taking into account the method of extraction

Добыча углеводородов. Обобщая полученные расчетные выбросы парниковых газов для нефтегазовой отрасли России, можно констатировать, что совокупный выброс оценивается в 138,4 млн т CO₂-экв. (табл. 12).

При этом среди сегментов нефтегазовой отрасли наибольший вклад в расчетные выбросы парниковых газов связан со сжиганием на факелях нефтяного попутного газа (42 % от всех выбросов в РФ), и здесь выделяется Сибирский федеральный округ.

В территориальном разрезе наибольшим выбросом парниковых газов (метана и диоксида углерода) при добыче нефти и природного газа характеризуются Уральский и Сибирский федеральные округа (рис. 5).

Оценивая проведенные расчеты от добычи всех видов топливно-энергетических ресурсов (угля и углеводородов) по федеральным округам, необходимо отметить значительный вклад нефтегазовой отрасли в суммарную эмиссию парниковых газов – до 67 % (табл. 13).

Расчетный выброс парниковых газов по федеральным округам России по видам деятельности в нефтегазовой отрасли, млн т CO₂-экв

Estimated greenhouse gas emissions by federal districts of Russia by type of activity in the oil and gas industry, million tons of CO₂-eq

Федеральный округ, Россия	Операции с нефтью	Сжигание на факелях	Операции с природным газом	Всего
Центральный	–	–	2,2	2,2
Северо-Западный	2,1	1,6	1,4	5,1
Южный	1,0	0,5	0,9	2,4
Северо-Кавказский	0,1	0,1	0,3	0,5
Приволжский	8,2	5,5	3,2	16,9
Уральский	21,3	18,9	31,8	72,1
Сибирский	3,4	26,2	0,8	30,5
Дальневосточный	2,2	5,7	0,7	8,6
Россия, всего	38,4	58,6	41,4	138,4

Таблица 12

Table 12

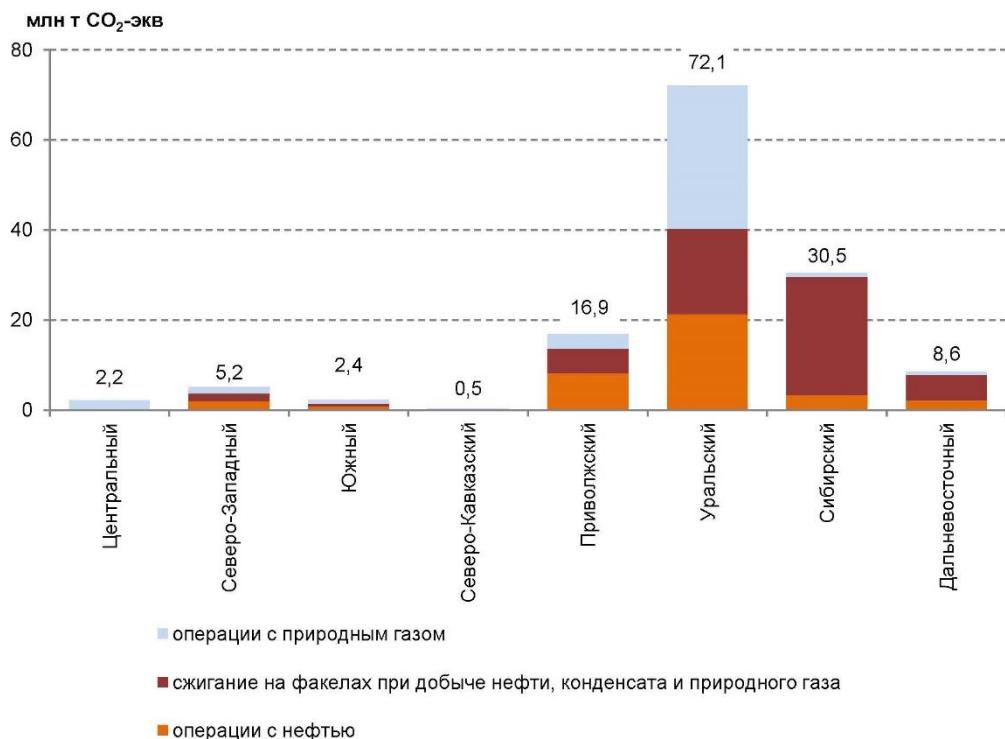


Рис. 5. Территориальное распределение расчетных выбросов парниковых газов по видам деятельности в нефтегазовой отрасли в России

Fig. 5. Territorial distribution of estimated greenhouse gas emissions by type of activity in the oil and gas industry in Russia

Таблица 13
Расчетные выбросы парниковых газов от добычи топливно-энергетических ресурсов в России, млн т СО₂-экв

Table 13
Estimated greenhouse gas emissions from the extraction of fuel and energy resources in Russia, million tons of CO₂-eq

Федеральный округ, Россия	Добыча угля	Нефтегазовая отрасль	Всего при добыче ТЭР
Центральный	0,007	2,2	2,2
Северо-Западный	5,4	5,2	10,6
Южный	3,2	2,4	5,6
Северо-Кавказский	0,0	0,5	0,5
Приволжский	0,0	16,9	16,9
Уральский	0,0	72,1	72,1
Сибирский	52,1	30,5	82,6
Дальневосточный	9,0	8,6	17,6
Россия, всего	69,7	138,4	208,1

Количественная оценка территориальной структуры эмиссии парниковых газов при добыче ТЭР показывает, что в Сибирском федеральном округе вклад угледобычи превосходит все сегменты нефтегазовой

отрасли, что, в свою очередь, формирует существенный вклад добычи угля и в суммарные показатели в целом по России – более 1/3 части от всех выбросов, рис. 6.

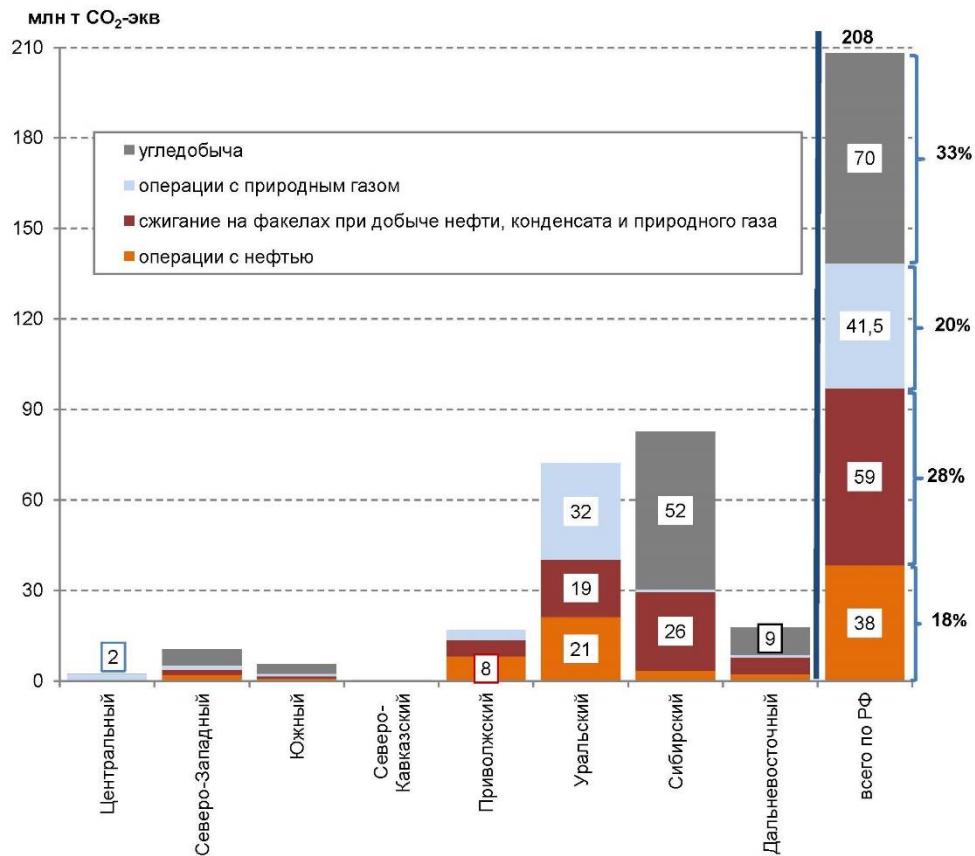


Рис. 6. Территориальное распределение расчетных выбросов парниковых газов от добычи топливно-энергетических ресурсов, млн т CO₂-экв

Fig. 6. Territorial distribution of estimated greenhouse gas emissions from the extraction of fuel and energy resources, million tons of CO₂-eq

Таким образом, проведенные исследования показывают, что 74 % от совокупной эмиссии парниковых газов в России от добычи ТЭР вносят два региона России – Уральский и Сибирский федеральные округа.

Заключение

В исследовании приведены методические подходы и математические зависимости для оценки выбросов парниковых газов от отраслей, связанных с добычей топливно-энергетических ресурсов, входящих в сектор «Энергетика» в соответствии с классификацией международной группы экспертов по изменению климата. В качестве подхода к оценке эмиссии парниковых газов при добыче ТЭР приняты методические основы, разработанные в Национальном кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом в соответствии с руководящими принципами МГЭИК.

На основе методик и имеющихся исходных данных по состоянию на 2019 г. проведен расчет выбросов парниковых газов от деятельности по добыче угля и углеводородов по федеральным округам Российской Федерации.

Проведенные исследования показали следующее:

- совокупный выброс парниковых газов в России от добычи ТЭР оценивается в 208 млн т CO₂-экв, из которых 67 % занимает деятельность по добыче углеводородов и, соответственно, 33 % – по угледобыче;

- третья часть парниковых газов в сфере добычи ТЭР поступает при сжигании попутного нефтяного и природного газа в факельных установках и составляет 28 % от совокупных выбросов России в сфере добычи ТЭР;

- в показателях при сжигании на факелах нефтяного попутного газа по федеральным округам России явно выделяется Сибирский федеральный округ с расчетным выбросом диоксида углерода в 21,8 млн т;

- наибольший выброс парниковых газов в сфере добычи ТЭР имеет место в Сибирском федеральном

округе за счет добычи угля, что формирует существенный вклад этого вида деятельности и в общероссийские показатели;

– на фоне всех федеральных округов России выделяется Уральский, в котором доминирует выброс от деятельности от добычи углеводородов.

Количественная оценка территориальной структуры эмиссии парниковых газов от добычи топливно-энергетических ресурсов показала, что 74 % суммарной эмиссии парниковых газов в данной сфере деятельности вносят два федеральных округа – Сибирский и Уральский.

Список источников

Единый архив экономических и социологических данных. Раздел Энергетика. 2019–2020 гг. Высшая школа экономики. URL: <http://sophist.hse.ru/rosstat.shtml> (дата обращения: 28.11.2022).

Мастепанов А.М. От ковидного «сегодня» к низко-углеродному «завтра»: анализ зарубежных прогнозов развития мировой энергетики // Георесурсы. 2021. № 23 (3). С. 42–52. doi: 10.18599/grs.2021.3.7

МГЭИК. Руководящие принципы МГЭИК 2006 года для национальных кадастров парниковых газов. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. МГЭИК-ИГЭС-ОЭСР-МЭА, ИГЕС, Япония. 2006. URL: <https://www.ipcc-nccc.iges.or.jp/public/2006gl/vol1.html> (дата обращения: 15.06.2023).

Методические указания и руководство по количественному определению объемов выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации. Утверждены приказом Минприроды России от 30.06.2015 г. URL: <http://sro150.ru/metodiki/371-metodika-rascheta-vybrosov-parnikovykh-gazov> (дата обращения: 28.11.2022).

Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2021 гг. Ч. 1. М. : Институт глобального климата и экологии им. акад. Ю.А. Израэля (ФГБУ «ИГКЭ»), 2023. 479 с.

Нургалиев Д.К., Селивановская С.Ю., Кожевникова М.В., Галицкая П.Ю. Некоторые вызовы и возможности для России и регионов в плане глобального тренда декарбонизации // Георесурсы. 2021. № 23 (3). С. 8–16. doi: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.2> (дата обращения: 03.03.2023).

О Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29 октября 2021 г. № 3052-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtIpruzWfHaiUa.pdf> (дата обращения: 01.12.2022).

Парижское соглашение. Организация Объединенных Наций. 2015. URL: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf (дата обращения: 1.11.2021).

Подземное хранение газа. Официальный сайт ПАО «Газпром». URL: <https://www.gazprom.ru/about/production/underground-storage/>, <https://www.gazprom.ru/f/posts/27/233865/50-years-underground-gas-storage-russia-ru.pdf> (дата обращения: 28.11.2022).

Порфириев Б.Н., Широн А.А., Колпаков А.Ю. Комплексный подход к стратегии низкоуглеродного социально-экономического развития России // Георесурсы. 2021. № 23 (3). С. 3–7. doi: 10.18599/grs.2021.3.1

Распоряжение Правительства РФ от 22 октября 2021 за № 2979-р «Об утверждении перечня парниковых газов, в отношении которых осуществляется государственный учет выбросов парниковых газов и ведение кадастра парниковых газов». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202110260021?syscid=lpw2yukkjc510715884> (дата обращения: 08.12.2023).

Российский статистический ежегодник. 2021: стат. сб. // Росстат. М., 2021. 692 с.

Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Ижбулдин А.К., Майсюк Е.П. Оценка территориальной структуры выбросов диоксида углерода от объектов энергетики в Российской Федерации // Энергетическая политика. 2022. № 11 (177). С. 92–103. doi: 10.46920/2409-5516_2022_11177_92

Форма статистических наблюдений Федеральной службы государственной статистики 4-ТЭР «Сведения об использовании топливно-энергетических ресурсов в России» за 2019 г.

References

Edinyy arkhiw ekonomicheskikh i sotsiologicheskikh dannykh. Razdel Energetika 2019–2020 gg. [Unified archive of economic and sociological data]. [Energy section] [Electronic resource] URL: <http://sophist.hse.ru/rosstat.shtml> (Date of accessed: 28.11.2022) In Russian

Mastepanov A.M.. *Ot kovidnogo «segodnya» k nizko-uglerodnomu «zavtra»: analiz zarubezhnykh prognozov razvitiya mirovoy energetiki* [From covid "today" to low-carbon "tomorrow": analysis of foreign forecasts of global energy development] // Georesursy [Georesources], 2021. 23(3), pp. 42–52. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.7>

IPCC. The 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.2023 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).2006.[Electronic resource] URL: <https://www.ipcc-nccc.iges.or.jp/public/2006gl/vol1.html> (Date of accessed:15.06.2023).

Metodicheskiye ukazaniya i rukovodstvo po kolichestvennomu opredeleniyu ob "yemov vybrosov parnikovykh gazov organizatsiyami, osushchestvlyayushchimi khozyaystvennyu i inyyu deyatel'nost' v Rossiyskoy Federatsii. [Methodological guidelines and guidelines for the quantitative determination of greenhouse gas emissions by organizations engaged in economic and other activities in the Russian Federation]. Utverzhden prikazom Minprirody Rossiiot 30.06.2015 g. – [Electronic resource] URL: <http://sro150.ru/metodiki/371-metodika-rascheta-vybrosov-parnikovykh-gazov>(Date of accessed: 28.11.2022). In Russian

Natsional'nyy doklad Rossiyskoy Federatsii o kadastre antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorbtii poglotitelyami parnikovykh gazov, ne reguliruyemykh Monreal'skim protokolom, za 1990–2021 gg. [National Report of the Russian Federation on the inventory of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases not regulated by the Montreal Protocol for 1990–2021.]. Chast' 1.Moscow: Institut lobal'nogo klimata i ekologiiim. Akad. YU.A. Izraelya (FGBU «IGKE»), 2023. 479 p. In Russian

Nurgaliev D.K., Selivanovskaya S.YU., Kozhevnikova M.V., Galickaya P.YU. *Nekotoryye vyzovy i vozmozhnosti dlya Rossii i regionov v plane global'nogo trenda dekarbonizatsii* [Some challenges and opportunities for Russia and the regions in terms of the global decarbonization trend]. Georesursy, 2021. 23(3), pp. 8–16. doi: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.2>. In Russian

O Strategii sotsial'no-ekonomiceskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii s nizkim urovnem vybrosov parnikovykh gazov do 2050 goda. Rasporyazheniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 29 oktyabrya [On the Strategy of Socio-economic Development of the Russian Federation with low Greenhouse Gas Emissions until 2050]. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 29 oktyabrya 2021 g. № 3052-r. [Electronic resource] URL: <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtIpyzWfHaiUa.pdf> (Date of accessed: 01.12.2022). In Russian

Parizhskoye soglasheniye. Organizatsiya Ob'yedinennykh Natsiy. 2015. [The Paris Agreement. The United Nations. 2015]. [Electronic resource] URL: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf (Date of accessed: 1.11.2021). In Russian

Podzemnoe hranenie gaza [Underground gas storage]. Oficial'nyjsajt PAO «Gazprom». [Electronic resource] URL: <https://www.gazprom.ru/about/production/underground-storage/>, <https://www.gazprom.ru/f/posts/27/233865/50-years-underground-gas-storage-russia-ru.pdf> (Date of accessed: 28.11.2022). In Russian

Porfir'ev B.N., SHirov A.A., Kolpakov A.YU. *Kompleksnyy podkhod k strategii nizkouglernogo sotsial'no-ekonomiceskogo razvitiya Rossii* [An integrated approach to the strategy of low-carbon socio-economic development of Russia] // Georesursy [Georesources], 2021. 23(3), pp. 3–7. doi: 10.18599/grs.2021.3.1. In Russian

Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 22 oktyabrya 2021 za № 2979-r «Ob utverzhdenii perechnya parnikovykh gazov, v otnoshenii kotorykh osushchestvlyayetsya gosudarstvennyy uchet vybrosov parnikovykh gazov i vedeniye kadastra parnikovykh gazov» – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202110260021?ysclid=lpw2yukkjc510715884> (Date of accessed: 08.12.2023). In Russian

Rossiyskiy statisticheskiy ezhegodnik [Russian Statistical Yearbook]. 2021: Stat.sbz/Rosstat. R76 Moscow, 2021. 692 p.

Saneev B.G., Ivanova I.YU., Izhbuldin A.K., Maysyuk E.P. *Otsenka territorial'noy struktury vybrosov dioksida ugleroda ot ob'yektor energetiki v Rossiyskoy Federatsii* [Assessment of the territorial structure of carbon dioxide emissions from energy facilities in the Russian Federation] // *Energeticheskaya politika* [Energy policy]. 2022. 11 (177). pp. 92–103. doi: 10.46920/2409-5516_2022_11177_92. In Russian

Forma statisticheskikh nablyudenij Federal'noj sluzhby gosudarstvennoj statistiki 4-TER «Svedeniya ob ispol'zovanii toplivno-energeticheskikh resursov v Rossii» za 2019 g. [The form of statistical observations of the Federal State Statistics Service 4-TER "Information on the use of fuel and energy resources in Russia" for 2019]. In Russian

Информация об авторах:

Майсюк Е.П., кандидат экономических наук, старший научный сотрудник лаборатории энергоснабжения децентрализованных потребителей, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: maysyuk@isem.irk.ru

Иванова И.Ю., кандидат экономических наук, заведующая лабораторией энергоснабжения децентрализованных потребителей, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail:nord@isem.irk.ru

Санеев Б.Г., доктор технических наук, профессор, заведующий отделом комплексных и региональных проблем энергетики, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: saneev@isem.irk.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Information about the authors:

Maysyuk E.P., Cand. Sci. (Economy), Senior researcher of the Laboratory of energy supply for distributed consumers, Melentiev Energy Systems Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia.
E-mail: maysyuk@isem.irk.ru

Ivanova I.Yu., Cand. Sci. (Economy), Head of the Laboratory of energy supply for distributed consumers, Melentiev Energy Systems Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia.
E-mail:nord@isem.irk.ru

Saneev B.G., Dr. Sci. (Engineering), Professor, Deputy Director, Head of Department of Complex and Regional Problems in Energy, Melentiev Energy Systems Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia.
E-mail: saneev@isem.irk.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 31.08.2023; одобрена после рецензирования 18.12.2023; принята к публикации 02.06.2025

The article was submitted 31.08.2023; approved after reviewing 18.12.2023; accepted for publication 02.06.2025

Научная статья
УДК 528
doi: 10.17223/25421379/35/12

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ, ГИС И СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ



Галина Прокопьевна Стручкова¹, Тамара Афанасьевна Капитонова²,
Татьяна Георгиевна Крупнова³, Сардана Алексеевна Тихонова⁴,
Лина Егоровна Тарская⁵, Ольга Викторовна Ракова⁶

^{1, 2, 4, 5} ФИЦ Якутский научный центр СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова
СО РАН, Якутск, Россия

^{3, 6} Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

¹ pandoram8@list.ru

² kapitonova@iptpn.ysn.ru

³ krupnovatg@susu.ru

⁴ sardankobeleva@gmail.com

⁵ lina.tarskaya@mail.ru

⁶ rakovaov@susu.ru

Аннотация. Лесные пожары являются одним из грозных стихийных бедствий, представляющих опасность для жизни и здоровья людей, для бесперебойного функционирования важных промышленных объектов, приводящих к огромным ущербам при поражении природных и хозяйственных систем. Для предотвращения и тушения пожаров важно иметь возможность определять места, где складываются критические условия для опасности возгорания и находятся важные объекты, которые подвергаются наибольшему риску по экологическим, физическим или социально-экономическим причинам. Целью исследования является оценка потенциальной опасности возникновения пожаров, используя статистические методы, ГИС и ДДЗ.

Ключевые слова: космические снимки, лесные пожары, картографирование, статистические методы, ГИС, байесовское моделирование веса доказательств

Источники финансирования: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 1023030900073-8-2.3.3, научная тема FWRS -2024-0032) и при поддержке Российского научного фонда № 24-27-20095.

Для цитирования: Стручкова Г.П., Капитонова Т.А., Крупнова Т.Г., Тихонова С.А., Тарская Л.Е., Ракова О.В. Картографирование потенциальной опасности лесных пожаров с использованием статистических методов, ГИС и спутниковых снимков // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 154–164. doi: 10.17223/25421379/35/12

Original article
doi: 10.17223/25421379/35/12

MAPPING THE POTENTIAL DANGER OF FOREST FIRES USING STATISTICAL METHODS, GIS AND SATELLITE IMAGES

Galina P. Struchkova¹, Tamara A. Kapitonova², Tatyana G. Krupnova³,
Sardana A. Tikhonova⁴, Lina E. Tarskaya⁵, Olga V. Rakova⁶

^{1, 2, 4, 5} Yakutsk Scientific Center, SB RAS, V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, SB RAS,
Yakutsk, Russia

^{3, 6} South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

¹ pandoram8@list.ru

² kapitonova@iptpn.ysn.ru

³ krupnovatg@susu.ru

⁴ sardankobeleva@gmail.com

⁵ lina.tarskaya@mail.ru

⁶ rakovaov@susu.ru

Abstract. Forest fires are one of the main natural disasters that cause huge damage to natural resources, threaten people's lives and the safety of important industrial facilities. (LP)

In order to prevent and extinguish fires, it is extremely important to be able to identify places where critical conditions for a fire hazard develop and important facilities are located that are most at risk for environmental, physical or socio-economic reasons. Currently, researchers both in Russia and abroad often use remote sensing to study the mechanisms of forest fires in various ecosystems.

The purpose of this study is to assess the territory of the Verkhoyansky ulus site according to the degree of risk of forest fires using statistical methods, GIS and DDZ. Based on archival data on forest fires in Yakutia for 2017–2021, satellite images from Landsat satellites for May, June, July, August 2017–2021, Terra (ASTER) 2013 after performing radiometric and atmospheric correction, the values of spectral indices and terrain parameters were calculated. As a result of the analysis of historical data on forest fires, a research site was selected to study the state of plant communities. This study presents an analysis of the impact of landscape and anthropogenic factors on forest fires using the Bayesian WOE evidence weight model, which consists of a statistical model of the spatial relationship between actual LP cases and the presence or absence of predictors that represent landscape conditions and anthropogenic influence. WOE models are built for binary classification, where the presence or absence of fires throughout the site is used to calculate the weight (evidence) of the importance of each category of predictive/explanatory factors (predictors). The main assumption of the WOE method is that future events (fire incidents) are more likely to occur in areas with conditions similar to those that contributed to past events. Geospatial data sets were processed and analyzed, and maps of potential fire hazard for the site were created, combining several thematic layers. The effectiveness of the model was evaluated using the ROC-AUC method, which showed that the WOE model classifies the territory quite well (accuracy up to 76 %) according to the level of fire hazard. Timely, adequate assessment of the danger of a forest fire and mapping of areas of potential fire danger are important and necessary to determine the scope of preventive fire-fighting measures and effective fire extinguishing actions.

Keywords: satellite images, forest fires, mapping, statistical methods, GIS, Bayesian modeling of the weight of evidence

Sources of financing: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 1023030900073-8-2.3.3, scientific theme FWRS -2024-0032 and Russian Science Foundation project 24-27-20095).

For citation: Struchkova G.P., Kapitonova T.A., Krupnova T.G., Tikhonova S.A., L.E. Tarskaya, Rakova O.V. (2025) Mapping the potential danger of forest fires using statistical methods, GIS and satellite images. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research.* 1. pp. 154–164. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/35/12

Введение

В последние годы для моделирования вероятности возникновения пожаров был разработан ряд методов, в которых используются преимущества дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и географических информационных систем (ГИС) [Павличенко и др., 2004; Hernandez-Lea et al., 2006; Peterson et al., 2013; Huesca et al., 2014; Курганович и др., 2015; Пушкин и др., 2015; Chowdhury et al., 2015; Сидельник и др., 2018; Mohajane et al., 2021; Peinl, 2021; Yaron et al., 2021; Wu et al., 2022; Стручкова и др., 2023]. Эти методы обычно предполагают, что условия, которые привели к возникновению пожаров в недавнем и более отдаленном прошлом, вероятно, продолжат вызывать пожары и в будущем. Таким образом, пространственное расположение мест возникновения пожаров (архивные данные мониторинга лесных пожаров (ЛП)), а также различные факторы, связанные с районами возгорания, обычно являются наиболее важными входными переменными для этих методов. Для решения этой сложной проблемы все большее число ученых проводят исследования различными методами [Dlamini, 2010; Jaafari et al., 2018; Hong et al., 2019; Стручкова и др., 2023; Ju et al., 2023; Rivière et al., 2023].

В данной работе подход заключался в том, чтобы связать события, связанные с пожарами, с набором

предикторных переменных, которые характеризуют особенности окружающей среды в пределах исследуемой территории, такие как рельеф и состояние растительности, с учетом влияния деятельности человека.

Суровый климат и природные условия в Якутии, служат причиной большого количества пожаров на ее территории, среднее число которых превышает в 2 раза среднее число пожаров по России. По данным Департамента лесного хозяйства Республики Саха (Якутия), 15 из 131 млн га зеленого леса не смогли восстановиться после пожара [Протопопова и др., 2017]. В регионах с вечной мерзлотой, из-за замедления процессов разложения, в лесах накапливается большое количество растительного опада, что может стать одной из причин пожаров при условии засушливой, жаркой погоды. Разновидности напочвенных горючих материалов определяют пирологические зоны растительного покрова территорий, влияющие на его пожароопасность. Усиление или снижение горимости в основном связано с количеством осадков и температурой воздуха. Из-за этого в условиях Якутии, особенно в труднопроходимых районах, крайне трудно предотвратить появление и распространение лесных пожаров на больших площадях. На возрождение растительности после пожара требуется 50 лет, а уровень вечной мерзлоты нормализуется намного дольше. [Протопопова и др., 2017].

Известно, что самыми частыми причинами возникновения пожаров являются летние «сухие грозы» (более 60 %) и антропогенный фактор (около 40 %).

Как российскими, так и зарубежными исследователями были разработаны разнообразные методы, формулы и показатели, в которых пожарная опасность оценивается с помощью метеорологических данных, а потенциальная возможность пожара – через запасы лесных горючих материалов и влагосодержание растительности. В России массово применяется комплексный показатель пожарной опасности В.Г. Нестерова, представленный в 1940-е гг. [Нестеров и др., 1968], а также его разновидности, предусматривающие данные атмосферы, количество осадков и скорость ветра. В зарубежных странах используют видоизмененный показатель В.Г. Нестерова с учетом дневных поправок на осадки и скорость ветра – индекс PORT, а также индексы пожароопасности, как FFDM в Австралии, ICONA в Испании, IMPI в Италии, полученные по модели Мак Артура и включающие температуру, влажность воздуха, скорость ветра и уклон местности [Bovio et al., 1984], индексы, которые отображают суточное изменение влажности почв и лесного массива – канадский FWI [Yaron et al., 2021], финский FMI [Chowdhury et al., 2015].

Глобальное потепление климата повышает риск засухи и губительных природных пожаров в Сибири [Кузнецов, 2009]. Сложное, многофакторное взаимовлияние между погодой, климатом, рельефом, состоянием растительности и лесными пожарами обуславливает актуальность исследований возникновения лесных пожаров [Белоусова и др., 2016]. Согласно статистическим данным Федеральной службы государственной статистики субъектов Дальневосточного федерального округа, большие лесные массивы

Республики Саха (Якутия) насчитывают 2,5 % мировых и около 11 % запасов лесных ресурсов России. Площадь леса в Якутии от общей площади составляет 51 %, в том числе хвойные леса 84,4 % [Латышева и др., 2021].

Область исследования

В исследовании использовались данные метеорологических спутников NOAA (США) с сайта Института космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН (https://ikfia.ysn.ru/new/phoroom/files/lgi/files/hotspots_overview_map.html). Сделана обработка и систематизация данных мониторинга, разработка и наполнение базы данных лесных пожаров на территории Республики Саха Якутия за 2017–2021 гг., изучены исторические данные по пожарам за выбранный промежуток, проанализированы и выбраны районы для работы. Из проанализированного распределения природных пожаров для глубокого изучения был избран Верхоянский район, где отмечено наибольшее число возгораний.

Краткая характеристика исследуемой области

Выбор участка исследования *Верхоянского улуса* был сделан на основании анализа распределения очагов природных пожаров за 2017–2021 гг. В этом регионе максимальное количеством пожаров. Кроме того, на территории исследуемого участка находится Батагайская нефтебаза, имеющая важнейшее значение для снабжения топливом арктических регионов. В последние годы в летние месяцы нефтебаза часто находится в режиме повышенной готовности из-за сложной ситуации с природными пожарами (рис. 1).



Рис. 1. Фотография лесных пожаров

В июле 2020 г. огонь находился в 300 м от Батагайской нефтебазы

Fig. 1. Photos of forest fires

In July 2020, the fire was located 300 meters from the Batagay oil depot

Верхоянский район расположен на севере Якутии, относится к Яно-Колымской лесопожарной области, Верхоянско-Черскому северотаежному округу с резко континентальным климатом и низкой плотностью населения (0,1 чел. км²). Участок находится в долине, обрамленной с трех сторон горными хребтами, и открыт с северной стороны, что способствует низким зимним температурам. Средние зимние температуры находятся в интервале –38...–48 °C, летние – в интервале +15 ...+17 °C. Количество осадков в год составляет от 150 до 300 мм (https://xn--h1ajim.xn--p1ai/%D0%92%D0%85%D1%80%D1%85%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%83%D0%BB%D1%83%D1%81).

Объекты и методы исследования

При оценке пожароопасности лесов использовались данные дистанционного зондирования Земли из бесплатных источников: Landsat8-OLI (earthexplorer.usgs.gov), снимки спутника Терра (сканер Aster) (https://gdemdl.aster.jspaceystems.or.jp/index_en.html).

По результатам космического мониторинга в работе исследованы крупные природные пожары в пределах Якутии, которые произошли с 2017 по 2021 г. Были использованы космические снимки со спутника Landsat8-OLI, летний период (июнь, июль, август с 2017 по 2021 г.), а также для рельефа использовались космические изображения со спутника Терра (сканер Aster) 2013 г.

Далее в ГИС была сделана обработка данных, с помощью которой проведен пространственный анализ выявленных пожаров и создана база данных природных пожаров, которые произошли в районе Якутии. Анализ результатов работ по природным пожарам показал, что антропогенный фактор имеет большое влияние на пожароопасность. В данной работе мы попытались учесть влияние антропогенного фактора через переменные «Расстояние пожаров от дорог» и «Расстояние от населенных пунктов».

На основе предыдущих исследований, обзора литературы, характеристик мест возникновения пожаров и доступных данных в качестве объясняющих переменных для моделирования подверженности лесным пожарам в этом исследовании были выбраны следующие факторы: тематические изображения вегетационных индексов (NDVI, NDWI и PSRI), крутизна склона, экспозиция склона, высота, а также добавлены два фактора – «близость от дорог» и «близость от населенных пунктов» (рис. 2).

NDVI (Нормализованный индекс растительности) – показатель количества фотосинтетически активной биомассы (обычно называемый вегетационным индексом). Индекс имеет значения от –1 до 1.

Значения индекса для растительности лежат в диапазоне от 0,2 до 0,8. Далее мы переклассифицировали растры на пять классов по степени риска возгорания.

Нормализованный разностный водный индекс NDWI. Является индексом для определения и мониторинга изменений содержания поверхностных вод в растительном покрове. Он вычисляется с использованием ближнего инфракрасного (NIR) и зеленого канала. Значения индекса NDWI чувствительны к изменению влажности. Индекс выводит значения между –1 и 1. Обычный диапазон для зеленой растительности составляет от –0,1 до 0,4. Вода имеет значения от 0,2 до 1, объекты, не содержащие влагу, принимают значения меньше 0. Далее была сделана переклассификация на пять классов по степени риска возгорания.

PSRI индекс содержания углерода в виде лигнина и целлюлозы разработан для учета общего количества «сухого» углерода в виде лигнина и целлюлозы. Такой углерод в больших количествах присутствует в древесине и в мертвых или сухих растительных тканях. Увеличение этих показателей отражает процессы «старения» и исчезновения растений.

Высота. Карта высот была получена, используя снимки спутника Терра (сканер Aster). Затем растровые слои были переклассифицированы на пять подгрупп, используя классификацию методом естественных интервалов в ArcGIS по степени опасности пожара.

Крутизна склона. Растровые слои склонов были определены с помощью ЦМР в инструменте генерации склонов в ArcGIS. Затем карта крутизны склона была переклассифицирована на пять подгрупп, используя классификацию в ArcGIS по степени риска возгорания.

Экспозиция склонов. Интенсивность поступающей солнечной радиации выше на восточных, южных, юго-восточных и юго-западных склонах, что может влиять на условия возникновения возгорания, скорость перемещения пожара. Для того, чтобы учесть влияние инсоляции на опасность возникновения лесных пожаров, необходимо использовать фактор экспозиции склона, полученный используя соответствующий инструмент ArcGis. Затем растр был переклассифицирован на пять классов по степени риска возгорания.

Расстояние от дорог. Для определения расстояния от дорог использовался алгоритм евклидова расстояния из spatial analyst toolbox в ArcGIS. Затем растр был переклассифицирован на пять классов для подготовки тематического слоя удаленности от дорог. Наивысшей категории (т.е. ближайшему расстоянию от дороги) присвоена оценка 5, тогда как низшей категории (т.е. наибольшему расстоянию от дороги) – оценка 1, что указывает на очень высокий и очень низкий риск ЛП соответственно.

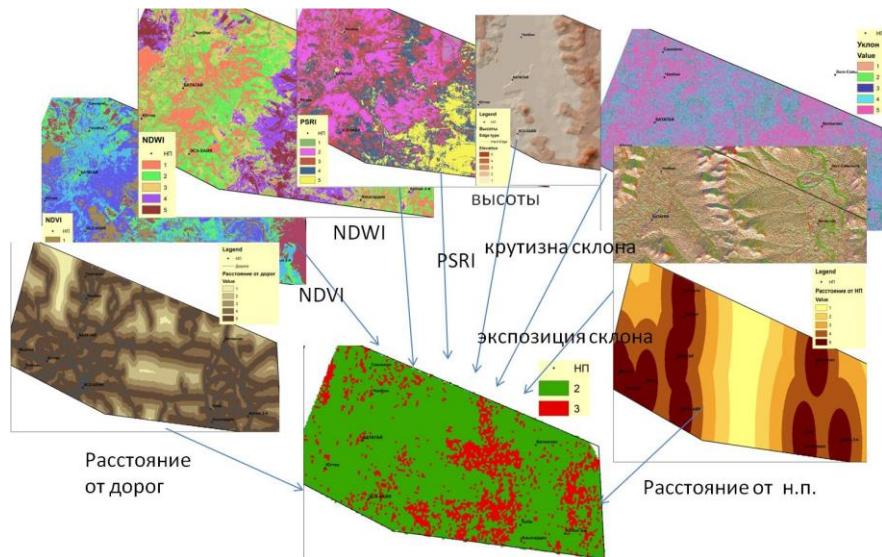


Рис. 2. Факторы, обуславливающие возникновения ЛП в исследуемом районе

NDVI – показатель состояния растительного покрова; NDWI – показатель увлажненности растительного покрова; PSRI – показатель наличия сухостоя; высота над уровнем моря, расстояние от дорог; расстояние от населенных пунктов; экспозиция склона, крутизна склона

Fig. 2. Factors causing the occurrence of LP in the studied area

NDVI – an indicator of the state of vegetation cover; NDWI – an indicator of the moisture content of vegetation cover; PSRI – an indicator of the presence of dead wood; altitude above sea level, distance from roads; distance from settlements; aspect; slope

Расстояние от населенных пунктов. Для определения расстояния от населенного пункта использовался алгоритм евклидова расстояния из spatial analyst toolbox в Arc GIS. Затем растр был переклассифицирован на пять классов для подготовки тематического слоя удаленности от населенного пункта. Наивысшей категории (т.е. ближайшему расстоянию от населенного пункта) присвоена оценка 5, тогда как низшей категории (т.е. наибольшему расстоянию от населенного пункта) – оценка 1, что указывает на очень высокий и очень низкий риск ЛП соответственно.

Значения классов после переклассификации растровых слоев в порядке усиления степени риска наводнений приведены в табл. 1.

Для создания карты потенциальной пожароопасности использовались следующие предикторы: состояние и степень увлажненности растительного покрова, наличие сухостоя, тематические слои высот, крутизна склона и экспозиция склона, близость от дорог и населенных пунктов. Определение классов потенциальной опасности лесного пожара выполнялось на основе комбинации полученных тематических слоев, используя инструменты Spatial Analyst Overlay analysis, Взвешенное наложение. Веса растров были определены методом байесовского веса доказательств (WOE).

Методы

Метод байесовского веса доказательств (WOE). Для исследования пространственной взаимосвязи между историческими событиями, связанными с пожарами и факторами, обуславливающими возникновения ЛП [Bonham-Carter, 1994] была использована модель веса доказательств. Обучающий набор точек был представлен 70 % общего количества ЛП, оставшиеся 30 % ЛП использовались для валидации.

В контексте моделирования лесных пожаров модели WOE построены для бинарной классификации, где наличие или отсутствие пожаров по всему участку используется для расчета веса (доказательств) важности каждой категории прогностических/объясняющих факторов (предикторов). Основное допущение метода WOE заключается в том, что будущие события (случаи возгорания) с большей вероятностью произойдут в районах с условиями, аналогичными тем, которые способствовали прошлым событиям [Jaafari et al., 2015]. Таким образом, вероятность возникновения инцидента с возгоранием при наличии переменной-предиктора определяется условной вероятностью [Bonham-Carter, 1994].

Модель основана на логарифмически-линейной форме правила Байеса.

Значения классов после переклассификации растровых слоев в порядке усиления степени риска пожароопасности

The values of the classes after the reclassification of raster layers in order of increasing the degree of fire hazard

Класс пожароопасности	NDVI	NDWI	PSRI	Расстояние от дорог, км	Расстояние от НП, км	Высоты, м	Крутизна склона, °	Экспозиция склона
1 (очень низкая)	0,14–0,33	–0,06–0,18	–0,13– (–0,08)	2,04–2,55	1,56–2,35	150–300	0–37	C3, C (292,5–360)
2 (низкая)	0,09–0,14	–0,14– (–0,06)	–0,08– (–0,07)	1,53–2,04	1,04–1,56	300–450	37–56	CB, C (0–67,5)
3 (средняя)	0,04–0,09	–0,21– (–0,14)	–0,07– (–0,05)	1,02–1,53	0,63–1,04	450–600	56–70	3 (247,5–292,5)
4 (высокая)	–0,03–0,04	–0,27– (–0,21)	–0,05– (–0,03)	0,51–1,02	0,31–0,63	600–750	70–80	ЮЗ, Ю (157,5–247,5)
5 (очень высокая)	–0,13– (–0,03)	–0,99– (–0,27)	–0,03–0,05	0–0,51	0–0,31	750–900	80–90	ЮВ, В (67,5–157,5)

Теорему Байеса можно записать в виде

$$P\left(\frac{A}{B}\right) = \frac{P(B/A) * P(A)}{P(B)}. \quad (1)$$

Таким образом, вероятность наступления некоторого события A , учитывая, что событие B уже произошло, $P(A|B)$, равна вероятности наступления события B , учитывая, что событие A произошло, $P(B|A)$, умноженной на вероятность наступления события A , $P(A)$, и деленной на вероятность наступления события B , $P(B)$. Этот метод вычисляет вес для каждого фактора, предсказывающего ЛП (B), на основе наличия или отсутствия случаев ЛП в пределах области [Bonham-Carter, 1994] следующим образом:

$$W^+ = \ln\left(\frac{P\{V/F\}}{P\{V/\bar{F}\}}\right). \quad (2)$$

$$W^- = \ln\left(\frac{P\{\bar{V}/F\}}{P\{\bar{V}/\bar{F}\}}\right), \quad (3)$$

где P – вероятность, а \ln – натуральный логарифм; V – наличие потенциального фактора ЛП, \bar{V} – отсутствие потенциального фактора, способствующего ЛП, F – наличие точки ЛП, \bar{F} – отсутствие ЛП.

W_i^+ и W_i^- дают безразмерную меру уровня корреляции между возгораниями и каждой категорией бинарных переменных. Точнее, W_i^+ присваивает веса наличию возгораний в определенной категории переменных-предикторов и количественно определяет величину положительной корреляции. Напротив, W_i^- дает веса для отсутствия возгораний в пределах определенной категории предикторных переменных, а величина веса указывает на отрицательную корреляцию между возгоранием и предикторной переменной [Jaafari et al., 2018]. В этом контексте важно помнить, что апостериорные вероятности, апостериорные коэффициенты и веса отражают наблюдаемые пропорции площадей, занятых соответствующими событиями/условиями. Оценка доказательств, основанная на

их различиях (S^2), приведена в [Bonham-Carter, 1994]):

$$S^2(W^+) = \frac{1}{N\{V \cap F\}} + \frac{1}{N\{V \cap \bar{F}\}}, \quad (4)$$

$$S^2(W^-) = \frac{1}{N\{\bar{V} \cap F\}} + \frac{1}{N\{\bar{V} \cap \bar{F}\}}. \quad (5)$$

Разница между двумя весами известна как контраст весов, $C = W^+ - W^-$. Этот контраст отражает общую пространственную связь между возгоранием и любой конкретной категорией предикторных переменных [Jaafari et al., 2015]. Дисперсия контраста ($S^2(C)$) и стьюдентизированный контраст (WF), который является конечным весом любой конкретной категории предикторных переменных, рассчитываются с использованием следующих уравнений:

$$S = \sqrt{(S^2(W^+) + S^2(W^-))}. \quad (6)$$

$$WF = C/S, \quad (7)$$

где $S(C)$ – стандартное отклонение контраста.

После вычисления весовых коэффициентов категорий вес предиктора рассчитывается с суммированием. В среде ГИС баллы рассчитываются путем объединения весов со слоями пространственных данных для каждого показателя.

Возникновение и поведение лесных пожаров зависят от факторов окружающей среды, таких как состояние, наличие сухостоя и влагосодержание растительности, высота, крутизна склона, экспозиция склона, а также от антропогенных факторов, таких как наличие proximity населенных пунктов, дорог и видов деятельности.

Проверка на взаимозависимость предикторов (мультиколлинеарность). Мультиколлинеарность существует, когда две или более предикторных переменных имеют высокую корреляцию, что может привести к менее точной оценке влияния независимой переменной на зависимую, чем когда независимые

переменные некоррелированы друг с другом. Критические значения *VIF* (коэффициент инфляции дисперсии) > 5 указывают на потенциальную проблему с мультиколлинеарностью. Для данной работы коэффициенты инфляции дисперсии (*VIF*) находятся в интервале 1–1,15. Предикторы «расстояние от дорог», «расстояние от населенных пунктов», «высота» – 1,15, остальные – 1.

Результаты и их обсуждение

Анализ полученных результатов показал: какие предикторы и какие категории внутри каждой предикторной переменной были тесно связаны с возникновением лесных пожаров. В результате использования ГИС, данных ДЗЗ, фактических данных по пожарам за 2017–2021 гг. и статистических методов построена карта пожароопасности участка Верхоянского улуса (см. рис. 2).

Вес доказательств (WOE). Учитывая, что более высокие значения WF указывают на более высокий уровень значимости для конкретной категории переменных [Jaafari et al., 2015], было получено, что вклад различных классов аспекта, индекса PSRI, уклона в возникновении пожаров был несущественным при исследовании каждой прогностической переменной отдельно (табл. 2).

Наиболее важный показатель с точки зрения веса был определен как «индекс состояния растительности NDVI» 0,379, следующими по важности предикторами были определены «индекс содержания влаги в растительности NDWI» 0,197, «крутизна склона» 0,155, «расстояние от дорог» 0,140; далее по уровню значимости слои PSRI, «высота» «расстояние от населенных пунктов» имеют значения 0,048; 0,038; 0,036 соответственно. Наименьший вклад в опасность возгорания вносит фактор – инсоляции – «экспозиция склона» 0,005.

Частота возникновения пожаров для всех предикторов рассчитывалась как отношения доли пожаров,

зарегистрированных в различных категориях каждого предиктора, на соответствующие этим категориям доли площади территории. Аналогично рассчитывалась частота отсутствия возгораний в пределах определенной категории предикторных переменных. Таким образом были получены связи между каждой категорией предикторов и распределением лесных пожаров по территории участка и определено влияние каждого предиктора на вероятность возникновения пожара.

Экспозиция склона, крутизна склона отражают местные условия, такие как количество солнечного света, крутизна склона – усиление динамики пожара и обычно считаются коррелирующими с пожарами. На рис. 3 показана карта опасности возникновения ЛП, сгенерированная на основе модели веса доказательств (WOE).

Точность моделей.

Метод ROC-AUC. Площадь под кривой рабочих характеристик приемника (ROC), известная как метод ROC-AUC, является широко используемым методом для оценки точности и производительности прогностических моделей, представляет собой график зависимости специфичности (т.е. ложноположительного результата по оси x) от чувствительности (т.е. истинно положительного результата по оси y). При моделировании лесных пожаров, в котором индексы восприимчивости подразделяются на два класса (т.е. «пожароопасные» и «непожароопасные»), чувствительность (соотношение (*SE*)) и специфичность (соотношение (*SP*)) относятся к доле правильно спрогнозированных пикселей пожара и доле правильно спрогнозированных пикселей, не связанных с пожаром соответственно:

$SE = TP / (TP + FN)$; $SP = TN / (TN + FP)$, (8) где *TN* (истинно отрицательный результат) и *TP* (истинно положительный результат) – количество пикселей, которые правильно определены как места возникновения пожаров, а *FP* (ложноположительный результат) и *FN* (ложноотрицательный результат) – количество пикселей, присвоенных ошибочно.

Таблица 2

Table 2

Веса факторов-слоев, полученные методом веса доказательств (WOE)

Factor-layer weights obtained by the Weight of evidence (WOE) method

Предиктор	WOE
Экспозиция склона	0,005
NDVI	0,379
NDWI	0,197
PSRI	0,048
Расстояние от дорог	0,140
Расстояние от НП	0,036
Высота	0,038
Крутизна склона	0,155

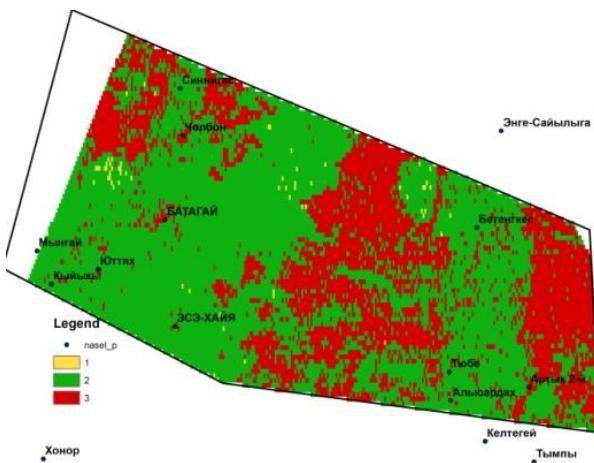


Рис. 3. Кarta опасности возникновения ЛП, построенная с использованием метода веса доказательств (WOE)

Fig. 3. A fire hazard map of the site, constructed using the weight of evidence (WOE) method

Максимально возможная площадь под кривой (AUC) = 1 представляет 100 %-ю специфичность (все пиксели, не связанные с пожарами, правильно классифицированы) и 100 %-ю чувствительность (все пиксели, связанные с пожарами, правильно классифицированы). Кроме того, значения AUC < 0,6 указы-

вают на плохую, 0,6–0,7 – умеренную, 0,7–0,8 – хорошую, 0,8–0,9 – очень хорошую и >0,9 – отличную производительность модели [Hanley et al., 1982]. Точность карты опасности возникновения ЛП, полученная с использованием метода веса доказательств (WOE), равна 0,76 (рис. 4).

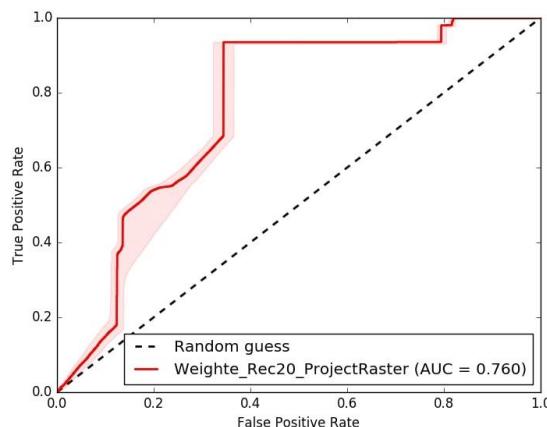


Рис. 4. Кривая ROC модели WOF, точность = 0,76

Fig. 4. The ROC curve of the WOF model, accuracy = 0.76

Заключение

Выполнены обработка и анализ наборов пространственных данных. Используя ГИС, данные ДЗЗ, фактические данные по лесным пожарам и статистические методы создана карта потенциальной пожароопасности для участка территории, объединяющая несколько тематических слоев. Модель байесовского

веса доказательств WOE, которая применялась в этом исследовании, использует фактические события лесных пожаров и предикторы, которые представляют различные природные и антропогенные аспекты. Результаты проверки подтвердили хорошую точность модели, которая имела значения 76 %. Этот подход позволил исследовать связи между каждой категорией предикторов и распределением лесных пожаров

по территории участка и определить влияние каждого предиктора на вероятность возникновения пожара. Адекватный и оперативный анализ потенциальной

опасности возникновения пожара, используя инструменты ДДЗ и ГИС, позволяет своевременно принять эффективные превентивные меры по пожароопасной ситуации.

Список источников

- Белоусова Е.П., Латышева И.В., Латышев С.В., Лощенко К.А. и др.** Природные факторы возникновения лесных пожаров на территории Иркутской области // Биосфера. 2016. № 4–8. С. 390–400.
- Кузнецов Г.В., Барановский Н.В.** Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. Новосибирск : СО РАН, 2009. 301 с.
- Курганович К.А., Макаров В.П.** Использование вегетационных индексов NDVI для оценки влияния пожаров на динамику растительности Цасучейского бора // Вестник ЗабГУ. 2015. Т. 117, № 2. С. 27–36.
- Латышева И.В., Вологжина С.Ж., Лощенко К.А.** Циркуляционные факторы возникновения лесных пожаров на территории Сибири и Дальнего Востока летом 2019 и 2021 гг. // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2021. Т. 38. С. 54–70.
- Нестеров В.Г., Гриценко М.В., Шабунина Т.А.** Использование температуры точки росы при расчете показателя горимости леса // Метеорология и гидрология. 1968. № 9. С. 102–104.
- Павличенко Е.А., Иванов В.В., Миськив С.И.** Использование геоинформационных систем при анализе и прогнозе природных чрезвычайных ситуаций на примере мониторинга лесных пожаров // Технологии гражданской безопасности. 2004. № 4. С. 46–51.
- Протопопова В.В., Габышева Л.П.** Горимость лесов Верхоянского района (Северо-Восточная Якутия) // Успехи современного естествознания. 2017. № 5. С. 66–71.
- Пушкин А.А., Сидельник Н.Я., Ковалевский С.В.** Использование материалов космической съемки для оценки пожарной опасности в лесах // Труды БГТУ. 2015. № 1. С. 36–40.
- Сидельник Н.Я., Пушкин А.А., Ковалевский С.В.** Картирование поврежденных лесных насаждений и объектов лесохозяйственных мероприятий с использованием материалов космической съемки и ГИС // Труды БГТУ. 2018. Серия 1. № 1. С. 5–12.
- Стручкова Г.П., Крупнова Т.Г., Тихонова С.А., Капитонова Т.А., Ракова О.В.** Оценка опасности возникновения лесных пожаров с использованием спутниковой информации и ГИС // Вестник Воронежского государственного университета. География. Геоэкология. 2023. № 4. С. 34–44.
- Bonham-Carter G.F.** Geographic Information Systems for Geoscientists, Modeling with GIS. Oxford : Pergamon Press, 1994. 398 p.
- Bovio G., Quaglino A., Nosenzo A.** Individuazione di un indice di previsione per il pericolo // Monti e Boschi. 1984. V. 35, No. 4. P. 39–44.
- Chowdhury Ehsan H., Hassan Quazi K.** Operational perspective of remote sensing-based forest fire danger forecasting systems / ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2015. V. 104. P. 224–236.
- Dlamini M., Wisdom A.** A Bayesian belief network analysis of factors influencing wildfire occurrence in Swaziland // Environmental Modelling & Software. 2010. V. 25, Iss. 2. P. 199–208. doi: 10.1016/j.envsoft.2009.08.002
- Hanley J.A., McNeil B.J.** The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve // Radiology. 1982. V. 143 (1). P. 29–36.
- Hernandez-Leal P.A., Arbelo M., Gonzalez-Calvo A.** Fire risk assessment using satellite data // Advances in Space Research. 2006. V. 37, Is. 4. P. 741–746.
- Hong Haoyuan, Jaafari Abolfazl, Zenner Eric K.** Predicting spatial patterns of wildfire susceptibility in the Huichang County, China: An integrated model to analysis of landscape indicators // Ecological Indicators. 2019. V. 101. P. 878–891. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.01.056
- Huesca Margarita, Litago Javier, Merino-de-Miguel Silvia, Ciguendez-López-Ocaña Victor, Palacios-Orueta Alicia** Modeling and forecasting MODIS-based Fire Potential Index on a pixel basis using time series models // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2014. V. 26. P. 363–376.
- Jaafari A., Najafi A., Rezaeian J., Sattarian A., Ghajar I.** Planning road networks in landslide-prone areas: a case study from the northern forests of Iran // Land Use Policy. 2015. V. 47. P. 198–208.
- Jaafari A., Zenner K. Eric, Thai Pham Binh** Wildfire spatial pattern analysis in the Zagros Mountains, Iran: A comparative study of decision tree based classifiers // Ecological Informatics. 2018. V. 43. P. 200–211. doi: 10.1016/j.ecoinf.2017.12.006
- Ju Weiyi, Zhixiang Xing, Jie Wu, Qingchun Kang.** Evaluation of forest fire risk based on multicriteria decision analysis techniques for Changzhou, China // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2023. V. 98. 104082.
- Mohajane Meriame, Romulus Costache, Firoozeh Karimi, Quoc Bao Pham, Ali Essahlaoui, Hoang Nguyen, Giovanni Laneve, Fatima Oudija.** Application of remote sensing and machine learning algorithms for forest fire mapping in a Mediterranean area // Ecological Indicators. 2021. V. 129. 107869.
- Peinl P.** A retrospective on ASPires – An advanced system for the prevention and early detection of forest fires // Internet of Things. 2021. 100456.
- Peterson D., Hyer E., JunWang** A short-term predictor of satellite-observed fire activity in the North American boreal forest: Toward improving the prediction of smoke emissions // Atmospheric Environment. 2013. V. 71. P. 304–310.
- Rivière Miguel, Jonathan Lenglet, Adrien Noirault, François Pimont, Jean-Luc Dupuy.** Mapping territorial vulnerability to wildfires: A participative multi-criteria analysis // Forest Ecology and Management. 2023. V. 539. 121014.
- Michael Yaron, Helman David, Glickman Oren, Gabay David, Brenner Steve, Lensky Itamar M.** Forecasting fire risk with machine learning and dynamic information derived from satellite vegetation index time-series // Science of The Total Environment. 2021. V. 764. 142844.
- Zechuan Wu, Bin Wang, Mingze Li, Yuping Tian, Ying Quan, Jianyang Liu** Simulation of forest fire spread based on artificial intelligence // Ecological Indicators. 2022. V. 136. 108653.

References

- Belousova E.P., Latysheva I.V., Latyshev S.V., Loshchenko K.A. et al. *Prirodnye faktory vozniknoveniya lesnyh pozharov na territorii Irkutskoj oblasti* [Natural factors of forest fires in the Irkutsk region] // Biosfera. 2016. No. 4–8. pp. 390–400. In Russian
- Kuznecov G.V., Baranovskij N.V. *Prognoz vozniknoveniya lesnyh pozharov i ih ekologicheskikh posledstvij*. [Forecast of forest fires and their environmental consequences] Novosibirsk : SO RAN. 2009, 301 p. In Russian
- Kurganovich K.A., Makarov V.P. *Ispol'zovanie vegetacionnyh indeksov NDVI dlya ocenki vliyaniya pozharov na dinamiku rastitel'nosti Casucheskogo bora* [The use of NDVI vegetation indices to assess the impact of fires on the vegetation dynamics of the Tsasuchey forest] // Vestnik ZabGU. 2015. No. 2, V. 117. pp. 27–36. In Russian
- Latysheva I.V., Vologzhina S.ZH., Loshchenko K.A. *Cirkulyacionnye faktory vozniknoveniya lesnyh pozharov na territorii Sibiri i Dal'nego Vostoka letom 2019 i 2021 gg.* [Circulating factors of forest fires in Siberia and the Far East in the summer of 2019 and 2021] // Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle» [The Bulletin of Irkutsk State University]. 2021, No. 4, V. 38. pp. 54–70. In Russian
- Nesterov V.G., Gricenko M.V., Shabunina T.A. *Ispol'zovanie temperatury tochki rosy pri raschete pokazatelya gorimosti lesa* [Using the dew point temperature in calculating the forest burnability index] // Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and hydrology]. 1968, No. 9, pp. 102–104. In Russian
- Pavlichenko E.A., Ivanov V.V., Mis'kiv S.I. *Ispol'zovanie geoinformacionnyh sistem pri analize i prognoze prirodnih chrezvychajnyh situacij na primere monitoringa lesnyh pozharov* [The use of geoinformation systems in the analysis and forecasting of natural emergencies on the example of forest fire monitoring] // Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti [Civil Security Technologies]. 2004. No. 4. pp. 46–51. In Russian
- Protopopova V.V., Gabysheva L.P. Gorimost' lesov Verhoyanskogo rajona (Severo-Vostochnaya Yakutia) [The mountainous nature of the forests of the Verkhoyansky district (North-Eastern Yakutia)] // Uspekhi sovremennoego estestvoznaniya [Advances in current natural sciences]. 2017. No. 5. pp. 66–71. In Russian
- Pushkin A.A., Sidel'nik N.YA., Kovalevskij S.V. *Ispol'zovanie materialov kosmicheskoy s"emki dlya ocenki pozharnoj opasnosti v lesah* [The use of satellite imagery materials to assess fire danger in forests] // Trudy BGTU. 2015. No. 1. pp. 36–40. In Russian
- Sidel'nik N.YA., Pushkin A.A., Kovalevskij S.V. *Kartirovanie povrezhdennyh lesnyh nasazhdenij i ob'ektov lesohozyajstvennyh meropriyatiy s ispol'zovaniem materialov kosmicheskoy s"emki i GIS-tehnologij* [Mapping of damaged forest stands and objects of forestry activities using space survey materials and GIS technologies] // Trudy BGTU. Seriya 1. 2018. No. 1. pp. 5–12. In Russian
- Struchkova G.P., Krupnova T.G., Tihonova S.A., Kapitonova T.A., Rakova O.V. *Ocenka opasnosti vozniknoveniya lesnyh pozharov s ispol'zovaniem sputnikovoj informacii i GIS* [Assessment of the risk of forest fires using satellite information and GIS] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geoekologiya [Bulletin of Voronezh State University. Geography. Geoecology]. 2023. No. 4. pp. 34–44. In Russian
- Bonham-Carter G.F. Geographic Information Systems for Geoscientists, Modeling with GIS. Oxford : «Pergamon Press», 1994. 398 p.
- Bovio G., Quaglino A., Nosenzo A. Individuazione di un indice di previsione per il pericolo // Monti e Boschi. 1984. V. 35, No. 4. pp. 39–44.
- Chowdhury Ehsan H., Hassan Quazi K. Operational perspective of remote sensing-based forest fire danger forecasting systems / ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2015. V. 104. pp. 224–236.
- M. Dlamini, Wisdom. A Bayesian belief network analysis of factors influencing wildfire occurrence in Swaziland / Dlamini, M. Wisdom.// Environmental Modelling & Software. 2010. V. 25, Iss. 2. pp. 199–208. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.08.002>.
- Hanley J.A. McNeil B.J. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve // Radiology. 1982. V. 143 (1). pp. 29–36.
- Hernandez-Leal P.A., Arbelo M., Gonzalez-Calvo A. Fire risk assessment using satellite data // Advances in Space Research. 2006. V. 37, Iss. 4. pp. 741–746.
- Hong H., Jaafari A., Zenner E.K. Predicting spatial patterns of wildfire susceptibility in the Huichang County, China: An integrated model to analysis of landscape indicators // Ecological Indicators. 2019. V. 101. pp. 878–891. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.01.056
- Huesca M., Litago Ja., Merino-de-Miguel S., Cicuendez-López-Ocaña V., Palacios-Orueta A. Modeling and forecasting MODIS-based Fire Potential Index on a pixel basis using time series models // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2014. V. 26. pp. 363–376.
- Jaafari A., Najafi A., Rezaeian J., Sattarian A., Ghajar I. Planning road networks in landslide-prone areas: a case study from the northern forests of Iran // Land Use Policy. 2015. V. 47. pp. 198–208.
- Jaafari A., Zenner K. Eric, Thai Pham Binh Wildfire spatial pattern analysis in the Zagros Mountains, Iran: A comparative study of decision tree based classifiers // Ecological Informatics. 2018. V. 43. P. 200–211. doi: 10.1016/j.ecoinf.2017.12.006
- Ju Weiyi, Zhixiang Xing, Jie Wu, Qingchun Kang Evaluation of forest fire risk based on multicriteria decision analysis techniques for Changzhou, China // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2023. V. 98. 104082.
- Mohajane M., Romulus Costache, Firoozeh Karimi, Quoc Bao Pham, Ali Essahlaoui, Hoang Nguyen, Giovanni Laneve, Fatiha Oudija. Application of remote sensing and machine learning algorithms for forest fire mapping in a Mediterranean area // Ecological Indicators. 2021. V. 129. 107869.
- Peinl P. A retrospective on ASPires – An advanced system for the prevention and early detection of forest fires // Internet of Things. 2021. 100456.
- Peterson D., Hyer E., Jun Wang. A short-term predictor of satellite-observed fire activity in the North American boreal forest: Toward improving the prediction of smoke emissions // Atmospheric Environment. 2013. V. 71. pp. 304–310.
- Rivière M., Lenglet J., Noirault A., Pimont F., Dupuy J.-L. Mapping territorial vulnerability to wildfires: A participative multi-criteria analysis // Forest Ecology and Management. 2023. V. 539. 121014.
- Michael Ya., Helman D., Glickman O., Gabay D., Brenner S., Lensky I.M. Forecasting fire risk with machine learning and dynamic information derived from satellite vegetation index time-series // Science of The Total Environment. 2021. V. 764. 142844.
- Zechuan Wu, Bin Wang, Mingze Li, Yuping Tian, Ying Quan, Jianyang Liu Simulation of forest fire spread based on artificial intelligence // Ecological Indicators. 2022. V. 136. 108653.

Информация об авторах:

Стручкова Г.П., кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, отдел геоинформатики, ФИЦ Якутский научный центр СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия.
E-mail: pandoramy8@list.ru

Капитонова Т.А., кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, отдел геоинформатики, ФИЦ ФИЦ Якутский научный центр СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия.
E-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru

Крупнова Т.Г., кандидат химических наук, доцент, кафедра экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
E-mail: krupnovatg@susu.ru

Тихонова С.А., ведущий инженер, отдел геоинформатики, ФИЦ Якутский научный центр СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия.
E-mail: sardankobeleva@gmail.com

Тарская Л.Е., ведущий инженер, отдел геоинформатики, ФИЦ Якутский научный центр СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия.
E-mail: lina.tarskaya@mail.ru

Ракова О.В., кандидат химических наук, доцент, кафедра экологии и химической технологии ЮУрГУ, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
E-mail: rakovaov@susu.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов между авторами отсутствует.

Information about authors:

Struchkova G.P., Cand. Sci. (Technique), Leading Researcher, Department of Geoinformatics, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical problems of the North, SB RAS, Yakutsk, Russia.

E-mail: pandoramy8@list.ru

Kapitonova T.A., Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Department of Geoinformatics, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical problems of the North, SB RAS, Yakutsk, Russia.

E-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru

Krupnova T.G., Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor of the Department of Ecology and Chemical Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

E-mail: krupnovatg@susu.ru

Tikhonova S.A., Leading engineer, Department of Geoinformatics, V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, SB RAS, Yakutsk, Russia.

E-mail: sardankobeleva@gmail.com

Tarskaya L.E., Leading engineer, Department of Geoinformatics, V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, SB RAS, Yakutsk, Russia.

E-mail: lina.tarskaya@mail.ru

Rakova O.V., Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor of the Department of Ecology and Chemical Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

E-mail: rakovaov@susu.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.03.2024; одобрена после рецензирования 09.12.2024; принята к публикации 02.06.2025

The article was submitted 28.03.2024; approved after reviewing 09.12.2024; accepted for publication 02.06.2025

Научная статья

УДК 543.31.51:[675.088.3+504.45](282.256.341)

doi: 10.17223/25421379/35/13

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ЛИТОРАЛИ ОЗ. БАЙКАЛ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ СТОЧНЫХ ВОД КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ Г. БАЙКАЛЬСКА: ОЦЕНКА ГЕОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ



Евгений Павлович Чебыкин¹, Наталья Николаевна Куликова²,
Елена Валентиновна Лихошвай³, Александр Николаевич Сутурин⁴

^{1, 2, 3, 4} Лимнологический институт Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия

¹ epcheb@yandex.ru

² kulikova@lin.irk.ru

³ likhoshway@mail.ru

⁴ san@lin.irk.ru

Аннотация. Разработан численный метод расчета водных вкладов источников на примере лitorали оз. Байкал в зоне влияния сточных вод канализационных очистных сооружений г. Байкальска. Наибольшая доля сточных вод (3,4 %) обнаружена в прибрежной воде вблизи накопителя сточных вод, что указывает на нарушения целостности конструкции. Доля сточных вод в поверхностной воде озера над подводными трубами сброса меньше – 0,034–0,19 %. Суммарные геохимические вклады составляют 561 и 14–55 % соответственно. Основные поллютанты – Mn, Cl, Ga, Ge, B, P.

Ключевые слова: сточные воды, химические элементы, ИСП-МС, предельно допустимые концентрации, озеро Байкал

Благодарности: авторы выражают благодарность команде и капитану И.Ю. Бархокову НИС «Г.Ю. Верещагин» за помощь в отборе проб.

Источник финансирования: работа выполнена по государственному заданию ЛИН СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 121032300186-9).

Для цитирования: Чебыкин Е.П., Куликова Н.Н., Лихошвай Е.В., Сутурин А.Н. Загрязнение поверхностных вод лitorали оз. Байкал в зоне влияния сточных вод канализационных очистных сооружений г. Байкальска: оценка геохимическим методом // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 165–182. doi: 10.17223/25421379/35/13

Original article

doi: 10.17223/25421379/35/13

POLLUTION OF LAKE BAIKAL LITTORAL SURFACE WATERS IN THE ZONE OF INFLUENCE OF WASTE WATER FROM THE BAIKALSK TOWN WASTEWATER TREATMENT FACILITIES: ASSESSMENT BY GEOCHEMICAL METHOD

Eugene P. Chebykin¹, Natalya N. Kulikova², Yelena V. Lkhoshway³, Alexander N. Suturin⁴

^{1, 2, 3, 4} Limnological Institute, RAS SB, Irkutsk, Russia

¹ epcheb@yandex.ru

² kulikova@lin.irk.ru

³ likhoshway@mail.ru

⁴ san@lin.irk.ru

Abstract. The assessment of impact of anthropogenic and natural pollution sources onto water objects is one of important ecological tasks. In this work, we developed a numeric method for calculation of water fractions from the sources illustrated by Lake Baikal littoral in the zone of influence of wastewaters from treatment facilities (WTF) in Baikalsk town. The method is based on use of a wide spectrum of chemical elements measured in the sources (waste, riverine and Baikalian waters) and mixing objects (littoral waters) and is a first stage of a developed earlier geochemical method for assessment of the influence of local pollution sources onto water objects. The calculation of water fraction from the sources is performed by several groups of contrast conservative and conventionally conservative chemical elements using iteration procedures minimizing a standard deviation of measured concentration of chemical elements in mixing objects from calculated ones. At the second stage, geochemical fractions from pollution sources are calculated taking into account a probable non-conservative behavior of chemical elements at physico-chemical and biogeochemical barriers. Waste waters from Baikalsk town WTF are discharged into an Aerator Pond situated at Lake Baikal

coast. The wastes income from the Aerator Pond via drainage stations along subaqueal pipes into Lake Baikal and are discharged at the depths of 12–44 m in ~ 140 from water edge. It is found that water fraction from Baikalsk town WTF in coastal water of the lake in the zone of influence of BPPP Aerator Pond is $3.4 \pm 03\%$ suggesting ground leakages, which are probably due to disturbance of consistency of the collector construction. Main sources of coastal waters formation are Baikal water ($56 \pm 4\%$) and the Bol'shaya Osinovka R. ($41 \pm 4\%$), the mouth of which is situated in 180 m eastward from the Aerator Pond. In Lake Baikal littoral surface water in the zone of influence of subaqueal pipes for wastewaters discharge in the sectors of ~ 145 and ~ 190 m from water edge, water fractions from wastewaters are 0.034–0.19 %, ones of riverine waters are – 1.7–2.1 %, ones of Baikalian waters are ~ 98 %.

Among the studies objects, the most geochemically influenced by wastewaters from Baikalsk town WTF one is Lake Baikal coastal water opposite to the Aerator Pond – summary geochemical fractions of waste waters calculated as a sum of fractions by 31 informative chemical elements is here 561 %, this is more by one order of magnitude than in the surface water above the head walls of discharge subaqueal pipes in the sector of ~ 145 m from the water edge (50–55 %) and in a more remote sector of ~ 190 m from water edge (14–71 %). Analogous characteristics calculated by 12 normative chemical elements are 261 %, 26–29 % and 8–37 %, respectively. In Lake Baikal coastal water, the most important are geochemical fractions of waste waters by Mn, Cl, Ga and Ge (69–51 %), a grade below belongs to B (45 %) and P (39 %), then Rb (24 %), Na (22 %) and K (24 %), then Cs, Fe, Li, Ni, Cr, V, Co and Sb (18–10 %). Fractions of other elements are < 10 %. In the lake surface water in the zone of influence of subaqueal pipes for wastewaters discharge in the sectors of ~ 145 and ~ 190 m from water edge, their geochemical fractions are the most important by Mn (5.3–23 %) and Ga (3–14 %), less – by Ge (1.2–6.1 %), Cl (1.1–5.6 %), B (0.57–3.1 %), P (0.42–2.3 %), Rb (0.34–1.8 %), Cs (0.27–1.5 %), Cr (0.23–1.3 %), Si, K (0.23–1.2 %), Fe (0.2–1.1 %) and Na (0.19–1 %). Fractions of other elements are < 1 %. We found in waste waters from Baikalsk town WTF the normatives exceed by Fe (158 MAC), P (67 MAC), Cl (37 MAC), Al (13 MAC), Cr (7.4 MAC), K (6 MAC), Na (5.6 MAC), Ni (4.8 MAC), S (3,3 MAC), Pb (1.6 MAC), Mn (1.6 MAC) and Mo (1.3 MAC) established for wastewaters discharged directly into Lake Baikal. The proposed method may be recommended for the assessment of a degree of geochemical impact of local pollution sources onto aquatic objects and expanded to any other pollutants at their common determination.

Keywords: waste waters, chemical elements, ICP-MS, maximal allowable concentrations, Lake Baikal

Acknowledgments: the authors thank R/V "Vereshchagin" team and captain I.Yu. Barkhakov for their help in sampling.

Source of financing: the study was carried out under the state assignment of Limnological Institute of SB RAS with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (№ 121032300186-9).

For citation: Chebykin E.P., Kulikova N.N., Likhoshway Ye.V., Suturin A.N. (2025) Pollution of Lake Baikal littoral surface waters in the zone of influence of waste water from the Baikalsk town wastewater treatment facilities: assessment by geochemical method. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research.* 1. pp. 165–182. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/35/13

Введение

На побережье Байкала в последние годы активно проявляется экологический кризис: в литоральной зоне бурно развиваются нитчатые водоросли рода *Spirogyra*, гибнут эндемичные байкальские губки, водные лишайники и другие гидробионты [Грачёв, 2015; Сутурина и др., 2016; Ханаев и др., 2016]. Приуроченность интенсивных кризисных проявлений к местам хозяйственной деятельности человека и развития туристического бизнеса указывает на антропогенное влияние, которое может быть как непосредственной причиной кризиса, так и косвенно влиять на его развитие при неблагоприятных природно-климатических условиях. В связи с этим актуален расширенный и детальный поиск неблагоприятных факторов и оценка степени их влияния на литоральную зону Байкала.

В предыдущей нашей работе [Чебыкин и др., 2024] дан обзор литературы по некоторым неблагополучным участкам Байкальской природной территории (БПТ) и существующим методам оценки степени воздействия сточных вод различного генезиса на загрязняемые объекты. В той же работе [Чебыкин и др., 2024] нами был предложен новый геохимический метод для количественной оценки водных и геохимических вкладов локальных источников загрязнения в последовательно за-

грязняемые водные объекты (стоки–река–озеро) на примере г. Слюдянки, р. Похабиха и прилегающей литорали оз. Байкал. Применимость данного метода обусловлена широким спектром химических элементов, определяемых методом масс-спектрометрии с индуктивно связанный плазмой (ИСП-МС). Для пресноводных объектов из 72 определяемых химических элементов информативными, как правило, оказываются около трех десятков, по которым в конечном итоге рассчитываются как индивидуальные, так и суммарные геохимические вклады от источников загрязнения с учётом возможных процессов на физико-химических и биогеохимических барьерах. Для определения водных вкладов источников смешения в объекты смешения используются контрастные консервативные и условно консервативные химические элементы, набор которых индивидуален и зависит от особенностей геохимического состава источников смешения. Важное преимущество предложенного нами геохимического метода состоит в том, что он позволяет быстро, дешево и надёжно определить водные вклады источников на каждом этапе смешения в любых сложных объектах на момент исследования, что невозможно сделать, опираясь на официальные справочные данные и (или) при использовании традиционных методов измерения расходов воды (например, при смешении разных типов вод в литорали озера).

Одним из проблемных участков побережья Байкала являются промплощадка Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) и промышленные полигоны, на которых хранятся твердые отходы (зола, шлам-лигнин), накопленные за период работы предприятия (1966–2013 гг.), в количестве более 6,2 млн м³ [Сутурин, 2012]. Солзанский полигон промотходов требует срочной рекультивации из-за высокой селеоопасности. Мощные сели в этом районе сходят регулярно с периодом приблизительно 40 лет [Сутурин и др., 2021]. Карты, в которых хранятся твердые отходы, заполнены надшламовой водой, геохимический состав которой зависит от истории их заполнения и эксплуатации [Чебыкин и др., 2020]. Концентрации многих химических элементов в надшламовых водах превышают нормативы, установленные для сточных вод, сбрасываемых в водные объекты в пределах центральной и буферной экологических зон БПГ. В летний период при интенсивных атмосферных осадках карты переполняются, надшламовые воды по времененным водотокам поступают в оз. Байкал [Чебыкин и др., 2020].

На территории самой промплощадки БЦБК расположены жидкие отходы производства (щёлок и др.), которые потенциально опасны из-за возможности утечек. Кроме того, происходит площадной смыв загрязнителей, которые с грунтовым стоком поступают в литораль озера. Субаквальная разгрузка таких стоков регулярно фиксировалась нами в ходе выполнения научно-исследовательских работ по государственным заданиям ЛИН СО РАН (2017–2020 гг.). Наиболее заметным является выход грунтовых вод в литорали Байкала напротив цеха № 1. Так, 22 июля 2017 г. при исследовании придонных вод на трансекте 0–100 м от берега обнаружено резкое изменение состава на глубине 60 см в 10 м от уреза. Концентрации большинства химических элементов здесь превышали фоновые (фотический слой Байкала 0–50 м в 2,6 км от берега): Sr, Hg, Cu, Ge, Tl, V, Re, Al – в 1,5–2 раза; Cd, Zn, Rb, Ca, Br, P, Mg, I, Se, Ta, Ti, B, Ba, Cr, Cs – в 2–5 раз, K, Hf – в 6–7 раз; Ni, Co, Nb, Cl, Na, Th, S, Si, Y – в 11–70 раз; Zr – в 225 раз, Fe – в 800 раз, Mn – 3000 раз, редкоземельные элементы (REE) – в 13–470 раз. Общая минерализация превышала фоновые значения в 4,6 раза.

На территории промплощадки БЦБК находится пруд-аэратор, куда поступали сточные воды с очистных сооружений БЦБК в период работы комбината, а в настоящее время сбрасываются стоки с канализационных очистных сооружений (КОС) г. Байкальска, которые затем через сливные колодцы по подземным трубам поступают в оз. Байкал. Согласно Приказу Минприроды РФ № 83 [Приказ..., 2020], сливные станции, находящиеся на коммунальных очистных сооружениях и (или) канализационных сетях, входят в «централизованную систему водоотведения поселений или городских округов». То есть сточные воды

КОС г. Байкальска попадают под категорию стоков, «сбрасываемых непосредственно в оз. Байкал», к которым предъявляются более высокие требования к качеству очистки.

Исследования сточных вод КОС г. Байкальска, проведённые нами в 2013, 2020 и 2021 гг., показали, что из 17 нормируемых химических элементов (Na, Al, P, S, Cl, K, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Mo, Cd, Hg и Pb) 13 превышали установленные нормативы: Na (6–10 ПДК), Al (13–105 ПДК), P (57–98 ПДК), S (4–11 ПДК), Cl (36–49 ПДК), K (6–7 ПДК), Cr (4–10 ПДК), Mn (2 ПДК), Fe (55–226 ПДК), Ni (5 ПДК), Cu (2–5 ПДК), Mo (1–2 ПДК), Pb (1–2 ПДК). Из числа рассматриваемых элементов мы исключаем ртуть ввиду её ненадёжного определения методом ИСП-МС.

Цель данного исследования – оценить степень влияния сточных вод КОС г. Байкальска на поверхностные воды прилегающей литорали оз. Байкал с помощью разработанного ранее геохимического метода, предложить более надёжный способ расчёта водных вкладов источников смешения.

1. Материалы и методы

1.1. Описание района работ, отбор и фиксация проб

Город Байкальск расположен на восточном берегу южного Байкала (рис. 1). Это моногород, связанный в прошлом с деятельностью Байкальского целлюлозно-бумажного комбината, закрытого в 2013 г. В 2020 г. численность населения города составляла ~12,5 тыс. человек [Итоги..., 2020]. КОС г. Байкальска сбрасывают сточные воды в западную часть (ст. PA in) пруда-аэратора (330 × 50 м), который расположен на территории БЦБК в 120 м от уреза оз. Байкал (рис. 1). Отстоянны и частично разбавленные атмосферными осадками сточные воды через сливные колодцы в восточной части пруда-аэратора (ст. PA out) поступают по двум трубам в оз. Байкал и разгружаются в ~140 м от уреза через оголовки на глубинах 12, 24, 34 и 44 м. По данным водолазных исследований, основной выход стоков осуществляется через оголовок на глубине 34 м.

Отбор проб произведён 5 сентября 2022 г. в ходе осенней кругобайкальской экспедиции на НИС «Г.Ю. Верещагин». Координаты станций отбора проб представлены в табл. 1, местоположение станций показано на рис. 1. Пробы сточных вод КОС г. Байкальска были отобраны как на входе в пруд-аэратор (ст. PA in, из трубы) так и на его выходе, из сливных колодцев (ст. PA out). Прибрежная вода озера (ст. CW, ~1 м от уреза) и интерстициальная вода в заплесковой зоне (ст. h) были отобраны напротив восточного края пруда-аэратора. Поверхностные воды в литорали Байкала были отобраны с лодки непосредственно над подводной трубой сброса, в ~145 м от

уреза (ст. Т). С радиусом ~ 50 м от ст. Т отобраны 2 пробы в секторе ~ 145 м от уреза (ст. 50TL, 50 TR) и 3 пробы в секторе ~ 190 м от уреза (ст. 50, 50L, 50R). Фоновая пробы байкальской воды была взята из фотического слоя (усреднённая с горизонтов 0, 5, 10, 15,

20 и 25 м) в 3 км от берега (ст. 3k). Пробы из фотического слоя отбирали с борта НИС «Г.Ю. Верещагин» пластиковыми (ПЭ-SDR-17 (21)) батометрами (6 л – OceanTest Equipment Inc., США, 12 л – «General Oceans Inc., США) и разливали в ПЭТ бутылки.

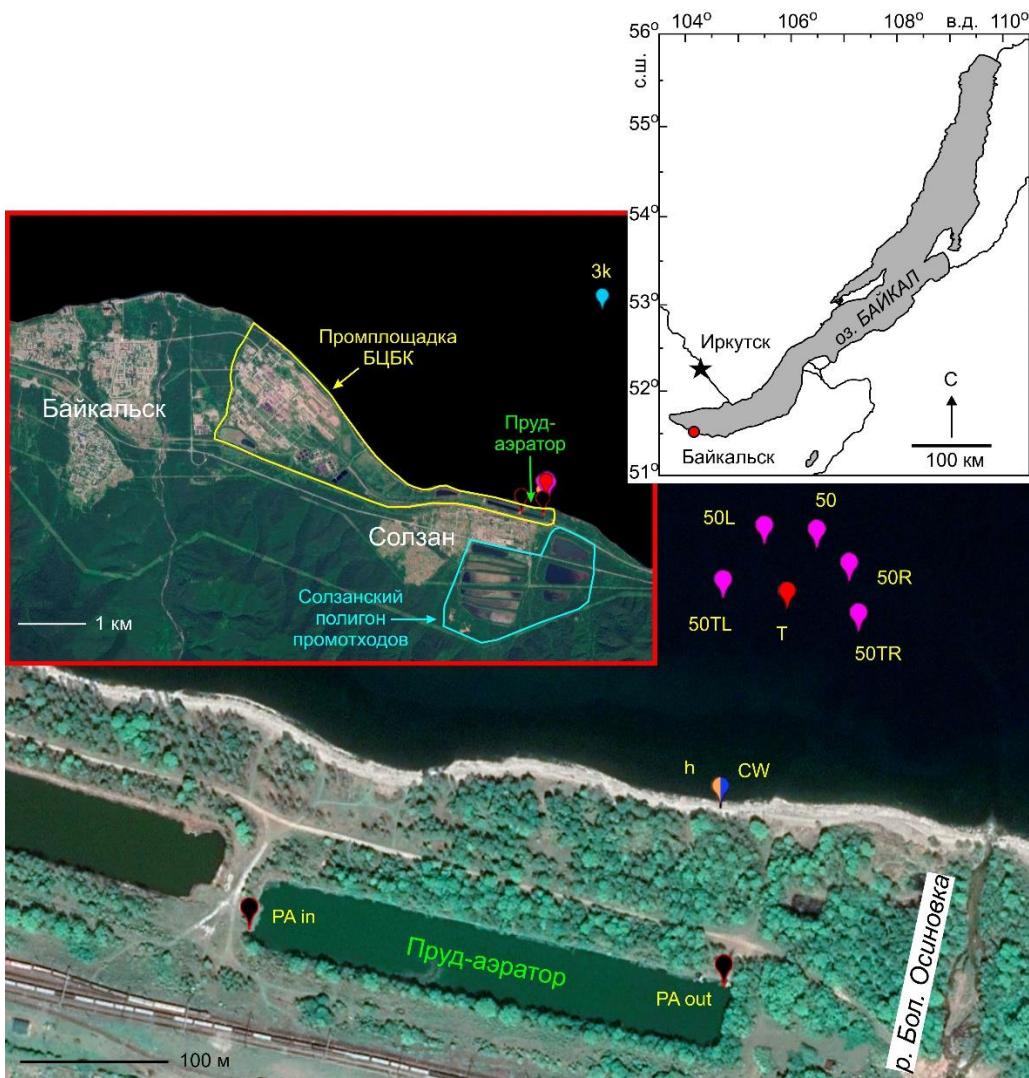


Рис. 1. Карта-схема оз. Байкал и космоснимки с указанием мест отбора проб в зоне влияния сточных вод КОС г. Байкальска

Космоснимки взяты из открытых источников (Google Earth). Чёрными символами отмечены места отбора сточных вод на входе (ст. PA in) и выходе (ст. PA out) из пруда-аэратора, красным – поверхность воды Байкала над подводной трубой сброса сточных вод (ст. Т, ~ 145 м от уреза), розовыми – поверхность воды Байкала в радиусе ~ 50 м от ст. Т в секторе ~ 145 м от уреза (ст. 50TL, 50TR) и в секторе ~ 190 м от уреза (ст. 50, 50L, 50R), голубым – фоновая станция в 3 км от берега (ст. 3k). Напротив восточной части пруда-аэратора отобрана прибрежная вода Байкала (ст. CW, символ синего цвета) и интерстициальная вода в заплесковой зоне (ст. h, символ светло-коричневого цвета). Жёлтым и голубым контурами выделены промплощадка БЦБК и Солзанский полигон промотходов

Fig. 1. Schematic map of Lake Baikal and satellite images with sampling sites in the zone of the influence of wastewaters from Baikalsk town WTF

Satellite images are from open sources (Google Earth). Black symbols are sampling sites of wastewaters at the entry (st. PA in) and exit (st. PA out) from Aerator Pond, red ones are Lake Baikal surface water above a subaqueous pipe of wastewaters discharge (st. T, ~ 145 m from the water edge), pink ones are Lake Baikal surface water in the radius of ~ 50 m from station T in the sector of ~ 145 m from water edge (st. 50TL, 50TR) and in the sector of ~ 190 m from the water edge (st. 50, 50L, 50R), light blue ones is a background station in 3 km from the coast (st. 3k). Opposite to the eastern part of the Aerator Pond, we sampled coastal water from Lake Baikal (st. CW, a blue symbol) and interstitial water in an oversplash zone (st. h, a light brown symbol). Yellow and light blue outlines show BPPP industrial site and Solzan polygon for industrial wastes

Описание и координаты точек отбора проб воды в зоне влияния КОС г. Байкальска

Table 1

Description and coordinates of the water sampling points in the zone of influence of Baikalsk Town WTF

Станция	Описание	С.Ш.	В.Д.
р.Б. Ос	р. Б. Осиновка, устье	51,5003°	104,2440°
PA in	Сточные воды КОС г. Байкальска на входе в пруд-аэратор	51,4998°	104,2366°
PA out	Сточные воды КОС г. Байкальска на выходе из пруда-аэратора	51,4995°	104,2413°
h	Интерстициальная вода напротив восточной части пруда-аэратора	51,5006°	104,2413°
CW	Байкал, прибрежная вода напротив восточной части пруда-аэратора	51,5006°	104,2413°
T	Байкал, поверхностная вода над подводной трубой сброса из пруда-аэратора	51,5018°	104,2419°
50TL	Байкал, поверхностная вода, 50 м влево от ст. Т	51,5019°	104,2413°
50TR	Байкал, поверхностная вода, 50 м вправо от ст. Т	51,5017°	104,2427°
50	Байкал, поверхностная вода, 50 м вперед по трансекте от ст. Т	51,5022°	104,2422°
50L	Байкал, поверхностная вода, 50 м под углом влево от ст. Т	51,5022°	104,2417°
50R	Байкал, поверхностная вода, 50 м под углом вправо от ст. Т	51,5020°	104,2426°
3k	Байкал, фотический слой (0–25 м), 3 км от уреза по трансекте от пруда-аэратора	51,5271°	104,2541°

Для многоэлементного ИСП-МС анализа пробы воды отбирали одноразовыми стерильными медицинскими шприцами (10 мл) непосредственно из объектов исследования. В гидрохимической лаборатории на борту НИС «Г.Ю. Верещагин» отобранные пробы в количестве 2 мл фильтровали через одноразовые полистирольные стерильные шприц-насадки Minisart 16555-K (размер пор 0,45 мкм, ацетат целлюлозы, Sartorius Stedim Biotech GmbH, Германия) в предварительно взвешенные полипропиленовые пробирки Эппendorфа (2 мл, Axugen Scientific, Cat.-No. MCT-200-C, США, Мексика), содержащие 40 мкл консерванта. В качестве консерванта использовалась 70 %-я HNO₃, дважды очищенная с помощью суббойлинговой системы перегонки кислот (Savillex DST-1000 sub-boiling distillation system, Япония), содержащая индий (1008 ppb) в качестве внутреннего стандарта. Консервант добавляли в пробирки Эппendorфа весовым методом. Пробирки с отобранными образцами воды взвешивали и рассчитывали точное содержание азотной кислоты (типовично 2 %) и индия (типовично 30 ppb). Все необходимые взвешивания проводились на аналитических весах Mettler Toledo AG104 (погрешность взвешивания ± 0,0003 г).

Для определения гидрохимических и физико-химических параметров образцы воды отбирали в ПЭТ бутылки. Измерения pH проводили сразу же после отбора проб pH-метром testo 252 (Германия, точность определения ± 0,02 pH).

1.2. Многоэлементный ИСП-МС анализ

Подготовленные пробы воды измеряли на квадрупольном ИСП-МС масс-спектрометре Agilent 7500 ce

в ЦКП «Ультрамикроанализ» ЛИН СО РАН в соответствии с разработанными ранее подходами [Чебыкин и др., 2012]. Система ввода проб: боросиликатный распылитель MicroMist (режим подачи растворов – самораспыление), PFA распылительная камера, кварцевая горелка с системой ShieldTorch. Измерения проводили в режиме «горячая плазма» (мощность генератора плазмы 1580 Вт) без столкновительной ячейки.

Растворы измерялись в сканирующем режиме с дополнительным загрублением сигналов в 30 раз для изотопов ²³Na, ²⁷Al, ²⁸Si, ³⁹K и ¹¹⁵In (3 канала на массу, 0,05 с на канал, общее время сканирования масс-спектра – 62 с, промывка между пробами – 60 с).

Для калибровки масс-спектрометра использовали многоэлементные стандартные растворы ICP-MS-68A-A и ICP-MS-68A-B (HIGH-PURITY STANDARDS, Charleston, США), образец байкальской бутылированной воды (для Na, Mg, Si, S, Cl, K, Ca, [Suturin et al., 2003]), а также растворы катионов (Na, Mg, K, Ca, Fe, Hg) и анионов (Si, P, S, Cl, Br, I), приготовленные смешением одноэлементных ИСП-МС стандартных растворов компании Inorganic Ventures (США): Na (Cat. No. MSNA-100PPM), Mg (Cat. No. MSMG-100PPM), K (Cat. No. MSK-100PPM), Ca (Cat. No. CGCA1), Fe (Cat. No. MSFE-100ppm), Hg (Cat. No. MSHGN-10PPM), Si (Cat. No. MSSI-100PPM), P (Cat. No. MSP-100ppm), S (Cat. No. CGS1), Cl (Cat. No. CGICCL1), Br (Cat. No. CGICBR1), I (Cat. No. CGICI1).

Металлы и Si в стандартных растворах присутствовали в азотокислой среде, S и P – в форме серной ортофосфорной кислот соответственно, галоге-

ниды – в водном растворе аммонийных солей. Концентрации элементов в рабочем стандартном растворе анионов и катионов готовили исходя из их типичных содержаний (кроме ртути и фосфора) в пресных природных водах: Na (3 ppm), Mg (3 ppm), K (1 ppm), Ca (16 ppm), Fe (0,3 ppm) и Hg (0,6 ppb), Si (2 ppm), P (1 ppm), S (5 ppm), Cl (4 ppm), Br (40 ppb) и I (20 ppb).

Корректировку на интерферирующие молекулярные ионы (MeO^+ , MeOH^+ , MeAr^+ , MeCl^+) проводили с использованием подхода, описанного в работе [Aries et al., 2000].

Ошибки измерения элементов оценивали по экспериментально установленной зависимости коэффициента вариации (**RSD %**) от величины аналитического сигнала (N , имп./с): $\text{RSD \%} = 125,71 \times N^{-0,33103}$, где $N = 20\text{--}20$ тыс. имп./с. Сигналы величиной более 20 000 имп./с характеризуются RSD 5 % и лучше, сигналы величиной менее 20 имп./с характеризуются RSD более 50 %. Типичные ошибки измерения (коэффициент вариации RSD), в зависимости от концентрации химических элементов, находятся в следующих диапазонах: $<0,001 \text{ мкг/дм}^3$ – RSD $> 25 \%$; $0,001\text{--}0,1 \text{ мкг/дм}^3$ – RSD 25–10 %; $0,1\text{--}1 \text{ мкг/дм}^3$ – RSD 10–5 %; $>1 \text{ мкг/дм}^3$ – RSD 5 %.

1.3. Расчёт общей минерализации воды

Расчёт общей минерализации (ОМ) воды проводили по результатам многоэлементного ИСП-МС анализа с использованием баланса химических эквивалентов. При известных значениях pH рассчитывали соотношения равновесных форм угольной кислоты ($[\text{HCO}_3^-]$, $[\text{CO}_3^{2-}]$ и $[\text{CO}_2]$), в отсутствии данных о pH полагали, что в типичных природных водах доминируют её гидрокарбонатные формы (90–98 % в диапазоне 7,3–9,4 pH). При составлении баланса химических эквивалентов измеренные концентрации химических элементов переводили в молярные концентрации их типичных ионных форм: Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} . При содержании кремния менее 2 мМоль (56 мг/дм³) полагали, что он находится в виде ортокремневой кислоты (H_4SiO_4 , слабодиссоциируемой при pH < 9), при более высоких концентрациях – в её полимерных формах, условно, в виде линейного полимера (H_2SiO_3)_n [Мышляева, Краснощеков, 1972]. В расчёт были также включены условно следовые элементы в формах Li^+ , BO_3^{3-} , Al^{3+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Sr^{2+} и Ba^{2+} , которые могут присутствовать в природных и техногенных водах в значимом количестве. Составленный баланс химических эквивалентов позволяет рассчитать суммарную концентрацию ионов, которые методом ИСП МС не определяются (HCO_3^- , CO_3^{2-} и NO_3^- , полагая, что концентрация NO_3^- в водах

значительно меньше суммарного содержания форм угольной кислоты) и оценить общую минерализацию воды по сумме всех ионов.

1.4. Расчёт ошибок результатов математических операций

Расчёт ошибок результатов математических операций в простых и сложных выражениях осуществлялся в соответствии с подходами, описанными в работе [Geyh, Schleicher, 1990].

1. Для результатов сложения и (или) вычитания.

Абсолютные ошибки:

$$t^* \pm \sigma^* = t_1 + t_2 - t_3 \pm \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}, \quad (1),$$

где σ_1 , σ_2 и σ_3 – абсолютные ошибки измерения переменных t_1 , t_2 и t_3 .

Относительные ошибки:

$$\bar{\sigma}^* = \frac{\sigma^*}{t^*} = \sqrt{\frac{(\bar{\sigma}_1 \times t_1)^2 + (\bar{\sigma}_2 \times t_2)^2 + (\bar{\sigma}_3 \times t_3)^2}{t^*}}, \quad (2)$$

где $\bar{\sigma}_1$, $\bar{\sigma}_2$ и $\bar{\sigma}_3$ – относительные ошибки измерения переменных t_1 , t_2 и t_3 .

2. Для результатов умножения и (или) деления.

Абсолютные ошибки:

$$\begin{aligned} t^* \pm \sigma^* &= \frac{t_1 \times t_2}{t_3} \pm t^* \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{t_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{t_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_3}{t_3}\right)^2} = \\ &= \frac{t_1 \times t_2}{t_3} \pm t^* \times \sqrt{\frac{-2}{\sigma_1^2} + \frac{-2}{\sigma_2^2} + \frac{-2}{\sigma_3^2}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Относительные ошибки:

$$\bar{\sigma}^* = \frac{\sigma^*}{t^*} = \sqrt{\frac{-2}{\sigma_1^2} + \frac{-2}{\sigma_2^2} + \frac{-2}{\sigma_3^2}}. \quad (4)$$

2. Результаты и обсуждение

В исследуемых пробах были определены концентрации 72 химических элементов. Концентрации наиболее информативных элементов, использованных в работе, представлены в табл. 2.

Согласно полученным данным, сточные воды КОС г. Байкальска в исследуемый период превышают установленные нормативы [Приказ..., 2020] по 12 химическим элементам: Fe (158 ПДК), P (67 ПДК), Cl (37 ПДК), Al (13 ПДК), Cr (7,4 ПДК), K (6 ПДК), Na (5,6 ПДК), Ni (4,8 ПДК), S (3,3 ПДК), Pb (1,6 ПДК), Mn (1,6 ПДК) и Mo (1,3 ПДК), а концентрация Cu близка к предельно допустимым концентрациям (0,9 ПДК).

Тепловая карта геохимических различий сточных, речных, интерстициальных и поверхностных вод литорали Байкала в зоне влияния пруда-аэратора БЦБК относительно фоновой станции в 3 км от уреза (ст. 3к), представлена на рис. 2 и ранжирована по

убыванию геохимических различий для ст. PA out (вода на выходе из пруда-аэратора). В число сравниваемых объектов добавлена р. Б. Осиновка, устье которой находится в 180 м восточнее прибрежной станции CW (см. рис. 1). Воду из этой речки необходимо включить в рассмотрение, поскольку анализ полученных данных показал, что прибрежная вода находится под ее большим влиянием. К сожалению, в данной экспедиции пробы из р. Б. Осиновка не была отобрана, поэтому мы взяли ее средний геохимический состав, полученный в ходе

предыдущих исследований в осенне-летний период 2013–2020 гг.

Первые данные о геохимическом составе воды р. Б. Осиновка были опубликованы ранее [Чебыкин и др., 2020].

Было установлено, что на всем протяжении реки на участке «выше карт-накопителей – устье» состав воды не меняется.

Далее регулярный мониторинг проводился в устье реки (см. табл. 1, рис. 1).

Таблица 2

Концентрация информативных химических элементов ($\mu\text{г}/\text{дм}^3$) и общая минерализация (OM, $\text{мг}/\text{дм}^3$) в отобранных пробах воды в зоне влияния КОС г. Байкальска. В скобках указаны ошибки определения (отн. %)

Table 2

Concentration of informative chemical elements ($\mu\text{g}/\text{dm}^3$) and total mineralization (OM, mg/dm^3) in collected water samples in the zone of Baikalsk Town WTF influence. Determination errors are in brackets (rel. %)

Станция	Al	As	B	Ba	Br	Ca	Cl	Co	Cr	Cs	Fe
р. Б. Ос*	9,2 (5,0)	0,040 (16)	2,1 (5,0)	7,6 (5,0)	2,8 (7,1)	12 300 (5,0)	120 (6,4)	0,049 (7,4)	0,27 (8,6)	0,004 (15)	15 (5,0)
PA in	11,5 (5,0)	0,24 (11)	140 (5,0)	18,2 (5,0)	12 (4,9)	22 000 (5,0)	20 000 (5,0)	0,19 (5,4)	0,60 (7,5)	0,020 (10)	52 (5,0)
PA out	15,8 (5,0)	0,26 (10)	104 (5,0)	13,2 (5,0)	12,1 (4,9)	21 000 (5,0)	17 500 (5,0)	0,19 (5,3)	0,57 (7,6)	0,017 (11)	84 (5,0)
h	33 (5,0)	0,08 (15)	17,3 (5,0)	26 (5,0)	4,2 (7)	23 000 (5,0)	1 490 (5,0)	0,15 (5,8)	0,19 (11)	0,0058 (15)	38 (5,0)
CW	6,9 (5,0)	0,22 (11)	8,1 (5,0)	13,7 (5,0)	6,2 (6,1)	18 600 (5,0)	990 (5,0)	0,099 (6,7)	0,22 (10)	0,003 (19)	13,8 (5,0)
T	3,4 (5,0)	0,36 (9,2)	6,2 (5,0)	10,8 (5,0)	9,4 (5,3)	16 900 (5,0)	580 (5,0)	0,064 (7,7)	0,090 (14)	0,0022 (21)	9,7 (5,1)
50TL	3,5 (5,0)	0,34 (9,4)	6,1 (5,0)	10,8 (5,0)	9,1 (5,4)	16 900 (5,0)	580 (5,0)	0,068 (7,5)	0,090 (14)	0,0023 (21)	11,9 (5,0)
50TR	4,0 (5,0)	0,37 (9,1)	6,2 (5,0)	10,7 (5,0)	9,9 (5,2)	16 800 (5,0)	580 (5,0)	0,066 (7,6)	0,11 (13)	0,0018 (23)	11,8 (5,0)
50	3,4 (5,0)	0,37 (9,1)	6,1 (5,0)	10,8 (5,0)	9,4 (5,3)	16 800 (5,0)	580 (5,0)	0,067 (7,6)	0,070 (15)	0,0017 (23)	10,3 (5,0)
50L	3,3 (5,0)	0,36 (9,3)	6,2 (5,0)	10,8 (5,0)	9,7 (5,3)	16 800 (5,0)	590 (5,0)	0,063 (7,7)	0,080 (15)	0,0018 (23)	10,3 (5,0)
50R	3,4 (5,0)	0,35 (9,3)	6,1 (5,0)	10,8 (5,0)	9,4 (5,3)	16 800 (5,0)	560 (5,0)	0,063 (7,7)	0,15 (12)	0,0022 (21)	11,8 (5,0)
3k	3,6 (5,0)	0,33 (9,5)	6,2 (5,0)	10,9 (5,0)	9,9 (5,2)	16 800 (5,0)	560 (5,0)	0,064 (7,7)	0,080 (14)	0,0021 (22)	14,2 (5,0)

Продолжение табл. 2
Continuation of table 2

Станция	Ga	Ge	I	K	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P
р. Б. Ос	0,005 (19)	0,003 (19)	0,31 (14)	830 (5,0)	0,47 (5,0)	3 230 (5,0)	0,47 (5,0)	0,39 (5,5)	1 160 (5,0)	0,13 (8,6)	14,6 (12)
PA in	0,087 (8,5)	0,078 (11)	0,66 (6,8)	6 700 (5,0)	6,1 (5,0)	4 700 (5,0)	5,1 (5,0)	1,23 (5,0)	22 000 (5,0)	0,60 (5,9)	860 (5,0)
PA out	0,080 (8,8)	0,077 (11)	0,92 (6,1)	6 500 (5,0)	5,5 (5,0)	4 500 (5,0)	15,5 (5,0)	1,30 (5,0)	20 000 (5,0)	0,72 (5,6)	670 (5,0)
h	0,011 (17)	0,010 (22)	0,65 (6,8)	1 540 (5,0)	0,59 (5,0)	6 100 (5,0)	4,5 (5,0)	0,61 (5,3)	4 600 (5,0)	0,40 (6,8)	42 (5,0)
CW	0,0022 (29)	0,0080 (25)	1,51 (5,1)	1 110 (5,0)	1,43 (5,0)	4 200 (5,0)	0,53 (5,0)	0,93 (5,0)	3 300 (5,0)	0,26 (7,8)	46 (5,0)
T	0,0011 (36)	0,0026 (35)	2,4 (5,0)	990 (5,0)	2,2 (5,0)	3 200 (5,0)	0,093 (6,3)	1,34 (5,0)	3 500 (5,0)	0,25 (7,9)	18,6 (5,0)
50TL	0,0009 (38)	0,002 (50)	2,5 (5,0)	990 (5,0)	2,2 (5,0)	3 200 (5,0)	0,111 (5,9)	1,34 (5,0)	3 500 (5,0)	0,28 (7,6)	46 (5,0)
50TR	0,0017 (32)	0,002 (50)	2,3 (5,0)	990 (5,0)	2,2 (5,0)	3 200 (5,0)	0,118 (5,8)	1,35 (5,0)	3 500 (5,0)	0,28 (7,7)	28 (5,0)

Станция	Ga	Ge	I	K	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P
50	0,0022 (29)	0,0030 (34)	2,4 (5,0)	990 (5,0)	2,2 (5,0)	3 200 (5,0)	0,115 (5,9)	1,33 (5,0)	3 500 (5,0)	0,24 (8,0)	48 (5,0)
50L	0,0017 (31)	0,0026 (35)	2,5 (5,0)	990 (5,0)	2,2 (5,0)	3 200 (5,0)	0,111 (5,9)	1,36 (5,0)	3 500 (5,0)	0,26 (7,8)	24 (5,0)
50R	0,0018 (31)	0,0025 (35)	2,5 (5,0)	990 (5,0)	2,2 (5,0)	3 200 (5,0)	0,132 (5,6)	1,30 (5,0)	3 500 (5,0)	0,29 (7,5)	38 (5,0)
3k	0,0008 (40)	0,0022 (37)	2,3 (5,0)	990 (5,0)	2,2 (5,0)	3 200 (5,0)	0,087 (6,4)	1,37 (5,0)	3 600 (5,0)	0,25 (8,0)	54 (5,0)

Продолжение табл. 2
Continuation of table 2

Станция	Rb	S	Sb	Si	Sr	Ti	U	V	W	OM
р. Б. Ос	0,87 (5,0)	2 710 (5,0)	0,074 (8,4)	3 380 (5,0)	49 (5,0)	0,42 (8,8)	0,12 (5,1)	0,49 (5,0)	0,009 (16)	85 (3,0)
PA in	6,4 (5,0)	6 600 (5,0)	0,160 (8,4)	3 900 (5,0)	116 (5,0)	0,81 (8,4)	0,011 (11)	1,15 (5,0)	0,061 (9,7)	200 (2,2)
PA out	6,3 (5,0)	6 000 (5,0)	0,150 (8,5)	3 700 (5,0)	110 (5,0)	0,77 (8,6)	0,014 (10)	1,40 (5,0)	0,061 (9,7)	190 (2,2)
h	1,27 (5,0)	3 700 (5,0)	0,027 (15)	4 200 (5,0)	80 (5,0)	1,14 (7,5)	0,098 (5,2)	0,51 (5,0)	0,006 (21)	160 (2,8)
CW	0,7 (5,0)	2 900 (5,0)	0,023 (16)	2 300 (5,0)	94 (5,0)	0,34 (11)	0,34 (5,0)	0,40 (5,0)	0,026 (13)	120 (2,9)
T	0,62 (5,0)	2 200 (5,0)	0,031 (14)	510 (5,0)	109 (5,0)	0,23 (13)	0,54 (5,0)	0,39 (5,0)	0,047 (11)	100 (3,2)
50TL	0,61 (5,0)	2 100 (5,0)	0,031 (14)	490 (5,0)	109 (5,0)	0,21 (13)	0,53 (5,0)	0,38 (5,0)	0,049 (10)	100 (3,2)
50TR	0,61 (5,0)	2 100 (5,0)	0,034 (14)	510 (5,0)	109 (5,0)	0,21 (13)	0,54 (5,0)	0,39 (5,0)	0,046 (11)	100 (3,2)
50	0,61 (5,0)	2 600 (5,0)	0,028 (15)	490 (5,0)	109 (5,0)	0,22 (13)	0,55 (5,0)	0,37 (5,0)	0,049 (10)	100 (3,1)
50L	0,63 (5,0)	2 300 (5,0)	0,035 (14)	510 (5,0)	109 (5,0)	0,19 (13)	0,54 (5,0)	0,37 (5,0)	0,047 (11)	100 (3,1)
50R	0,61 (5,0)	2 100 (5,0)	0,033 (14)	520 (5,0)	108 (5,0)	0,19 (14)	0,54 (5,0)	0,38 (5,0)	0,050 (10)	100 (3,2)
3k	0,62 (5,0)	2 300 (5,0)	0,028 (15)	500 (5,0)	109 (5,0)	0,16 (14)	0,54 (5,0)	0,36 (5,0)	0,048 (11)	100 (3,1)

Примечание. * – усредненный состав р. Большая Осиновка по результатам мониторинга в осенне-летний сезон за период 2013–2020 гг.

Note. * – average composition of the Bolshaya Osinovka River based on monitoring results in the autumn-summer season for the period 2013–2020.

Из анализа рис. 2 следует, что влияние сточных вод на поверхностный слой литорали над оголовками сброса (сектор ~ 145 м от уреза) и в ~ 45 м далее (сектор ~ 190 м) по большинству элементов не обнаруживается, за исключением Mn и Ga. Концентрация этих элементов в сточных водах на два порядка, а в литорали в 1,3–2,8 раза больше, чем на фоновой станции, причём превышения концентраций в секторе ~ 190 м от уреза фиксируются на всех станциях и они чуть больше, чем над оголовками сброса. Сопоставимые с Mn и Ga превышения фоновых концентраций по Ti (в 1,3–1,4 раза) и эпизодически по Cr (1,4–1,9 раза), Al (1,1 раза) и Ni (1,2 раза), скорее всего, обусловлены поступлением тонкодисперсной терригенной взвеси с речным стоком и (или) вследствие абразии берегов. Поскольку концентрация этих элементов в сточных

водах превышает фоновые в 3–7 раз, в сопоставлении с Mn (178 раз) и Ga (100 раз), то вряд ли они могут свидетельствовать о влиянии сточных вод.

Mn и Ga, к сожалению, также не являются надёжными индикаторами. Марганец неконсервативный элемент, сильно чувствительный к редокс-потенциалу. К тому же он может поступать в литоральную зону с подземными водами, которые, как правило, обеднены кислородом и содержат большое количество растворённого Mn. Это может скомпрометировать влияние сточных вод. Концентрация Ga в водах литорали очень низка (<0,01 мкг/дм³), чтобы с уверенностью говорить об эффектах влияния. Эффекты влияния по Mn и Ge нуждаются в дополнительной проверке на основе оценки водных вкладов сточных вод.

p_Б. Oc	PA in	PA out	h	Элемент	CW	T	50TL	50TR	50	50L	50 R
					Прибреж. зона	Сектор ~ 145 м от уреза (над трубой сброса)			Сектор ~ 190 м от уреза		
5,5	59	178	52	Mn	6,1	1,07	1,3	1,4	1,3	1,3	1,5
6,4	109	100	14	Ga	2,8	1,4	1,1	2,1	2,8	2,1	2,3
1,4	35	35	4,5	Ge	3,6	1,2	0,91	0,91	1,4	1,2	1,1
0,21	36	31	2,7	Cl	1,8	1,04	1,04	1,04	1,04	1,05	1,00
0,34	23	17	2,8	B	1,3	1,00	0,98	1,00	0,98	1,00	0,98
0,27	16	12	0,78	P	0,85	0,34	0,85	0,52	0,89	0,44	0,70
1,4	10	10	2,0	Rb	1,1	1,00	0,98	0,98	0,98	1,02	0,98
1,8	9,5	8,1	2,8	Cs	1,4	1,05	1,10	0,86	0,81	0,86	1,05
6,8	7,8	7,4	8,4	Si	4,6	1,02	0,98	1,02	0,98	1,02	1,04
3,4	7,5	7,1	2,4	Cr	2,8	1,1	1,1	1,4	0,88	1,00	1,9
0,84	6,8	6,6	1,6	K	1,1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,07	3,7	5,9	2,7	Fe	0,97	0,68	0,84	0,83	0,73	0,73	0,83
0,32	6,1	5,6	1,3	Na	0,92	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
2,7	5,7	5,4	0,96	Sb	0,82	1,1	1,1	1,2	1,00	1,3	1,2
2,6	5,1	4,8	7,1	Ti	2,1	1,4	1,3	1,3	1,4	1,2	1,2
2,6	3,2	4,4	9,2	Al	1,9	0,94	0,97	1,1	0,94	0,92	0,94
1,3	3,2	3,9	1,4	V	1,1	1,08	1,06	1,08	1,03	1,03	1,06
0,77	3,0	3,0	2,4	Co	1,5	1,00	1,06	1,03	1,05	0,98	0,98
0,50	2,4	2,9	1,6	Ni	1,04	1,00	1,1	1,1	0,96	1,04	1,2
1,2	2,9	2,6	1,6	S	1,3	0,96	0,91	0,91	1,1	1,00	0,91
0,21	2,8	2,5	0,27	Li	0,65	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,85	2,0	1,9	1,6	OM	1,2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,01	1,5	1,4	1,9	Mg	1,3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,19	1,3	1,3	0,13	W	0,54	0,98	1,02	0,96	1,02	0,98	1,04
0,73	1,3	1,3	1,4	Ca	1,1	1,01	1,01	1,00	1,00	1,00	1,00
0,28	1,2	1,2	0,42	Br	0,63	0,95	0,92	1,00	0,95	0,98	0,95
0,69	1,7	1,2	2,4	Ba	1,3	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99
0,45	1,06	1,01	0,73	Sr	0,86	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99
0,28	0,90	0,95	0,45	Mo	0,68	0,98	0,98	0,99	0,97	0,99	0,95
0,12	0,73	0,79	0,24	As	0,67	1,09	1,03	1,1	1,1	1,09	1,06
0,13	0,29	0,40	0,28	I	0,66	1,04	1,09	1,00	1,04	1,09	1,09
0,23	0,02	0,03	0,18	U	0,63	1,00	0,98	1,00	1,02	1,00	1,00

Ранг различий	Ранг различий
(14) >100 раз	(0) <0,01 раз
(13) 30–100 раз	(1) 0,01–0,033 раз
(12) 10–30 раз	(2) 0,033–0,1 раз
(11) 5–10 раз	(3) 0,1–0,2 раз
(10) 3–5 раз	(4) 0,2–0,33 раз
(9) 2–3 раза	(5) 0,33–0,5 раз
(8) 1,1–2 раз	(6) 0,5–0,91 раз
(7) 0,91–1,1 раз	(7*) ≤0,91 или ≥1,1 раз – нет достоверных отличий
(7*) 0,91–1,1 раз – нет достоверных отличий	(7*) ≤0,91 или ≥1,1 раз – нет достоверных отличий (перекрывание доверительных интервалов)

Рис. 2. Тепловая карта геохимических различий (кол-во раз) относительно фотического слоя в 3 км от уреза сточных, речных, интерстициальных и поверхностных вод литорали в зоне влияния сточных вод КОС г. Байкальска

OM – общая минерализация

Fig. 2. Heat map of geochemical differences (in times) related to a photic layer in 3 km from water edge of waste, riverine, interstitial and surface waters of the littoral in the zone of influence of wastewaters from Baikalsk town WTF

OM – total mineralization

Анализируя рис. 2, можно видеть, что прибрежная вода в зоне влияния пруда-аэратора формируется путем смешения как минимум байкальских, речных и сточных вод. Последние, скорее всего, попадают в подземные горизонты из-за нарушения целостности конструкции и субаквально разгружаются в литорали.

Используя концентрации консервативных и условно консервативных элементов, можно рассчитать вклад каждого источника в формирование состава прибрежных вод:

$$C_{i_расчет} = Part_riv \times C_{i_riv} + Part_ww \times C_{i_ww} + Part_bw \times C_{i_bw}, \quad (5)$$

$$Part_riv + Part_ww + Part_bw = 1, \quad (6)$$

$$Part_riv \geq 0; Part_ww \geq 0; Part_bw \geq 0, \quad (7)$$

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{C_{i_расчет} - C_i}{C_i} \right) \times 100 \right]^2} \rightarrow 0, \quad (8)$$

где $C_{i_расчет}$ и C_i – расчётная и измеренная концентрация элемента i в объекте смешения (в прибрежной воде) соответственно; C_{i_riv} , C_{i_ww} , C_{i_bw} – измеренные концентрации элемента i в речной, сточной и байкальской (фоновая станция) воде соответственно, а $Part_riv$, $Part_ww$, $Part_bw$ – массовые (или объёмные) доли соответствующих вод; Δ – среднеквадратичное расхождение расчётных и измеренных концентраций элементов в объекте смешения (в %).

Решение системы уравнений (5)–(8) являлось задачей на оптимизацию переменных (долей $Part_riv$, $Part_ww$, $Part_bw$) при поиске глобального минимума по параметру Δ и осуществлялось численными методами с помощью модуля «Поиск решения» в ПО Excel 2003.

Для того чтобы определиться, какие элементы из рис. 2 можно брать в расчёт, их разбили на категории: по степени контрастности, консервативности, надёжности определения и выполнимости граничных условий (рис. 3).

Очевидно, что при одинаковых концентрациях элемента во всех источниках смешения определить их вклады по данному элементу невозможно, и наоборот, чем больше источники смешения отличаются друг от друга по концентрации одного и того же элемента, тем более надёжным и устойчивым должен быть результат расчёта. Для оценки элементов в этой категории использовался фактор контрастности (FC):

$$FC = P/\Phi + C/\Phi + C/P, \quad (9)$$

где P/Φ , C/Φ и C/P – отношения концентраций (R) элементов в источниках смешения: P – р. Б. Осиновка, C – сточные воды (PA out), Φ – байкальская вода на фоновой станции (3k). Для $R < 1$ взяты обратные величины.

На рис. 3 элементы ранжированы по убыванию фактора контрастности FC . Условно элементы разделены на **ВКт** – высококонтрастные ($FC > 50$), **ЧВКт** –

частично высококонтрастные ($FC > 50$, $R < 2$), **Кт** – контрастные ($FC = 10$ – 50), **ЧКт** – частично контрастные ($FC = 10$ – 50 , $R < 2$), **СКт** – средне контрастные ($FC = 5$ – 10), **НКт** – низко контрастные ($FC < 5$).

По степени консервативности элементы разделены на **ТК** – типично консервативные главные элементы, которые мигрируют в растворённой форме, при смешении вод не участвуют в физико-химических процессах и слабо поглощаются гидробионтами (Na, Cl); **К** – консервативные, которые в пресных водоёмах мигрируют в основном в растворённой форме и слабо вовлечены в физико-химические и биогеохимические процессы (B, I, Cs, Rb, Li, W, Br, Co, Mo, S, Sr, Ba, Ca, Mg, общая минерализация); **УК** – условно консервативные, которые преимущественно мигрируют в растворённой форме, но могут в определённых условиях утилизироваться в твёрдую фазу (осаждение, сорбция – Ga, U, Ge, Sb, Ni) или дополнительно поступать из осадков в процессе диагенеза (д) (As, V), частично поглощаются гидробионтами (К – частично биогенный (**ЧБ**)), или частично мигрировать в составе мелкодисперсной терригенной взвеси (**ВЗВ**) (Al, Cr, Ti); **НК** – неконсервативные, которые в водной среде легко меняют форму нахождения (растворённая/нерастворённая) при изменении окисительно-восстановительного потенциала (**О/В**) (Mn, Fe), или могут быть в значительной степени утилизированы гидробионтами (P, Si – биогенные (**Б**))). По надёжности определения элементы разделены на **НО** – надёжно определяемые во всех объектах, **ОНК** – очень низкие концентрации ($<0,01$ мкг/дм 3 , для Sb $<0,05$ мкг/дм 3): Pr – в прибрежной воде, P – в реке, C – в сточных водах, Φ – в байкальской воде на фоновой станции.

Ещё один параметр, по которому необходимо разделить элементы, это случаи, когда концентрация элемента в объекте смешения (прибрежной воде) ниже или выше, чем в предполагаемых источниках смешения (реке, сточных водах и байкальской воде на фоновой станции), что делает процедуру определения их долей математически некорректной. Такая ситуация может указывать на наличие ещё одного источника или неконсервативных процессов. В данном случае найдено два элемента – Sb (наименьшая концентрация в Pr) и Ba (наибольшая концентрация в Pr). Сурьма довольно контрастный элемент ($FC = 10$), но её концентрации низкие в сточных водах (0,15 мкг/дм 3) и реке (0,07 мкг/дм 3) и очень низкие в интерстициальной, прибрежной и байкальской воде ($<0,03$ мкг/дм 3 , в рамках ошибок определения неразличимы, табл. 2). Если не принимать во внимание низкую надёжность определения, то данная картина распределения может означать, что Sb активно поглощается в грунтово-почвенных горизонтах и (или) сорбируется взвесью в прибрежной зоне.

Элемент	P/Φ	C/Φ	C/P	FC	Контрастность	Консервативность	НО	ОНизК	ТК & ВКт, Кт & НО	ВКт, Кт & НО	ВКт & Кт	Все НО**	Все допустимые	
Mn	5,5	178	33	216	ВКт	НК(о/в)	НО							
Cl	4,7*	31	146	182	ВКт	ТК	НО		1	1	1	1	1	
Ga	6,4	100	16	122	ВКт	УК	НО							
B	2,9*	17	49	69	ВКт	К	НО			1	1	1	1	
P	3,7*	12	46	62	ВКт	НК(б)								
Ge	1,4	35	24	61	ЧВКт	УК								
U	4,4*	39*	8,8*	52	ВКт	УК	НО			1	1	1	1	
Na	3,1*	5,6	17	26	Кт	ТК	НО		1	1	1	1	1	
Li	4,7*	2,5	12	19	Кт	К	НО			1	1	1	1	
Rb	1,4	10	7,3	19	ЧКт	К	НО							
As	8,4*	1,3*	6,6	16	ЧКт	УК(д)	НО						1	
K	1,2*	6,6	7,9	16	ЧКт	УК(чб)	НО					1	1	
Si	6,8	7,4	1,1	15	ЧКт	НК(б)								
Cs	1,8	8,1	4,4	14	ЧКт	К								
W	5,3*	1,3	6,8	13	ЧКт	К							1	
I	7,5*	2,5*	3,0	13	Кт	К					1		1	
Cr	3,4	7,1	2,1	13	Кт	УК(взв)								
Fe	1,1	5,9	5,5	13	ЧКт	НК(о/в)								
Ni	2,0*	2,9	5,8	11	Кт	УК					1		1	
Sb	2,7	5,4	2,0	10	Кт	УК								
Ti	2,6	4,8	1,8	9,3	СКт	УК(взв)								
Br	3,5*	1,2	4,3	9,1	СКт	К							1	
Al	2,6	4,4	1,7	8,7	СКт	УК(взв)	НО							
Co	1,3*	3,0	3,9	8,1	СКт	К							1	
V	1,3	3,9	2,9	8,1	СКт	УК(д)	НО					1	1	
Mo	3,5*	1,1*	3,4	7,9	СКт	К	НО					1	1	
S	1,2	2,6	2,2	6,0	СКт	К							1	
Sr	2,2*	1,0	2,2	5,4	СКт	К	НО					1	1	
OM	1,2*	1,9	2,2	5,3	СКт	К							1	
Ba	1,4*	1,2	1,7	4,4	НКт	К	НО							
Ca	1,4*	1,3	1,7	4,3	НКт	К	НО							
Mg	1,0	1,4	1,4	3,8	НКт	К	НО							
									N	2	5	7	10	18
									Part_riv, %	36	46	41	39	42
									Part_ww, %	3,5	3,8	3,7	3,0	3,3
									Part_bw, %	61	50	55	58	54
									Δ, %	0	4	8	11	16

Рис. 3 Вклады речных (Part_riv), сточных (Part_ww) и байкальских вод (Part_bw) в формирование состава прибрежных вод в зоне влияния пруда-аэратора БЦБК по результатам расчётов с различными комбинациями химических элементов в зависимости от степени их контрастности, консервативности и надёжности определения («1» в группах – включённый в расчёт элемент)

P/Φ , C/Φ и C/P – отношение концентраций (R) элементов в источниках смешения: P – р. Б. Осиновка, C – сточные воды (2-РА out), Φ – байкальская вода на фоновой станции (ст. 3к) [* – для отношений <1 взяты обратные величины]. $FC = P/\Phi + C/\Phi + C/P$ – фактор контрастности. N – количество элементов в группе; Контрастность: ВКт – высококонтрастный ($FC > 50$), ЧВКт – частично высококонтрастный ($FC > 50$, $R < 2$), Кт – контрастный ($FC = 10–50$), ЧКт – частично контрастный ($FC = 10–50$, $R < 2$), СКт – средне контрастный ($FC = 5–10$), НКт – низко контрастный ($FC < 5$). Консервативность: ТК – типично консервативный, К – консервативный, УК – условно консервативный, НК – неконсервативный, (о/в) – Red/Ox зависимый, (б) – биогенный, (д) – может быть диагенетического происхождения из осадков, (взв) – частично мигрирующий в составе тонкодисперсной взвеси. Надёжность определения: НО – надёжно определяется во всех объектах, ОНизК – очень низкие концентрации ($<0,01 \mu\text{g}/\text{dm}^3$, для Sb $< 0,05 \mu\text{g}/\text{dm}^3$): Пр – в прибрежной воде, Р – в реке, С – в сточных водах, Φ – в байкальской воде на фоновой станции. ** – все надёжно определяемые элементы за исключением неконсервативных элементов, низко контрастных элементов и элементов, не удовлетворяющих граничным условиям (см. текст). $\Delta, \%$ – среднеквадратичное отклонение расчётов и измеренных концентраций элементов в объекте смешения, показывает качество расчёта вкладов (чем меньше, тем лучше)

Fig. 3. Fractions of riverine (Part_riv), waste (Part_ww) and Baikalian waters (Part_bw) in the formation of coastal waters composition in the zone of influence of an Aerator Pond of BPPP by results of calculations with various combinations of chemical elements depending on the degree of their contrast, conservativeness and determination reliability (“1” in the groups is an elements included in a calculation)

P/Φ , C/Φ и C/P – соотношение концентраций (R) элементов в источниках смешения: P – река Б. Осиновка, C – сточные воды (2-РА out), Φ – байкальская вода на фоновой станции (ст. 3к) [* – для отношений <1 взяты обратные величины]. $FC = P/\Phi + C/\Phi + C/P$ – коэффициент контрастности. N – количество элементов в группе. Контраст: ВКт – высококонтрастный ($FC > 50$), ЧВКт – частично высококонтрастный ($FC > 50$, $R < 2$), Кт – контрастный ($FC = 10–50$), ЧКт – частично контрастный ($FC = 10–50$, $R < 2$), СКт – средне контрастный ($FC = 5–10$), НКт – низко контрастный ($FC < 5$). Консервативность: ТК – типично консервативный, К – консервативный, УК – условно консервативный, НК – неконсервативный, (о/в) – Red/Ox зависимый, (б) – биогенный, (д) – может быть диагенетического происхождения из осадков, (взв) – частично мигрирующий в составе тонкодисперсной взвеси. Надёжность определения: НО – надёжно определяется во всех объектах, ОНизК – очень низкие концентрации ($<0,01 \mu\text{g}/\text{dm}^3$, для Sb $< 0,05 \mu\text{g}/\text{dm}^3$): Пр – в прибрежной воде, Р – в реке, С – в сточных водах, Φ – в байкальской воде на фоновой станции. ** – все надёжно определяемые элементы за исключением неконсервативных элементов, низко контрастных элементов и элементов, не удовлетворяющих граничным условиям (см. текст). $\Delta, \%$ – стандартное отклонение расчёта вкладов (чем меньше, тем лучше)

В отличие от сурьмы, барий надёжно определяется во всех объектах и, по нашим многочисленным данным, в большинстве случаев является хорошим маркером подземных вод. Концентрация Ba в интерстициальной воде максимальная, и она почти в 2 раза больше, чем в сточных водах и прибрежной воде (табл. 2). Поскольку в прибрежной воде концентрация Ba наибольшая среди предполагаемых источников смешения (река, сточные воды, байкальская вода на фоновой станции), это означает, что Ba маркирует поступление грунтовых вод, не связанных с проточками от пруда-аэратора. Такие воды могут формироваться, в том числе, и локально при взаимодействии вода – горные породы. Об этом свидетельствуют максимальные концентрации в интерстициальной воде породообразующих элементов Al, Si, Ca, Mg, а также терригенных, мигрирующих в составе тонкодисперсной взвеси (Al, Ti, Y, REE). К сожалению, мы не можем идентифицировать геохимический состав данного источника грунтовых вод и включить его в расчёт. Состав интерстициальных вод для этого непригоден, поскольку сам является результатом сложного смешения. Лишь по отдельным элементам, указанным выше, мы видим, что такой источник имеется. Полагаем, что его вклад в формирование прибрежных вод небольшой по сравнению с тремя основными источниками, но для надёжного расчёта их вкладов указанные выше элементы следует исключить. Ba, Ca и Mg, к тому же, являются самыми низко контрастными ($FC = 4,4\text{--}3,8$, рис. 3), что будет понижать точность расчёта.

Таким образом, из допустимых к расчёту элементов мы исключили биогенные (P, Si), неконсервативные (Mn, Fe), условно консервативные терригенные, которые могут частично мигрировать в составе тонкодисперсной взвеси (Al, Cr, Ti), удовлетворяющие условию наименьших/наибольших концентраций в объекте смешения по сравнению с источниками смешения (Sb, Ba), а также низко контрастные Ca, Mg, концентрация которых максимальна в интерстициальной воде. Из расчёта также исключены элементы с очень низкими концентрациями в источниках и или объектах смешения (Ga и Ge $< 0,01$ мкг/дм³).

Расчёт долей предполагаемых источников в формирование состава прибрежной воды в зоне влияния пруда-аэратора осуществлялся по пяти группам элементов (см. рис. 3). В первой группе {TK & ВКт, Кт & НО} использовались два типично консервативных элемента (Na, Cl), которые надёжно определяются во всех объектах и являются высококонтрастными или контрастными. При любых исходных комбинациях переменных (долей $Part_{riv}$, $Part_{ww}$, $Part_{bw}$ при условиях (6) и (7)) «Поиск решения» приходил к единственному результату соотношения

долей $Part_{riv} = 36\%$, $Part_{ww} = 3,5\%$, $Part_{bw} = 61\%$ с глобальным минимумом $\Delta = 0\%$.

Во второй группе {ВКт, Кт & НО} использовались все высококонтрастные, контрастные и надёжно определяемые элементы (Cl, B, U, Na и Li). При любых исходных комбинациях переменных «Поиск решения» приходил к единственному результату соотношения долей $Part_{riv} = 46\%$, $Part_{ww} = 3,8\%$, $Part_{bw} = 50\%$ с глобальным минимумом $\Delta = 4\%$.

В третьей группе {ВКт & Кт} использовались все высококонтрастные и контрастные элементы (Cl, B, U, Na, Li, I и Ni – 7 элементов). При любых исходных комбинациях переменных «Поиск решения» приходил к единственному результату соотношения долей $Part_{riv} = 41\%$, $Part_{ww} = 3,7\%$, $Part_{bw} = 55\%$ с глобальным минимумом $\Delta = 8\%$.

В четвёртой группе (Все НО**) использовались все надёжно определяемые элементы (Cl, B, U, Na, Li, Rb, K, V, Mo и Sr – 10 элементов) за исключением Ca и Mg. При любых исходных комбинациях переменных «Поиск решения» приходил к единственному результату соотношения долей $Part_{riv} = 39\%$, $Part_{ww} = 3,0\%$, $Part_{bw} = 58\%$ с глобальным минимумом $\Delta = 11\%$.

В пятой группе использовались все допустимые элементы (Cl, B, U, Na, Li, Rb, As, K, W, I, Ni, Br, Co, V, Mo, S, Sr, ОМ – 18 компонентов). При любых исходных комбинациях переменных «Поиск решения» приходил к единственному результату соотношения долей $Part_{riv} = 42\%$, $Part_{ww} = 3,3\%$, $Part_{bw} = 54\%$ с глобальным минимумом $\Delta = 16\%$.

Таким образом, расчёты по всем пяти группам элементов дают близкие результаты и свидетельствуют о том, что основными источниками формирования прибрежных вод Байкала в зоне влияния пруда-аэратора БЦБК являются байкальская вода (50–61%, в среднем $56 \pm 4\%$) и р. Б. Осиновка (36–46%, в среднем $41 \pm 4\%$), доля сточных вод КОС г. Байкальска составляет 3,0–3,8%, в среднем $3,4 \pm 0,3\%$.

Используя данный подход, были рассчитаны доли речных, байкальских и сточных вод в поверхностных водах лitorали Байкала в секторе ~ 145 м от уреза (над подводными трубами сброса стоков из пруда-аэратора) и в ~ 45 м далее (сектор ~ 190 м от уреза) (табл. 3). По осреднённым данным, полученным в расчётах по пяти группам элементов, доля байкальской воды составляет $\sim 98\%$ на всех станциях, доля речной воды варьирует в интервале 1,7–2,1%. Доля сточных вод в секторе ~ 145 м от уреза составляет 0,13–0,14%, в секторе ~ 190 м от уреза она меняется от минимальных значений 0,034% на ст. 50R до максимальных значений 0,19% на ст. 50L, т.е. субпараллельно берегу в западном направлении, что не совпадает с направлением геострофических течений [Верболов, 1996] и, вероятно, обусловлено локальной циркуляцией под воздействием ветра.

Очевидно, что геохимические вклады (Γ_{XB}) по отдельным компонентам сточных вод могут быть как больше, так и меньше, чем водный вклад сточных вод. Это зависит от степени загрязнённости сточных вод относительно объектов смешения. Геохимический вклад представляет собой долю химического элемента сточных вод от общего содержания данного элемента в объекте смешения и рассчитывается

с учётом возможного неконсервативного поведения элементов на физико-химических и биогеохимических барьерах [Чебыкин и др., 2024]:

$$\Gamma_{XB} = \text{Part}_{ww} \times C_i_{ww} / C_{i_расчет}, \quad (10)$$

где $C_{i_расчет}$ – концентрация элемента i в объекте смешения, рассчитанная по (5) с учётом полученных ранее водных вкладов от основных источников смешения (табл. 3).

Таблица 3

Вклады речных (Part_{riv}), байкальских (Part_{bw}) и сточных (Part_{ww}) вод в прибрежные и поверхностные воды лitorали Байкала в зоне влияния пруда-аэратора и субаквального сброса сточных вод КОС г. Байкальска

Table 3

Fractions of riverine (Part_{riv}), Baikalian (Part_{bw}) and waste waters (Part_{ww}) in coastal and surface waters of Lake Baikal littoral in the zone of influence of the Aerator Pond and subaqual discharge of waste waters from Baikalsk town WFT

Группа*	Параметры и результаты расчёта	2-1 CW	2-T	2-50 T L	2-50 T R	2-50	2-50 L	2-50 R
		Прибрежная	Сектор ~ 145 м от уреза (над трубой сброса)			Сектор ~ 190 м от уреза		
{TK & BKт, Kт & HO}: Cl, Na	N	2	2	2	2	2	2	2
	Part_{riv} {1}, %	36	5,9	5,9	5,9	5,9	6,4	5,0
	Part_{ww} {1}, %	3,5	0,27	0,27	0,27	0,27	0,34	0,13
	Part_{bw} {1}, %	61	94	94	94	94	93	95
	Δ , %	0	0	0	0	0	0	0
{BKт, Kт & HO}: Cl, B, U, Na, Li	N	5	5	5	5	5	5	5
	Part_{riv} {2}, %	46	1,4	2,5	1,4	0,7	1,6	1,2
	Part_{ww} {2}, %	3,8	0,12	0,14	0,12	0,07	0,17	0,004
	Part_{bw} {2}, %	50	98	97	98	99	98	99
	Δ , %	4	1	2	1	2	2	1
{BKт & Kт}: Cl, B, U, Na, Li, I, Ni	N	7	7	7	7	7	7	7
	Part_{riv} {3}, %	41	0	0	0	0	0	0
	Part_{ww} {3}, %	3,7	0,08	0,07	0,09	0,04	0,12	0
	Part_{bw} {3}, %	55	100	100	100	100	100	100
	Δ , %	8	2	5	4	3	4	6
{Bce HO**}: Cl, B, U, Na, Li, Rb, K, V, Mo, Sr	N	10	10	10	10	10	10	10
	Part_{riv} {4}, %	39	2,1	2,1	1,6	1,0	1,5	2,5
	Part_{ww} {4}, %	3,0	0,14	0,10	0,11	0,07	0,16	0,04
	Part_{bw} {4}, %	58	98	98	98	99	98	97
	Δ , %	11	2	2	3	2	1	2
{Bce***}: Cl, B, U, Na, Li, Rb, As, K, W, I, Ni, Br, Co, V, Mo, S, Sr, OM	N	18	18	18	18	18	18	18
	Part_{riv} {5}, %	42	0,1	0	0	0	0	0
	Part_{ww} {5}, %	3,3	0,08	0,05	0,08	0,05	0,12	0
	Part_{bw} {5}, %	54	100	100	100	100	100	100
	Δ , %	16	3	5	5	5	3	5
Среднее по группам	Part_{riv} (aver), %	41	1,9	2,1	1,8	1,5	1,9	1,7
	Part_{ww} (aver), %	3,4	0,14	0,13	0,14	0,10	0,19	0,034
	Part_{bw} (aver), %	56	98	98	98	98	98	98
Точность оценки, RSD%	Error _{Part_riv} (aver)	9	126	115	137	165	139	120
	Error _{Part_ww} (aver)	9	58	69	58	95	49	164
	Error _{Part_bw} (aver)	7	3	3	3	3	3	2

Примечание.* – формирование групп элементов описано в тексте и показано на рис. 3; N – количество элементов в группе; Δ , % – среднеквадратичное отклонение расчётных и измеренных концентраций элементов в объекте смешения, показывает качество расчёта вкладов источников смешения Part_{riv} , Part_{ww} Part_{bw} (чем меньше, тем лучше); ** – все надёжно определяемые элементы за исключением неконсервативных элементов, низко контрастных элементов и элементов, не удовлетворяющих граничным условиям (см. текст); *** – все допустимые элементы.

Note.* – the formation of elements groups is described in the text and is shown in the Fig. 3; N is elements number in a group; Δ , % is standard deviation of calculated and measured elements concentrations in a mixing object, it shows the quality of calculation of fraction of mixing sources Part_{riv} , Part_{ww} Part_{bw} (the less, the better); ** – all reliably determinable elements except non-conservative ones, low contrast ones and ones not meeting boundary conditions (see text); *** – all allowable elements

Геохимические вклады сточных вод г. Байкальска в состав прибрежных и поверхностных вод литорали Байкала в зоне влияния пруда-аэратора, рассчитанные по (10), представлены на рис. 4 в виде тепловой карты и ранжированы по убыванию вкладов элементов в секторе ~ 145 м от уреза.

Из полученных данных следует, что максимальное влияние сточных вод в прибрежной зоне проявляется по Mn, Cl, Ga и Ge (69–51 %), рангом ниже следуют В (45 %) и P (39 %), затем Rb (24 %), Na (22 %) и K (24 %), после Cs, Fe, Li, Ni, Cr, V, Co и Sb (18–10 %). Вклады по остальным элементам составляют менее 10 %.

В поверхностной воде в секторе ~ 145 м от уреза (над оголовками подводных труб сброса из пруда-аэратора) наибольшее влияние сточных вод обнаруживается по Mn (17–18 %) и Ga (10–11 %), в меньшей степени по Ge и Cl (3,9–4,6 %), В (2,1–2,3 %), P, Rb, Cs (1–1,7 %). Это почти тот же топовый набор элементов, что и для прибрежных вод. Вклады по остальным элементам составляют менее 1 %.

Поверхностная вода в секторе ~ 190 м от уреза по распределению геохимических вкладов сточных вод близка к сектору ~ 145 м от уреза, за исключением того, что восточная станция (ст. 50R) имеет более низкие, а западная станция (ст. 50L) более высокие значения вкладов, которые различаются между собой примерно в 5 раз, отражая соответствующее соотношение между водными вкладами сточных вод.

На рис. 4 также показаны суммарные геохимические вклады сточных вод г. Байкальска по всем информативным элементам (СГХВ) (31 элемент) и элементам, нормируемым Приказом № 83 Минприроды [Приказ..., 2020] (СГХВ Пр. № 83). Из числа 17 нормативных элементов (см. выше) были исключены малоинформационные элементы (Fe, Zn, Cd, Pb) и элементы, сложности определения которых связаны с контаминацией прибора (Cu) или с недостаточно низкими пределами обнаружения (Hg).

СГХВ в прибрежной воде Байкала напротив пруда-аэратора составляет 561 %, что на порядок больше, чем в поверхностной воде над оголовками подводных труб сброса (50–55 %) и в секторе 190 м от уреза (14–71 %). Основной вклад в первые ~ 80% СГХВ вносят: в прибрежной воде – Mn (12 %), Cl (11 %), Ga (9 %), Ge (9 %), В (8 %), P (7 %), Rb (4,2 %), Na (3,9 %), K (3,6 %), Cs (3,2 %), Fe (3 %), Li (2,1 %), Ni (2,1 %) и Cr (2 %); в поверхностной воде литорали Байкала в секторах 145 и 190 м от уреза – Mn (33–37 %), Ga (20–21 %), Ge (8–8,5 %), Cl (7,3–7,8 %), В (3,9–4,3 %), P (2,9–3,2 %) и Rb (2,3–2,6 %).

СГХВ Пр. № 83 в прибрежной воде Байкала напротив пруда-аэратора составляет 261 %, что на порядок больше, чем в поверхностной воде над оголовками подводных труб сброса (26–29 %) и в секторе 190 м

от уреза (8–37 %). Основной вклад в первые ~ 80% СГХВ Пр. № 83 вносят: в прибрежной воде – Mn (26 %), Cl (24 %), P (15 %), Na (8,4 %) и K (7,7 %); в поверхностной воде литорали Байкала в секторах 145 и 190 м от уреза – Mn (63–68 %), Cl (14–15 %) и P (5,4–6,2 %).

Заключение

Разработан численный метод расчёта водных вкладов источников на примере литорали оз. Байкал в зоне влияния сточных вод канализационных очистных сооружений г. Байкальска. Метод базируется на использовании широкого спектра химических элементов, измеренных в источниках (сточные, речные и байкальские воды) и объектах смешения (литоральные воды) и является первым этапом разработанного ранее геохимического метода для оценки влияния локальных источников загрязнения на водные объекты.

Расчет водных вкладов источников ведется по некоторым группам контрастных консервативных и условно консервативных химических элементов с помощью итерационных процедур, минимизирующих среднеквадратичное отклонение измеренных концентраций химических элементов в объектах смешения от расчётных.

На втором этапе рассчитываются геохимические вклады от источников загрязнения с учетом возможного неконсервативного поведения химических элементов на физико-химических и биогеохимических барьерах.

Установлено, что водный вклад сточных вод КОС г. Байкальска в прибрежной воде озера в зоне влияния пруда-аэратора БЦБК (накопителя сточных вод) составляет $3,4 \pm 0,3$ %, что указывает на грунтовые протечки (вероятно, из-за нарушения целостности конструкции). Основными источниками формирования прибрежных вод являются байкальская вода (56 ± 4 %) и р. Б. Осиновка (41 ± 4 %), устье которой находится в 180 м восточнее пруда-аэратора. В поверхностных водах литорали Байкала в зоне влияния подводных труб сброса сточных вод в секторах ~ 145 и ~ 190 м от уреза водные вклады сточных вод составляют 0,034–0,19 %, речных вод – 1,7–2,1 %, байкальских вод ~ 98 %.

Из исследованных объектов наибольшему геохимическому влиянию сточных вод КОС г. Байкальска подвержена прибрежная вода Байкала напротив пруда-аэратора – суммарный геохимический вклад сточных вод, рассчитанный как сумма вкладов по 31 информативному химическому элементу, здесь составляет 561 %, что на порядок больше, чем в поверхностной воде над оголовками подводных труб сброса в секторе ~ 145 м от уреза (50–55 %) и в более удалённом секторе ~ 190 м от уреза (14–71 %).

Зона	Прибрежная	Сектор ~ 145 м от уреза (над трубой сброса)			Сектор ~ 190 м от уреза		
		CW	T	50TL	50TR	50	50L
Ошибка ГХВ ± отн. %	11–20	58–68	69–78	58–68	96–103	50–61	164–168
Part_ww (aver), %	3,4	0,14	0,13	0,14	0,10	0,19	0,034
Mn	69	18	17	18	14	23	5,3
Ga	52	11	10	11	8,5	14	3,0
Ge	51	4,6	4,2	4,5	3,4	6,1	1,2
Cl	63	4,2	3,9	4,1	3,1	5,6	1,1
B	45	2,3	2,1	2,3	1,7	3,1	0,57
P	39	1,7	1,6	1,7	1,3	2,3	0,42
Rb	24	1,4	1,3	1,4	1,0	1,8	0,34
Cs	18	1,1	1,00	1,1	0,80	1,5	0,27
Cr	11	0,93	0,85	0,92	0,69	1,3	0,23
Si	7,1	0,91	0,83	0,90	0,68	1,2	0,23
K	20	0,90	0,83	0,89	0,66	1,2	0,22
Fe	17	0,81	0,74	0,80	0,59	1,1	0,20
Na	22	0,77	0,71	0,76	0,56	1,0	0,19
Sb	10	0,71	0,65	0,70	0,53	0,96	0,18
Ti	9,2	0,64	0,59	0,63	0,47	0,86	0,16
Al	8,6	0,59	0,54	0,58	0,43	0,79	0,14
V	11	0,53	0,49	0,52	0,39	0,71	0,13
Co	11	0,41	0,38	0,40	0,30	0,55	0,10
Ni	12	0,40	0,37	0,39	0,29	0,54	0,098
S	8,0	0,36	0,33	0,35	0,26	0,48	0,088
Li	12	0,35	0,32	0,34	0,25	0,47	0,085
OM	6,8	0,26	0,24	0,26	0,19	0,35	0,064
Mg	4,8	0,19	0,18	0,19	0,14	0,26	0,047
W	6,5	0,18	0,16	0,18	0,13	0,24	0,043
Ca	4,8	0,17	0,16	0,17	0,13	0,23	0,042
Br	5,9	0,17	0,16	0,17	0,12	0,23	0,042
Ba	4,7	0,17	0,15	0,17	0,12	0,23	0,041
Sr	4,5	0,14	0,13	0,14	0,10	0,19	0,034
Mo	4,6	0,13	0,12	0,13	0,097	0,18	0,032
As	4,3	0,11	0,10	0,11	0,081	0,15	0,027
I	2,2	0,056	0,052	0,055	0,041	0,075	0,014
U	0,14	0,004	0,003	0,004	0,003	0,005	0,001
СГХВ, %	561	55	50	54	41	71	14
Ошибка СГХВ, ± отн. %	3,7	26	31	26	42	22	73
СГХВ Пр. № 83, %	261	29	26	28	22	37	8
Ошибка СГХВ Пр. № 83, ± отн. %	5,1	40	48	40	66	34	114



Рис. 4. Термальная карта геохимических вкладов (ГХВ, %) сточных вод г. Байкальска в состав прибрежных и поверхностных вод лitorали Байкала в зоне влияния пруда-аэратора в сопоставлении с водными вкладами сточных вод (Part_ww)

СГХВ – суммарные геохимические вклады по всем компонентам, СГХВ Пр. № 83 – суммарные геохимические вклады по элементам, нормируемым Приказом № 83 Минприроды [Приказ..., 2020]. ОМ – общая минерализация

Fig. 4. Heat map of geochemical fractions (ГХВ, %) of Baikalsk town wastewaters in the composition of coastal and surface waters of Lake Baikal littoral in the zone of influence of Aerator Pond compared to water fractions of wastewaters (Part_ww)

СГХВ – summary geochemical contributions by all components, СГХВ Пр. № 83 – summary geochemical contributions by elements according to the Order No 83 of Ministry of Natural Resources [Order..., 2020]. OM – total mineralization

Аналогичные характеристики, рассчитанные по 12 нормативным химическим элементам [Приказ..., 2020], составляют 261, 26–29 и 8–37 % соответственно.

В прибрежной воде Байкала наиболее значимы геохимические вклады сточных вод по Mn, Cl, Ga и Ge (69–51 %), рангом ниже следуют B (45 %) и P (39 %), затем Rb (24 %), Na (22 %) и K (24 %), после Cs, Fe, Li, Ni, Cr, V, Co и Sb (18–10 %). Вклады по остальным элементам составляют менее 10 %. В поверхностной воде озера в зоне влияния подводных трубброса сточных вод в секторах ~ 145 и ~ 190 м от уреза их геохимические вклады наиболее значимы по Mn (5,3–23 %) и Ga (3–14%), в меньшей степени по Ge (1,2–6,1 %), Cl (1,1–5,6 %), B (0,57–3,1 %), P (0,42–2,3 %), Rb (0,34–1,8 %), Cs

(0,27–1,5 %), Cr (0,23–1,3 %), Si, K (0,23–1,2 %), Fe (0,2–1,1 %) и Na (0,19–1 %). Вклады по остальным элементам составляют менее 1 %.

В сточных водах КОС г. Байкальска обнаружено превышение нормативов по Fe (158 ПДК), P (67 ПДК), Cl (37 ПДК), Al (13 ПДК), Cr (7,4 ПДК), K (6 ПДК), Na (5,6 ПДК), Ni (4,8 ПДК), S (3,3 ПДК), Pb (1,6 ПДК), Mn (1,6 ПДК) и Mo (1,3 ПДК), установленных для сточных вод, сбрасываемых непосредственно в оз. Байкал

Предложенный метод может быть рекомендован для оценки степени геохимического влияния локальных источников загрязнения на водные объекты и расширен на любые другие загрязняющие вещества при их совместном определении.

Список источников

- Верболов В.И.** Течения и водообмен в Байкале // Водные ресурсы. 1996. Т. 23, № 4. С. 413–423.
- Грачёв М.А.** Что грозит Байкалу? // В мире науки. 2015. № 1. С. 4–15.
- Итоги Всероссийской переписи населения 2020 года.** Федеральная служба государственной статистики РФ. URL: https://rosstat.gov.ru/vpn_popul (дата обращения: 12.05.2023).
- Мышляева Л.В., Краснощёков В.В.** Аналитическая химия кремния (серия «Аналитическая химия элементов»). М. : Наука, 1972. 212 с.
- Приказ** Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 83 от 21.02.2020 г. Об утверждении нормативов предельно допустимых воздействий на уникальную экологическую систему озера Байкал и перечня вредных веществ, в том числе веществ, относящихся к категориям особо опасных, высокоопасных, опасных и умеренно опасных для уникальной экологической системы озера Байкал. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202004230027> (дата обращения: 08.07.2020).
- Сутурин А.Н.** Экосистема Байкала может быть уничтожена техногенными отходами // Экология и жизнь. 2012. № 2. С. 82–85.
- Сутурин А.Н., Чебыкин Е.П., Мальник В.В., Ханаев И.В., Минаев А.В., Минаев В.В.** Роль антропогенных факторов в развитии экологического стресса в литорали оз. Байкал (акватория пос. Листвянка) // География и природные ресурсы. 2016. № 6. С. 43–54.
- Сутурин А.Н., Гончаров А.И., Дамбинов Ю.А., Куликова Н.Н., Мальник В.В., Дамбина Е.Л., Чебыкин Е.П.** Ремедиация Солзанского полигона промотходов Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25, № 2. С. 41–47.
- Ханаев И.В., Дзюба Е.В., Кравцова Л.С., Грачёв М.А.** Влияние массового развития зеленых нитчатых водорослей на воспроизводство желтогрызки *Cottoscompherus grewingkii* (Dybowski, 1874) (Cottidae) в условиях экологического кризиса озера Байкал // Доклады РАН. 2016. Т. 467, № 1. С. 119–121.
- Чебыкин Е.П., Сороковикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В., Грачёв М.А.** Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20, № 5. С. 613–631.
- Чебыкин Е.П., Дамбинов Ю.А., Сутурин А.Н.** Многоэлементный анализ надшламовых вод карт-накопителей Байкальского целлюлозно-бумажного комбината для выбора стратегии ремедиации территории // Вода и экология: проблемы и решения. 2020. Т. 84, № 4, С. 67–80.
- Чебыкин Е.П., Куликова Н.Н., Лихошвай Е.В., Сутурин А.Н.** Геохимический метод оценки влияния загрязнённых стоков на водные объекты на примере г. Слюдянка, р. Похабиха и Южного Байкала // Геосферные исследования. 2024. № 4. С. 107–136.
- Aries S., Valladon M., Polve M., Dupre B.** A Routine Method for Oxide and Hydroxide Interference Corrections in ICP-MS Chemical Analysis of Environmental and Geological Samples // Geostandards Newsletter. 2000. V. 24, No. 1. P. 19–31.
- Geyh M.A., Schleicher H.** Absolute Age Determination: Physical and Chemical Dating Methods and Their Application. Heidelberg: Springer Berlin, 1990. 503 pp.
- Suturin A.N., Paradina L.F., Erov V.N., Semenov A.R., Lozhkin V.I., Petrov L.L.** Preparation and assessment of a candidate reference sample of Lake Baikal deep water // Spectrochimica Acta Part B. 2003. V. 58. P. 277–288.

References

- Verbolov V.I. *Techeniya i vodoobmen v Baykale* [Currents and Water Exchange in Lake Baikal] // *Vodnye resursy* [Water Resources]. 1996. 23(4). pp. 381–391.
- Grachev M.A. *Что грозит Байкалу?* [What threatens Baikal?] // *V mire nauki* [In the World of Science]. 2015. 1. pp. 4–15. In Russian
- Itogi Vserossiyskoy perepisi naseleniya 2020 goda* [Results of the All - Russian Population Census 2020] [Electronic resource]: Federal State Statistics Service of the Russian Federation. URL: https://rosstat.gov.ru/vpn_popul (Date of accessed: 12.05.2023). In Russian

Myshlyaeva L.V., Krasnoshchekov V.V. *Analiticheskaya khimiya kremniya (seriya "Analiticheskaya khimiya elementov")* [Analytical chemistry of silicon (series "Analytical chemistry of elements")]. Moscow: Publishing house "Nauka". 1972. 212 p. In Russian

Prikaz Ministerstva prirodnnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii № 83 ot 21.02.2020 g. Ob utverzhdenii normativov predel'no dopustimykh vozdeystviy na unikal'nyu ekologicheskuyu sistemу ozera Baykal i perechnya vrednykh veshchestv, v tom chisle veshchestv, otnosyashchikhsya k kategoriyam osobo opasnykh, vysokoopasnykh, opasnykh i umerenno opasnykh dlya unikal'noy ekologicheskoy sistemy ozera Baykal. [Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation No. 83 dated 02.21.2020 On Approval of the Standards of maximum permissible impacts on the Unique Ecological system of Lake Baikal and the List of harmful Substances, including substances belonging to the categories of especially dangerous, highly dangerous, dangerous and moderately dangerous for the unique ecological system of Lake Baikal]. [Electronic resource]: URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202004230027>. (Date of accessed: 08.07.2020). In Russian

Suturin A.N. *Ekosistema Baykala mozhet byt' unichtozhena tekhnogennymi otkhodami* [The Baikal ecosystem can be destroyed by man-made waste] // *Ekologiya i zhizn'* [Ecology and Life]. 2. 2012. pp. 82–85. In Russian

Suturin A.N., Chebykin E.P., Mal'nik V.V., Khanaev I.V., Minaev A.V., Minaev V.V. *Rol' antropogennykh faktorov v razvitiu ekologicheskogo stressa v litorali oz. Baykal (akvatoriya pos. Listvyanka)* [The role of anthropogenic factors in the development of ecological stress in Lake Baikal littoral (the Listvyanka settlement lakescape)]. *Geografiya i prirodnye resursy - Geography and Natural Resources*. 2016. 6. pp. 43–54. In Russian. doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(43-54)

Suturin A.N., Goncharov A.I., Dambinov Yu.A., Kulikova N.N., Mal'nik V.V., Dambinova E.L., Chebykin E.P. *Remediatsiya Solzanskogo poligona promotkhodov Baykal'skogo tsellyulozno-bumazhnogo kombinata (BTsBK)* [Remediation of the Solzan Industrial Waste Landfill at the Baikal Pulp and Paper Mill (BPPM)]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii -Ecology and Industry of Russia*. 2021. 25(2). pp. 41–47. In Russian. doi: 10.18412/1816-0395-2021-2-41-47

Khanaev I.V., Dzyuba E.V., Kravtsova L.S., Grachev M.A. *Vliyanie massovogo razvitiya zelenykh nitchatykh vodorosley na vospriyvostvo zheltokrylki Cottocomephorus grewingkii (Dybowski, 1874) (Cottidae) v usloviyakh ekologicheskogo krizisa ozera Baykal* [The effect of bloom of filamentous green algae on the reproduction of yellowfin sculpin *Cottocomephorus grewingkii* (Dybowski, 1874) (Cottidae) during ecological crisis in Lake Baikal] // *Doklady RAN* [Doklady Biological Sciences]. 2016. 467 (1). pp. 63–641. doi: 10.7868/S0869565216070306

Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Vodneva E.N., Rasskazov S.V., Khodzher T.V., Grachev M.A. *Sovremennoe sostoyanie vod r. Selengi na territorii Rossii po glavnym komponentam i sledovym elementam* [Modern state of water in the Selenga river at the territory of Russia over major components and trace elements] // *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya* [Chemistry for Sustainable Development]. 2012. 20 (5). pp. 613–631. In Russian

Chebykin E.P., Dambinov Yu.A., Suturin A.N. *Mnogoelementnyy analiz nadshlamovykh vod kart-nakopiteley Baykal'skogo tsellyulozno-bumazhnogo kombinata dlya vybora strategii remediatsii territorii* [Multi-elemental analysis of above slime waters in the accumulation cells of Baikalsk Pulp and Paper Plant for the choice of territory remediation strategy] // *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* [Water and ecology]. 2020. 84 (4). pp. 67–80. In Russian. doi: 10.23968/2305-3488.2020.25.4.67-80

Chebykin E.P., Kulikova N.N., Likhoshway Ye.V., Suturin A.N. *Geokhimicheskiy metod otsenki vliyaniya zagryaznennykh stokov na vodnye ob'ekty na primere g. Slyudyanka, r. Pokhabikha i Yuzhnogo Baykala* [Geochemical method of assessment of the impact of polluted drains onto water bodies illustrated by Slyudyanka City, the Pokhabikha River and South Baikal] // *Geosfernye issledovaniya* [Geosphere Research]. 2024. 4. pp. 107–136. In Russian. doi: 10.17223/25421379/33/7

Aries S., Valladon M., Polve M., Dupre B. A Routine Method for Oxide and Hydroxide Interference Corrections in ICP-MS Chemical Analysis of Environmental and Geological Samples. *Geostandards Newsletter*. 2000. 24(1). pp. 19–31. doi: 10.1111/j.1751-908X.2000.tb00583.x

Geyh M.A., Schleicher H. *Absolute Age Determination: Physical and Chemical Dating Methods and Their Application*. Heidelberg: Springer Berlin. 1990. 503 pp.

Suturin A.N., Paradina L.F., Epov V.N., Semenov A.R., Lozhkin V.I., Petrov L.L. Preparation and assessment of a candidate reference sample of Lake Baikal deep water. *Spectrochimica Acta Part B*. 2003. 58. pp. 277–288. doi: 10.1016/S0584-8547(02)00157-X

Информация об авторах:

Чебыкин Е.П., кандидат химических наук, старший научный сотрудник, лаборатория биогеохимии, Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: epcheb@yandex.ru

Куликова Н.Н., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория биогеохимии, Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: kulikova@lin.irk.ru

Лихошвай Е.В., доктор биологических наук, профессор, заведующая Отделом ультраструктуры клетки, Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: likhoshway@mail.ru

Сутурин А.Н., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией биогеохимии, Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: san@lin.irk.ru

Вклад авторов:

Чебыкин Е.П. – отбор и многоэлементный ИСП-МС анализ проб воды; сбор и анализ научных публикаций; разработка геохимического метода для решения поставленных задач; подготовка графического материала и написание манускрипта, итоговые выводы.

Куликова Н. Н. – полевые работы; развитие концепции биогеохимических исследований; написание отдельных частей манускрипта.

Лихошвай Е.В. – научное руководство; постановка задач; организация экспедиции; редактирование манускрипта; итоговые выводы

Сутурин А.Н. – научное руководство; концепция исследований; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Chebykin E.P., Cand. Sci. (Chemistry), Senior Researcher, Laboratory of biogeochemistry, Limnological Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia.

E-mail: epcheb@yandex.ru

Kulikova N.N., Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Laboratory of biogeochemistry, Limnological Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia.

E-mail: kulikova@lin.irk.ru

Likhoshway Ye.V., Dr. Sci. (Biology), Professor, Head of Department of Cell Ultrastructure, Limnological Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia.

E-mail: likhoshway@mail.ru

Suturin A.N., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory of biogeochemistry, Limnological Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia.

E-mail: san@lin.irk.ru

Contribution of the authors:

Chebykin E.P. – sampling and multi-element ICP-MS analysis of water samples; search and analysis of scientific publications; development of a geochemical method for solving the tasks set; preparation of graphic material and writing of the manuscript, final conclusions.

Kulikova N.N. – field work; development of the concept of biogeochemical research; writing individual parts of the manuscript.

Likhoshway Ye.V. – scientific management; problem statement; organization of the expedition; editing the manuscript; final conclusions.

Suturin A.N. – scientific management; research concept; conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.02.2024; одобрена после рецензирования 26.07.2024; принята к публикации 02.06.2025

The article was submitted 05.02.2024; approved after reviewing 26.07.2024; accepted for publication 02.06.2025

Исправление / Corrigendum
doi: 10.17223/25421379/35/14

ИСПРАВЛЕНИЕ В СТАТЬЕ «СТРАТИГРАФИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ АТАКСОФРАГМИИД (ФОРАМИНИФЕРЫ) ДЛЯ МЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ»

Вера Михайловна Подобина

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия. podobina@mail.tsu.ru

Опубликована в: Геосферные исследования. 2025. № 1. С. 20–31. doi: 10.17223/25421379/34/2

ERRATUM TO ARTICLE “STRATIGRAPHIC POTENCIAL OF ATAXOPHRAGMIIDA (FORAMINIFERA) FOR CRETACEOUS SEDIMENTS OF WESTERN SIBERIA”

Vera M. Podobina

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia, podobina@mail.tsu.ru

Published in: *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2025. 1. pp. 20–31. doi: 10.17223/25421379/34/2

Среди атаксофрагмийд впервые выявлены роды-двойники, отличающиеся морфологией раковин и химическим составом стенки. Они приурочены к разным типам фаций, доминировали при расширении трансгрессии и имеют стратиграфическое значение.

Из них род *Pseudoverneuilina* Podobina, 2013 оказался в паре с родом двойником *Verneuilina* Orbigny, 1839. В статье автора «Стратиграфический потенциал атаксофрагмийд (фораминиферы) для меловых отложений Западной Сибири» показано, в чем состоит различие этих родов.

Род *Pseudoverneuilina* широко распространён в апт-альбских комплексах фораминифер северного палеобиогеографического района Западно-Сибирской провинции.

Наглядным видом этого рода является *P. albica* Podobina, опубликованный как и род в 2013 году [Подобина, 2013] и далее упомянутый в ряде работ автора. Вид *P. albica* Podobina характерен для датировки альбского возраста во многих разрезах среднего мела северного района, поэтому хотелось повторно его описать и показать изображение на палеонтологической таблице. Однако слова «gen. nov. и sp. nov.» [стр. 21 (раздел Стратиграфическое значение атаксофрагмийд), стр. 24 (раздел Заключение), стр. 29 (подпись в Палеонтологической таблице V, фиг. 4), стр. 29 (текст), стр. 30] оказались лишними, вместо них должно быть написано «Podobina, 2013». Также в палеонтологическом описании [стр. 30] вместо слова, «Голотип» нужно понимать «Паратип».

В целом в статье показана значимость для стратиграфии этой группы фораминифер.

Редакция журнала и автор благодарят читателей за выявленные в статье ошибки.

Оригинальную статью можно найти по doi: 10.17223/25421379/34/2

Внесение исправлений не повлияло на сделанные автором выводы. Исправление было внесено в онлайн-версию статьи.

These errors do not affect the conclusions of the article. The article has been corrected online.

Список источников

Подобина В.М. Биостратиграфия альба Самотлорской площади Западной Сибири (по данным фораминифер) // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 374. С. 188–198.

References

Podobina V.M. *Biostratigrafiya al'ba Samotlorskoy ploshchadi Zapadnoy Sibiri (po dannym foraminifer)* [Biostratigraphy of the Albian of the Samotlor area of Western Siberia (based on foraminifera)] // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* – Tomsk State University Journal. 2013. No. 374. pp. 188–198. In Russian

Научный журнал

ГЕОСФЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

GEOSPHERE RESEARCH

2025. № 2

Редактор Ю.П. Готфрид
Оригинал-макет А.И. Лелоюр
Редактор-переводчик С.И. Гертнер
Дизайн обложки Л.Д. Кривцовой

Для оформления обложки использована проекция Земного шара
из работы: Stampfli G.M., Borel G.D. / *Earth and Planetary Science Letters* 196 (2002) 17-33.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00588-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00588-X)

Подписано к печати 08.07.2025 г. Формат 60×84^{1/8}.
Гарнитура Times. Печ. л. 15,2; усл. печ. л. 14,1.
Тираж 50 экз. Заказ № 6365. Цена свободная.

Дата выхода в свет 18.08.2025 г.

Журнал отпечатан на полиграфическом оборудовании
Издательства Томского государственного университета
634050, г. Томск, Ленина, 36
Тел. 8(382-2)-52-98-49; 8(382-2)-52-96-75
Сайт: <http://publish.tsu.ru>; E-mail: rio.tsu@mail.ru