

ГЕОСФЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

GEOSPHERE RESEARCH

Научный журнал

2024

№ 4

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
2024

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, 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

Дорошкевич 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

Кузьмин М.И., д-р геол.-минерал. наук, академик РАН, Институт геохимии СО РАН, Иркутск, 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

Реведагто 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

Склярков 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

Худoley 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 Holymoore Consultancy, Честерфилд, Университета Глазго, Великобритания

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

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

Чамберлейн К.Р., профессор, Университет Вайоминг, Ларамии, 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; **Тишин П.А.**, 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: **Izokh A.E.**, Professor, 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

Kuzmin M.I., Member of RAS, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, 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, Holymoore 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 of the Hamburg University, Hamburg, Germany

Richard E. Ernst, Professor of the 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; **Kvasnikova Z.N.**, Cand. Sci. (Geogr.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Krasnova T.S.**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Kuzhevskaya 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

- Афонин И.В., Плюснин А.В., Хитарова А.В.** Состав источников сноса терригенных пород непской и тирской свит верхнего венда юга Непско-Ботуобинской антеклизы Сибирской платформы 6

ПАЛЕОНТОЛОГИЯ, ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ

- Frolov A.O., Mashchuk I.M., Ivantsov S.V.** Paleogeography and climates of Europe, Central Asia and Siberia in the Early Jurassic 22

МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ

- Борозновская Н.Н., Небера Т.С., Хрущева М.О., Зырянова Л.А.** Кристаллохимический аспект природы люминесценции цеолитов 44
- Леснов Ф.П., Ойдул Ч.К., Королюк В.Н., Монгуш А.А.** Минералогия ультрамафитового массива Безымянный (Западно-Тувинская офиолитовая ассоциация) 55

ГЕОМОРФОЛОГИЯ, ГЕОГРАФИЯ

- Буковский М.Е., Кузьмин К.А.** Оценка точности общедоступных цифровых моделей рельефа по абсолютной высоте для равнинных территорий лесостепной зоны 73
- Мартынов А.В.** Минералогический состав как индикатор возраста аллювиальных почв в пойме реки Амур 87

ГЕОЭКОЛОГИЯ, ГИДРОЛОГИЯ

- 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 107
- Харанжевская Ю.А.** Оценка пространственно-временной динамики электропроводности вод осушенного участка Васюганского болота 137

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ

- Китаев Л.М., Титкова Т.Б.** Сезонная изменчивость температуры почвы в условиях региональной неоднородности метеорологического режима Сибири 148
- Мельник М.А., Семенова К.А., Волкова Е.С.** Пространственно-временная характеристика комплекса климатических рисков в сфере растениеводства подзоны южной тайги Западной Сибири 160
- Рыбаков Д.С.** Динамика приземной температуры воздуха, ветрового режима и смертности населения на примере Петрозаводска 177

CONTENTS

REGIONAL GEOLOGY

Afonin I.V., Plusnin A.V., Hitarova A.V. Composition of sources/provenance of terrigenous rocks in the Upper Vendian Nepa and Tira formations in the south of the Nepa-Botuoba anteklise of the Siberian platform	6
--	---

PALEONTOLOGY, PALEOGEOGRAPHY

Frolov A.O., Mashchuk I.M., Ivantsov S.V. Paleogeography and climates of Europe, Central Asia and Siberia in the Early Jurassic	22
--	----

MINERALOGY, GEOCHEMISTRY

Boroznovskaya N.N., T.S. Nebera T.S., Khrushcheva M.O., Zyryanova L.A. Crystallochemical aspect of zeolites luminescence	44
Lesnov F.P., Oydup Ch.K., Korolyuk V.N., Mongush A.A. Mineralogy of the Bezmyannyi ultramafic massif (Western Tuva ophiolite association)	55

GEOMORPHOLOGY, GEOGRAPHY

Bukovskiy M.E., Kuzmin K.A. Assessment of the accuracy of publicly available digital elevation models by absolute height for plain territories of the forest-steppe zone	73
Martynov A.V. Mineralogical composition as an indicator of the age of alluvial soils in the floodplain of the Amur River	87

GEOECOLOGY, HYDROLOGY

Chebykin E.P., Kulikova N.N., Likhoshway Ye.V., Suturin A.N. Geochemical method of assessment of the impact of polluted drains onto water bodies illustrated by Slyudyanka City, the Pokhabikha River and South Baikal	107
Kharanzhevskaya Y.A. Assessment of spatio-temporal variation in water electrical conductivity of drained part of the Great Vasyugan Mire	137

METEOROLOGY, CLIMATOLOGY

Kitaev L.M., Titkova T.B. Seasonal variability of soil temperature in the conditions of regional heterogeneity of meteorological regime of Siberia	148
Mel'nik M.A., Volkova E.S., Semenova K.A. The spatial and temporal characteristics complex of climatic risks in the crop production field in the Western Siberia southern taiga subzone	160
Rybakov D.S. Dynamics of surface air temperature, wind regime and population mortality rate on the example of Petrozavodsk	177

РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 549.086+550.4

doi: 10.17223/25421379/33/1

СОСТАВ ИСТОЧНИКОВ СНОСА ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД НЕПСКОЙ И ТИРСКОЙ СВИТ ВЕРХНЕГО ВЕНДА ЮГА НЕПСКО-БОТУОБИНСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ



Игорь Викторович Афонин¹, Алексей Владимирович Плюснин²,
Александра Васильевна Хитарова³

^{1,3} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

² Лаборатория геологии и стратиграфии осадочных бассейнов Альметьевского государственного технологического университета «Высшая школа нефти», Альметьевск, Татарстан, Россия

¹ heaven05@list.ru

² plusnin@agni-rt.ru

³ aleks.hitarova@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены минералогические и геохимические особенности терригенных пород непской и тирской свит в пределах Непско-Ботубинской антеклизы. Установлено, что на момент формирования пород верхнего венда существовало несколько разноудаленных от области осадконакопления источников сноса. Состав петрофонда был преобладающе кислый с незначительной долей средних и основных пород.

Ключевые слова: непская и тирская свиты, петрофонд, иммерсионный анализ, геохимические индикаторы, Восточная Сибирь

Источник финансирования: исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, госзадание № 0721-2020-0041.

Для цитирования: Афонин И.В., Плюснин А.В., Хитарова А.В. Состав источников сноса терригенных пород непской и тирской свит верхнего венда юга Непско-Ботубинской антеклизы Сибирской платформы // Геосферные исследования. 2024. № 4. С. 6–21. doi: 10.17223/25421379/33/1

Original article

doi: 10.17223/25421379/33/1

COMPOSITION OF PROVENANCE OF TERRIGENOUS ROCKS IN THE UPPER VENDIAN NEPA AND TIRA FORMATIONS IN THE SOUTH OF THE NEPA-BOTUOBA ANTECLISE OF THE SIBERIAN PLATFORM

Igor V. Afonin¹, Alexey V. Plusnin², Alexandra V. Hitarova³

^{1,3} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

² Laboratory of Geology and Stratigraphy of Sedimentary Basins, Almet'yevsk State Technological University "Higher School of Oil", Almet'yevsk, Tatarstan, Russia

¹ heaven05@list.ru

² plusnin@agni-rt.ru

³ aleks.hitarova@mail.ru

Abstract. The paper examines Upper Vendian deposits confined to the south of the Nepa-Botuoba antecline. The Nepa Formation is composed of uneven-grained terrigenous rocks with a transition to siltstones and mudstones, the Tira suite is composed of terrigenous and clayey-sulphate-carbonate rocks. The study of the material composition plays an important role in clarifying the structure and composition of the formations and for paleogeographic reconstructions. The research was based on the results of immersion analysis and inductively coupled plasma mass spectrometry. The main methodological approaches were the analysis of heavy fraction minerals, indicators of the degree of rock alteration and their remoteness from the sedimentation area (Mhd, Mc and Zr/Turm), geochemical ratios (Th/Sc, La/Sc, La/Co, Cr/Zr, Th/Co, Th/Cr, Co/Ni, Th/La) and binary diagrams (Th/Sc-Zr/Sc, Th/Co-La/Sc, Th-Sc-La, Hf-Co-Th), which allows us to draw a conclusion about the composition of the drift source and its position relative to the sedimentation basin.

The composition of the heavy fraction of the deposits of the Nepa Formation is characterized by a wide distribution of zircon, tourmaline and rutile with a subordinate amount of amphiboles and chrome spinels. In combination with wide variations in the values of geochemical coefficients and the position of figurative points on the diagrams, it can be concluded that there are several provenance sources of various compositions. Acid rocks predominate, transitional varieties and basic rocks are insignificant. Analysis of indicators Mhd, Mc and Zr/Turm fix the average level of weathering of the original rocks and different degrees of remoteness from the areas of sedimentation.

In the composition of the heavy fraction of the rocks of the Tira Formation, there is a sharp predominance of tourmaline, and amphibole and zircon are observed in a smaller amount. A significant proportion of tourmaline in sediments may indicate multiple redeposition. The position of points on the discriminant diagrams and variations in geochemical ratios, together with the data of the immersion method, suggest the presence of several drift sources. The composition of the petrofund is presumably characterized by an acidic composition with a significant proportion of the presence of medium rocks. The basic component in the area of erosion is characterized by a small percentage, by analogy with the Nepa time. The nature of the change in the numerical values of the Mhd, Mc, and Zr/Turm indicators fix the low level of weathering of the eroded rocks and the closer position of the erosion area to the sedimentation basin compared to the deposits of the Nepa Formation.

Based on the color of zircons and their crystal morphological features, we can conclude that the presence of pinkish zircons of varying degrees of color intensity is associated exclusively with Archean gneisses and granites. The felsic composition of the provenance source is also fixed by prismatic and long prismatic forms of zircons; bipyramidal forms, as a rule, are characteristic of ultraalkaline rocks.

Keywords: Nepa and Tira suite, provenance area, immersion analysis, geochemical indicators, Eastern Siberia

Source of financing: The research was carried out with the financial support of the Russian Ministry of Science and Higher Education, grant No. 0721-2020-0041.

For citation: Afonin I.V., Plusnin A.V., Hitarova A.V. (2024) Composition of sources/provenance of terrigenous rocks in the Upper Vendian Nepa and Tira formations in the south of the Nepa-Botuoba anticline of the Siberian platform. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 6–21. (In Russian) doi: 10.17223/25421379/33/1

Введение

Исследования вендских терригенных отложений Непско-Ботуобинской антеклизы (НБА) Сибирской платформы представляют особый интерес в связи с их промышленной нефтегазоносностью. Вещественные характеристики этого стратиграфического интервала имеют особую значимость, так как позволяют получить новые данные об их составе и строении, что может быть использовано как при проведении палеогеографических реконструкций, так и геологоразведочных работ.

Объектами исследования в данной работе стали терригенные отложения непской и тирской свит, одноименных горизонтов верхнего венда юга НБА юго-востока Сибирской платформы.

Краткие сведения о геологическом строении

Изученный керновый материал относится к скважинам, расположенным на юге НБА, и принадлежит к одноименному фациальному району и южной части Приленско-Непской внутренней фациальной зоны (рис. 1).

Согласно действующей стратиграфической схеме, изучаемый стратиграфический интервал непского и тирского горизонтов относится к нерасчленённой толще венда [Решения четвертого..., 1989]. В последнее время в изучаемом регионе активно проводятся биостратиграфические исследования. В работах [Голубкова, Кузнецов, 2014; Кочнев и др., 2018] приведена корреляция вендских (эдиакарских) отложений на основе биостратиграфических и изотопно-хе-

мостратиграфических данных. Эти и другие исследования позволили обосновать границы и объем нижнего и верхнего отделов венда [Голубкова и др., 2012; Голубкова, Кочнев, 2020]. Согласно предложенной схеме непский горизонт отнесен к верхнему отделу венда.

В регионе были выделены следующие свиты: непская (непский горизонт), тирская (тирский горизонт) и перекрывающая их катангская свита нижнего подгоризонта даниловского горизонта [Решения четвертого..., 1989]. Непская свита подразделяется на две подсвиты, каждая из которых снизу вверх представлена переходом от грубозернистых терригенных пород к мелкозернистым и до алевролитов и аргиллитов. Мощность свиты до 150 м. Тирская свита подразделяется на две подсвиты, каждая из которых снизу вверх представлена переходом от терригенных к глинисто-сульфатно-карбонатным смешанным породам.

Мощность свиты до 70 м [Стратиграфия нефтегазоносных..., 2005; Шемин, 2007; Мельников, 2018]. Подробное описание свит рассматриваемого района приводится в работе [Плюснин, Гёкче, 2020].

Материалы и методы

Основой для работы послужили пробы песчаников и гравелитов, отобранных из кернового материала с территории Средне-непского, Кийского, Ярактинского, Аянского, Большетирского, Верхнетирского и Марковского лицензионных участков, расположенных на юге Непско-Ботуобинской антеклизы.

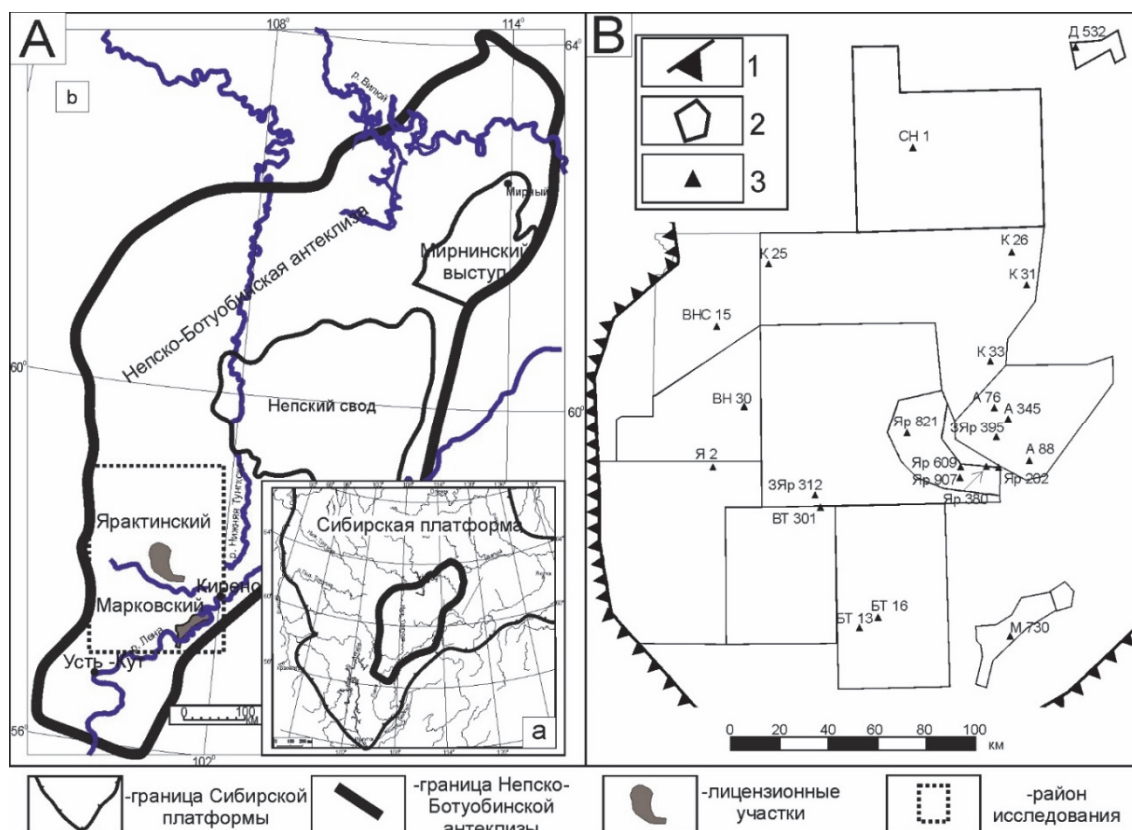


Рис. 1. Район исследований (а) и местоположение лицензионных участков (б) на фрагменте тектонической схемы Непско-Ботубобинской антеклизы Сибирской платформы по [Тектоническая карта..., 2005] с изменениями авторов (А). Карта фактического материала (В)

1 – границы НБА; 2 – границы ЛУ; 3 – скважины. Площади: Д – Даниловская; СН – Средненепская; К – Кийская; ВНС – Верхненепская Северная; ВН – Верхненепская; Я – Ялыкская; А – Аянская; Яр – Ярактинская; БТ – Верхнетирская; БТ – Большетирская; М – Марсковская; ЗЯр – Западно-Ярактинская

Fig. 1. Study area (a) and location of license areas (b) on a fragment of the tectonic scheme of the Nepa-Botuoba antecline of the Siberian platform after [Tectonic map..., 2005] with authors' additions (A). Map of actual materials (B)

1 – borders of the NBA; 2 – boundaries of the license areas; 3 – wells. Areas: Д – Danilovskaya; СН – Srednepenskaya; К – Kiyskaya; ВНС – Verkhnepskaya North; ВН – Verkhnepskaya; Я – Yalykskaya; А – Ayanskaya; Яр – Yarakinskaya; БТ – Verkhnetirskaya; БТ – Bolshetirskaya; М – Marskovskaya; ЗЯр – Zapadno-Yarakinskaya

Полуколичественный иммерсионный минералогический анализ тяжелой фракции терригенных пород по методике МР НСОММИ № 158, включая процедуры пробоподготовки и разделение на тяжелую и легкую фракции с применением центрифуги, описание типоморфных характеристик акцессорных минералов проводились в лаборатории Томского регионального центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета. Подготовка фракций для иммерсионных исследований производилась с использованием магнита РЧМ, валкового сепаратора ЭВС 10/5 и тяжелой жидкости ГПС-В на основе гетерополисоединений вольфрама. Качественные и коли-

чественные характеристики определялись при помощи стереомикроскопа Leica EZ4 (Leica Microsystems AG, Германия) и набора иммерсионных жидкостей (аналитик А.О. Корнева).

Иммерсионный метод минералогического анализа позволяет диагностировать минеральные фазы с подсчетом присутствующего в пробе количества зерен каждого минерального вида, оценивать их процентное соотношение и далее вести количественный подсчет содержания в пробе выделенных минеральных фаз [Лапина, Савинова, 1971; Лапина, 1977; Лисицын, 1986].

Данный анализ необходимо проводить на препаратах, состоящих из минеральных зёрен одного класса крупности. В основу данной методики поло-

жено изучение класса крупности 0,05–0,10 мм. Содержание тяжелой фракции в этом классе крупности достигает 2–3 % [Рухин, 1953; Захарова, 1974]. Данный класс крупности содержит минимальное количество сrostков зерен. В рыхлых терригенных отложениях этот класс крупности содержит, как правило, более полный по сравнению с другими классами набор минералов, сохранивших типоморфные признаки [Копченова, 1979; Родыгина, 2007]. Диагностика минералов проводится на основании определения оптических констант и сопоставления их со справочными материалами [Винчелл, Винчелл, 1953; Ларсен, Берман, 1965; Флейшер и др., 1987; Родыгина, 2007]. Для оценки зрелости осадка и удаленности от источника сноса были рассчитаны следующие показатели: гидроаэродинамическая зрелость (Mhd), зрелость обломочного вещества (Mc), гидроаэродинамическая устойчивость (Zr/Turm) [Бергер, 1986]. Состав источника сноса определялся на основании выделенных терригенно-минералогических комплексов (ТМК).

Расчет показателей производится после приведения к 100 % тяжелой немагнитной и тяжелой электромагнитной фракций по исключительно терригенным минералам. Интерпретация значений данных коэффициентов осуществлялась по таблицам М.Г. Бергера [Бергер, 1986].

Снимки минералов выполнены на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LMU, совмещенном с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром модели INCA Energy 350 (Oxford Instruments Analytical, Великобритания), аналитик А.О. Корнева.

Помимо минералогического анализа для реконструкции состава источника сноса также были использованы данные микроэлементного состава (110 образцов). Как правило, для сравнения с эталонными объектами и стандартами и последующей интерпретации используются не содержания элементов, а их отношения. Наиболее показательными являются Th/Sc, La/Sc, La/Co, Cr/Zr, Th/Co, Th/Cr, Co/Ni, Th/La, [Condie, 1993; Rollinson, 1994; Интерпретация..., 2001; Heinrich, Turekian, 2004]. Среди дискриминационных диаграмм широкое распространение получили Th/Sc-Zr/Sc, Th/Co-La/Sc, Th-Sc-La, Hf-Co-Th [Тейлор, МакЛеннан, 1988; McLennan, 1989; McLennan, Hemming, 1992; Jahn, Condie, 1995; Cullers, 2002].

Определение примесных и микропримесных элементов (с содержанием менее 5 %) проводили методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой согласно аттестованной методике СТО ТГУ 048-2012 «Породы горные. Определение элементного состава методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной

плазмой» ФР.1.31.2017.26326 [Хрущева и др., 2019] (аналитики Е.С. Рабцевич, Д.Е. Бабенков). Пределы обнаружения следовых количеств элементов составляют 0,001 г/т. Анализ выполнялся методом ИСП-МС на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500cx (Agilent Technologies Inc., США) с использованием внутреннего стандарта (In Internal standard, Inorganic Ventures, США) и внешнего стандарта СГД-2А (ГСО 8670-2005).

Результаты

Нижненепская подсвета. Отложения нижненепской подсветы были изучены по трём образцам (табл. 1). Литологически исследуемые образцы представлены песчаниками с преобладающе глинистым цементом с локальным развитием карбонатного. Из скважины Ярактинская 202 образец представлен гравелитом с прослоями песчаника и алевролита.

Соотношение легкой и тяжелой фракции варьирует в узких пределах: легкая (96,5–98,8 %), тяжелая (1,2–3,5 %), максимальные значения фиксируются в скважине Ярактинская 907. Состав легкой фракции представлен кварцем (70–80 %), полевыми шпатами (5–12 %), слюдами (до 5 %), обломками пород (3–20 %) и аутигенными карбонатами (до 10 %) в скважине Ярактинская 202. Состав тяжелой фракции в пределах подсветы является однородным и представлен цирконом (13,3–70,3 %), турмалином (26,4–71,4 %) и рутилом (3,3–42,7 %) (рис. 2).

Циркон представлен призматическими и дипирамидальными зернами и их обломками различной степени окатанности (рис. 2, *a, d*). Зерна как однородные, так и с включениями других минералов, чаще всего трещиноватые. Цвет варьирует от прозрачного через чайный до смоляно-черного. Турмалин представлен призматическими зернами либо их обломками различной степени окатанности (рис. 2, *b*). Цвет преимущественно зеленовато-коричневый, темно-коричневый. Рутил – окатанные обломки столбчатой, приплюснутой и короткопризматической формы черного цвета (рис. 2, *c*).

Опираясь на полученные результаты, можно заключить, что большая часть территории характеризуется широким распространением рутил-циркон-турмалинового комплекса. В пределах Ярактинской 907 – циркон-турмалиновый комплекс (рис. 3, *a*).

Верхненепская подсвета. Отложения верхненепской подсветы были изучены по 19 пробам (табл. 1). Литологически исследуемые образцы представлены песчаниками с преобладающе глинистым цементом с локальным развитием карбонатного и сульфатного цемента.

Таблица 1

Результаты полуколичественного иммерсионного анализа

Table 1

Results of semi-quantitative immersion analysis

№ п. п.	Площадь, скважина	ЛЕГКАЯ ФРАКЦИЯ, %						Выход тяжелой фракции, %	ТЯЖЕЛАЯ ФРАКЦИЯ, %										Показатель			
		Кварц	Полевые шпаты	Слюда	Обломки пород	Доломит/кальцит	Сульфаты		Рутил	Ильменит	Циркон	Турмалин	Амфиболы	Пироксены	Лейкоксен	Хромшпиннелид	Гранат	Монацит	Апатит	Zr/ Turm	Mhd	Mc
Нижненепская подсвита																						
1	Большетирская, 16	80,0	12,0	5,0	3,0			1,8	3,3		70,3	26,4								2,67	2,79	70,12
2	Ярактинская, 202	70,0			20,0	10,0		1,2	33,3		13,3	53,3								0,25	0,88	46,67
3	Ярактинская, 907	80,0	5,0	5,0	10,0			3,5			28,6	71,4								0,4	0,4	27,21
Верхненепская подсвита																						
4	Кийская, 31	85,0	4,0	6,0	5,0			3,1	30,9		11,5	44,2		13,4						0,26	0,74	40,04
5	Кийская, 31	82,6	5,3	6,9	5,2			7,6	47,8	11,8	11,6	20,3				0,4	8,1			0,58	3,94	74,6
6	Кийская, 26	85,0	10,0		5,0			2,6	53,9		6,5	34,3				5,3				0,19	1,92	65,7
7	Кийская, 33	72,5	0,5	7,0	20,0			1,2				100										
8	Кийская, 33	82,5		6,5	11,0			0,8	3,9			76,2	19,9								0,04	3,63
9	Кийская, 33	73,5	2,5	8,5	15,5			1,8	43,3		13,6	43,1								0,32	1,32	52,46
10	Аянская, 76	75,0	3,5	7,5	14,0			0,3	53,2		4,3	40,4	2,1							0,11	1,35	53,44
11	Ярактинская, 821	83,5	3,0	7,5	6,0			1,1	11,6		3,4	78,8			6,2					0,04	0,27	19,75
12	Даниловская, 532	62,5	10,0	11,0	16,5			4,9	16,7		57,1	26,2								2,18	2,82	66,5
13	Большетирская, 16	50,0	10,0		40,0			0,7			10,3	69,0			20,7					0,15	0,45	31,03
14	Верхненепская, 30	80,0	5,0	10,0	5,0			0,8	13,6		1,7	78,0			6,8					0,02	0,28	20,03
15	Ярактинская, 609	90,0	2,0	3,0	5,0			13,2	4,1		30,9	64,9								0,48	0,54	34,03
16	Верхнетирская, 301	85,0	5,0		10,0			2,3				100										
17	Ярактинская, 202	75,0		5,0	20,0			2,1	8,2		12,2	36,7	22,4					20,4		0,33	0,26	24,13
18	Аянская, 88	85,0	5,0		10,0			0,2	4,8			95,2									0,05	4,84
19	Кийская, 20	80,0	5,0	5,0	10,0			1,8	42,7		12,7	39,3			5,3					0,32	1,54	57,78
20	Средненепская, 1	77,3	15,1	7,6				1,3	28,0	44,7	2,1	21,0	4,2							0,1	2,97	69,5
21	Аянская, 345	53,1	6,4	6,4	8,4	25,7		0,6	38,3		6,1	41,1	14,4							0,15	0,8	41,8
22	Аянская, 345	45,9	1,1		14,2	4,4	34,4	6,6	37,9		12,3	21,3				4,1		24,4		0,58	3,70	78,73
Нижнетирская подсвита																						
25	Марковская, 730	74,1	14,0	7,7	4,2			0,8	22,7		1,1	19,4	56,8							0,06	0,31	22,12
26	Марковская, 730	71,4	15,3	8,9	4,4			0,2			2,9	57,1	23,3	16,6						0,05	0,03	2,70
27	Марковская, 730	69,0	6,0	15,0	10,0			6,0	9,1		6,7	62,8	21,3							0,11	0,19	13,79
28	Большетирская, 16	97,0	1,0	2,0				0,2	15,0		3,0	65,9			13,2		3,0			0,05	0,52	33,46
29	Ялыкская, 2	70,0			25,0	5,0		5,3	9,1	27,3	27,3	36,4								0,75	1,75	63,64
30	Ярактинская, 609	78,0	7,0		5,0	10,0		1,4	1,9		1,9	9,4	3,3	83,5						0,20	0,04	3,77

Верхнетирская подсвета																		
32	Ярактинская, 821	91,5	2,0	3,5	1,0	2,0		0,3	15,2		9,1	43,0			32,7			
33	Западно-Ярактинская, 312	40,0	40,0			20,0		2,4				100,0						
34	Ярактинская, 380	95,0		5,0				1,2	11,4			88,6					0,13	10,88

Примечание. Mhd = (рутил + гранат + циркон + гр. шпинелидов + сфен)/(турмалин + апатит + гр. эпидота + гр. амфиболов + пироксены); Mc = $(100 \times (\text{циркон} + \text{рутил} + \text{турмалин} + \text{гр. шпинелидов}) / ((\text{циркон} + \text{рутил} + \text{турмалин} + \text{гр. шпинелидов}) + (\text{гр. слюд} + \text{гр. амфиболов} + \text{гр. эпидота} + \text{гр. пироксенов})))$.

Note. Mhd = (rutile + garnet + zircon + spinel gr. + sphene)/(tourmaline + apatite + gr. epidote + gr. of amphiboles + pyroxenes); Mc = $(100 \times (\text{zircon} + \text{rutile} + \text{tourmaline} + \text{spinel gr.}) / ((\text{zircon} + \text{rutile} + \text{tourmaline} + \text{spinel gr.}) + (\text{gr. of specular stones} + \text{gr. of amphiboles} + \text{gr. of epidote} + \text{gr. of pyroxenes})))$.

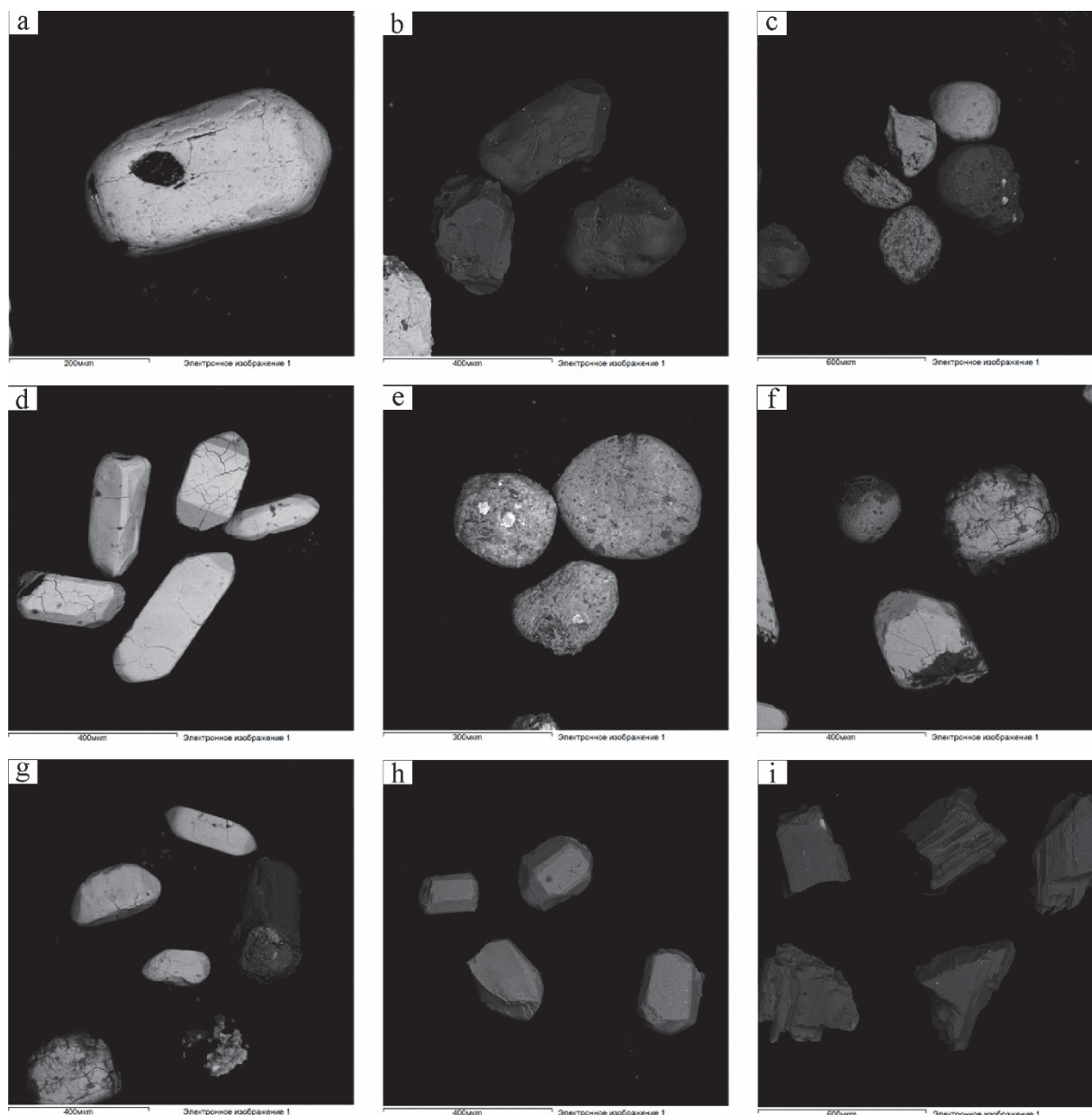


Рис. 2. Минералы тяжелой фракции нижненепской (а–д) и верхненепской (е–и) подсвет

Снимки высокого разрешения, выполненные на растровом электронном микроскопе: а – цирконы с включением монацита, б – турмалин, с – рутил, d – цирконы, е – рутил, f – цирконы с хромшпинелидом (округлое зерно), g – цирконы с турмалином, h – апатит, i – амфиболы

Fig. 2. Heavy fraction minerals from the Lower Nepa (a–d) and Upper Nepa (d–i) subformations

High resolution images captured by SEM: a – zircons with inclusion of monazite, b – tourmaline, c – rutile, d – zircons, e – rutile, f – zircons with chrome spinel (rounded grain), g – zircons with tourmaline, h – apatite, i – amphiboles

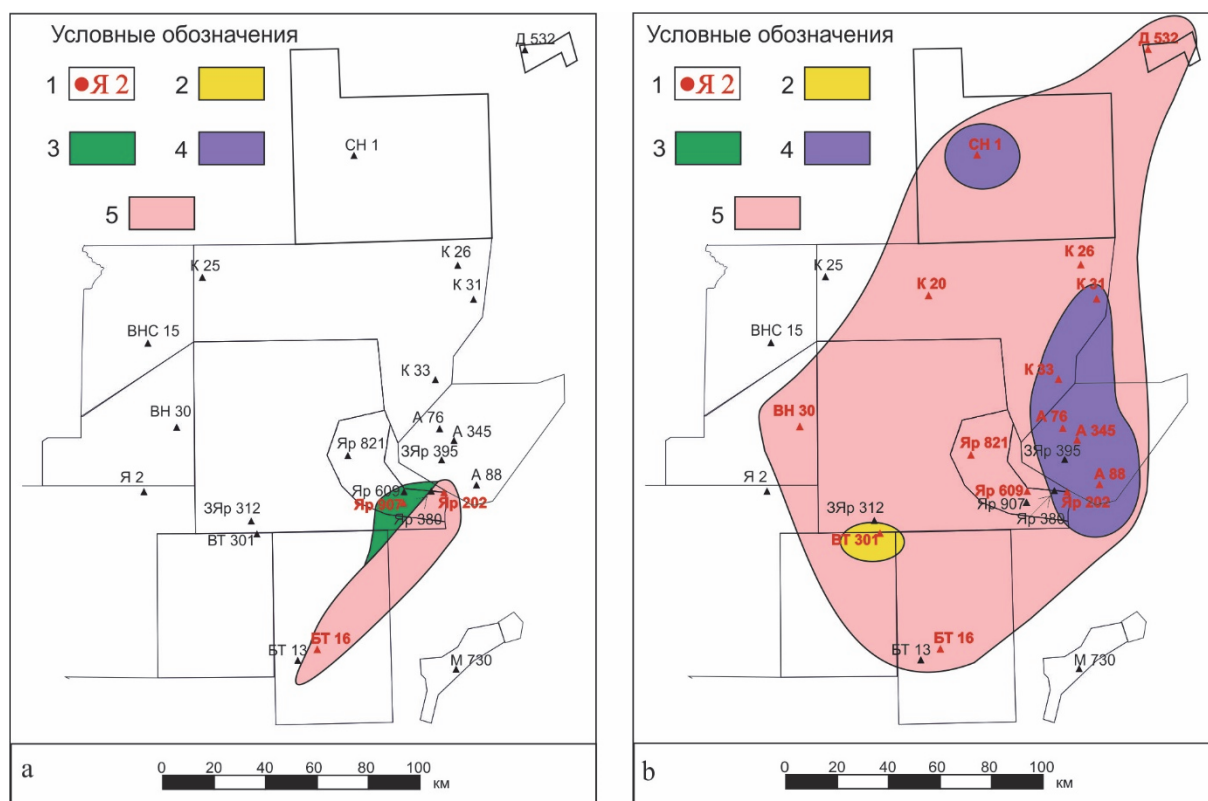


Рис. 3. Терригенно-минералогические комплексы (ТМК) для отложений нижненепской подсвиты (а) и верхненепской подсвиты (б)

1 – площадь, скважина см. рис. 1; 2 – турмалиновый ТМК; 3 – циркон-турмалиновый ТМК; 4 – рутил/циркон-турмалиновый ТМК с амфиболами/пироксенами; 5 – рутил/циркон-турмалиновый ТМК

Fig. 3. Terrigenous-mineralogical association (TMA) for deposits of the Lower Nepa subformation (a) and Upper Nepa subformation (b)

1 – area, well with sampling; 2 – tourmaline TMA; 3 – zircon-tourmaline TMA; 4 – rutile/zircon-tourmaline TMA with amphiboles/pyroxenes; 5 – rutile/zircon-tourmaline TMA

Соотношение легкой и тяжелой фракции варьирует в широких пределах: легкая (86,8–99,8 %), тяжелая (0,2–13,2 %). Наиболее высокие содержания тяжелой фракции отмечаются в образце Ярактинской 609.

Состав легкой фракции представлен кварцем (45,9–90 %), полевыми шпатами (0,5–15,1 %), слюдами (3–11 %), обломками пород (5–40 %), карбонатами (4,4–25,7 %) и сульфатами (34,4 % в скважине Аянская 345).

Основной объем тяжелой фракции составляют рутил (3,9–53,9 %), циркон (1,7–57,1 %) и турмалин (20,3–100 %). Также в образцах отмечаются следующие минералы: ильменит (11,8–44,7 %), амфиболы (2,1–22,4 %), лейкоксен (5,3–20,7 %), хромшпинелиды (0,4–5,3 %), в единичных образцах – пироксены (13,4 %), гранаты (8,1 %), монацит (24,4 %) и апатит (20,4 %).

Циркон представлен призматическими и дипирамидальными зернами с хорошо сохранными гранями и их обломками различной степени окатанности

(рис. 2, , g). Зерна часто неоднородные с включениями других минералов, также отмечаются единичные зерна с выраженной зональностью. Большая часть зерен характеризуется сильной степенью трещиноватости.

Цвет изменяется в широких диапазонах – от прозрачных разностей через пудровые, розовые и коричневатые оттенки к смоляно-черным. Турмалин наблюдается в виде хорошо ограненных призм и их обломков различной степени окатанности (бочонковидные, округлые, овальные). Цвета зерен укладываются в незначительный диапазон от зеленого до черного (рис. 2, g). Рутил встречается в виде хорошо окатанных призм черного цвета с редкой побегалостью (рис. 2, e). Лейкоксен представлен окатанными приплюснутыми агрегатами серо-серебристого цвета. Ильменит наблюдается в виде неоднородных окатанных зерен округлой либо толстотаблитчатой формы с небольшими включениями лейкоксена.

Хромшпинелид – окатанные зерна черного иногда с зеленоватым оттенком цвета (см. рис. 2, *ж*). Амфиболы представлены зеленовато-коричневыми игольчатыми, шестоватыми зернами и их обломками, преимущественно угловатыми, реже окатанными (рис. 2, *и*). В некоторых зернах отмечается хорошо различимая спайность. Пироксен – хорошо окатанные короткопризматические зерна темного (до черного) цвета. Апатит преимущественно встречается в виде окатанных призматических, дипирамидальных, усеченно-дипирамидальных зерен, редко встречаются угловатые обломки. Цвет изменяется от прозрачных до буровато-желтых (рис. 2, *h*). Монацит – коричневатые-желтые хорошо окатанные зерна, трещиноватые.

Опираясь на полученные результаты, были выделены следующие терригенно-минералогические комплексы: турмалиновый (Верхнетирская 301), рутил/циркон-турмалиновый на всей остальной площади (см. рис. 3, *б*). В скважинах Средненепская 1, Кийские 31 и 33, Аянские 76 и 345 и Ярактинская 202 также отмечаются амфиболы и пироксены.

Нижнетирская подсвета. Отложения нижнетирской подсветы были изучены по шести образцам (см. табл. 1). Литологически представлена песчаниками с преобладающе глинистым цементом с локальным развитием карбонатного, сульфатного и кварцевого цемента.

Соотношение легкой и тяжелой фракции варьирует в узких пределах: легкая (94–99,8 %), тяжелая (0,2–6,0 %).

Состав легкой фракции представлен кварцем (69,0–97,0 %), полевыми шпатами (1,0–15,3 %), слюдами (2,0–15,0 %), обломками пород (4,2–25,0 %), карбонатами (5,0–10,0 %). Преобладающий объем тяжелой фракции сложен тремя минералами: цирконом (1,1–27,3 %), рутилом (1,9–22,7 %) и турмалином (6,5–65,9 %). В северо-восточной части рассматриваемой территории (Марковская 730 и Ярактинская 609) наблюдаются амфиболы (3,3–56,8 %) и пироксены (16,6–83,5 %). В единичных образцах были установлены ильменит (27,3 %) и продукты изменения рутила – лейкоксен (13,2 %), монацит (3,0 %) (табл. 1; рис. 4).

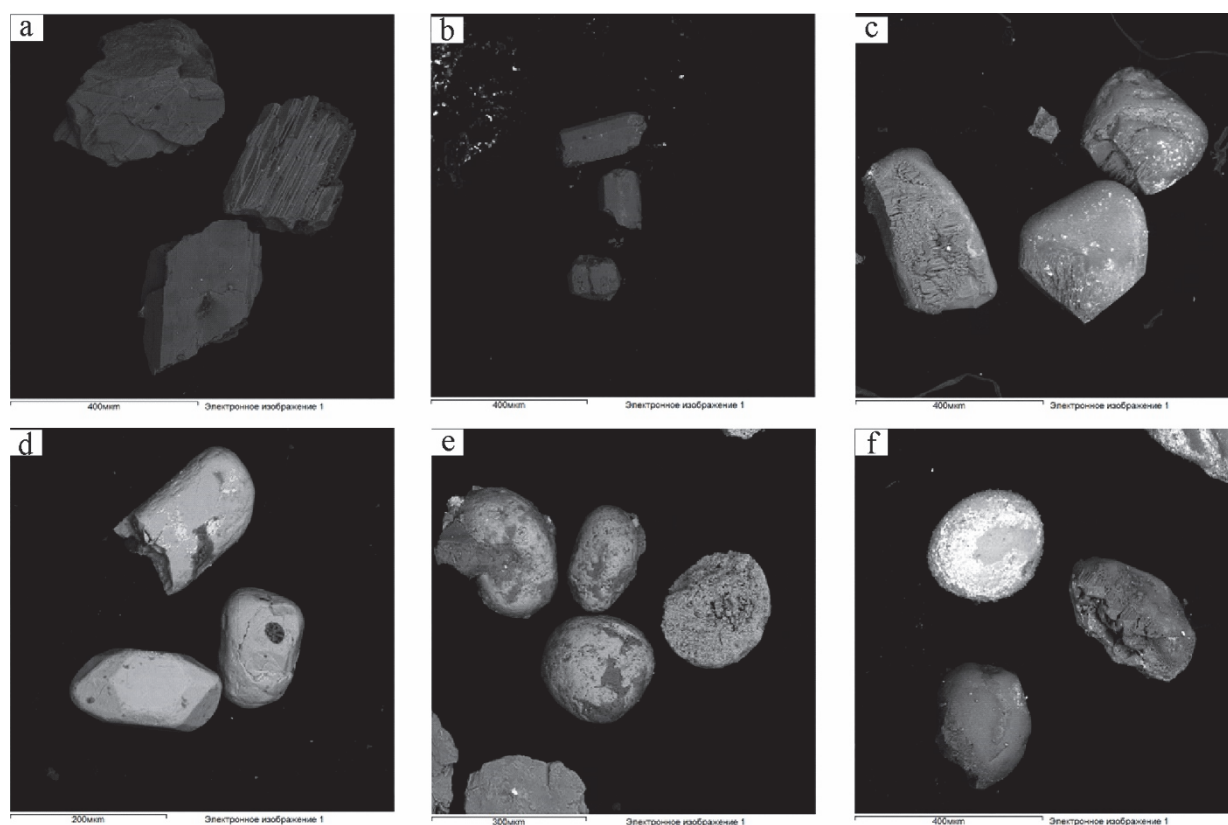


Рис. 4. Минералы тяжелой фракции нижнетирской (а–д) и верхнетирской (е, ф) подсвет

Снимки высокого разрешения, выполненные на растровом электронном микроскопе: а – амфиболы и пироксены, б, с – турмалин, д – цирконы, е – рутил, ф – турмалин и монацит (светлое зерно)

Fig. 4. Heavy fraction minerals from of the Lower Tira (a–d) and Upper Tira (e, f) subformations

High-resolution images captured by SEM: a – amphiboles and pyroxenes, b, c – tourmaline, d – zircons, e – rutile, f – tourmaline and monazite (light grain)

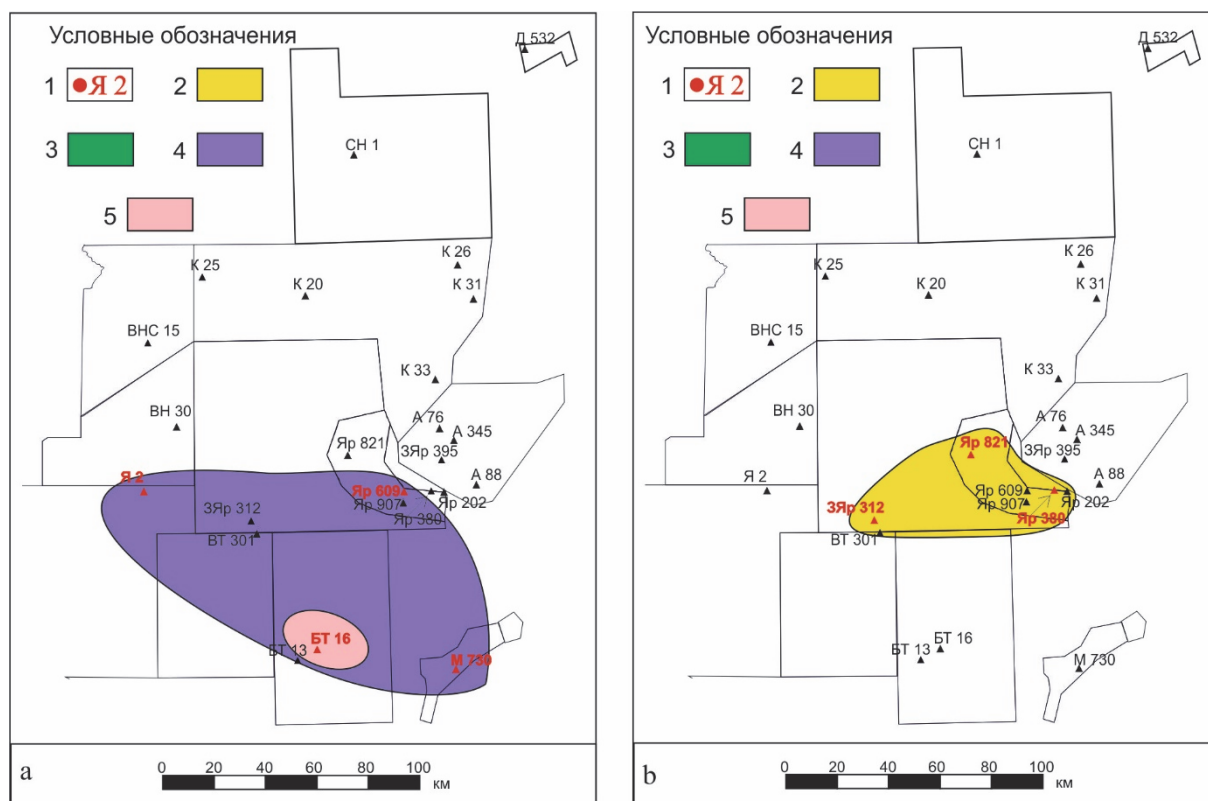


Рис. 5. Терригенно-минералогические комплексы (ТМК) для отложений нижнетирской подсвиты (а) и верхнетирской подсвиты (б)

Условные обозначения см. на рис. 3

Fig. 5. Terrigenous-mineralogical association (TMA) for deposits of the Lower Tira subformation (a) and Upper Subformation (b)

For legend see Fig. 3

Циркон представлен призматическими, дипирамидальными зернами и их обломками (столбчатые, овальные) различной степени окатанности (см. рис. 4, d). Зерна неоднородные с редкими включениями силикатов и фосфатов, отмечаются редкие трещины. Цвет варьирует от прозрачного через розоватые оттенки до насыщенно коричневого («чайного»). Турмалин встречается в виде хорошо ограненных гексагональных призм и их обломков с различной степенью окатанности вплоть до полного исчезновения кристалломорфологических очертаний (столбчатые, бочонковидные зерна). Преобладающий цвет зеленовато-коричневый различной степени насыщенности, реже отмечаются болотно-зеленые и черные оттенки (рис. 4, b, c). Рутил – окатанные и полуокатанные тонко призматические обломки бурового либо черного цветов. Амфиболы представлены зелеными и зеленовато-коричневыми призмами и их обломками, редко с хорошо выраженной спайностью (рис. 4, a). Пироксены – окатанные округлые зерна темного (до черного) цвета (рис. 4, a). Лейкоксен наблюдается в виде окатанных и полуокатанных

непрозрачных приплюснутых агрегатов молочного и молочно-серебристого цвета. Ильменит встречается в виде округлых окатанных зерен с неровной поверхностью, в которых отмечается лейкоксен. Апатит – бурые окатанные дипирамидальные зерна, бесцветные столбчатые зерна, прозрачные бесцветные окатанные столбчатые, бочонковидные зерна. Монацит – коричневатожелтые хорошо окатанные зерна, трещиноватые (рис. 4, f). Хромшпинелид – окатанные зерна черного иногда с зеленоватым оттенком цвета.

Опираясь на полученные результаты, в пределах рассматриваемой территории можно выделить два терригенно-минералогических комплекса: на севере – рутил-циркон-турмалиновый с амфиболами/пироксенами, в южной части – рутил-циркон-турмалиновый (рис. 5, a).

Верхнетирская подсвита. Породы, составляющие верхнетирскую подсвиту, были изучены по трем образцам (см. табл. 1). Образцы представлены песчаниками с преобладающе глинистым цементом и редкой пиритизацией.

Соотношение легкой и тяжелой фракции варьирует в узких пределах: легкая (97,6–99,7 %), тяжелая (0,3–2,4 %).

Состав легкой фракции представлен кварцем (40,0–95,0 %), полевыми шпатами (2,0–40,0 %), слюдами (3,5–5,0 %), обломками пород (до 1 %), карбонатами (2,0–20,0 %). Основной объем тяжелой фракции составляет турмалин (43,0–100 %). Также в образцах отмечается рутил (11,4–15,2 %), лейкоксен (32,7 %) и циркон (9,1 %) (см. рис. 5).

Циркон представлен призматическими, дипирамидальными зернами и их обломками различной степени окатанности. Зерна как однородные, так и с включениями других минералов, не трещиноватые. Цвет зерен изменяется от мутновато-прозрачного до буроватого. Турмалин представлен гексагональными призмами с хорошо выраженными гранями и их обломками с различной степенью окатанности (бочонковидные, столбчатые) (рис. 4, *ж*). Цвет большинства зерен зеленовато-коричневый (болотный), единично отмечаются прозрачные, желтые и голубые оттенки. Рутил наблюдается в виде призматических зерен различной степени окатанности бурого и смоляно-черного цвета (см. рис. 4, *е*). Лейкоксен – окатанные шестироховатые приплюснутые агрегаты молочно-белого цвета.

Исходя из полученных данных, на всей площади можно выделить преобладающий турмалиновый комплекс (рис. 5, *б*).

Обсуждение

Для рассматриваемых отложений непской и тирской свит юга НБА впервые был проведен полуколичественный минералогический анализ. Отмечено преобладание циркона, турмалина и рутила, количество остальных минералов варьирует в небольших объемах по сравнению с ними. Данные минералы подчеркивают преобладание кислых пород в источнике сноса [Tomita, 1954; Poldervoart, 1956; Vitanage, 1957]. Далее рассмотрим основные расчетные показатели по подсвита.

Нижненепская подсвита. Коэффициент гидроаэродинамической зрелости (Mhd) для отложений подсвиты варьирует в пределах 0,4–2,8 (максимум достигается в скважине 16 Большетирской площади). Предполагается относительная близость источника сноса, что отражается в низкой-средней зрелости обломочного материала. В образцах отмечаются минералы с различной степенью окатанности. Показатель химической зрелости (Mc) изменяется от 27,2 до 70,1 (с максимумом в скважине Большетирская 16), соответствуя от низкой до высокой степени зрелости. Для данного показателя отмечается прямая зависимость

от показателя Mhd. Гидравлический коэффициент (Zr/Turm) для рассматриваемого интервала отложений равен 0,3–2,7, что свидетельствует о различной степени удаленности от источника сноса.

Верхненепская подсвита. Для пород верхненепской подсвиты значения Mhd варьируют в широких пределах 0,04–3,94 (наиболее высокие значения отмечаются в образцах скважин Даниловская 532, Средненепская 1, Аянская 345, Кийская 31; минимальные (0) наблюдаются в скважинах Кийская 33 и Верхнетирская 301). В целом остальные скважины характеризуются низкой, реже средней степенью аэрогидродинамической зрелости. Показатель химической зрелости изменяется от 3,63 до 78,73. По площади материал характеризуется низкой степенью химической зрелости. Высокая степень отмечается в тех же скважинах, где фиксируются высокие значения Mhd. Для рассматриваемого интервала отложений Zr/Turm равен 0,02–2,18. Наиболее удаленной от источника сноса является Даниловская 532.

Нижнетирская подсвита. Коэффициент гидроаэродинамической зрелости для пород нижнетирской подсвиты изменяется в широких пределах: от 0,03 до 1,75 (максимум достигается в скважине 2 Ялыкской площади), что соответствует низкой, реже средней степени зрелости. Это подчеркивается наличием минералов с различной степенью окатанности. Показатель химической зрелости изменяется от 2,7 до 63,6 (максимальные значения – Ялыкская 2). В целом исследуемые отложения характеризуются низкой степенью химической зрелости. Гидравлический коэффициент в пределах подсвиты изменяется в широком диапазоне (0,05–0,75). Наиболее удаленной от источника сноса является Ялыкская 2.

Верхнетирская подсвита. Коэффициент гидроаэродинамической зрелости для отложений верхнетирской подсвиты изменяется до 1,32 (Ярактинская 821), отвечая низкой степени зрелости осадка. Показатель химической зрелости изменяется до 55,0 (Ярактинская 821), фиксируя низкую степень химической зрелости. Гидравлический коэффициент для рассматриваемого интервала варьирует от 0 до 0,21. Наиболее удаленной от источника сноса является Ярактинская 821. Учитывая преобладающе турмалиновый состав тяжелой фракции, можно предположить, что данные отложения являются многократно переотложенными [Родыгина, 2007].

Для уточнения состава источника сноса рассматриваемых отложений были проанализированы геохимические данные. Нормированные спектры лантаноидов однообразны (рис. 6) и характеризуются отрицательным наклоном кривых (преобладание легких РЗЭ над тяжелыми) с разной степенью выраженности отрицательной европиевой аномалии, что может свидетельствовать о смешанном составе петрофонда (присутствие как кислых, так и основных пород).

Вариации показателей представлены в табл. 2. Индикатор $(La/Yb)_n$ поступательно возрастает от подошвы к кровле разреза, от 7,82 для нижненепской подсвиты до 10,82 в верхнетирской, что говорит об увеличении доли кислых пород в области палеоводосборов. Это же подчеркивается медианными значениями Eu/Eu^* , которые значительно меньше 0,85 для каждого подраздела.

При этом стоит отметить, что для отложений непской свиты в единичных образцах присутствует значительная положительная европиевая аномалия (до 2,51), что на фоне низких значений $(La/Yb)_n$ и $(Gd/Yb)_n$ предполагает наличие в областях размыва пород основного состава. Это находит свое отражение в результатах минералогического анализа.

В данной работе медианные значения показателей Th/Sc , La/Sc , La/Co , Cr/Zr , Th/Co , Th/Cr , Co/Ni , Th/La сравнивались с аналогичными в магматических породах [Интерпретация..., 2001; Маслов, 2005]. Опираясь на полученные значения (табл. 2), можно заключить, что состав питающей провинции в нижненепское время существенно состоял из средних и кислых пород и их взаимных переходов (Th/Sc , La/Sc , La/Co , Th/Co , Co/Ni , Th/La) с незначительной долей основных пород (Cr/Zr , Th/Cr). Вариации индикаторов изменяются в широких пределах (табл. 2), что, вероятно, обусловлено присутствием нескольких литотипов. Однако четкая тенденция изменения значений к приуроченности к определенному типу пород не прослеживается.

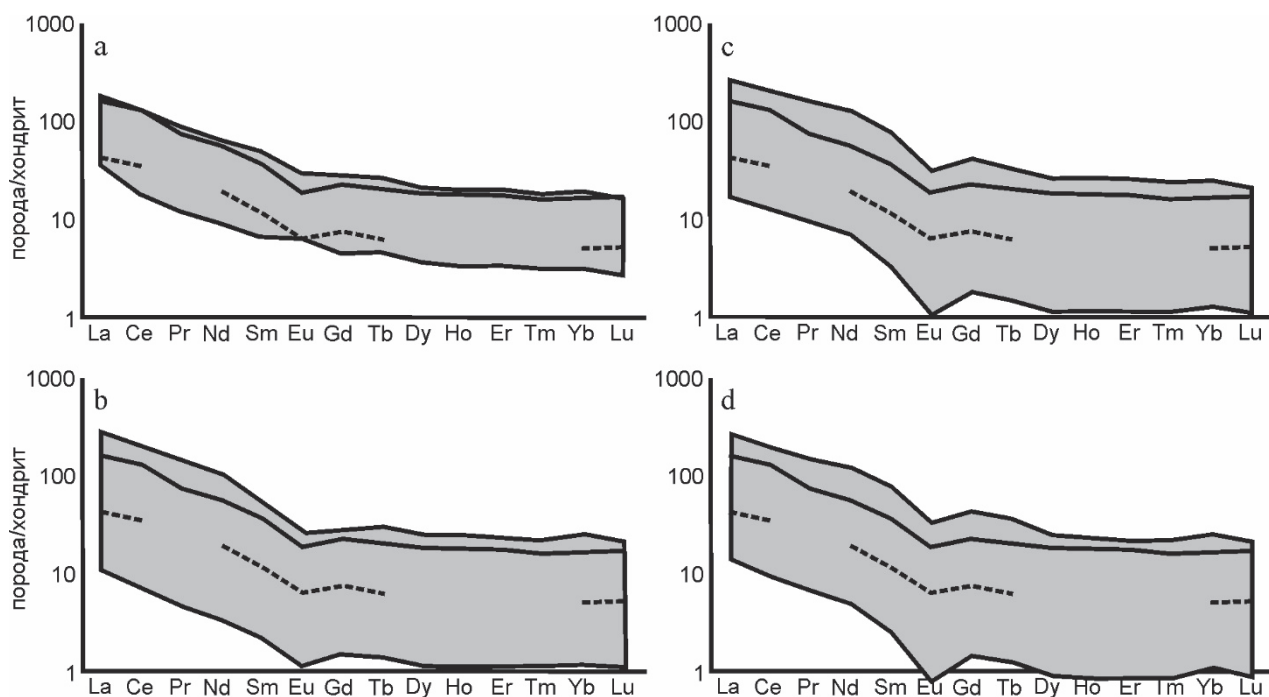


Рис. 6. Нормированные спектры лантаноидов для пород нижненепской (а), верхненепской (б), нижнетирской (с), верхнетирской (д) подсвит

Черная линия – австралийский постархейский сланец (PAAS) [Rollinson, 1994], пунктирная линия – средний протерозойский кратонный песчаник (СПКП) [Condie, 1993]

Fig. 6. Normalized spectra of lanthanides for rocks of the Lower Napa (a), Upper Napa (b), Lower Tira (c), Upper Tira (d) subformation

The black line is the Australian Post-Archaean Shale (PAAS) [Rollinson, 1994], the dotted line is the Middle Proterozoic Craton Sandstone (MPS) [Condie, 1993]

Таблица 2

Вариации индикаторов состава источника сноса в породах юга НБА

Table 2

Variations of indicators of the composition of the source of demolition in the rocks of the south of the NBA

Индикаторы	Нижненепская	Верхненепская	Нижнетирская	Верхнетирская
Th/Sc	<u>0,25–1,50</u> 0,45	<u>0,38–6,11</u> 1,22	<u>0,25–7,09</u> 1,41	<u>0,06–4,34</u> 1,01
La/Sc	<u>1,07–3,56</u> 1,56	<u>0,72–20,14</u> 3,29	<u>1,52–24,88</u> 3,73	<u>0,91–14,31</u> 2,08
La/Co	<u>0,68–3,86</u> 2,12	<u>0,24–9,97</u> 3,0	<u>0,85–8,68</u> 3,28	<u>0,34–10,70</u> 1,32

Индикаторы	Нижненепская	Верхненепская	Нижнетирская	Верхнетирская
Cr/Zr	<u>0,55–1,13</u> 1,04	<u>0,28–3,76</u> 1,07	<u>0,41–5,98</u> 1,17	<u>0,75–13,23</u> 1,21
Th/Co	<u>0,19–1,04</u> 0,62	<u>0,09–5,06</u> 0,91	<u>0,33–2,56</u> 1,06	<u>0,05–2,75</u> 0,71
Th/Cr	<u>0,04–0,22</u> 0,07	<u>0,02–0,27</u> 0,09	<u>0,02–0,27</u> 0,10	<u>0,01–1,09</u> 1,10
Co/Ni	<u>0,25–0,43</u> 0,31	<u>0,03–1,92</u> 0,26	<u>0,05–0,41</u> 0,21	<u>0,10–0,67</u> 0,30
Th/La	<u>0,23–0,42</u> 0,27	<u>0,13–1,10</u> 0,33	<u>0,16–0,63</u> 0,30	<u>0,05–0,74</u> 0,37
(La/Yb)n	<u>6,25–11,38</u> 7,82	<u>2,55–25,34</u> 10,41	<u>4,75–33,06</u> 10,58	<u>5,26–21,68</u> 10,82
(Gd/Yb)n	<u>0,80–2,10</u> 1,36	<u>0,61–3,68</u> 1,33	<u>0,94–3,68</u> 1,50	<u>0,76–3,92</u> 1,34
Eu/Eu*	<u>0,51–1,14</u> 0,69	<u>0,43–2,51</u> 0,58	<u>0,39–0,83</u> 0,58	<u>0,34–0,75</u> 0,62

Примечание. В числителе – минимальное и максимальное значение; в знаменателе – медиана.

Note. In the numerator are the minimum and maximum values, in the denominator is the median.

Значения показателей в отложениях верхненепской свиты характеризуются несколько повышены по сравнению с подстилающими породами от 1,1 до 2 раз. Наиболее значительный рост отмечается для La/Sc и Th/Sc, что подчеркивает увеличение доли кислых и переходных (от средних к кислым) пород в области размыва. Значения Cr/Zr и Th/Cr практически не изменяются, что говорит о постоянстве доли основных пород.

В отложениях нижнетирской свиты наблюдается тренд на общее поступательное повышение референсных значений показателей по сравнению с нижележащими толщами.

Это позволяет предполагать дальнейшее увеличение доли кислых пород либо увеличение степени перемыва осадка и, как следствие, разрушение минералов других типов пород. Индикаторы Cr/Zr и Th/Cr демонстрируют слабый рост, что говорит о присутствии основных пород.

Для пород верхнетирской подсвиты наблюдается уменьшение большей части показателей (Th/Sc, La/Sc, La/Co, Th/Co) до 2,5 раз (см. табл. 2) на фоне незначительного увеличения Cr/Zr, Co/Ni, Th/La и стабильного поведения Th/Cr. Это, вероятно, связано с бóльшим распространением сульфатно-карбонатных пород в данном стратиграфическом интервале и уменьшением объемов поступления терригенного материала из источника сноса. Его состав предположительно остается неизменным – преобладание кислых и средних пород с небольшим присутствием основных пород.

На рис. 7 и 8 представлены диаграммы, которые позволяют реконструировать состав источника сноса.

Фигуративные точки на диаграмме Th/Sc-Zr/Sc (рис. 7, а) сосредоточены в полях риолитов, верхней коры и частично дацитов, что позволяет сделать заключение о преобладающе кислом составе петрофонда с незначительной примесью средних пород. Этот же вывод подтверждается диаграммой Th/Co-La/Sc (рис. 7, б), где рой точек находится в поле кислых пород. Часть выборки располагается между полями кислых и основных пород и, предположительно, может отвечать породам среднего состава.

Тройные диаграммы, представленные на рис. 8, основаны на преобладании определенных элементов в каждом типе магматических пород [Тейлор, МакЛеннан, 1988; McLennan, 1989; McLennan, Hemming, 1992; Jahn, Condie, 1995; Маслов и др., 2020]. Так, приуроченность точек к вершинам Th, Hf и La говорит о преобладании кислых пород в петрофонде, к Co и Sc – основных и ультраосновных пород [Маслов, 2005]. Фигуративные точки основных типов пород на тройных диаграммах (рис. 8) были построены по данным, взятым из публикации [Григорьев, 2009].

На диаграмме Th-Sc-La фигуративные точки сосредоточены исключительно в области кислых пород (рис. 8, а), часть выборки попадает в область между основными породами и гранодиоритами, что, вероятно, может отвечать переходным разностям. Несколько отличные результаты демонстрирует диаграмма Hf-Co-Th (рис. 8, б). Рой фигуративных точек вытягивается вдоль линии Th-Hf, сосредоточиваясь в области между гранодиоритами и основными породами. Незначительный объем попадает в области исключительно кислых и основных/ультраосновных пород.

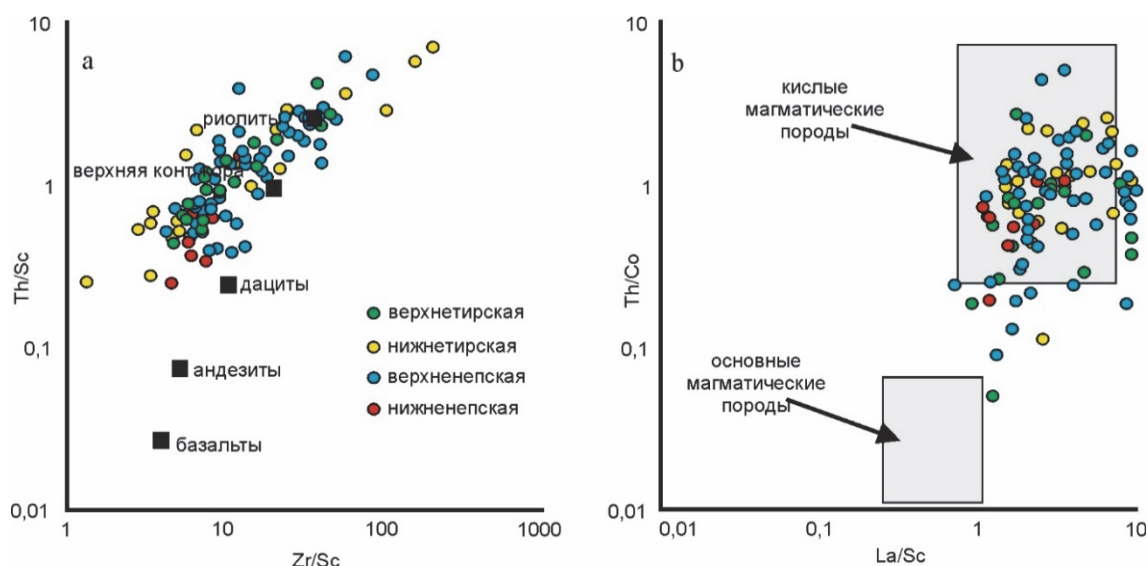


Рис. 7. Дискриминантные диаграммы терригенных и глинистых пород Приленско-Непской фациальной зоны (НБА). а – Th/Sc-Zr/Sc [Cullers, 2002], б – Th/Co-La/Sc [Тейлор, МакЛеннан, 1988]

Fig. 7. Discriminant diagrams of terrigenous and clayey rocks of the Lena-Nepa facies zone (NBA). а – Th/Sc-Zr/Sc [Cullers, 2002], б – Th/Co-La/Sc [Taylor and McLennan, 1988]

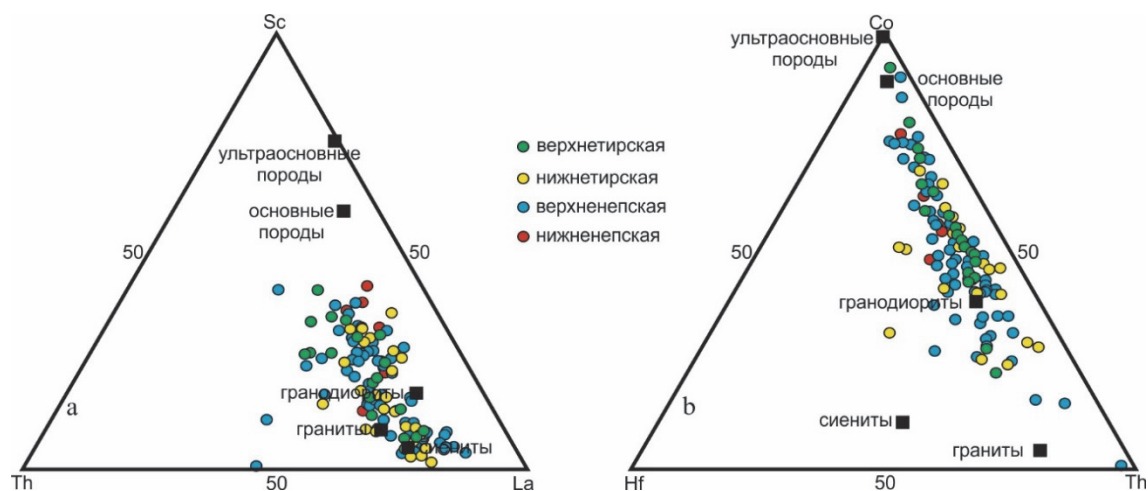


Рис. 8. Тройные диаграммы Th-Sc-La (а), Hf-Co-Th (б) для терригенных и глинистых пород Приленско-Непской фациальной зоны (НБА) [McLennan, Hemming, 1992; Jahn, Condie, 1995]

Fig. 8. Ternary plots Th-Sc-La (a), Hf-Co-Th (b) for terrigenous and clayey rocks of the Lena-Nepa facies zone (NBA) [McLennan, Hemming, 1992; Jahn, Condie, 1995]

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать ряд выводов:

1. Несмотря на высокую степень неоднородности терригенно-минералогических комплексов исследуемых стратиграфических подразделений, наиболее распространенными минералами тяжелой фракции

являются турмалин, циркон и рутил ввиду их высокой степени устойчивости к механическим и химическим воздействиям.

2. Анализ формы зерен минералов, степени их окатанности и видового разнообразия позволяет сделать вывод о существовании в непское и тирское время нескольких источников сноса разного состава и степени удаленности от бассейна осадконакопления.

3. Вариации средних значений показателей Mhd, Mc и Zr/Ti_{tot} в направлении от нижнелепской под- свиты к верхнетирской демонстрируют снижение общей степени выветрелости исходных пород, уменьшение аэрогидродинамической зрелости и приближение областей сноса к областям седиментации.

4. В целом для изученных свит диагностируется преимущественно кислый источник сноса. Присутствие розоватых цирконов различной степени интенсивности окраса связано с исключительно архейскими

гнейсами и гранитами. Кислый состав источника сноса также фиксируется призматическими и длинно призматическими формами цирконов, бипирамидальные формы, как правило, характерны для ультращелочных пород. Амфиболы, пироксены и хромшпинелиды в тяжелой фракции предполагают наличие в составе петрофонда средних и основных пород. Эти выводы подчеркиваются положением фигуративных точек на дискриминантных диаграммах (см. рис. 7, 8) и медианными значениями геохимических показателей.

Список источников

- Бергер М.Г. Терригенная минералогия. М. : Недра, 1986. 227 с.
- Винчелл А., Винчелл Г. Оптическая минералогия. М. : Иностранная литература, 1953. 561 с.
- Голубкова Е.Ю., Кузнецов А.Б. Таксономическое разнообразие и корреляция эдиакарических комплексов акантоморфной палинофлоры мира // Водоросли в эволюции биосферы / отв. ред. С.В. Рожнов. М. : ПИН РАН, 2014. С. 119–140.
- Голубкова Е.Ю., Раевская Е.Г., Ивановская А.В. Закономерности латерального распространения микрофоссилий в вендских нефтегазоносных отложениях Непского свода Непско-Ботуобинской антеклизы Восточной Сибири // Проблемы зарождения и эволюции биосферы. Ч. 2 / под ред. Э.М. Галимова. М. : УРСС, 2012. С. 591–595.
- Голубкова Е.Ю., Кочнев Б.Б. Нитчатые цианобактерии из вендских отложений непского горизонта внутренних районов Сибирской платформы // Палеонтологический журнал. 2020. № 5. С. 102–110.
- Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург : УрО РАН, 2009. 383 с.
- Захарова Е.М. Шлиховые поиски и анализ шликсов. М. : Недра, 1974. 160 с.
- Копченкова Е.В. Минералогический анализ шликсов и рудных концентратов. М. : Недра, 1979. 247 с.
- Интерпретация геохимических данных / под ред. Е.В. Скиярова М. : Интернет Инжиниринг, 2001. 288 с.
- Кочнев Б.Б., Покровский Б.Г., Кузнецов А.Б., Марусин В.В. С- и Sr-хемостратиграфия карбонатных отложений венда нижнего кембрия центральных районов Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 6. С. 731–755.
- Лапина Н.Н., Савинова А.И. Методика комплексного исследования вещественного состава терригенных морских осадков // Геология моря. Л. : НИИГА, 1971. Вып. 1. С. 92–114.
- Лапина Н.Н. Методика изучения вещественного состава донных отложений (на примере Северного Ледовитого океана). Л. : НИИГА, 1977. 56 с.
- Ларсен Е., Берман Г. Определение прозрачных минералов под микроскопом. М. : Недра, 1965. 448 с.
- Лисицын А.П. Вопросы морского геологического картирования (на примере континентальной окраины Африки) // Доклад ЮНЕСКО. 1986. 91 с.
- Маслов А.В. Осадочные породы: методы изучения и интерпретация полученных данных : учеб. пособие. Екатеринбург : УГГУ, 2005. 289 с.
- Маслов А.В., Мельничук О.Ю., Мизенс Г.А., Титов Ю.В., Червяковская М.В. Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 2. Лито- и изотопно-геохимические подходы и методы // Литосфера. 2020. № 20 (1). С. 40–62.
- Мельников Н.В. Венд-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-фацальной зоны Непско-Ботуобинской антеклизы по результатам изучения кернового материала // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2020. № 1. С. 75–89.
- Решения четвертого межведомственного регионального совещания по уточнению и дополнению стратиграфических схем венда и кембрия внутренних районов Сибирской платформы. Новосибирск : СНИИГГиМС, 1989. С. 40.
- Родыгина В.Г. Шлиховые поиски и минералогия россыпей (шлиховой метод). Томск : НТЛ, 2007. 404 с.
- Рухин Л.Б. Основы литологии. М. : Гостоптехиздат, 1953. 671 с.
- Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Рифей и венд Сибирской платформы и ее складчатого обрамления / ред. А.Е. Конторович. Новосибирск : Гео, 2005. 432 с.
- Тейлор С.Р., МакЛеннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М. : Мир, 1988. 384 с.
- Тектоническая карта нефтегазоносных провинций Сибирской платформы. Масштаб 1 : 5000000. Новосибирск : СНИИГГиМС, 2005.
- Флейшер М., Уилкоккс Р., Матцко Дж. Микроскопическое определение прозрачных минералов / пер. с англ. Л. : Недра, 1987. 647 с.
- Хрущева М.О., Тишин П.А., Чернышов А.И. Геохимическая характеристика рассолов и современных эвапоритов урочища Талое Озеро (Республика Хакасия) // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2019. Т. 30. С. 130–140.
- 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.
- Condie K. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales // Chem. Geol. 1993. V. 104. P. 1–37.
- Cullers R.L. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA // Chem. Geol. 2002. V. 191 (4). P. 305–327.

- Heinrich D.H., Turekian K.K. Treatise on Geochemistry. Oxford, UK : Elsevier Pergamon, 2004. 204 p.
- Jahn B.M., Condie K.C. Evolution of the Kaapvaal Craton as viewed from geochemical and Sm-Nd isotopic analyses of intracratonic pelites // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1995. V. 59. P. 2239–2258.
- McLennan S.M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes // *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements. Reviews in Mineralogy*. 1989. V. 21. P. 169–200.
- McLennan S.M., Hemming S. Samarium/neodymium elemental and isotopic systematics in sedimentary rocks // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1992. V. 56. P. 997–898.
- Poldervoort A. Zircon in rocks, 2 Igneous rocks // *Am. Journ. Sci.* 1956. V. 254. P. 521–554.
- Rollinson H.R. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Essex : London Group UK Ltd, 1994. 352 p.
- Tomita T. Geological significance of the color of granite zircon and the discovery of the Pre-Cambrian in Japan, Kyushu Univ. // *Mem. Fac. Sci. Ser. D. Geol.* 1954. V. 4. P. 135–161.
- Vitanage P.W. Studies of zircon types in Ceylon Pre-Cambrian complex // *Journ. Geology*. 1957. V. 65. P. 117–138.

References

- Berger M.G. *Terrigennaya mineralogiya* [Terrigenous mineralogy]. Moscow: Nedra, 1986. 227 p. In Russian
- Vinchell A., Vinchell G. *Opticheskaya mineralogiya* [Optical mineralogy]. Moscow: Inostrannaya literatura, 1953. 561 p. In Russian
- Golubkova E.Ju., Kuznecov A.B. *Taksonomicheskoe raznoobrazie i korreljaciya ediakarskih kompleksov akantomorfnoy palinoflory mira* [Taxonomic Diversity and Correlation of Ediacaran Assemblages of Acanthomorphic Palynoflora of the World] // *Vodorosli v evoljucii biosfery. Otv. red. S.V. Rozhnov. Ser. "Geo-biologicheskie processy v proshlom"* Moscow. PIN RAN. 2014. S. 119–140. In Russian
- Golubkova E.Ju., Raevskaya E.G., Ivanovskaya A.V. *Zakonomernosti lateral'nogo rasprostraneniya mikrofosilij v vendskih neftegazonosnyh otlozheniyah Nepского svoda Nepsko-Botuobinskoy anteklizy Vostochnoy Sibiri* [Patterns of Lateral Distribution of Microfossils in the Vendian Oil and Gas Deposits of the Nepa Dome of the Nepa-Botuoba Antecline of Eastern Siberia] // *Problemy zarozhdeniya i evoljucii biosfery. Ch. 2. Pod. red. Je.M. Galimova. Moscow: URSS, 2012. pp. 591–595. In Russian*
- Golubkova E.Ju., Kochnev B.B. *Nitchatye cianobakterii iz vendskih otlozhenij nepского gorizonta vnutrennih rayonov Sibirskoy platformy* [Filamentous Cyanobacteria from the Vendian Deposits of the Nepa Regional Stage of Interior Areas of the Siberian Platform] // *Paleontologicheskij zhurnal* [Paleontological journal]. 2020. No. 5. pp. 102–110. In Russian
- Grigor'ev N.A. *Raspredelenie himicheskikh jelementov v verhney chasti kontinental'noy kory* [Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2009. 383 p. In Russian
- Zaharova E.M. *Shlihovyje poiski i analiz shlihov* [Schlich searches and analysis of concentrates]. Moscow: Nedra, 1974. 160 p. In Russian
- Kopchenova E.V. *Mineralogicheskij analiz shlihov i rudnyh koncentratov* [Mineralogical analysis of concentrates and ore concentrates]. Moscow: Nedra, 1979. 247 p. In Russian
- Interpretaciya geohimicheskikh dannyh* [Interpretation of geochemical data] / pod red. E.V. Sklyarova. Moscow: Internet Inzhiniring, 2001. 288 p. In Russian
- Kochnev B.B., Pokrovskiy B.G., Kuznecov A.B., Marusin V.V. *C- i Sr-hemostratigrafija karbonatnyh otlozhenij venda-nizhnego kembrija central'nyh rayonov Sibirskoy platformy* [C- and Sr-chemostratigraphy of Vendian-Lower Cambrian carbonate sediments in the central regions of the Siberian Platform] // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2018. V. 59, No. 6. pp. 731–755. In Russian
- Lapina N.N., Savinova A.I. *Metodika kompleksnogo issledovaniya veshhestvennogo sostava terrigennyh morskikh osadkov* [Methodology for a comprehensive study of the material composition of terrigenous marine sediments] // *Geologiya morey* [Geology of the seas]. Leningrad: NIIGA, 1971. Vyp. 1. pp. 92–114. In Russian
- Lapina N.N. *Metodika izucheniya veshhestvennogo sostava donnyh otlozhenij (na primere Severnogo Ledovitogo okeana)* [Methodology for studying the material composition of bottom sediments (on the example of the Arctic Ocean)]. Leningrad: NIIGA, 1977. 56 p. In Russian
- Larsen E., Berman G. *Opredelenie prozrachnyh mineralov pod mikroskopom* [Determination of transparent minerals under a microscope]. Moscow: Nedra, 1965. 448 p. In Russian
- Lisitsyn A.P. *Voprosy morskogo geologicheskogo kartirovaniya (na primere kontinental'noy okrainy Afriki)* [Issues of marine geological mapping (on the example of the continental margin of Africa)] // *Dokl. JuNESKO* [UNESCO reports]. 1986. 91 p. In Russian
- Maslov A.V. *Osadochnye porody: metody izucheniya i interpretaciya poluchennyh dannyh* [Sedimentary rocks: methods of study and interpretation of the obtained data]. *Uchebnoe posobie*. Ekaterinburg: UGGU, 2005. 289 p. In Russian
- Maslov A.V., Mel'nichuk O.Ju., Mizens G.A., Titov Ju.V., Chervyakovskaya M.V. *Rekonstrukciya sostava porod pitayushhih provincij. Statya 2. Lito- i izotopno-geohimicheskie podhody i metody* [Provenance reconstructions. Article 2. Litho- and isotope-geochemical approaches and methods] // *Litosfera*. 2020. 20(1). pp. 40–62 In Russian
- Mel'nikov N.V. *Vend-kembrijskij solenosnyi basseyn Sibirskoy platformy (Stratigrafiya, istoriya razvitiya)* [Vendian-Cambrian saline basin of the Siberian Platform (Stratigraphy, history of development)]. Izd. 2-e, dop. Novosibirsk: SNIIGiMS, 2018. 177 p. In Russian
- Plusnin A.V. Gyokche M.I. *Sostav i stroenie nepского i tirского gorizontov Prilensko-Nepской litologo-facial'noy zony Nepsko-Botuobinskoy anteklizy po rezul'tatam izucheniya kernovogo materiala* [Composition and structure of the Nepa and Tyr horizons of the Prilensko-Nepskaya lithofacies zone of the Nepa-Botuoba antecline according to the results of the study of core material] // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Geologiya i razvedka* [News of higher educational institutions. Geology and exploration]. 2020. No. 1. pp. 75–89. In Russian
- Resheniya chetvertogo mezhvedomstvennogo regional'nogo soveshchaniya po utochneniyu i dopolneniyu stratigraficheskikh shem venda i kembriya vnutrennih rayonov Sibirskoy platformy* [Decisions of the Fourth Interdepartmental Regional Meeting on Refinement and Supplementation of the Vendian and Cambrian Stratigraphic Schemes of the Inner Regions of the Siberian Platform]. Novosibirsk: SNIIGiMS, 1989. p. 40. In Russian

- Rodygina V.G. *Shlihovye poiski i mineralogiya rossypey (shlihovoy metod)* [Placer prospecting and mineralogy of placers (placer method)]. Tomsk: NTL, 2007. 404 p. In Russian
- Ruhin L.B. *Osnovy litologii* [Fundamentals of lithology]. Moscow: Gostoptehizdat, 1953. 671 p. In Russian
- Stratigrafiya neftegazonosnykh basseynov Sibiri. Rifey i vend Sibirskoy platformy i ee skladchatogo obramleniya* [Stratigraphy of oil and gas bearing basins of Siberia. Riphean and Vendian of the Siberian platform and its folded frame] / Red. A.E. Kontorovich. Novosibirsk: Geo, 2005. 432 p. In Russian
- Taylor S.R., McLennan S.M. *Kontinental'naya kora: ee sostav i evolyuciya* [Continental crust: its composition and evolution]. Moscow: Mir, 1988. 384 p. In Russian
- Tektonicheskaya karta neftegazonosnykh provinciy Sibirskoy platformy. Masshtab 1 : 5 000 000* [Tectonic map of the oil and gas provinces of the Siberian Platform. Scale 1 : 5 000 000]. Novosibirsk. SNIIGGIMS. 2005. In Russian
- Fleisher M., Uilkoks R., Matcko Dzh. *Mikroskopicheskoe opredelenie prozrachnykh mineralov* [Microscopic determination of transparent minerals]: Per. s angl. Leningrad: Nedra, 1987. 647 p. In Russian
- Khrushcheva M.O., Tishin P.A., Chernyshov A.I. *Geohimicheskaya harakteristika rassolov i sovremennykh evaporitov urochishha Taloe Ozero (Respublika Hakasiya)* [Geochemical characteristics of brines and modern evaporites of the tract Taloe Ozero (Republic of Khakassia)] // *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle* [News of Irkutsk State University. Earth Sciences Series.]. 2019. V. 30. pp. 130–140. In Russian
- Shemin E.G. *Geologiya i perspektivy neftegazonosnosti venda i nizhnego kembriya central'nykh rayonov Sibirskoy platformy (Nepsko-Botuobinskaya, Baikitskaya anteklizy i Katangskaya sedlovina)* [Geology and prospects of oil and gas potential of the Vendian and Lower Cambrian of the central regions of the Siberian platform (Nepsko-Botuobinskaya, Baikitskaya antecline and Katanga saddle)]. Novosibirsk: SO RAN, 2007. 467 p. In Russian
- Condie K. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales // *Chem. Geol.* 1993. V. 104. pp. 1–37.
- Cullers R.L. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. *Chem. Geol.*, 2002. 191(4). pp. 305–327.
- Heinrich D.H., Turekian K.K. *Treatise on Geochemistry*. Oxford, UK: Elsevier Pergamon, 2004. 204 p.
- Jahn B.M., Condie K.C. Evolution of the Kaapvaal Craton as viewed from geochemical and Sm- Nd isotopic analyses of intracratonic pelites // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1995. V. 59. pp. 2239–2258.
- McLennan S.M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes // *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements*. B.R. Lipin & G.A. McKay (Eds.). Reviews in Mineralogy. 1989. V. 21. pp. 169–200.
- McLennan S.M., Hemming S. Samarium/neodymium elemental and isotopic systematics in sedimentary rocks // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1992. V. 56. pp. 997–998.
- Poldervoort A. Zircon in rocks, 2 Igneous rocks. *Am. Journ. Sci.* 1956. 254. pp. 521–554.
- Rollinson H.R. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Essex: London Group UK Ltd., 1994. 352 p.
- Tomita T. Geological significance of the color of granite zircon and the discovery of the Pre-Cambrian in Japan, Kyushu Univ., Mem. Fac. Sci., Ser. D, Geol. 1954. 4. pp. 135–161.
- Vitanage P.W. Studies of zircon types in Ceylon Pre-Cambrian complex // *Journ. Geology*. 1957. 65. pp. 117–138.

Информация об авторах:

Афонин И.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория структурной петрологии и минерогенеза, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: heaven05@list.ru

Плюснин А.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория геологии и стратиграфии осадочных бассейнов Альметьевского государственного технологического университета «Высшая школа нефти», Альметьевск, Татарстан, Россия.

E-mail: plusnin@agni-rt.ru

Хитарова А.В., инженер-исследователь, центр коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем», геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: aleks.hitárova@mail.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Afonin I.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Laboratory of Structural Petrology and Minerageny, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: heaven05@list.ru

Plusnin A.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Laboratory of Geology and Stratigraphy of Sedimentary Basins, Almet'yevsk State Technological University "Higher School of Oil", Almet'yevsk, Tatarstan, Russia.

E-mail: plusnin@agni-rt.ru

Hitarova A.V., Research Engineer, Center for Collective Use "Analytical Center for Geochemistry of Natural Systems", Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: aleks.hitárova@mail.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.11.2022; одобрена после рецензирования 05.12.2023; принята к публикации 27.11.2024

The article was submitted 17.11.2022; approved after reviewing 05.12.2023; accepted for publication 27.11.2024

ПАЛЕОНТОЛОГИЯ, ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ

Original article

doi: 10.17223/25421379/33/2

PALEO GEOGRAPHY AND CLIMATES OF EUROPE, CENTRAL ASIA AND SIBERIA IN THE EARLY JURASSIC

Andrey O. Frolov¹, Irina M. Mashchuk², Stepan V. Ivantsov³

^{1,2} Institute of the Earth's Crust SB RUS, Irkutsk, Russia

³ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹ frolov88-21@yandex.ru

² samaropsis@yandex.ru

³ stepan_ivantsov@mail.ru



Abstract. The article presents an overview of published lithological, sedimentological, geochemical, paleontological, paleogeographic, paleobiogeographic, paleoclimatic data on the Lower Jurassic deposits of Europe, Central Asia and Siberia. As a result of the analysis and integration of these materials, the paleogeographic sketch maps of the Northern Eurasia land for the Hettangian, Sinemurian, Pliensbachian and Toarcian were refined and detailed, which reflect the main changes in accumulative and denudational landscapes. Sketch maps of climatic zoning for this area have been compiled. In Europe, during the Early Jurassic, the continental settings were gradually replaced by shallow-marine environments. A warm, predominantly humid, subtropical climate prevailed. Siberia in the first half of the Early Jurassic, was characterized by landscapes, where denudation prevailed over accumulation. In the second half of the Early Jurassic, a series of marine transgressions occur in the north of Siberia, while in the south, the area of continental sedimentation reaches its maximum extension. There was a high-latitude moderately warm climate with a pronounced change of polar days and nights. During the Early Jurassic, the temperate and subtropical climatic zones came into contact on the area of Central Asia. The resulting maps can be used in paleobiogeographic research.

Keywords: Hettangian, Sinemurian, Pliensbachian, Toarcian, land paleorelief, climatic zones

Acknowledgments: The authors are grateful to Yu.V. Ryzhov and A.V. Arzhannikova (Institute of the Earth's crust SB RAS) for discussing the issues touched upon in the paper.

Source of financing: The study was performed within the framework of a state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project № FSWM-2024-0006).

For citation: Frolov A.O., Mashchuk I.M., Ivantsov S.V. (2024) Paleogeography and climates of Europe, Central Asia and Siberia in the Early Jurassic. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 22–43. doi: 10.17223/25421379/33/2

Научная статья

УДК 551.86

doi: 10.17223/25421379/33/2

ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ И КЛИМАТЫ ЕВРОПЫ, ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ И СИБИРИ В РАННЕЙ ЮРЕ

Андрей Олегович Фролов¹, Ирина Михайловна Машук¹, Степан Валерьевич Иванцов²

^{1,2} Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ frolov88-21@yandex.ru

² samaropsis@yandex.ru

³ stepan_ivantsov@mail.ru

Аннотация. Приведен обзор комплекса опубликованных литологических, седиментологических, геохимических, палеонтологических, палеогеографических, палеобиогеографических, палеоклиматических данных о нижнеюрских отложениях Европы, Центральной Азии и Сибири. В результате анализа и интеграции этих данных уточнены и детализированы палеогеографические карты-схемы суши Северной Евразии для геттанга, синемюра, плинсбаха и тоара, которые отражают основные этапы перестроек аккумулятивных и денудационных ландшафтов. Составлены карты-схемы климатической зональности для этой территории. В Европе на протяжении ранней юры континентальные обстановки постепенно сменялись мелководно-морскими. Преобладал теплый, преимущественно влажный, субтропический климат. На территории Сибири на суше в первой половине ранней юры денудационные ландшафты преобладали над аккумулятивными. Во

второй половине ранней юры на севере Сибири происходит серия морских трансгрессий, а на юге площадь континентальной седиментации достигает максимального распространения. Здесь существовал высокоширотный умеренно теплый климат с выраженной сменой полярных дней и ночей. На территории Центральной Азии на протяжении ранней юры происходило соприкосновение умеренно теплого и субтропического климатических поясов. Полученные карты могут быть использованы при биогеографических исследованиях.

Ключевые слова: *геттанг, синемюр, плинсбах, тоар, палеорельеф суши, климатические пояса*

Благодарности: авторы выражают благодарность Ю.В. Рыжову и А.В. Аржанниковой (Институт земной коры СО РАН) за обсуждение затронутых в статье вопросов.

Источник финансирования: исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWM-2024-0006).

Для цитирования: Frolov A.O., Mashchuk I.M., Ivantsov S.V. *Paleogeography and climates of Europe, Central Asia and Siberia in the Early Jurassic* // Геосферные исследования. 2024. № 4. С. 22–43. doi: 10.17223/25421379/33/2

1. Introduction

The Early Jurassic is an important interval in the Earth's history. This is a time of Pangea 2 breakup, caused by the opening of the Northern Atlantic. This event had a significant effect on the climate and biogeography of many representatives of the European and Asian fauna and flora.

Paleogeographic and paleoclimatic research are the most important component of the large sedimentary basins study. Paleogeographic reconstructions are necessary prerequisites for mineral prospecting. Recently, their importance has been especially increasing in relation to oil and gas bearing basins [Kontorovich et al., 2013; Shemin et al., 2018]. Paleogeographic and paleoclimatic reconstructions are the fundamental basis for understanding paleobiogeographic and evolutionary changes in ancient floras and faunas [Vakhrameev et al., 1970; Gladenkov, 2005; Ros-Franch et al., 2014]. As a result, significant attention of last 50 years, has been paid to the Jurassic paleogeography in combined, special and regional works [Odintsov, 1967; Vinogradov, 1975; Buvalkin, 1978; Ziegler, 1988; Polyansky, 1989; Dercourt et al., 1993; Smith et al., 1994; Golonka et al., 2000; Golonka, Ford, 2000; Blakey, 2016; Scotese, 2016; Rogov et al., 2019]. The global paleogeographic reconstructions were compiled for individual epochs and ages of the Jurassic [Kazmin, Natapov, 1998; Golonka, 2007; Scotese, 2014; Matthews et al., 2016].

However, the currently available global maps of the Jurassic period are not always suitable for the land paleobiogeographic studies. Due to the large scale, they often do not reflect important features of some sedimentation basins paleorelief, and it is not always possible to indicate the location of some basins. During the last 20 years, a large amount of geological, paleontological, biostratigraphic, sedimentological, petrographic, mineralogical and geochemical data has been accumulated on the Jurassic continental deposits of Eurasia. Based on them, regional paleogeographic reconstructions of the land relief

have been developed [Golonka et al., 2000; Zakharov et al., 2010; Devyatov et al., 2011; Michalík, 2011; Sibuet et al., 2012; Kontorovich et al., 2013; Fantasia et al., 2018; Shemin et al., 2018]. Today there is an opportunity to refine the Early Jurassic paleogeographic maps of Eurasia using these reconstructions. Following the Vakhrameev [1991], the maps are supposed to be used for detailed phytogeographic constructions in order to clarify the relationship between the floras of the Siberian and Euro-Sinian paleofloristic regions. We use the term “Siberia” for the area of West Siberian sedimentary basin and Siberian Craton. In order to detail phytogeographic reconstructions, it is necessary to know the history of land relief and climate development in Europe, Central Asia and Siberia in the Hettangian, Sinemurian, Pliensbachian and Toarcian. The choice of this area is due to the fact that Ural Mountains were the natural barrier, which prevented the direct distribution of some plants from the Euro-Sinian region to Siberia. Thus, the main routs of plant's migration from Europe to Siberia passed through the Central Asia. The area of modern China and Mongolia is not considered in this paper because of its isolation from Siberia by Southern Tian-Shan mountain systems in the Jurassic.

In our opinion, development of detailed paleogeographic maps for the Early Jurassic will improve our understanding of the relationships between the geological processes and changes in flora and fauna.

These relationships could be revealed by tracing the flora and fauna distribution from age to age, taking into account the changes in the relief, climate and global sea level.

Detailed biogeographic research requires a high-resolution maps, we developed herein.

2. Materials and Methods

Paleogeographic and paleoclimatic schemes were developed according to the plate tectonic reconstructions of the continents' positions in the Early Jurassic [Scotese,

2014; Cao et al., 2017], lithological and paleogeographic atlases [Vinogradov, 1975; Kazmin, Natapov, 1998], and the maps cited in a number of publications [Sinitsyn, 1963; Odintsov, 1967; Buvalkin, 1978; Zakharov et al., 1983; Polyansky, 1989; Vajda, Wigforss-Lange, 2009; Devyatov et al., 2011; Kontorovich et al., 2013; Shemin et al., 2018]. The modern and ancient land

contours, paleorelief elements (mountains, lowlands, lakes, etc.), volcanism areas, and locations of the main lithological and paleontological indicators of climate were plotted on paleogeographic schemes. The information on the geological structure of 56 Early Jurassic large sedimentary basins of Northern Eurasia were analyzed herein (Fig. 1).

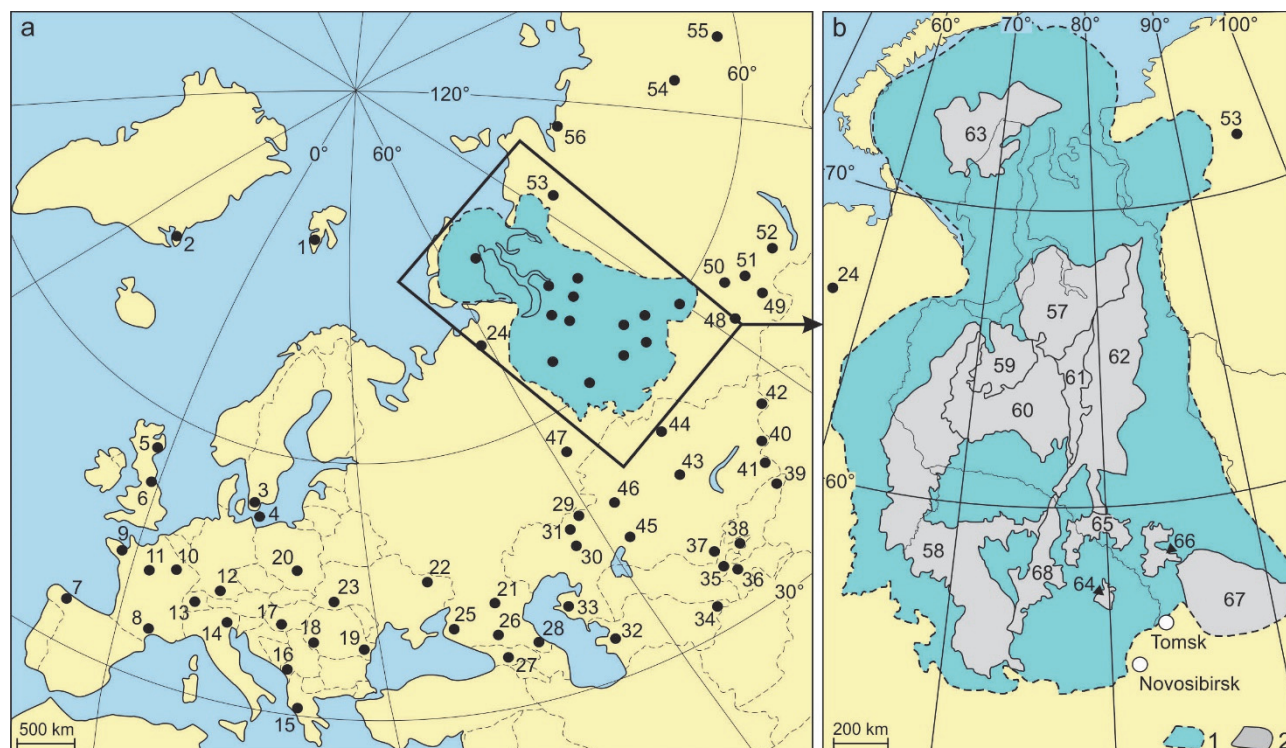


Fig. 1. Geographical position of the Lower Jurassic sedimentation basins used in the construction of paleogeographic maps

a – Europe and Central Asia, b – West Siberian sedimentary basin. 1 – Territory of the West Siberian sedimentary basin, 2 – Negative landforms mentioned in the article (after Kontorovich et al., 2001 with simplification). The numbers indicate: 1 – Svalbard (Norway), 2 – Scoresby (Greenland), 3 – Skåne (South Sweden), 4 – Bornholm (Denmark), 5 – North East Scotland, 6 – Yorkshire (England), 7 – Asturias (Spain), 8 – Causses Basin (France), 9 – Normandy (France), 10 – Lorraine (France), 11 – Paris Basin (France), 12 – Bavaria (Germany), 13 – Switzerland, 14 – Trento platform (North Italy), 15 – Balkan Peninsula, 16 – Montenegro, 17 – Mecsek Mountains (Hungary), 18 – Resita Basin (Romania), 19 – Dobruja trough (Romania), 20 – Poland, 21 – Kuma-Manych trough (Russia), 22 – Dnieper-Donets depression (Ukraine), 23 – Stryi trough (Ukraine), 24 – Pechersk Basin (Russia), 25 – Kuban (Russia), 26 – Baksan (Russia), 27 – Georgian lump (Georgia), 28 – Dagestan (Russia), 29 – Orsk basin (Kazakhstan), 30 – Emba R. (Kazakhstan), 31 – Ilel R. (Kazakhstan), 32 – Tuarkyr (Turkmenistan), 33 – Mangyshlak (Kazakhstan), 34 – Kugitangtau ridge (Turkmenistan), 35 – Hissar Range (Tajikistan), 36 – Fan-Yagnob (Tajikistan), 37 – Karatau (Kazakhstan), 38 – Fergana depression (Uzbekistan), 39 – Issyk-Kul depression (Kyrgyzstan), 40 – Alakol depression (Kazakhstan), 41 – Ili depression (Kazakhstan), 42 – Kinderlyk Basin (Kazakhstan), 43 – Karaganda Basin (Kazakhstan), 44 – Maikuben basin (Kazakhstan), 45 – South Turgai (Kazakhstan), 46 – North Turgai (Kazakhstan), 47 – Chelyabinsk Basin (Russia), 48 – Kuznetsk Basin (Russia), 49 – Ulughem Basin (Russia), 50 – Achinsk Basin (Russia), 51 – Kansk Basin (Russia), 52 – Irkutsk Basin (Russia), 53 – Yenisei-Khatanga trough (Russia), 54 – Vilyui Basin (Russia), 55 – South Yakutsk Basin (Russia), 56 – Anabar Bay (Russia), 57 – Bol'shaya Kheta megasyncline, 58 – Krasnoleninsk megamonocline, 59 – Nadym hemisyncline, 60 – South Nadym megamonocline, 61 – Middle Pur inclined megatrough, 62 – Krasnoselkup monocline, 63 – Kara megasyncline, 64 – Bakchar mesodepression, 65 – Ust'-Tym megadepressions, 66 – East Paiduga megadepressions, 67 – Teguldet megasyncline, 68 – Koltogor-Nyul Trench

The maps we developed were built, basing on paleogeographic atlases of Kazmin and Natapov [1998] and Scotese [2014]. They show the major paleorelief elements, and contours of the modern continents. The standard legend for paleogeographic maps was adopted from atlases [Vinogradov, 1975; Kazmin, Natapov, 1998]. The

legend for paleoclimatic maps was adopted from the articles of Chumakov et al. [1995] and Herman [2004]. The symbols of plants-indicators of climate were developed by authors. Paleophytochoria and their borders we use in the article were introduced by Vakhrameev [1991], Kiritchkova et al. [2005], Frolov and Mashchuk [2018].

The uneven state of knowledge and representation of the Early Jurassic continental deposits of this vast area and the often insufficient stratigraphic subdivision of some sections create considerable difficulties in compiling paleogeographic and paleoclimatic schemes. In this regard, some sections are conventionally subdivided into stages, or the geographical settings reconstructed from them are shown on both adjacent diagrams. We imply the following indicators of climate: paleobotanic (distribution of plants of the Siberian and Euro-Sinian regions and xerophilic conifer of Cheirolepidiaceae family), lithological (distribution of industrial coals, gypsum and anhydrite, green-colored and variegated rocks of continental genesis, glendonites), and geochemical (clay minerals study), gained from the published sources.

Mapping of climatic zones, in the case of sparse locations of climate indicators, we did significant spatial interpolations. In cases of indicators abundance and small-scale reconstructions, the schemes were significantly generalized.

The relief dissection, climate, sedimentation environments, sea level fluctuations, and the plant distribution are presented on the proposed paleogeographic maps (Fig. 2–6) of Europe, Central Asia, and Siberia compiled for the Hettangian, Sinemurian, Pliensbachian, and Toarcian.

3. Results and Discussion

The latitudinal orientation of Eurasia in the Early Jurassic differed from the modern one. According to plate tectonic reconstructions, the modern Bering Sea was located near the geographic North Pole [Scotese, 2014].

Siberia was located further to north, on the altitudes higher than 60° N (hereinafter, authors refer to as paleolatitudes). It was lowland surrounded by the Urals on the west, the uplifts of central Kazakhstan on the south, Altai-Sayan Mountains, Baikal-Patom Highlands and Stanovoy Ridge on the east, and North Siberian Upland on the northwest [Vinogradov, 1975]. The epicontinental seas that existed in the north of Siberia were opened into the Proto-Arctic Ocean reconstructed from the South Anyui ophiolite suture. The ocean had separated the North Asian and Euro-American cratons in the Mesozoic [Seslavinsky, 1979; Sokolov et al., 1997].

The area of Central Asia was located between 60° and 40° N [Scotese, 2014]. It was highly dissected elevated inland adjacent to the Southern Tian-Shan mountain system. Numerous accumulative depressions existed here, were often isolated from each other by hills and ridges. Only the Central Caspian area, located in the south of this region, had access to the Central Caucasian Sea [Sinitsyn, 1963; Buvalkin, 1978].

The northern part of Europe (Norway, Sweden, Denmark, Finland, Belarus, Ukraine and the European part of Russia), located between 60° and 40° N was a lowland. Southward of 40° N, the European area was represented by a series of islands with low relief surrounded by shallow epicontinental seas adjoining the Tethys Ocean in the south [Scotese, 2014].

The Northern Hemisphere in the Early Jurassic already had a climatic zoning. A belt of subtropical, seasonally humid climate crossed Europe and Central Asia. It comprises the Euro-Sinian paleofloristic region where the thermophilic ferns (Dipteridaceae, Marattiaceae and Matoniaceae) and gymnosperms (Cycadales, Bennettitales, Caytoniales) and small-leaved conifers Cheirolepidiaceae were widespread. To the north (in Siberia and Kazakhstan) there was a moderately warm, constantly humid climatic zone, with Siberian paleofloristic region. It differed from Euro-Sinian in its low taxonomic diversity and the dominance of Ginkgoales, Leptostroboles, and large-leaved conifers [Vakhrameev, 1991]. The biogeography and sedimentology data indicate the absence of ice sheets in the circumpolar regions [Zakharov et al., 2010].

3.1. Hettangian age

We have proposed for Hettangian the paleogeographic (Fig. 2) and paleoclimatic (Fig. 3, *a*) schemes, which are described below.

3.1.1. Europe and East Greenland

Climate. There was a subtropical semi-arid climate on the Iberian Peninsula, in the Venetian Alps, Aquitaine and Paris Basins (Fig. 3, *a*), indicated by paleobotanical data and the presence of evaporites [Hallam, 1975; Vakhrameev, 1991; Barrón et al., 2006; Moreau et al., 2019]. A more humid subtropical climate was in on the area of modern Germany, Southern Sweden, Romania, Hungary, and Poland [Vakhrameev, 1991] (Fig. 3, *a*). The clay minerals study and paleobotanical data indicate the cooler and drier climate at the late Early Hettangian and earliest Middle Hettangian in Poland [Brański, 2011; Barbacka et al., 2014].

Sea level. The size of the Europe marine areas was minimal; continental sediments prevailed over marine ones [Hallam, 1975]. The boreal seas and the Tethys were separated by land (Fig. 2). The opening of the Penninic rift, occurring in the Hettangian, gave rise to the Pennine Ocean Branch, which separated the Alpine-Carpathian continental block from Paleoeurope [Vörös, 2001]. A small sea bay went into southeast of the Kuma-Manych Trough [Vinogradov, 1975].

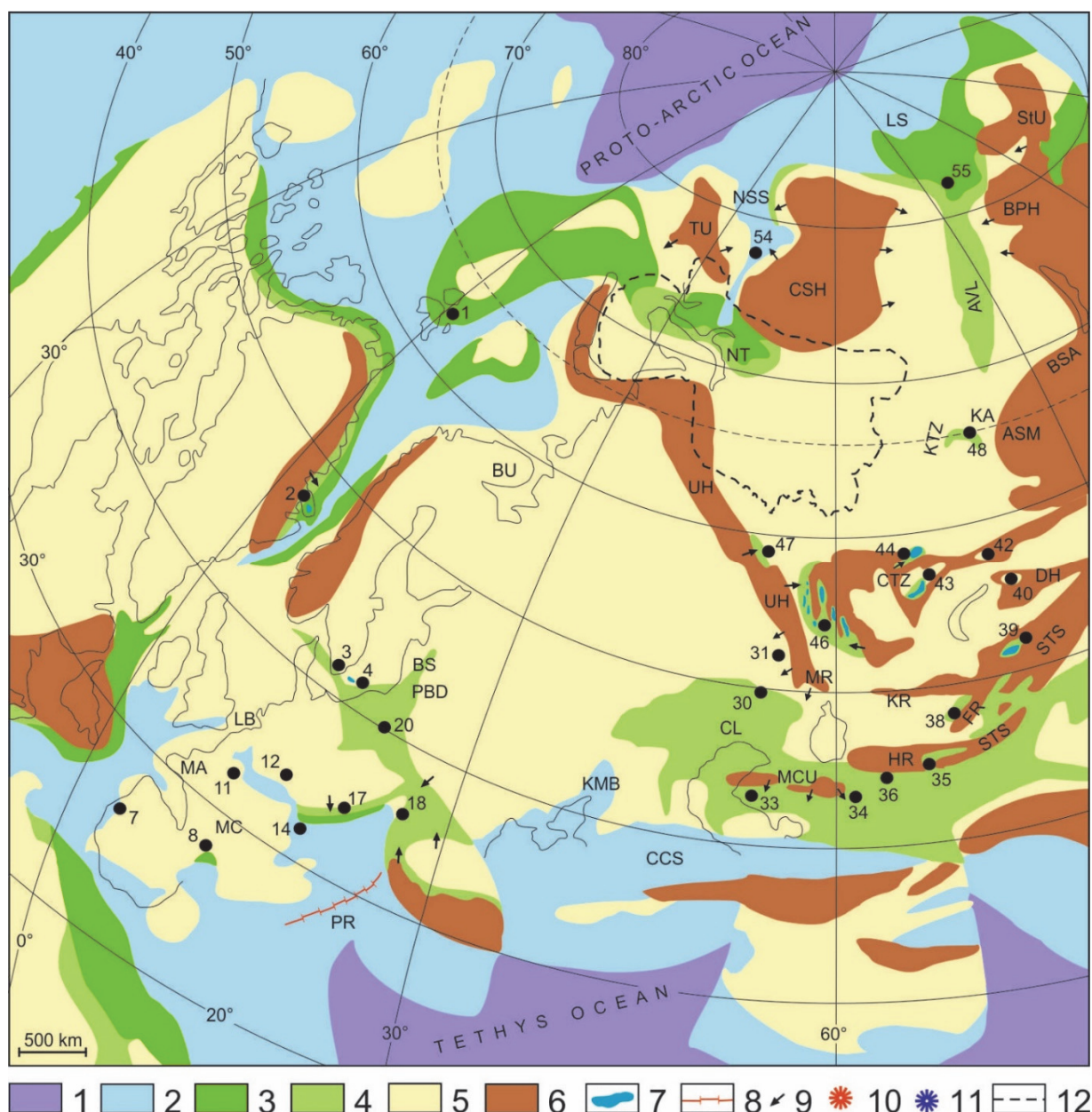


Fig. 2. Terrestrial paleogeography of the region under study in the Hettangian

1 – ocean type pools, 2 – areas of marine deposition, 3 – coastal plain, periodically inundated by the sea (floodplain, palustrine-lacustrine, channel, deltaic, barrier bar, beach facies), 4 – low-lying depositional plain (channel, floodplain, lacustrine facies), 5 – low-lying denudation land, 6 – mountains and plateaus, 7 – lakes, 8 – rifts, 9 – direction of clastic sediment supply, 10 – volcanic activity, 11 – glendonites, 12 – present-day boundary of the West Siberian Basin. Abbreviations: AD – Aldan depression, ASM – Altai-Sayan mountain system, AVL – Angara-Vilyui Lowland, BA – Belarus Antecline, BPH – Baikal-Patom Highlands, BS – Baltic Syncline, BSA – mountains of the Baikal-Sayan Arch, BU – Baltic Upland, CCS – Central Caucasian Sea, CL – Caspian Lowland, CSH – Central Siberian Highland, CTZ – Chingiz-Tarbagatai fold zone, DH – Dzhungar Highland, FR – Fergana Range, HC – Hispanic Corridor, HR – Hissar Range, KA – Kuznetsk Alatau, KMB – Kuma-Manych Bay, KR – Karatau Ridge, KTZ – Kolyvan-Tomsk fold zone, LB – London-Brabant landmass, LS – Lena Sea, LiS – Ligurian Sea, MA – Massif Armoricaïn, MC – Massif Central, MCU – Middle Caspian Uplift, MR – Mugodzhzar Ridge, NSS – North Siberian Sea, NT – Nadym-Taz interfluvium, NSR – North Sea Rift, PBD – Podlasie-Brest Depression, PR – Penninic Rift, STS – South Tian-Shan, StU – Stanovaya Upland, SU – Stavropol Uplift, TU – Taimyr Upland; TiU – Timan Upland, UH – Ural Highland, US – Ukrainian shield, VA – Voronezh Anteclines, VC – Viking Corridor, WSS – West Siberian Sea, YU – Yenisei Upland

Relief. In the Early Hettangian the vast marshes existed in the Causses Basin (France), located on the southern coast of the Tethys [Demathieu et al., 2002]

(see Fig. 2, point 8). This area was transgressed in the end-Hettangian. As a result, a fairly protected environments, restricted partially or regularly open to the sea,

with reduced bathymetry, locally brackish and of the bay/lagoon/estuary type was formed [Moreau et al., 2019].

Within the Alpine-Carpathian block, the continental sedimentation occurred on the area of present-day Hungary and Romania (see Fig. 2, points 17, 18). During the Early Hettangian at the site of the present Mecsek Mountains (Hungary) there was a deltaic plain. Sedimentary environments were mainly fluvial with channel, flood plain and palustrine facies [Barbacka, 2011]. River systems transported the eroded material from continent through rift valleys to the south of Europe Sea, forming deltas [Michalik, 2011]. Due to the sea transgression in the Late Hettangian, palustrine environments began to dominate on the coastal delta plain, where coals of commercial importance were formed. The Resita Coal Basin (Romania) was an intermountain depression. Coarse clastic material, carried by fast-flowing rivers, entered it from the nearest mountains. As a result, the Dealul Budinic Member of Steierdorf Formation was formed, represented by conglomerates and sandstones with rare mudstones [Popa, Meller, 2009].

In the Early Hettangian, near the modern island of Bornholm (Denmark) (Fig. 2, point 4), a depression was formed. Black shales interbedded with sandstones (Munkerup Member of Rønne Formation) enriched with plant remains were deposited in its deepest part in the lacustrine environments [Mehlqvist et al., 2009].

In the East Greenland (Fig. 2, point 2), at the beginning of the Hettangian there was a vast lake surrounded by highlands. The rivers carrying sediments from the mountains formed wide palustrine deltas in its coastal part. On its area, black shales with thin coal seams and root horizons (Primulaelv Formation) were formed under conditions of excessive moisture. Black, laminated shales of the Rhætelv Formation, which laterally replaces the Primulaelv Formation probably formed during anoxic conditions in a deep lake. These black shales are interbedded with sand sheets representing lacustrine deltas when the lake becomes shallow [Surlyk, 2003]. The modern North and Norwegian seas area were occupied by humid swamplands. On the Svalbard, coastal and tidal channels sedimentation environments prevailed, where thick sandstone strata were formed [Vajda, Wigforss-Lange, 2009]. In the modern Barents and Kara seas area, there were vast lacustrine-alluvial plains, accumulated coal-bearing deposits. The Taimyr Upland was the source area [Vinogradov, 1975].

In the west of the East European Platform, there was a vast alluvial plain that occupied the Baltic Syneclise, Masurian ledge and Podlasie-Brest Depression. It was drained by meandering rivers, with swampy valleys. In the western part of the plain (Poland) (Fig. 2, point 20), the Zagaje Formation was accumulated with floodplain

sandstones and lacustrine-palustrine fine-grained deposits with abundant plant remains and root horizons [Pieńkowski, 2004]. In the east of the plain, sandy gravel, sandy, clayish silty rocks enriched in plant detritus were accumulated [Zinovenko, Monkevich, 1995].

3.1.2. Central Asia

Climate. According to the paleobotanical data, there were two humid climatic zones in Central Asia. The subtropical climate was typical for the modern Tuarkyr, Mangyshlak, Caspian Depression and Hissar Range. Moderately warm climate covered the northern regions of Kazakhstan: Turgai, Maykyuben, Karaganda, Kinderlyk Basins and Alakol Depression (Fig. 3, a).

The Early Jurassic floras of Fergana, Karatau, and Issyk-Kul are transitional between the Siberian and Euro-Sinian floras [Vachrameev, 1991; Kiritchkova et al., 2005; Frolov, Mashchuk, 2018]. This indicates a temperate subtropical climate intermediate between subtropical and moderately warm (Fig. 3, a).

Relief. During the Hettangian, the area of Kazakhstan was an elevated inland, in some places mountainous land. High mountains were located in the Central Kazakhstan, Southern Urals and the South-Eastern Kazakhstan area, adjacent to the places of junction with the Altai and Southern Tian-Shan structures [Sinitsyn, 1963]. In the Hettangian and Sinemurian, these areas experienced a regional uplift, which caused a rejuvenation of the relief. They were the source of clastic material, accumulated in the associated submountain and intermountain depressions [Buvalkin, 1978].

The northern part of the Turgai Trough (Fig. 2, point 46) was meridionally extended. In the lakes that existed on the basin area, there was an accumulation of detrital material coming from the Ulytau Mountains and the Southern Urals. Here, the Chernigov Formation composed of conglomerates, sandstones, and siltstones was formed. An erosional-depositional plain was located in the southern part of the Turgai Trough, the eastern Aral Sea region, and the Kyzylkum Depression [Buvalkin, 1978].

Closed intermountain depressions (Fig. 2, points 39–43) were located in the southeast of Central Asia. The inner region of the depressions was occupied by lakes, supplied with coarse clastic material from the surrounding mountains [Vinogradov, 1975]. Here, the Hettangian sediments are presented by the Saransk Formation (in Karaganda Depression), lower parts of the Taisugan (in Kinderlyk Depression), Djil (in Issyk-Kul Depression) and Uzunbulak (in Alakol Depression) formations. The Alakol Depression was high-altitude and located at an altitude of more than 1000 m above the denudation area level. The plant macroremains from the Uzunbulak Formation indicate the presence of vertical climatic zonation in the Kazakhstan mountainous regions [Buvalkin, 1978].

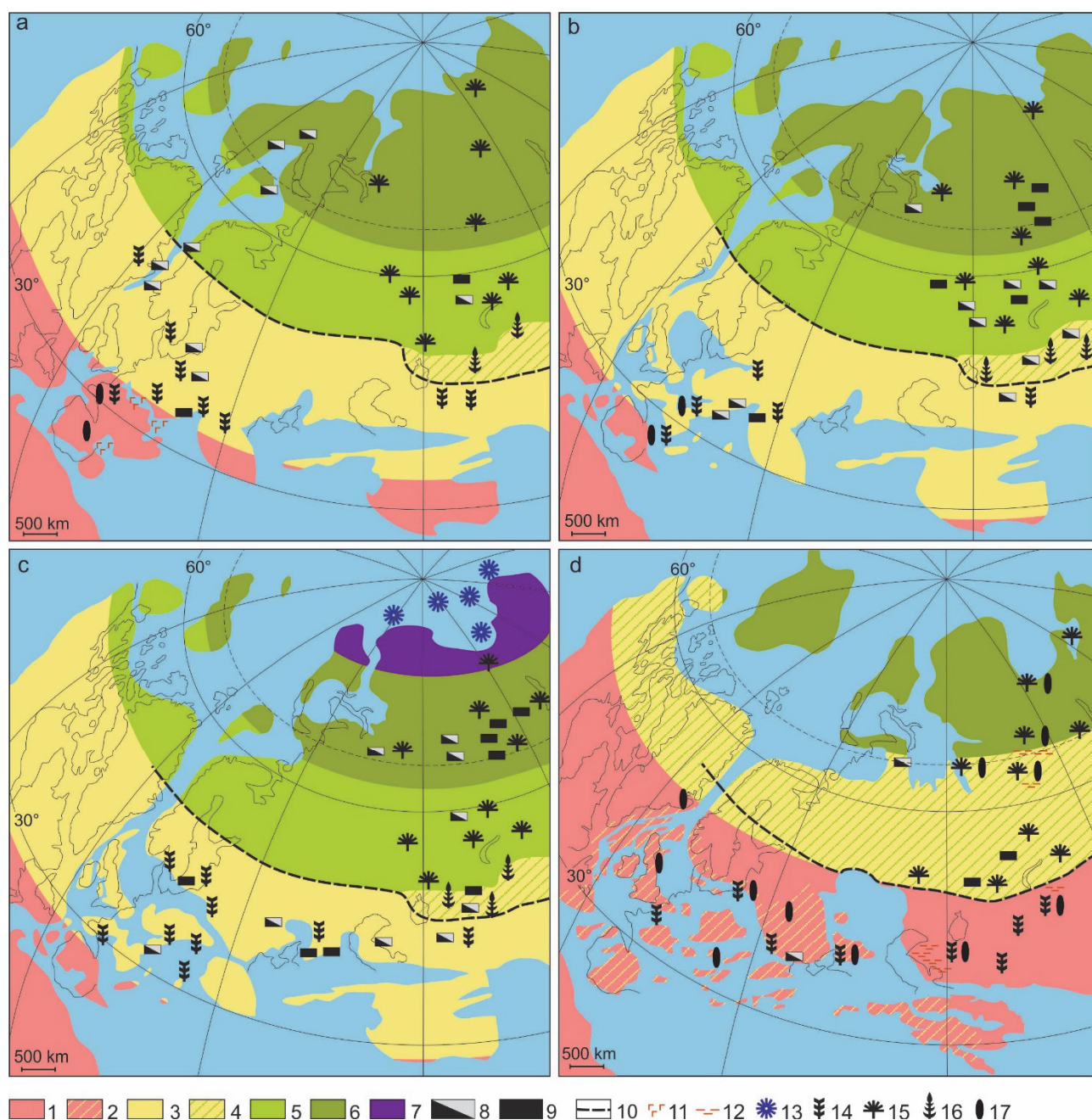


Fig. 3. Climatic zoning of the studied region in the Early Jurassic

a – in the Hettangian, b – in the Sinemurian, c – in the Late Pliensbachian, d – in the Early Toarcian. Climatic belts: 1 – subtropical semiarid, 2 – subtropical monsoonal climates with extreme wet and dry seasons, 3 – subtropical humid, 4 – temperate subtropical (intermediate between true subtropical and warm temperate), humid, 5 – warm temperate, humid, 6 – high latitude warm temperate, humid, 7 – high latitude cool temperate, humid; off-scale signs: 8 – coal interlayers of small thickness, 9 – industrial coals, 10 – boundary between the Euro-Sinian and Siberian paleofloristic regions, 11 – gypsum and anhydrite, 12 – green-colored and variegated rocks of continental genesis, 13 – glendonites, 14 – flora of Euro-Sinian paleofloristic region, 15 – flora of Siberian paleofloristic region, 16 – transitional flora between the Euro-Sinian and Siberian regions, 17 – increased occurrence in the floras of Cheirolepidiaceae conifers

In the Kazakhstan northeast, there was the Maikuben Piedmont Depression (Fig. 2, point 44), framed from the south by the mountains of the Chingiz-Tarbagatai folded zone. Rivers and temporary streams removed boulders, pebbles and sandy material into depression (Ashchikol Formation). In the depression northeast there was a shallow

lake, where coals accumulated in the marshes [Buvalkin, 1978].

Southwest of the Turgai Depression, there was the vast Caspian lowland, with clayish silt, less often sandy sediments accumulated in shallow lakes and on alluvial plains. Clastic material came from low elevations located

in the region of the present Southern Urals and the Mugodzhar Ridge [Vinogradov, 1975].

The uplifts of Turan plate were located on the southeastern extension of the South and Central Caspian swells and the Central Karakum dome. The Mangyshlak and Kugitangtau depressions are confined to them. On the Southern Mangyshlak area (see Fig. 2, point 33) and in the modern Middle Caspian, there was an accumulative plain with a weakly dissected relief, lakes and fairly fast rivers. Poorly sorted sandstones with pebbles (Ergozin Formation) were formed here [Kiritchkova, Nosova, 2014]. The sandstones and gravelstones (lower part of the Sanjar Formation) were accumulated in the southeast of the Turan Plate, in troughs located near the modern Hissar Range southwestern spurs (Fig. 2, points 35, 36). To the east of Turan plate Southern Tian-Shan ridges were associated with the Fergana, Tashkent and Zeravshan depressions (Fig. 2, point 38), filled with alluvial deposits of conglomerates and gravelites (the Sogul and Kokkinsk formations lower parts) [Vinogradov, 1975].

3.1.3. Siberia

Climate. In the Early Jurassic, there was a moderately warm, constantly humid climate (see Fig. 3, *a*). Winter temperatures were not lower than 10–12 °C, and summer temperatures reached 20–22 °C [Golbert, 1987]. According to palynological data, during the Hettangian and Sinemurian, there was a tendency for a gradual decrease in temperature [Ilyina, 1985].

Climatic interpretations of lithological and paleobotanic data from the Early Jurassic deposits of Siberia are controversial. On the one hand, there were no pronounced seasonal fluctuations in temperature and humidity [Golbert, 1987]. On the other hand, Ginkgoales and Leptostrobales were characterized by seasonal leaf fall [Vachrameev, 1991], and the annual rings were found in fossil wood [Odintsova et al., 1975]. In our opinion, the observed seasonal prevalence of plant activity can be explained by the geographical location of this area. According to plate tectonic reconstructions [Scotese, 2014], Siberia in the Early Jurassic was located at high latitudes (further to the north than 60° N), and the eastern margins of the Vilyui Syncline were located near the geographic North Pole. A feature of modern high latitudes is a pronounced light and temperature seasonality (polar nights in winter and polar days in summer). Apparently, seasonal leaf fall and the annual rings formation in the Jurassic Siberian plants can be explained by the inevitable alternation of polar days and nights at high latitudes. Thus, we suggest that in the Early Jurassic of Siberia there was a high-latitude, moderately warm, constantly humid climate, whose feature was the annual photoperiodism (polar nights and days) (Fig. 3, *a*).

Relief. By the beginning of Jurassic, a large part of the Western Siberia was an elevated denudation plain surrounded by the Central Siberian Highland, the Ural and Altai-Sayan mountain systems and Chingiz-Tarbagatai fold zone (Fig. 2). The Ural Highland was the watershed between the East European and West Siberian platforms river systems [Zakharov et al., 1983].

In the Hettangian, the area of the Yenisei-Khatanga Trough (Fig. 2, point 54) and the Gydan Peninsula (the north of Western Siberia) was occupied by the narrow bay, which separated Taymyr Peninsula from the Siberian Platform. Silt and argillite sediments with sands interlayers were accumulated here. Clastic material came from the Central Siberian and Taimyr Highlands (Fig. 2). In the most subsided part of the Kara Depression and in the south of the Nadym-Taz interfluvium, the sands, silts, and clays with gravel-pebble interlayers were accumulated in alluvial plains [Zakharov et al., 1983; Shemin et al., 2018].

In the Hettangian, the Angara-Vilyui Trough extended in the central part of Siberian Platform [Odintsov, 1986], from the Eastern Sayan to the Verkhoyansk area (Fig. 2). This area was a lacustrine-alluvial plain, with Ukugut Formation conglomerates and sands accumulated in its western part. The plain was drained by a river system in the direction to the Lena Sea. Clastic material came from the Stanovoy Range, the Baikal-Patom and Central Siberian highlands [Zakharov et al., 1983]. In the south of the Siberian Platform, the region of the Irkutsk and Kansk Basins were a denudation area surrounded by the Sayan-Baikal mountain systems [Odintsov, 1967].

In the Kuznetsk Intermountain Depression (Fig. 2, point 48), there was a lacustrine-alluvial plain, where sandy and silty sediments of the Lebedevo Formation and lower part of the Rapsadskaya Formation were accumulated. In the southeast of the Ural Highland, in the depression of Chelyabinsk Graben (Fig. 2, point 47), coarse clastic alluvial deposits (Sugoyak Formation lower part) were accumulated.

3.2. Sinemurian age

The Sinemurian paleogeography and paleoclimate described below are shown in the diagrams (Fig. 4) and (Fig. 3, *b*), respectively.

3.2.1. Europe and East Greenland

Climate. The climate in Europe was subtropical and humid [Vachrameev, 1991] (Fig. 3, *b*). On the area of Romania, the cooler and drier environments typical for the Hettangian have changed to warmer and more humid ones [Popa, Van Konijnenburg-Van Cittert, 2006].

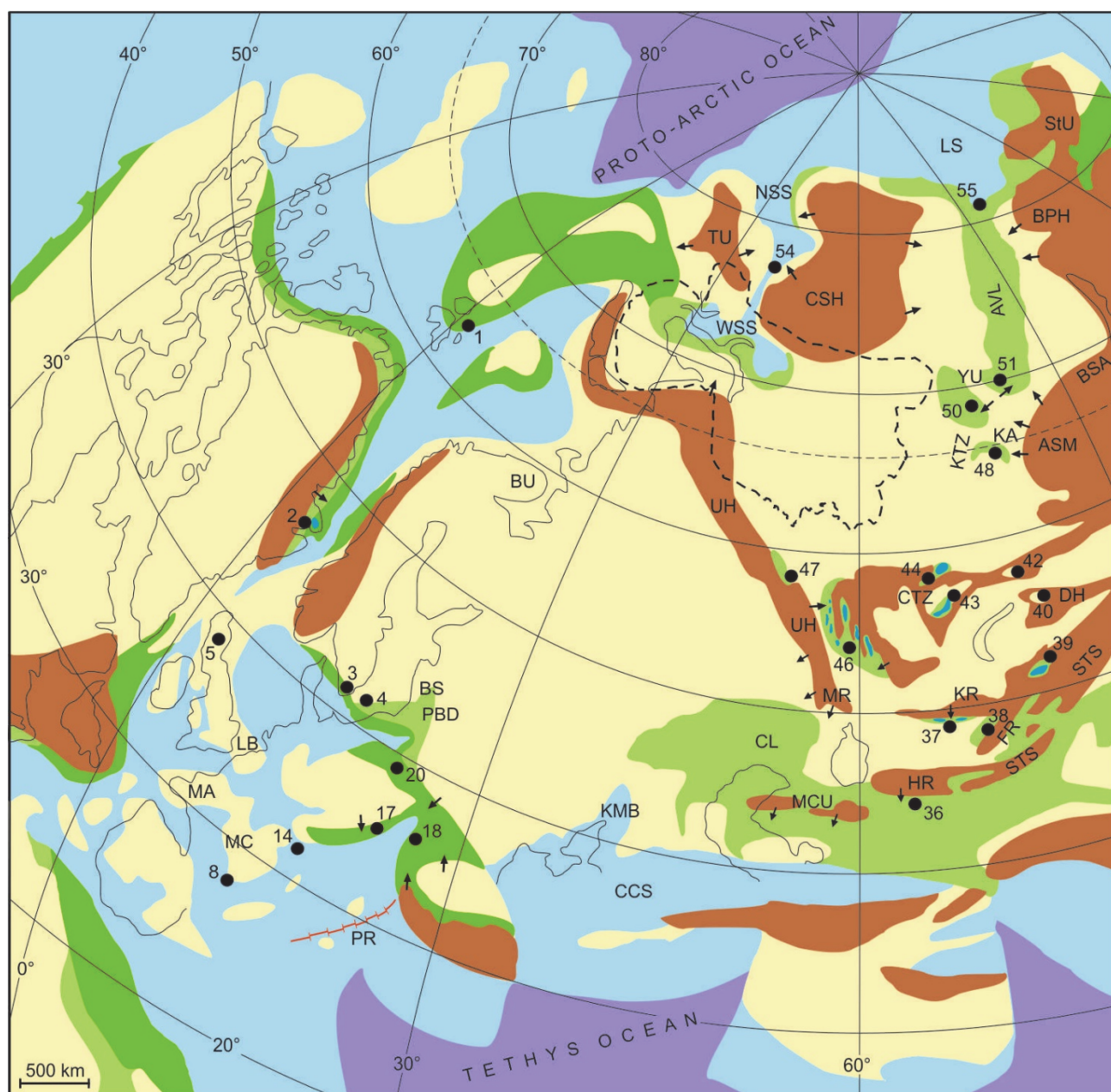


Fig. 4. Terrestrial paleogeography of the region under study in the Sinemurian

For legend see Fig. 2.

Sea level. In the Early Sinemurian, a transgression occurred the northern Europe. Its traces are observed in the southern Sweden and Scotland. The transgression also captured the margins of the Massif Central and London-Brabant landmasses in the Western Europe [Hallam, 1975].

Relief. Continental sediments accumulated on the area of present-day Hungary and Romania (see Fig. 4, points 17, 18). At the end of the Hettangian–Sinemurian, the mountains surrounding the Resita Basin (Romania) were denudated, which caused a decrease in the rivers flow speed and increasing areas of floodplain swamps.

Under these conditions, the productive coal seams of the Steierdorf Formation (Valea Tereziei Member) were formed [Popa, Meller, 2009]. In the Early Sinemurian of Hungary, river delta-plain leading to lagoon systems with paralic marshes, with coals of non-industrial value were formed. Calcareous siltstones, sandstones, and marls were accumulated in coastal and marine environments [Barbacka, 2011]. In the second half of the Sinemurian, the Tethys waters covered the area of Hungary.

In the Early Sinemurian, the sea transgression reached Denmark, Sweden and Poland. The area of Southern Sweden (Skåne) and Denmark (Bornholm) (Fig. 4, points

3, 4), represented a coastal marine sedimentation. A partially swampy deltaic plain, drained by slow-flowing rivers, adjoined the brackish lagoon, formed the Sose Bugt Mamber of Rønne Formation, represented by sandstones alternating with gray mudstone interbeds, on the Bornholm [Mehlqvist et al., 2009; Vajda, Wigforss-Lange, 2009]. The reddish sandstones and siltstones of the Döshult Mamber of Rya Formation were accumulated on Skåne in a marginal marine setting [Vajda et al., 2016]. In the second half of the Sinemurian, the coastal marine sedimentation in southern Sweden and Denmark were replaced by marine environments as a result of the Tethys transgression.

On the area of Poland (see Fig. 4, point 20) there was a palustrine alluvial plain. Sandstones, siltstones, and mudstones of the Ostrowiec Formation lower part were accumulated. Later, as a result of transgression, this land was transformed into a semi-enclosed brackish lagoon. The middle and upper parts of the Ostrowiec Formation, represented by shallow marine sandstone and mudstone interbedded by lagoonal, barrier and deltaic deposits was formed under these conditions. Deltaic plain drained by meandering rivers adjoined it from the south, where sandstones mudstones of the Ostrowiec Formation Middle and Upper members were accumulated [Pieńkowski, 2004].

In the Sinemurian in the East Greenland (Fig. 4, point 2) there was a vast lake surrounded by wide deltas continued to exist, where the Kap Stewart Group (Primulaelv and Rhætelv formations) was formed. At the end of the Sinemurian the previously freshwater lake was replaced by fully marine environments. The coastal-marine and shallow marine sedimentation conditions prevailed on Svalbard (Fig. 4, point 1) [Vajda, Wigforss-Lange, 2009].

3.2.2. Central Asia

Climate. In the Sinemurian, there still existed two climatic zones: subtropical and moderately warm. The intermediate (moderately subtropical) zone covered the Fergana, Karatau, and Issyk-Kul depressions (see Fig. 3, *b*). High humidity has led to the widespread wetlands and intensive peat accumulation.

Relief. The mountain systems, uplands, lowlands, and depressions existed in the Hettangian in Central Asia continued to develop in the Sinemurian. Denudation of mountain ranges and the widespread development of peat accumulation processes took place here [Vinogradov, 1975]. The uplift took place only in the Maly Karatau Range, adjacent to Taskomyrsai and Chokpak depressions (Fig. 4, point 37), with large lakes in their lower parts [Buvalkin, 1978].

The formation of coal-bearing deposits was confined to the coastal zone of large lakes of almost every depression (Fig. 4, points 39–44).

When the lakes became shallow, the swamplands with an open water surface were formed in their coastal zone. Under such conditions, there was an accumulation of peat and peat-sapropel deposits which became the coals of the Upper Chernigov (Northern Turgai), Taisugan (Kinderlyk Depression), Sogul (South Fergana), Kokkinsk (Fergana Range), Sanjar (Hissar Range), Sarykol (Maikuben Basin) and coal-bearing Issyk-Kul formations, as well as the lower part of the Dubovo Formation (Karaganda Basin). The peats had a lenticular structure and local distribution in the depressions of the Hissar and Fergana Ranges [Sinitsyn, 1963; Polyansky, 1989]. The Upper Uzunbulak Formation, represented by sandstones, siltstones and mudstones intercalation was formed in the lake of the Alakol alpine depression.

3.2.3. Siberia

Climate. In the Sinemurian, a high-latitude, moderately warm, constantly humid climate with pronounced light seasonal prevalence continued to exist in Siberia (see Fig. 3, *b*), but temperature gradually decreased [Ilyina, 1985].

Relief. The paleogeographic setting in most of Western Siberia remained the same as in the Hettangian. Changes happened in the south of the region: in the Kuznetsk and Achinsk Basins (Fig. 4, points 48, 50) the alluvial-lacustrine-palustrine deposits with thick peats began to form, which became the source material for coal seams of the Rapsadskaya Formation and Lower Member of the Makarova Formation [Berzon, 2006; Kiritchkova et al., 1992]. The uplands existed in Kuznetsk Alatau, Salair and the Kolyvan-Tomsk fold zone were the demolition areas for the Kuznetsk Basin, while Altai-Sayan Mountains were the demolition areas for Achinsk and Kansk Basins.

In Chelyabinsk Depression of the southeast Ural Highland (Fig. 4, point 47), the sedimentation had changed from alluvial to lacustrine-marsh. The peats which formed the industrial coals were accumulated here (Sugoyak Formation).

In the central part of the Siberian Platform, the Angara-Vilyui Lowland was expanded to the west and reached the Kansk Basin [Odintsov, 1986] (Fig. 4, point 51) and formed a single sedimentation area. The vast alluvial plain, which existed within the lowland, was separated from Western Siberia by an upland of the Yenisei Ridge. The Baikal-Patom Highland and to a lesser extent the Central Siberian Highland were the source area for the Angara-Vilyui Lowland [Vinogradov, 1975]. The Lower Pereyaslovka Subformation, represented by sandstones, siltstones, mudstones, and coal beds was accumulated within the Kansk Basin in alluvial-lacustrine-palustrine landscape [Berzon, 2006]. To the east of the Kansk Basin

pebble-sand sediments (Ukugut Formation) was accumulated. In the east of the Siberian Platform, the Lena Sea incursion into the central part of the Angara-Vilyui Lowland reached the modern Vilyui River middle course. As a result, a desalinated estuary was formed [Zakharov et al., 1983].

3.3. Pliensbachian age

For the Pliensbachian, we proposed paleogeographic (Fig. 5) and paleoclimatic (see Fig. 3, c) schemes, described below.



Fig. 5. Terrestrial paleogeography of the region under study in the Pliensbachian

For legend see Fig. 2.

3.3.1. Europe and East Greenland

Climate. Europe had a humid subtropical climate [Vachrameev, 1991] (Fig. 3, c). Due to the transgression of the sea, it was more humid than in the Sinemurian. The coal-bearing deposits, which are common in the Denmark, Northern Italy, the Dnieper-Donetsk Depression and the Caucasus, give evidence for it.

Sea level. In the Early Pliensbachian, the transgression covered the land part that now borders the North Atlantic. Its signs are visible in East Greenland, Scotland, Southern Sweden, on the isle of Bornholm, in the Polish Lowland, within the margins of the London-Brabant landmass and Massif Armoricain, as well as in the Massif Central and Northern Pyrenees [Hallam, 1975] (see Fig. 5).

In the result of the northern Tethys continental margin (Crimea-Caucasus segment) subsidence, the epicontinental Central Caucasus Sea, bounded by the Stavropol Uplift in the north and the Georgian block in the south, was expanded [Chikhradze, 1981]. In the second half of the Pliensbachian, sea waters entered the Scythian Platform and the Dnieper-Donetsk Depression (East European Platform) [Panov et al., 2005]. The Dobruja Trough experienced a slight subsidence, and marine sandy and argillaceous deposits were accumulated [Zinovenko, Monkevich, 1995].

Rifting in the North Sea and in the northern part of the Proto-Atlantic coast [Ziegler, 1988] led to the opening of the Arctic North Atlantic seaway (the Viking Corridor) between Scandinavia and Greenland in the Late Pliensbachian [Saks et al., 1971; Ziegler, 1975; Westermann, 1977]. It connected the Boreal seas with the Tethys (see Fig. 5).

Relief. The oolitic shallow banks and adjoining paralic marshes were existed in the marine basin of the Northern Italy (Fig. 5, point 14). The ooidal, peloidal, bio- and intraclastic limestones marly and clayey horizons and thin coal levels (Rotzo Formation) were formed under these conditions [Neri et al., 2018].

The sea transgression occurred on the area of Denmark and East Greenland in the Early Pliensbachian. The Hasle Formation (Denmark), represented by rippled cross-laminated siltstones and sandstones with sparse layers of coarse-grained sandstone and gravel [Surlyk, Noe-Nygaard, 1986], and the Rævekløft Formation (Greenland), represented by well-lithified sandstones with marine fauna, were formed under shallow water shelf conditions [Surlyk et al., 1973]. In the Late Pliensbachian, the sea receded and shallow lagoons were formed in both regions (Fig. 5, points 2, 4). In Denmark, the lagoon was adjoined by a deltaic plain with meandering rivers and peat-forming mires and lakes, where the lacustrine clay packages, capped by coaly clays and coals, with sands interbedding (Bagå Formation) [Petersen, 1993]. In the East Greenland, the Gule Horn Formation was formed in a shallow lagoon, containing interlayers with plant roots [Vajda, Wigforss-Lange, 2009]. The Southern Sweden area (Fig. 5, point 3) was an active volcanic landscape with hydrothermal activity. There were periodic eruptions of ash, lapilli and gas, which caused the changing of drainage patterns. As a result, it led to the formation of xerophilous vegetation that developed in an ecologically stressful situation [Vajda et al., 2016].

The Baltic, Timan and Ural gently sloping uplands were located on the East European Platform [Vinogradov, 1975]. In the Pliensbachian, in the northeast of the platform, the Pechora Depression (Fig. 5, point 24), opened into the sea basin in the north, began to form [Zakharov et al., 1983; Panov et al., 2005]. Here, the Kharyaga Formation sandy

sediments were accumulated on the lacustrine and alluvial plain [Kalantar, Golubeva, 1976] (Fig. 6).

In the Early Pliensbachian on the accumulative plain of the Dnieper-Donetsk Depression, sediments of temporary streams, lakes and swamps, represented by koalin clays were accumulated (Fig. 5, point 22). The Voronezh and Belorussian antecises, the Ukrainian Shield and uplands located in the Donbas region were the source areas [Vinogradov, 1975]. In the Late Pliensbachian, the Tethys transgressed into the Dnieper-Donetsk Depression [Panov et al., 2005].

In the Early Pliensbachian, the tectonic movements in the northwestern part of the North Caucasus led to the elevation of the Stavropol Uplift above the level of the Central Caucasian Sea. A series of volcanic islands and peninsulas appeared on the southern margin of the uplift, as well as conditions of peat accumulation, comprising marshy coastal plains, partially isolated bays and lagoons [Polyansky, 1989] (Fig. 5, point 26). The coal-bearing strata of the Southern Kuban area (Fig. 5, point 25) were formed in swampy river valleys. In the west of the Kuban, the peat was deposited on swampy estuarial alluvial-deltaic plains [Balanchivadze, 2004].

3.3.2. Central Asia

Climate. Pliensbachian climate in Central Asia was the same as in the Sinemurian (see Fig. 3, c).

Relief. In the Pliensbachian on the Kazakhstan area, tectonic movements led to an increase in the relief contrast and a decrease in the peat accumulation processes. New depressions appeared on the Karatau, in Irtysh and in the north of the East Kazakhstan areas [Buvalkin, 1978]. The conglomerates and sandstones, with minor interlayers of siltstones and mudstones were mainly accumulated in the intermountain and submountain depressions. Such sediments are present in Northern Turgai (Lower Kushmurun Subformation), Southern Turgai (Sazymbai Formation), Karatau (Lower Kurkureu Subformation), the Karaganda (Lower Dubovo Subformation), the Maikyubensk (Sarykol Formation), the Ili (Kairlagan Formation) Basins and the Issyk-Kul (Aksai Formation) and Alakol (Lower Kusak Subformation) depressions (Fig. 5, points 37, 39–46).

As a result of tectonic movements near the eastern side of the Turgai Trough (Fig. 5, point 46), an extensive depression with a huge lake in the most deepened part was formed. It accumulated terrigenous material carried by rivers from the mountain ridges of the Urals and East Kazakhstan [Buvalkin, 1978].

The Turan Plate had experienced a slight subsidence. Its surface was leveled off, and the areas of accumulation increased. In the southwest of the plate in the Mangyshlak, Central Caspian and Central Karakum areas,

there were elongated uplands surrounded by alluvial plains (Southern Mangyshlak, Kugitangtau), which opened towards the sea, located to the south [Vinogradov, 1975; Polyansky, 1989]. Sandstones were accumulated in river valleys, and silty clays with interlayers of carbonaceous clays (second rhythm unit of the Ergozin Formation) were accumulated in some lakes [Kiritchkova, Nosova, 2014].

In the Southern Tian-Shan, the main uplifts have decreased, and the accumulation basins have expanded. In the South Fergana (Sogul Formation) and Hissar Range (Sanjar Formation) basins (see Fig. 5, points 35, 36, 38), there were alluvial-lacustrine-palustrine sedimentation conditions with local insignificant swamping. The Fergana Depression has expanded and possibly merged with the Alai valley and the Issyk-Kul Depression [Vinogradov, 1975; Polyansky, 1989].

3.3.3. Siberia

Climate. In Siberia, the Sinemurian cooling, reached its peak in the Late Pliensbachian. The high-latitude warm-temperate climate at this time is estimated to be highly humid and coolest for the Early Jurassic (see Fig. 3, c) [Ilyina, 1985].

Important climate indicators are glendonites formed at low temperatures (not higher than 4°C) [Kemper, Schmitz, 1981]. Glendonites are known from the Upper Pliensbachian of the Anabar Bay, in the North-East of Russia (Viliga River) and in Lena, Aldan and Vilyui River basins they are the regional stratigraphic markers [Kirina, 1966]. The absence of thermophilic mollusks in sediments with glendonites also supports the cold-water nature of the Siberian Seas [Rogov et al., 2021; Zakharov et al., 2010]. The wide distribution of glendonites in the Late Pliensbachian, indicates the existence cool climate with seasonal temperature drops down to 0 °C to the north of 80° N (Fig. 3, c). There was an assumption that the Pliensbachian cooling was accompanied by glaciation [Morard et al., 2003; Ruebsam et al., 2019]. However, no glacial deposits have been found in the Pliensbachian sections of Siberia.

Sea level. At the beginning of the Late Pliensbachian, the transgression covered a large area in the north of Western Siberia, Yenisei-Khatanga interfluve and Vilyui Lowland [Zakharov et al., 1983]. In the north of Western Siberia, the sea reached the southern side of the Bolshaya Kheta Megasyneclise. Here, mudstones and siltstones with rare interlayers of sandy turbidites (Levinskiy Formation) were accumulated in shallow marine environments. Gravel and pebble material is present in the marginal parts of the basin [Kontorovich et al., 2013; Shemin et al., 2018]. Within the Siberian Platform, sea waters flooded the Vilyui Lowland. Siltstones and mudstones

with sandstone interbeds (the Lower Krasno-Aldan, Tyung, Undyulung and Airkat formations) were accumulated here [Shurygin et al., 2000].

The end of the Late Pliensbachian was the period of the Siberian sea regression. At that time, there was a shallowing of the West Siberian Sea, which manifested itself in the coarsening of the Sharapovo Formation sediments, composed of mudstones, siltstones, and sandstones with interlayers of conglomerates and gravelites [Kontorovich et al., 2013]. Within the Vilyui Syncline, clay silts were accumulated in the coastal zone, and clastites (Upper Tyung Subformation and upper member of the Kyzylsar Formation) were accumulated at a considerable distance from the coast [Devyatov et al., 2011].

Relief. In the north of Western Siberia, the lowland coastal plain, sometimes flooded by the sea, bordered the sea basin and migrated to the south as the transgression developed (Fig. 5). Coastal-marine and lacustrine-lagoon deposits (Yagel Formation) were formed here, represented by siltstones with sandstone interbeds. In the south of the region, the accumulative alluvial plain has significantly expanded and has covered the present-day northern part of the Krasnoleninsk Megamonocline, Nadym hemi-syneclise, South Nadym megamonocline, southern part of the Middle Pur inclined Megatrough and southern part of the Krasnoselkup monocline. Alluvial-lacustrine-palustrine sediments of the middle member of the Urman Formation were formed here [Zakharov et al., 1983; Kontorovich et al., 2013].

In the south of Western Siberia and the-Siberian Platform, the sedimentation was controlled by the growth of the Altai-Sayan Mountains. In the first half of the Pliensbachian, the mountains had risen; as a result, sedimentation began in the Sayan Piedmont Trough (Irkutsk Basin), which was connected with the Kansk Depression and Angara-Vilyui trough, forming an integral system of sedimentation. Due to the active subsidence, Irkutsk Basin (Fig. 5, point 52) had accumulated coarse clastic material of the Lower Member of Cheremchovo Formation, coming from the Sayan and Baikal Mountains. The main river artery of the south of the Siberian Platform started from that area. It passed along the Eastern Sayan and in the Kansk Depression, turned towards the Angara-Vilyui plain, towards the Lena Sea [Timofeev, 1969]. The growth of the Altai-Sayan Mountains led to the peat accumulation end in the lacustrine-alluvial plains of the Achinsk and Kansk Basins (Fig. 5, points 50, 51). Sand and pebble material from the adjacent ridges accumulated here, forming the lower parts of the Middle Makarovo and Middle Pereyaslovka Subformations. The orogenic processes slightly influenced the sedimentation in the Kuznetsk Basin (Fig. 5, point 48). Sandy-pebble material was accumulated in its marginal parts.

The central part of the Kuznetsk Basin was palustrine and lacustrine-alluvial plain, where the Abasheva Formation sandstones, siltstones and coals were accumulated. At the same time, the Tuva Depression was formed (see Fig. 5, point 49), with lacustrine-alluvial sands, silts, and clays of the Eleget Formation deposited in its central part [Vinogradov, 1975].

At the beginning of the Late Pliensbachian, the growth of the Altai-Sayan Mountains had been slowed down, which led to the expansion of the lacustrine-alluvial plains adjacent to them, with intensive processes of waterlogging and peat accumulation. At the same time, industrial coal-bearing sediments of the Irkutsk (Upper Cheremchovo Subformation), Kansk (Middle Pereyaslovka Subformation), Achinsk (Upper part of the Middle Makarova Subformation) and Kuznetsk (Upper Osinovka Subformation) Basins were formed. At the end of Late Pliensbachian, the growth of the Altai-Sayan Mountains was resumed. As a result, in the depressions adjacent to the mountains, the speed of rivers increased and peat accumulation was stopped. A channel deposit has reached their maximum distribution. The Upper Makarova Subformation sandstones and siltstones of the Achinsk Basin, the Upper Pereyaslovka Subformation sandstones with layers of conglomerates of the Kansk Basin [Berzon, 2006], and the Lower Prisayan Subformation sandstones with lenses of siltstones and mudstones of the Irkutsk Basin were accumulated [Frolov, Mashchuk, 2018; Frolov et al., 2022].

In the Late Pliensbachian in the northeast of the Siberian Platform, the absolute altitudes of the Central Siberian, the Taimyr and Baikal-Patom Highlands were slightly decreased, while the area of the Angara-Vilyui Lowland increased. Because of the Stanovoy and Yablonovy ridges uplift, the Stanovoy Trough was formed in the South Yakutia, (Fig. 5, point 56). Within the trough, a system of lakes was formed, which accumulated the coarse clastic material carried in by the fast mountain rivers. Under these conditions, inequigranular sediments were accumulated in the basal part of Yukhtinskaya Formation. The sedimentation was accompanied by the volcanic activity [Syundyukov, 1974; Shabarov, 1981].

3.4. Toarcian age

Global climate warming occurred in the Early Toarcian, accompanied by a major marine transgression and oxygen deficiency in the ocean (Toarcian anoxic event – T-OAE) [Hallam, 2001; Lu et al., 2010; Gill et al., 2011; Dickson, 2017; Them et al., 2018]. This is evidenced by the wide distribution of marine black shales in the Northern Hemisphere [Jenkyne, 1988], the biotic crisis of marine fauna [Tremolada et al., 2005; Caswell et al., 2009; Mattioli et al., 2009], and changing of floras in Europe,

Asia, and Siberia [Vachrameev, 1991; Slater et al., 2019]. Black shales and bituminous limestones of the Sachrang Formation widespread on the area of southwestern and northeast Germany, northern Switzerland, northwestern Austria, southern Luxembourg and the Netherlands were accumulated in the deposited in an anoxic, or oxygen-depleted, deep water environment of the open sea [Littke et al., 1991; Röhl, Schmid-Röhl, 2005]. Black bituminous clays and mudstones of lagoonal and marine origin, with marine fauna, are characteristic of the Lower Toarcian of Western Siberia (Kiterbyut Horizon) [Shurygin et al., 2000].

Volcanic activity in the large igneous Caroo-Ferrar province in the Southern Hemisphere (Fig. 6) has led to an increase in atmospheric CO₂ [Svensen et al., 2007; Hesselbo, Pieńkowski, 2011; Ivanov et al., 2017]. This event caused the Early Toarcian climate optimum and T-OAE. Changes in terrestrial ecosystems at the Pliensbachian–Toarcian boundary correlate with the first impulse of volcanism in the Caroo-Ferrar province [Them et al., 2018; Xu et al., 2018]. Perturbations in the marine ecosystems coincide with the main phase of volcanism [Sell et al., 2014; Burgess et al., 2015; Moulin et al., 2017].

The Toarcian paleogeography and paleoclimate described below are shown in the diagrams, (Fig. 6) and (see Fig. 3, d), respectively.

3.4.1. Europe and East Greenland

Climate. A variety of data has been accumulated of the Europe Lower Toarcian has a controversial paleoclimatic interpretations. Geochemical and mineralogical studies of the Switzerland and Poland deposits corresponding to the T–OAE interval have shown that the subtropical climate in this area has changed towards warmer and more humid [Brański, 2012; Fantasia et al., 2018]. However, the pollen of *Classopollis*, *Chasmatosporites* and *Cerebropollenites* are indicators of warm and dry environment predominate in the Lower Toarcian palynological complexes of the Greenland [Koppelhus, Dam, 2003], England [Slater et al., 2019], Poland [Pieńkowski et al., 2016], Balkan Peninsula, North Caucasus and Dnieper-Donetsk Depression [Vachrameev, 1991]. The geochemical data suggest the existence of warm and humid climate with high precipitation rates during T–OAE. Palynological data testify that the Early Toarcian climate become drier. In this regard, a hypothesis for subtropical monsoonal climate in Europe with alternating extreme wet and dry seasons has been put forward [Slater et al., 2019] (Fig. 3, d).

Sea level. The largest Early Jurassic transgression took place in the Early Toarcian [Hallam, 1975]. The sea existed in the north of the modern Barents and Kara Seas expanded

to the south and reached the Baltic and Ural denudational areas [Zakharov et al., 1983]. In northwestern Europe, due

to seafloor rifting, the seaway between Scandinavia and Greenland has widened [Ziegler, 1975] (Fig. 6).



Fig. 6. Terrestrial paleogeography of the region under study in the Early Toarcian (Toarcian anoxic event interval)

Insert shows Early Jurassic global paleogeography (modified after Blakey, 2016). For legend see Fig. 2

The sea penetrated into the southeastern part of the Dnieper-Donetsk Depression (see Fig. 6, point 22) and

formed a shallow bay with clayish and sandy sediments accumulation. On the Scythian Plate and in the Kuma-

Manych Trough (Fig. 6, point 21) there was a shallow marine basin with sands and silts deposition. In the Crimean-Caucasian region, the transgression reached its maximum, but the basin remained shallow [Vinogradov, 1975].

Relief. A regular volcanic eruptions still existed in the Early Toarcian in Southern Sweden (Fig. 6, point 3). The pyroclastic material had dried out the soil and led to the emergence of xerophilic vegetation [Vajda et al., 2016].

In the Early Toarcian in the west of the East European Platform (Polish Basin) (Fig. 6, point 20) there was a large but shallow brackish bay. In these conditions the Ciechocinek Formation was formed. Its lower unit was deposited in a restricted offshore environment, while its upper unit predominate by shallower facies of small deltas, lagoons and marshes. After the sea regression in the Late Toarcian, an alluvial plain was formed, drained by meandering rivers with well-developed floodplains. Under these conditions, Borucice Formation was formed, represented mostly of fluvial sandstones, and lesser fine-grained deposits [Brański, 2012; Pieńkowski, 2004]. In the north of the platform, sedimentation took place only in the Timan-Ural area (Fig. 6, point 24). There was an alluvial plain adjoining the sea, transgressing from the north. On its area, the upper part of the Kharyaga Formation was formed, represented by sandy and silty-argillaceous deposits [Kalantar, Golubeva, 1976].

Due to the sea transgression the Transcaucasian masif denudation zone was reduced. Within the Dagestan area (Fig. 6, point 28) there was an extensive delta, where sandy and silty material was accumulated, coming from the plateau-like uplifts which located in the Scythian Plate south. To the southwest, deltaic deposits were replaced by marine sediments of the Central Caucasian Sea [Polyansky, 1989].

3.4.2. Central Asia

Climate. The Early Toarcian warming was clearly pronounced within this area. In Northern and Eastern Kazakhstan, the moderately warm climate has changed to a moderately subtropical one. At the same time, it had been remained humid, as evidenced by the maximum coal accumulation in this area. In Transcaspia, as well as in the Fergana, Karatau and Issyk-Kul depressions, the humid subtropical climate had changed to subtropical semiarid one (Fig. 3d). This is evidenced by palynological data and the rock variegated coloration [Vachrameev, 1991].

Relief. In the Toarcian, the growth of mountain systems slowed down on the Kazakhstan area. This was reflected in the sedimentation environments; the industrial coal-bearing strata formed in many depressions: upper parts of the Kushmurun (Northern Turgai), Sarykol (Maikyuben Basin), Dubovo (Karaganda Basin) and Kairlagan (Ili Depression) formations [Vinogradov,

1975]. In the shallow coastal part of the vast lakes located in the Turgai and Maikyuben Basins (Fig. 6, points 44, 46), stable persistent swamps have appeared, where thick peat bogs were formed. Coal of non-commercial thickness are known in the Issyk-Kul Depression and Karatau (Fig. 6, points 37, 39). Only in the Alakol alpine Depression (Fig. 6, point 40), due to the uplift of the Dzhungar Highland, was the area of boulders, pebbles and sands accumulation, represented by Kusak Formation [Buvalkin, 1978].

The Caspian Depression in the Toarcian had experienced a noticeable downwarping, which led to the transgression of the sea from Ciscaucasia. In the east, an alluvial plain with numerous lakes and swamps adjoined the sea (Emba and Ilek areas of Kazakhstan) (Fig. 6, points 30, 31). Sandstones and siltstones with rare coal seams were accumulated here (Chashkan Formations and the Lower Uzuntal Subformation). The Orsk Depression (Fig. 6, point 29), comprising the lake, was surrounded by highlands, has adjoined the Caspian Depression from the east. The terrigenous material supplied from the Southern Ural Highland was accumulated in the lake and has formed Katynadyr Formation, represented by sandstones with interlayers of conglomerates, siltstones, and clays [Vinogradov, 1975].

On the Turan Plate and in the Southern Tian-Shan, due to the relief smoothing of the source areas, fine-grained material entered the adjacent areas [Vinogradov, 1975]. In the southwest of the plate the transgression occurred, as a result, a coastal-marine and shallow-marine regime was established. On the Southern Mangyshlak area (Fig. 6, point 33), the boundaries of accumulative plain were expanded to the Karatau megaswall northeast. Sedimentation took place in lacustrine-marsh and deltaic landscapes (Lower Kokala Subformation and the third rhythm unit of the Ergozin Formation) [Kiritchkova, Nosova, 2014]. In the depressions, adjacent to the Southern Tian-Shan, the alluvial-lacustrine-palustrine sediments were formed. Palustrine landscapes were developed in the depressions of the Hissar Range (upper part of the Sanjar Formation), Eastern and Southern Fergana (Aldyar Formation and the Upper Sogul Subformation) (Fig. 6, points 35, 36, 38) [Vinogradov, 1975].

3.4.3. Siberia

Climate. The Early Toarcian warming led to a temperate subtropical climate in Siberia; it was intermediate between subtropical and temperate warm (see Fig. 3, d). In the Kuznetsk and Kansk-Achinsk Basins, coal accumulation stopped, and variegated layers of Tersyuk Formation and green-colored Ilan Formation indicating some aridization. Despite the influx of thermophilic plants from the Euro-Sinian region, the type of Siberian vegetation remained the same [Ilyina, 1985; Golbert, 1987; Vachrameev, 1991].

Thermophilic plants have penetrated into Siberia mainly along the sea coasts, and the flora changes were not significant within inland areas [Vakhrameev, 1987]. This observation is true for the northern Siberian basins: Irkutsk and South Yakutsk, where a high-latitude warm temperate climate still existed (see Fig. 3, *d*). In the Irkutsk Basin, warming did not manifest itself either in the composition of the macro- and palynofloras. This is due to the position of this region inside the continent far from the seas and the presence of mountain systems around it, which did not contribute to the climate softening [Frolov et al., 2022].

In the second half of the Early Toarcian, the climate cooling has begun. This is indicated by the disappearance of plants from the Euro-Sinian region [Ilyina, 1985] and a few finds of glendonites [Rogov et al., 2019]. One of the reasons for the cooling is the disconnection between the Siberian Seas and the Tethys through the Viking Corridor [Korte et al., 2015].

Sea level. At the beginning of the Early Toarcian, one of the largest Early Jurassic transgressions took place. In Western Siberia, the sea reached the southern part of the Koltogor-Nyuroi Trench, the southwestern ends of the Bolshaya Kheta Megasyneclise and the Middle Pur inclined trench. The West Siberian Sea was united with the East European and Lena Seas through the straits of the Kara Megasyneclise and the Yenisei-Khatanga Trough (see Fig. 6). In the east of Siberia, the Lena Sea advanced deeply into the Angara-Vilyui Trough and reached the modern Chona River [Zakharov et al., 1983; Devyatov et al., 2011; Kontorovich et al., 2013; Shemin et al., 2018].

At the end of the Early Toarcian and the beginning of Aalenian there was a regression. It led to the shallowing of the West Siberian Sea, which continued to communicate with the East European and Lena Seas. The sea level fall and the tectonic processes activation in the watersheds led to the influx of coarse-grained material into sedimentary basin. As a result, a deltaic, shallow-water coastal marine Nadoyakha Formation of sandstones, siltstones, and mudstones were formed [Kontorovich et al., 2013].

Relief. At the beginning of the Early Toarcian in Western Siberia, there was a coastal plain south of the sea basin (Fig. 6). Clayish sediments of Togur Formation accumulated in lakes, plant-filled ponds and swamps. To the south, they were replaced by alluvial deposits with significantly increasing sand component. The low-lying accumulative plain stretched in a narrow strip along the western, southwestern, and eastern boundaries of the sea basin. Lacustrine-alluvial, marsh, and floodplain landscapes developed on the plain. Plains separated by denuded land occurred in the southeastern part of the basin, in the Bakchar Mesodepression, Ust-Tym and East Paiduga Megadepression. Lacustrine and ingressive-marine clay deposits (Togur Formation) were accumulated

here. To the east, within the Teguldet Megasyneclise and East Paiduga Megadepression these deposits are replaced by the Ilan Formation, composed of greenish-gray mudstones and siltstones with sandstone interlayers [Kontorovich et al., 2013]. Formation was accumulated in a large lake or a series of lakes with an active input of sedimentary material [Vakulenko et al., 2010].

In Western Siberia, at the end of the Early Toarcian and at the beginning Aalenian, the area of the coastal plain, temporarily flooded by the sea, remained within its former boundaries. On the areas of the Nadym hemisyncline, South Nadym Megamonocline and northern parts of the Krasnoyarsk Megamonocline are represented by coastal-marine, deltaic, lagoonal, lacustrine-alluvial deposits (Upper Member of Kotukhta Formation, Sherkaly Formation, and Gorelaya Formation). They are composed by sandstones with interlayers of gravelites, rare mudstones and coals. The accumulative plain increased, occupying the southeastern part of the sedimentary basin on the 56th parallel north. Here, sands and silts with mudstone intercalations and several coal seams (Peshkov Formation) were formed in alluvial-lacustrine environments [Kontorovich et al., 2013].

In the Toarcian, the Altai-Sayan area were middle altitude mountains. Here, the sedimentation continued in the Kuznetsk Basin (Fig. 6, point 48), as the Tersyuk Formation sandstones and siltstones with interlayers of conglomerates, mudstones and coals. At the base of the formation, there is variegated sandstone layer, indicating the short-term aridization during the Early Toarcian warming [Kiritchkova et al., 1992]. On the Siberian Platform, source areas of the Taimyr and Central Siberian highlands and the Baikal Mountains become lower. The accumulation areas have expanded. The Angara-Vilyui Lowland reached its maximum, as an alluvial plain with slowly flowing rivers, lakes and swamps. In its central part, sandy-silty, less often coal-bearing sediments (upper parts of the Karabulinskaya and Chaikinskaya Formations) were accumulated, due to the supply of material from the Baikal-Patom and the Central Siberian highlands [Vinogradov, 1975]. In the Irkutsk Basin (Fig. 6, point 52), sandstones and siltstones with mudstones interlayers and coals of the Middle Prisayan Subformation were accumulated in plain rivers with developed floodplains environments. Floodplain environments were widespread, but the process of peat accumulation was interrupted by frequent floods [Frolov et al., 2022].

At the end of the Late Toarcian and beginning of the Aalenian, alluvial-lacustrine landscapes with wide palustrine floodplains and small lakes dominated in the Kansk Basin (Fig. 6, point 51) forming, greenish-gray sandstones and siltstones of the Ilan Formation [Berzon, 2006].

In the Toarcian, as a result of transgression in the Stanovoy Trough (see Fig. 6, point 56), a vast reservoir was formed, where silts and sands with pyrite nodules (upper

part of the Yukhtinskaya Formation) accumulated, carrying down from the Stanovoi Highland. Peatlands were rare due to unstable tectonic regime [Syundyukov, 1974; Vinogradov, 1975; Shabarov, 1981].

4. Conclusion

We represent an overview and integration of a complex of lithological, sedimentological, geochemical, paleontological, paleogeographic, paleobiogeographic, paleoclimatic data on the Lower Jurassic deposits of Europe, Central Asia and Siberia. As a result, the existing paleogeographic schemes were detailed, reflecting the contours of modern and ancient land, elements of the paleorelief (mountains, lowlands, lakes, etc.), and the volcanism areas in the Hettangian, Sinemurian, Pliensbachian, and Toarcian (see Fig. 2–6). Updated climate zoning charts have been compiled showing the locations of major lithological and paleontological indicators of climate (see Fig. 3).

During the Early Jurassic, the continental settings in Europe had a maximum development in the Hettangian, gradually replaced by marine ones, which reached a maximum in the Pliensbachian and Toarcian. The position of Europe, mainly in the middle paleolatitudes (30–60° N), ensured the existence of a subtropical, predominantly humid, climate and diverse Euro-Sinian flora. The greatest change in abiotic conditions occurred at the beginning of the Toarcian. At that time, the climate became monsoonal with alternating extremely wet and dry seasons.

For the Siberia located in the Early Jurassic at high latitudes, the existence of a high-latitude moderately warm climate is assumed. It is characterized by the annual photoperiodism (change of polar days and nights), which is associated with the seasonal deciduousness of the Siberian

flora dominants and the presence of annual rings in fossil wood. During the Hettangian and Sinemurian, Siberia was a denudational land surrounded by the Ural and Altai-Sayan mountains and the Baikal-Patom Highland. Continental basins occupied a limited area. In the Late Pliensbachian the climate became cooler. It is evidenced by the vast distribution of glendonites. We suppose the temperature below the 0 °C in the north of Siberia (northward from 80° N). A series of marine transgressions in the Pliensbachian and Toarcian occurred in the north of Siberia, while in the south the area of continental sedimentation reached its maximum. The Early Toarcian warming led to a temperate subtropical climate in Siberia; it was intermediate between subtropical and warm temperate. The climate warming is evidenced by the emerging of thermophilic plants from the Euro-Sinian region and variegated or green-colored deposits in a series of sedimentary basins.

In the Early Jurassic within the Central Asia two climatic zones (moderately warm and subtropical) and floral regions (Euro-Sinian and Siberian) came into contact. The southern part of the region adjoining to the Central Caucasian Sea was a coastal alluvial plain. There was a humid subtropical climate, which changed in the Early Toarcian to a hotter and drier one. The Kazakhstan area, located to the north, looked like a mountainous, dissected land with a series of depressions. There was a moderately warm climate, which led to the development of specific plants of the Siberian region. During the Toarcian warming, the local climate was transitional between subtropical and moderately warm.

The resulting sketch maps could be applied for biogeographic studies of the Early Jurassic terrestrial fauna and flora.

References

- Balanchivadze S.G. (2004) Formation of Lower and Middle Jurassic Coaliferous Sequences in the Northern Caucasus. *Lithology and Mineral Resources*, 39(1). pp. 70–85.
- Barbacka M. (2011) Biodiversity and the reconstruction of Early Jurassic flora from the Mecsek Mountains (southern Hungary). *Acta Palaeobotanica* 51(2). pp. 127–179.
- Barbacka M., Pacyna G., Feldman-Olszewska A., Ziaja J., Bodor E. (2014) Triassic-Jurassic flora of Poland; floristical support of climatic changes. *Acta Geologica Polonica*, 64(3). pp. 281–308. doi: 10.2478/agp-2014-0015
- Barrón E., Gómez J.J., Goy A., Pieren A.P. (2006) The Triassic-Jurassic boundary in Asturias (northern Spain): Palynological characterisation and facies. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 138. pp. 187–208. doi:10.1016/j.revpalbo.2006.01.002
- Berzon E.I. (2006) *Stratigrafiya i uglenosnost' yurkskikh otlozheniy Kansko-Achinskogo basseyna* [Stratigraphy and coal content of the Kansk-Achinsk Basin Jurassic sediments]. Krasnoyarsk: publishing house of "Krasnoyarskgeols'emka". 97 p. In Russian
- Blakey R.C. (2016) Global Jurassic Paleogeographic Map (180 MaBP): Mollweide. In: *Global Paleogeography and Tectonics in Deep Time* © 2016. Colorado Plateau Geosystems Inc.
- Brański P. (2011) Clay mineral composition in the Triassic and Jurassic deposits from the Polish Basin – a record of palaeoclimatic and palaeoenvironmental changes. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*. 444. pp. 15–32. In Polish with English abstract.
- Brański P. (2012) The mineralogical record of the Early Toarcian stepwise climate changes and other environmental variations (Ciechocinek Formation, Polish Basin). *Volumina Jurassica*. 10(10). pp. 1–24.
- Burgess S.D., Bowring S.A., Fleming T.H., Elliot D.H. (2015) High-precision geochronology links the Ferrar large igneous province with Early-Jurassic ocean anoxia and biotic crisis. *Earth Planet. Sci. Lett.* 415. pp. 90–99. doi: 10.1016/j.epsl.2015.01.037
- Buvalkin A.K. (1978) *Yurskiye otlozheniya Vostochnogo Kazakhstana* [Jurassic sediments of East Kazakhstan]. Alma-Ata: Publishing house "Nauka". 164 p. In Russian
- Cao W., Zahirovic S., Flament N., Williams S., Golonka J., Müller R.D. (2017) Improving global paleogeography since the late Paleozoic using paleobiology. *Biogeosciences*. 14. pp. 5425–5439. doi: 10.5194/bg-14-5425-2017

- Caswell B.A., Coe A.L., Cohen A.S. (2009). New range data for marine invertebrate species across the Early Toarcian (Early Jurassic) mass extinction. *Journal of the Geological Society*. 166. pp. 859–872. doi: 10.1144/0016-76492008-0831
- Chikhradze G.A. (1981) *Litologicheskie osobennosti nizhne- i sredneyurskikh otlozheniy yuzhnogo sklona Bol'shogo Kavkaza* [Lithological features of the Lower and Middle Jurassic sediments of the southern slope of the Greater Caucasus]. *Litologiya yurskikh i melovykh otlozheniy yuzhnogo sklona Bol'shogo Kavkaza* – [Lithology of Jurassic and Cretaceous sediments of the southern slope of the Greater Caucasus]. Tbilisi: Publishing house “Metsniereba”. pp. 5–41. In Russian
- Chumakov N.M., Zharkov M.A., German A.B., Doludenko M.P., Kalandadze N.N., Lebedev E.L., Ponomarenko A.G., Rautian A.S. (1995) *Klimaticheskie poyasa v seredine melovogo perioda* [Climatic zones in the Middle Cretaceous]. *Stratigraphy. Geological correlation*. 3(3). pp. 42–63. In Russian
- Demathieu G., Gand G., Sciau J., Freytet P. (2002) Les traces de pas de dinosaures et autres archosaures du Lias inférieur des Grands Causses, Sud de la France. *Palaeovertebrata*. 31(1–4). pp. 1–143.
- Dercourt J., Ricou L.E., Vrielynck B. (1993) *Atlas Tethys Palaeoenvironmental Maps*. Paris: Gauthier-Villars, CCGM. 260 p. <http://pi.lib.uchicago.edu/1001/cat/bib/2349016>
- Devyatov V.P., Nikitenko B.L., Shurygin B.N. (2011) *Paleogeografiya Sibiri v yurskom periode na yetapah osnovnykh perestroek* [Jurassic paleogeography of Siberia during major changeovers]. *Novosti paleontologii i stratigrafii* - News of Paleontology and Stratigraphy. 16–17. pp. 87–101. In Russian
- Dickson A.J. (2017) A molybdenum-isotope perspective on Phanerozoic deoxygenation events. *Nat. Geosci.* 10. pp. 721–726. doi: 10.1038/ngeo3028
- Fantasia A., Föllmi K.B., Adatte T., Spangenberg J.E., Montero-Serrano J.-C. (2018) The Early Toarcian oceanic anoxic event: Palaeoenvironmental and paleoclimatic change across the Alpine Tethys (Switzerland). *Global and Planetary Change*. 162. pp. 53–68. doi: 10.1016/j.gloplacha.2018.01.008
- Frolov A.O., Mashchuk I.M. (2018) *Yurskaya flora i rastitel'nost' Irkutskogo ugol'nogo basseyna* [Jurassic flora and vegetation of the Irkutsk Coal Basin]. Irkutsk: V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS Publishers. 541 p. In Russian.
- Frolov A.O., Ivantsov S.V., Afonin I.V., Mashchuk I.M., Lyalyuk K.P. (2022) Prisayan Formation (Lower and Middle Jurassic) of the Irkutsk Coal Basin: new data on litho- and phytostratigraphy. *Russian Geology and Geophysics*. 63(10). pp. 1133–1161. doi: 10.15372/GiG2021145
- Gill B.C., Lyons T.W., Jenkyns H.C. (2011) A global perturbation to the sulfur cycle during the Toarcian Oceanic Anoxic Event. *Earth Planet. Sci. Lett.* 312. pp. 484–496. doi: 10.1016/j.epsl.2011.10.030
- Gladenkov Yu.B. (2005) *Biosfera – ekosistema – biota v proshlom Zemli: paleobiogeograficheskie aspekty. K 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika V.V. Mennera* [Biosphere-ecosystem-biota in the Earth history: paleobiogeographic aspects. To the centenary of Academician V.V. Menner] Moscow: Publishing house “Nauka”. 512 p. In Russian
- Golonka J., Oszczytko N., Ślaczka A. (2000) Late Carboniferous-Neogene geodynamic evolution and paleogeography of the Circum-Carpathian region and adjacent areas. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*. 70. pp. 107–136.
- Golonka J., Ford D. (2000) Pangean (Late Carboniferous–Middle Jurassic) palaeoenvironment and lithofacies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 161. pp. 1–34.
- Golonka J. (2007) Late Triassic and Early Jurassic palaeogeography of the world. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 244. pp. 297–307.
- Golbert A.V. (1987) *Osnovy regional'noy paleoklimatologii* [The Fundamentals of Regional Paleoclimatology]. Moscow: Publishing house “Nedra”, 222 p. In Russian
- Hallam A. (1975) *Jurassic Environments*. Cambridge, Cambridge University Press, 284 p.
- Hallam A. (2001) A review of the broad pattern of Jurassic sea-level changes and their possible causes in the light of current knowledge. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 167. pp. 23–37. doi: 10.1016/S0031-0182(00)00229-7
- Herman A.B. (2004) *Pozdne-melovoy klimat Evrazii i Alyaski: po paleobotanicheskim dannym* [Late Cretaceous climate of Eurasia and Alaska based on palaeobotanical data]. Moscow: Publishing house “Nauka”, 157 p. In Russian
- Hesselbo S.P., Pieńkowski G. (2011) Stepwise atmospheric carbon-isotope excursion during the Toarcian Oceanic Anoxic Event (Early Jurassic, Polish Basin). *Earth Planet. Sci. Lett.* 301. pp. 365–372. DOI:10.1016/j.epsl.2010.11.021
- Ilyina V.I. (1985) *Palinologiya yury Sibiri* [Jurassic Palynology of Siberia]. Moscow: Publishing house “Nauka”, 237 p. In Russian
- Ivanov A.V., Meffre S., Thompson J., Corfu F., Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Demonerova E.I. (2017) Timing and genesis of the Karoo-Ferrar large igneous province: new high precision U–Pb data for Tasmania confirm short duration of the major magmatic pulse. *Chem. Geol.* 455. pp. 32–43. doi: 10.1016/j.chemgeo.2016.10.008
- Jenkyns H.C. (1988) The Early Toarcian (Jurassic) anoxic event: stratigraphic, sedimentary, and geochemical evidence. *Am. J. Sci.* 288. pp. 101–151.
- Kazmin V.G., Natapov L.M. (1988) *The Paleogeographic Atlas of Northern Eurasia*. Paleogeographic maps on the Palinspastic reconstruction. Moscow, 28 p. In Russian
- Kalantar I.Z., Golubeva L.P. (1976). *O nizhneyurskikh otlozheniyakh Pecherskoy sineklizy* [About the Lower Jurassic sediments of the Pechersk Syncline]. *Osobennosti geologicheskogo stroeniya severo-vostoka evropeiskoy chasti SSSR i severa Urala* - Features of the geological structure of the north-east of the European part of the USSR and the north of the Urals. Syktyvkar, pp. 93–98. In Russian.
- Kemper E., Schmitz H.H. (1981) Glendonite – Indicatoren des polarmarinen Ablagerungsmilieus. *Geologische Rundschau*. 70(2). pp. 759–773.
- Kirina T.I. (1966) *Stratigrafija nizhneyurskikh otlozheniy zapadnoy chasti Vilyuyskoy sineklizy* [Stratigraphy of Lower Jurassic sediments in the western part of the Vilyui syncline]. *VNIGRI Proceedings*. 249. pp. 18–71. In Russian.
- Kiritchkova A.I., Batyaeva S.K., Bystritskaya L.I. (1992) *Fitostratigrafiya yurskikh otlozheniy yuga Zapadnoy Sibiri* [Phytostratigraphy of the Jurassic sediments in the south of Western Siberia]. Moscow: Publishing house “Nedra”, 216 p. In Russian.
- Kiritchkova A.I., Kostina E.I., Bystritskaya L.I. (2005) *Fitostratigrafija i flora yurskikh otlozheniy Zapadnoy Sibiri* [Phytostratigraphy and Flora of the Jurassic of Western Siberia]. St. Petersburg: Publishing house “Nedra”, 378 p. In Russian.
- Kiritchkova A.I., Nosova N.V. (2014) The Lower Jurassic of the Eastern Pre-Caspian and the waters of the Middle Caspian: lithology, facies, taphonomy. *Stratigraphy. Geological correlation*. 22(5). pp. 36–51. doi: 10.7868/S0869592X14050056

- Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Ryzhkova S.V., Shurygin B.N., Vakulenko L.G., Gaideburova E.A., Danilova V.P., Kazanenkov V.A., Kim N.S., Kostyeva E.A., Moskvina V.I., Yan P.A. (2013) Jurassic paleogeography of the West Siberian sedimentary basin. *Russian Geology and Geophysics*. 54. pp. 747–779. doi: 10.1016/j.rgg.2013.07.002
- Kontorovich V.A., Belyaev S.Yu., Kontorovich A.E., Krasavchikov V.O., Kontorovich A.A., Suprunenko O.I. (2001) *Tektonicheskie struktury i istoriya evolyucii Zapadno-Sibirskoy geochineklizy v mezozoe i kaynozoe* [Tectonic structure and history of evolution of the West Siberian geosyncline in the Mesozoic and Cenozoic]. *Russian Geology and Geophysics*. 42(11–12). pp. 1832–1845. In Russian
- Koppelhus E.B., Dam G. (2003) Palynostratigraphy and palaeoenvironments of the Rævekløft, Gule Horn and Ostreaelv Formations (Lower–Middle Jurassic), Neill Klint Group, Jameson Land, East Greenland. *Geol. Surv. Den. Greenl.* 1. pp. 723–775. doi: 10.34194/geusb.v1.4688
- Korte C., Hesselbo S.P., Ullmann C.V., Dietl G., Ruhl M., Schweigert G., Thibault N. (2015) Jurassic climate mode governed by ocean gateway. *Nature Communications*. 6. doi: 10.1038/ncomms10015.
- Lu Z., Jenkyns H.C., Rickaby R.E.M. (2010) Iodine to calcium ratios in marine carbonate as a paleo-redox proxy during oceanic anoxic events. *Geology*. 38. pp. 1107–1110. doi: 10.1130/G31145.1
- Littke R., Leythaeuser D., Rullkötter J., Baker D.R. (1991). Keys to the depositional history of the Posidonia Shale (Toarcian) in the Hils Syncline, northern Germany. *Geological Society, London, Special Publications*. 58(1). pp. 311–333.
- Matthews K.J., Maloney K.T., Zahirovic S., Williams S.E., Seton M., Müller R.D. (2016) Global plate boundary evolution and kinematics since the late Paleozoic. *Global Planet. Change*. 146. pp. 226–250.
- Mattioli E., Pittet B., Petitpierre L., Mailliot S. (2009) Dramatic decrease of pelagic carbonate production by nannoplankton across the Early Toarcian anoxic event (TOAE). *Glob. Planet. Chang.* 65(3–4). pp. 134–145. doi: 10.1016/j.gloplacha.2008.10.018
- Mehlqvist K., Vajda V., Larsson L.M. (2009) A Jurassic (Pliensbachian) flora from Bornholm, Denmark – a study of a historic plant-fossil collection at Lund University, Sweden. *GFF*. 131(1–2). pp. 137–146. doi: 10.1080/11035890902975275
- Michalik J. (2011) Mesozoic paleogeography and facies distribution in the Northern Mediterranean Tethys from Western Carpathians view. *Iranian Journal of Earth Sciences*. 3. pp. 10–19.
- Morard A., Guex J., Bartolini A., Morettini E., de Wever P. (2003) A new scenario for the Dimerian-Toarcian transition. *Le Bulletin de la Société géologique de France*. 174(4). pp. 351–356.
- Moreau J.-D., Philippe M., Thévenard F. (2019) Early Jurassic flora from the city of Mende (Lozère): Synthesis of the historical sites, new sedimentological, palaeontological, and palaeoenvironmental data. *Comptes Rendus Palevol*. 18. pp. 159–177, doi: 10.1016/j.crpv.2018.07.002
- Moulin M., Fluteau F., Courtillot V., Marsh J., Delpech G., Quidelleur X., Gérard M. (2017) Eruptive history of the Karoo lava flows and their impact on early Jurassic environmental change. *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 122. pp. 738–772. doi: 10.1002/2016JB013354
- Neri M., Kustatscher E., Roghi G. (2018) Megaspores from the Lower Jurassic (Pliensbachian) Rotzo Formation (Monti Lessini, northern Italy) and their palaeoenvironmental implications. *Palaeobio Palaeoenv.* 98. pp. 97–110. doi: 10.1007/s12549-017-0314-z
- Odintsov M.M. (1967) *Yurskie kontinental'nye otlozheniya juga Sibirskoy platformy* [Jurassic continental deposits in the south of the Siberian platform]. Moscow: Publishing house “Nauka”, 336 p. In Russian
- Odintsov M.M. (1986) *Problemy geologii i prirodnye resursy Vostochnoy Sibiri* [Problems of geology and natural resources of Eastern Siberia]. Novosibirsk: Publishing house “Nauka”, 230 p. In Russian
- Odintsova M.M., Smirnova O.K., Bogdashova L.I. (1975) *Paleogeograficheskoe znachenie paleoekologicheskikh i paleotafonomicheskikh nabljudeniy v amazonosnykh osadkakh leyasa central'noy chasti Sibirskoy platformy* [Paleogeographic Significance of Palaeoenvironmental and Paleotaphonomic Observations in Diamondiferous Lias Sediments of the Central Part of the Siberian Platform]. *Materialy po biostratigrafii i paleogeografii Vostochnoy Sibiri* - Materials on biostratigraphy and paleogeography of East Siberia. Moscow: Publishing house “Nauka”, 4–17 p. In Russian
- Panov D.I., Shikhanov S.E., Belenev P.O. (2005) *Etapy razvitiya Russkoy plity v yurskom periode i ih korrelyatsiya s etapami razvitiya Kryma i Kavkaza* [Stages of evolution of Russian Plate during Jurassic and their correlation with stages of evolution of the Crimea and Caucasus]. *Bulleten' MOIP. Otd. geologii*. - Bulletin MOIP. Department of Geology. 80(1). pp. 26–36. In Russian
- Petersen H.I. (1993) Petrographic facies analysis of Lower and middle Jurassic coal seams on the island of Bornholm, Denmark. *International Journal of Coal Geology*. 22. pp. 189–216.
- Pieńkowski G. (2004) The epicontinental Lower Jurassic of Poland. *Polish Geological Institute Special Papers*. 12. pp. 1–122.
- Pieńkowski G., Hodob M., Ullmann C.V. (2016) Fungal decomposition of terrestrial organic matter accelerated Early Jurassic climate warming. *Sci. Rep.* 6. 31930. doi: 10.1038/srep31930
- Polyanskii B.V. (1989) *Mezozoyские угленосные формации северной окраины Мезотетиса* [Mesozoic Coaliferous Sequences at the Northern Margin of the Mesotethys]. Moscow: Publishing house “Nedra”, 192 p. In Russian
- Popa M., Van Konijnenburg-Van Cittert J.H.A. (2006) Aspects of Romanian Early-Middle Jurassic palaeobotany and polynopogy. Part VII. Successions and floras. *Progress in natural science*. 16. pp. 203–212.
- Popa M.E., Meller B. (2009) Review of Jurassic Plants from the Anina (Steierdorf) Coal Mining Area, South Carpathians, in the Collections of the Geological Survey of Austria. *Jb. Geol. B.-A.* 149(4). pp. 487–498.
- Rogov M.A., Zverkov N.G., Zakharov V.A., Arkhangelsky M.S. (2019) Marine reptiles and climates of the Jurassic and Cretaceous of Siberia. *Stratigraphy. Geological correlation*. 27(4). pp. 13–39. doi: 10.31857/S0869-592X27413-39
- Rogov M., Ershova V., Vereshchagin O., Vasileva K., Mikhailova K., Krylov A. (2021). Database of global glendonite and ikaite records throughout the Phanerozoic. *Earth Syst. Sci. Data*. 13. pp. 343–356. doi: 10.5194/essd-13-343-2021
- Röhl H. J., Schmid-Röhl A. (2005) Lower Toarcian (Upper Liassic) black shales of the Central European epicontinental basin: a sequence stratigraphic case study from the SW German Posidonia Shale. *Society for Sedimentary Geology*. 82. pp. 165–189.
- Ros-Franch S., Márquez-Aliaga A., Damborenea S.E. (2014). Comprehensive Database on Induan (Lower Triassic) to Sinemurian (Lower Jurassic) Marine Bivalve Genera and Their Paleobiogeographic Record. *Paleontological Contributions*. 8. pp. 1–219. doi: 10.17161/PC.1808.13433
- Ruesam W., Mayer B., Schwark L. (2019). Cryosphere carbon dynamics control early Toarcian global warming and sea level evolution. *Global and Planetary Change*. 172. pp. 440–453. doi: 10.1016/j.gloplacha.2018.11.003

- Saks V.N., Basov V.A., Dagis A.A., Dagis A.S., Zakharov V.A., Ivanova E.F., Meledina S.V., Mesezhnikov M.S., Nalnyaeva T.I., Shulgina N.I. (1971) *Paleozoogeografiya morey boreal'nogo poyasa v yure: i neokome* [Paleozoogeography of the boreal belt seas in the Jurassic and Neocomian]. *Problemy obshhey i regional'noy geologii* - Problems of general and regional geology. Novosibirsk: Publishing house "Nauka", pp. 179–211. In Russian
- Scotese C.R. (2014) Atlas of Jurassic Paleogeographic Maps, PALEOMAP Atlas for ArcGIS, V. 4, The Jurassic and Triassic, Maps 32–42, Mollweide Projection, PALEOMAP Project, Evanston, IL.
- Scotese C.R. (2016) PALEOMAP PaleoAtlas for GPplates and the PaleoData Plotter Program. PALEOMAP Project. Technical Report. doi: 10.13140/RG.2.2.34367.00166.
- Sell B., Ovtcharova M., Guex J., Bartolini A., Jourdan F., Spangenberg J.E., Vincente J., Schaltegger U. (2014) Evaluating the temporal link between Karoo LIP and climatic–biologic events of the Toarcian stage with high-precision U–Pb geochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.* 408. pp. 48–56. doi: 10.1016/j.epsl.2014.10.008
- Seslavinsky K.B. (1979) *Yuzhno-Anyuyskaya sutura (Zapadnaya Chukotka)* [South Anyui Suture (Western Chukotka)]. *Dokl. AN SSSR* - Reports of the USSR Academy of Sciences, 249(5). pp. 1181–1185. In Russian
- Shabarov N.V. (1981) *Yuzhnoyakutskaya ugleonosnaya formatsiya* [South Yakutian coal formation]. Leningrad: Publishing house "Nedra", 191 p. In Russian
- Shemin G.G., Vernikovskiy V.A., Moskvina V.I., Vakulenko L.G., Deev E.V., Pervukhina N.V. (2018). *Litologo-paleogeograficheskie rekonstrukcii yurskogo perioda severa Zapadno-Sibirskogo osadochnogo basseyna* [Lithologic and paleogeographic reconstruction of Jurassic system in West Siberian sedimentary basin]. *Geologiya nefti i gaza* - Oil and gas geology. 6. pp. 35–61. In Russian. doi: 10.31087/0016-7894-2018-6-35-61
- Shurygin B.N., Nikitenko B.L., Devyatov V.P., Ilyina V.I., Meledina S.V., Gaideburova E.A., Dzyuba O.S., Kazakov A.M., Mogucheva N.K. (2000). *Stratigrafiya neftegazonosnykh basseynov Sibiri. Yurskaya sistema*. [Stratigraphy of Petroleum Basins in Siberia in 9 Books. The Jurassic]. Novosibirsk: Publishing house SO RAN, Filial "Geo", 480 p. In Russian
- Sibuet J.-C., Rouzo S., Srivastava S., Dehler S. (2012) Plate tectonic reconstructions and paleogeographic maps of the central and North Atlantic oceans. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 49(12). pp. 1395–1415. doi: 10.1139/e2012-071
- Sinityn V.M. (1963) *Istoriya nizhnemeyozoyevskogo uglenakopleniya v Kazakhstane* [The history of Lower Mesozoic coal accumulation in Kazakhstan]. Part III. Moscow – Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 284 p. In Russian
- Slater S.M., Twitchett R.J., Danise S., Vajda V. (2019) Substantial vegetation response to Early Jurassic global warming with impacts on oceanic anoxia. *Nat. Geosci.* 12. pp. 462–467. doi: 10.1038/s41561-019-0349-z
- Smith A.G., Smith D.G., Funnell B.M. (1994) Atlas of Mesozoic and Cenozoic Coastlines. Cambridge Univ. Press, New York, 99 p.
- Sokolov S.D., Didenko A.N., Grigoriev V.N., Alekseyutin M.V., Bondarenko G.E., Krylov K.A. (1997) *Paleotektonicheskie rekonstrukcii Severo-Vostoka Rossii: problemy i neopredelennosti* [Paleotectonic Reconstructions of the North-East of Russia: Problems and Uncertainties]. *Geotektonika* [Geotectonics]. 6. pp. 72–90. In Russian
- Syunduykov Sh.A. (1974) *Usloviya nakopleniya ugleonosnykh otlozheniy v central'noy chasti Yuzhno-Yakutskogo basseyna* [Conditions for of coal-bearing the accumulation in the central part of the South Yakutsk Basin]. Novosibirsk: Publishing house "Nauka", 78 p. In Russian
- Surlyk F., Callomon J.H., Bromley R.G., Birkenlund T. (1973) Stratigraphy of the Jurassic-Lower Cretaceous sediments of Jameson Land and Scoresby land East Greenland. *Grönlands Geologiske Undersøgelse*. 105. pp. 1–77.
- Surlyk F., Noe-Nygaard N. (1986) Hummocky cross-stratification from the Lower Jurassic Hasle Formation of Bornholm, Denmark. *Sedimentary Geology*. 46. pp. 259–273.
- Surlyk F. (2003) The Jurassic of East Greenland: a sedimentary record of thermal subsidence, onset and culmination of rifting. *The Jurassic of Denmark and Greenland. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin*. 1. pp. 659–722. doi: 10.34194/geusb.v1.4674
- Svensen H., Planke S., Chevallier L., Mørch-Sørensen A., Corfu F., Jamveit B. (2007). Hydrothermal venting of greenhouse gases triggering Early Jurassic global warming. *Earth Planet. Sci. Lett.* 256. pp. 554–566. doi: 10.1016/j.epsl.2007.02.013
- Them T.R., Gilic B.C., Caruthers A.H., Gerhardt A.M., Gröckel D.R., Lyons T.W., Marroquín S.M., Nielsen S.G., Alexandrei J.P.T., Owens J.D. (2018) Thallium isotopes reveal protracted anoxia during the Toarcian (Early Jurassic) associated with volcanism, carbon burial, and mass extinction. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*. 115. pp. 6596–6601. doi: 10.1073/pnas.1803478115
- Timofeev P.P. (1969) *Geologiya i facii jurskoy ugleonosnoy formatsii Yuzhnoy Sibiri* [Geology and Facies of Jurassic coal measures in Southern Siberia]. Moscow: Publishing house "Nauka", 459 p. In Russian
- Tremolada F., van de Schootbrugge B., Erba E. (2005) Early Jurassic schizosphaerellid crisis in Cantabria, Spain; Implications for calcification rates and phytoplankton evolution across the Toarcian oceanic anoxic event. *Paleoceanography*. 20. PA2011. doi: 10.1029/2004PA001120
- Vajda V., Wigforss-Lange J. (2009) Onshore Jurassic of Scandinavia and related areas. *GFF*. 131(1–2). pp. 5–23, doi: 10.1080/11035890902975309
- Vajda V., Linderson H., McLoughlin S. (2016) Disrupted vegetation as a response to Jurassic volcanism in southern Sweden. *Mesozoic Biotas of Scandinavia and its Arctic Territories. Geological Society, London, Special Publications*. 434. pp. 127–147.
- Vakhrameev V.A., Dobruskina I.A., Zaklinskaya E.D., Meyen S.V. (1970) *Paleozoyiskie i mezozoyiskie flory Evrazii i fitogeografiya etogo vremeni* [Palaeozoic and Mesozoic floras of Eurasia and Phytogeography of this time]. Moscow: Publishing house "Nauka", 208 p. In Russian.
- Vakhrameev V.A. (1987) Climates and the distribution of some gymnosperms in Asia during the Jurassic and Cretaceous. *Rev. Palaeobot. Palynol.* 51. pp. 205–212. doi: 10.1016/0034-6667(87)90030-3
- Vakhrameev V.A. (1991) Jurassic and Cretaceous Floras and Climates of the Earth. Cambridge University Press, Cambridge, 340 p.
- Vakulenko L.G., Aksenova T.P., Yeltsov I.N., Zamirailova A.G., Yan P.A. (2010) *Litologo-facial'naya harakteristika yurskikh otlozheniy yuzhnoy chasti Pred'eniseyskoj neftegazonosnoy subprovincii Zapadnoy Sibiri* [A lithofacies description of Jurassic sediments in the South of the Predenisei Petroleum Subprovince, West Siberia]. *Russian Geology and geophysics*. 51(4). pp. 425–436. In Russian

- Vinogradov A.P. (1975) *Ob'yasnitel'naya zapiska k atlasu litologo-paleogeograficheskikh kart SSSR (v chetyreh tomah)* [Paleogeography of the USSR. Explanatory note to the atlas of lithological and paleogeographic maps of the USSR (in four volumes)]. Moscow: Publishing house "Nedra", Vol. 3. 200 p. In Russian
- Vörös A. (2001) Paleobiogeographical analysis: a tool for the reconstruction of Mesozoic Tethyan and Penninic basins. *Acta Geol. Hungarica*. 44(2–3). pp. 145–158.
- Westermann G.E.G. (1977) Comments to Hallam's conclusion regarding the first marine connection between the eastern Pacific and western Tethys. *Milwaukee Publ. Mus. Spec. Publ. Biol. Geol.* 2. pp. 35–38.
- Xu W., Niocaill C.M., Ruhl M., Jenkyns H.C., Riding J.B., Hesselbo S.P. (2018) Magnetostratigraphy of the Toarcian Stage (Lower Jurassic) or the Llandbedr (Mochras Farm) Borehole, Wales: basis for a global standard and implications for volcanic forcing of palaeoenvironmental change. *J. Geol. Soc.* 175. pp. 594–604. doi: 10.1144/jgs2017-120
- Zakharov V.A., Mesezhnikov M.S., Ronkina Z.Z., Repin Yu.S., Chirva S.A., Shurygin B.N., Basov V.A., Vereninova T.A., Kalacheva E.D., Kravets V.S., Meledina S.V., Nalnyaeva T.I., Paraketsov K.V., Polubotko I.V., Sey I.I. (1983) *Paleogeografiya severa SSSR v yurskom periode* [Jurassic Paleogeography of Northern USSR]. Novosibirsk: Publishing house "Nauka", 191 p. In Russian
- Zakharov V.A., Rogov M.A., Bragin N.Yu. (2010) *Mezozoy rossiyskoy Arktiki: stratigrafiya, biogeografiya, paleogeografiya, paleoklimat* [Russian Arctic During the Mesozoic: Stratigraphy, Biogeography, Paleogeography, Paleoclimate]. Structure and Evolution of the Lithosphere. Moscow: Paulsen. pp. 331–383. In Russian
- Ziegler P.A. (1975) The geological evolution of the North Sea area in the tectonic framework of North-Western Europe. *Norges geol. Unders.* 316. pp. 1–27.
- Ziegler P.A. (1988) Evolution of the Arctic-North Atlantic and the Western Tethys. *American Association Petroleum Geologists Memoir*. 43. pp. 1–198.
- Zinovenko G.V., Monkevich K.N. (1995) *Paleogeografiya zapada Vostochno-Evropejskoy platformy v yurskiy period na fone global'nyh sobytij* [Jurassic paleogeography of the EEP West in the context of Global Events]. *Litosfer - Lithosphere*. 2. pp. 108–119. In Russian

Information about the authors:

Frolov A.O., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Institute of the Earth's crust SB RUS, Irkutsk, Russia.

E-mail: frolov88-21@yandex.ru

Mashchuk I.M., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Institute of the Earth's crust SB RUS, Irkutsk, Russia.

E-mail: samaropsis@yandex.ru

Ivantsov S.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Assistant Professor of Paleontology and Historical Geology Department, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: stepan_ivantsov@mail.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

Информация об авторах:

Фролов А.О., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: frolov88-21@yandex.ru

Машук И.М., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: samaropsis@yandex.ru

Иванцов С.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра палеонтологии и исторической геологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: stepan_ivantsov@mail.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.02.2024; одобрена после рецензирования 01.06.2024; принята к публикации 27.11.2024

The article was submitted 16.02.2024; approved after reviewing 01.06.2024; accepted for publication 27.11.2024

МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ

Научная статья

УДК 549.08

doi: 10.17223/25421379/33/3

КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ПРИРОДЫ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ЦЕОЛИТОВ

Нина Николаевна Борозновская¹, Татьяна Степановна Небера²,
Мария Олеговна Хрущева³, Луиза Алексеевна Зырянова⁴



^{1, 2, 3, 4} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ boroznovskaya@mail.ru

² tsnebera@mail.ru

³ masha2904@mail.ru

⁴ luiza@ggf.tsu.ru

Аннотация. Детально исследованы люминесцентные свойства ряда цеолитов (гармотома, натролита, сколецита, ломонтита, стеллерита). Установлена зависимость люминесцентных характеристик рассмотренных цеолитов от изоморфных кремне-алюминиевых замещений. Это определяет вхождение компенсаторов, участвующих в образовании центров люминесценции, которые являются, в свою очередь, носителями генетической информации. Индивидуальность люминесцентных характеристик данных цеолитов может использоваться в диагностических целях и генетических построениях при изучении пород-коллекторов нефтегазоносных провинций Западной Сибири и других регионов.

Ключевые слова: рентгенолюминесценция, рентгеновская дифрактометрия, спектроскопия, люминоген, цеолиты, центры люминесценции, интенсивность свечения

Источник финансирования: исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, госзадание № 0721-2020-0041.

Для цитирования: Борозновская Н.Н., Небера Т.С., Хрущева М.О., Зырянова Л.А. Кристаллохимический аспект природы люминесценции цеолитов // Геосферные исследования. 2024. № 4. С. 44–54. doi: 10.17223/25421379/33/3

Original article

doi: 10.17223/25421379/33/3

CRYSTALLOCHEMICAL ASPECT OF ZEOLITES LUMINESCENCE

Nina N. Boroznovskaya¹, Tatyana S. Nebera², Maria O. Khrushcheva³, Luiza A. Zyryanova⁴

^{1, 2, 3, 4} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹ boroznovskaya@mail.ru

² tsnebera@mail.ru

³ masha2904@mail.ru

⁴ luiza@ggf.tsu.ru

Abstract. The luminescence of a number of zeolites (garmotome, natrolite, scolecite, lomontite, stelerite) has been studied. Their ability to detect luminescence at optical long wavelengths of 200–800 nm and longer wavelengths upon detection of excitation manifestations was found. X-ray luminescence (XRL) spectra are strictly individual for each of the zeolites. Ion-sieve effect, limiting limited isomorphic substitutions in zeolites, slowing down the limited stress associated with impurity ions. Both intrinsic defects (oxygen excitable states) and impurity ions of the Mn^{2+} type, replacing Na^{+} in some cases of the zeolite, and Fe^{3+} in the Si or Al position are responsible for the spectral composition of complex zeolites. The very weak luminescence of Mn^{2+} , or its complete absence in calcium-containing zeolites, is explained by the fact that the alkaline conditions under which zeolites accumulate can prevent isomorphic substitution of Ca^{2+} for Mn^{2+} . An exception is natrolite, in which intense Mn^{2+} XRL can be a threat with the substitution of Na^{+} for Mn^{2+} . Luminescence in the near light and the visibility of the presence of crystal chemical features are the result of isomorphic silicon-aluminum substitutions and depend on the Si/Al ratio: the more Al, the more opportunities the compensators have to find in the centers of luminescence formation. The XRL centers associated with the oxygen vacancy (280 nm) reveal information about the oxidative potential of the mineral formation medium. The luminescence intensity of a number of impurity centers of luminescence of zeolites can show an indicator of the level of acidity-alkalinity and oxidative separation of the

mineral-forming medium. The individuality of luminescent characteristics with a high sensitivity of the X-ray luminescence method can be implemented for diagnostic purposes and genetic structures in the study of reservoir rocks in oil and gas provinces of vast territories and other regions.

Keywords: X-ray luminescence, X-ray diffractometry, spectroscopy, luminogen, zeolites, luminescence centers, luminescence intensity

Source of financing: The research was carried out with the financial support of the Russian Ministry of Science and Higher Education, grant No. 0721-2020-0041.

For citation: Boroznovskaya N.N., T.S. Nebera T.S., Khrushcheva M.O., Zyryanova L.A. (2024) Crystallochemical aspect of zeolites luminescence. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 44–54. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/33/3

Введение

Цеолиты – группа минералов, широко распространенная в природе (до сотни видов) [Пеков и др., 2004; Ulmanu, 2012]. Цеолиты активно используются во многих промышленных отраслях в качестве адсорбентов, ионообменников, молекулярных сит, катализаторов и т.д. [Беляев, Юрков, 1999]. Их генетическая природа весьма разнообразна [Коссовская, 1975; Karakaya et al., 2015]. Традиционно эти минералы рассматривались в качестве продуктов постмагматического гидротермального и позднемагматического процессов [Ловская и др., 2002]. Доказано их участие (совместно с глинистыми минералами) в осадочном процессе [Япаскурт, 1989]. По выражению О.В. Япаскурта [1989], цеолиты являются приспособленцами к фациальной среде и стадийности литогенеза. В настоящее время имеется много научных трудов, посвященных изучению физических свойств цеолитов [Пеков и др., 2001; Pekov et al., 2008; Ловская, Пеков, Конюкова, 2009; Ostrooumov et al., 2012; Elizondo-Villarreal et al., 2016; Górniak et al., 2017; Payana et al., 2017]. Однако по-прежнему существует проблема их точной диагностики, поскольку их оптические признаки недостаточно выразительны, а мелкоагрегатность делает их внешне сходными с криптозернистыми агрегатами кремнезема и полевых шпатов, особенно в полиминеральных агрегатах.

При изучении многофазных пород-коллекторов становится актуальной диагностика цеолитов, поскольку минералы этой группы, как оказалось, принадлежат к числу наиболее информативных для стадийных построений. Кроме того, цеолитизация пород-коллекторов влияет на фильтрационно-емкостные свойства, снижая их. Методами рентгенофазового анализа не всегда возможна диагностика цеолитов в многофазной системе, которую представляют из себя породы коллекторов нефтегазоносных месторождений.

По геофизическим данным цеолитизацию также невозможно выявить. Поэтому возникает необходимость поиска дополнительных методов их диагностики, какими могут оказаться спектроскопические.

Ранее были изучены люминесцентные свойства глинистых минералов, совместно с которыми часто встречаются цеолиты [Boroznovskaya et al., 2017]. Учитывая вышеизложенное, предложено использовать в качестве диагностики цеолитов методы люминесцентной спектроскопии. Были проведены детальные люминесцентные исследования имеющихся в наличии цеолитов.

Цель данной работы – на фоне кристаллохимических особенностей изучить люминесцентные свойства ряда цеолитов для выявления возможности использования их в диагностических целях и как источников генетической информации. Необходимо отметить, что люминесценция цеолитов, как и глинистых минералов, тем более рентгенолюминесценция, ранее систематически не исследовались. Имеются только редкие упоминания об оранжевой люминесценции натролита [Горобец, Рогожин, 2001], голубом свечении некоторых цеолитов и фотолюминесценции цеолитов неизвестного состава [Горобец, Рогожин, 2001]. Цеолиты по химическому составу и структуре близки к полевым шпатам, люминесценция которых детально изучена и широко используется как для диагностики, так и в генетических построениях [Boroznovskaya, 1989; Gaft et al., 2005; Poolton et al., 2006]. Поэтому можно полагать, что и люминесценция цеолитов может быть востребована как в диагностических целях, так и при выявлении их типоморфизма.

Объект исследования

Цеолиты принадлежат к классу каркасных водных алюмосиликатов, по структуре и химическому составу близких к полевым шпатам. Однако их структура обладает рядом специфических черт, отличающих их от других каркасных алюмосиликатов и придающих им особые свойства. Как известно [Годовиков, 1975], основу структуры цеолитов составляют кремне- и алюмоокислородные тетраэдры, сочленяющиеся между собой через общие кислородные вершины и образующие трехмерный каркас (рис. 1).

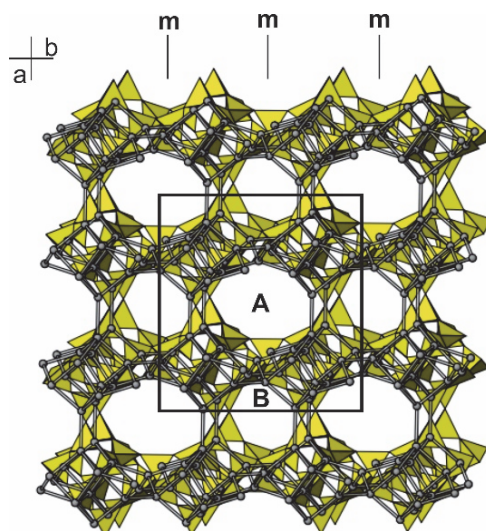


Рис. 1. Пример структуры цеолитов в проекции на плоскость ab с разными размерами и конфигурацией сечения каналов А и В

Атомы Al и Si находятся в центрах тетраэдров с атомами O в их вершинах. Прямоугольник – элементарная ячейка структуры. $A = 0,6 \times 0,4$ нм, $B = 0,4 \times 0,4$ нм. Символ m – плоскость симметрии

Fig 1. The example of zeolite structure with different sizes and shapes of the A and B channels cross section in projection onto the ab plane

Atoms of Al and Si are located in the centres of the tetrahedra with oxygen atoms in their vertexes. The rectangular is the unit cell. $A = 0.6 \times 0.4$ nm, $B = 0.4 \times 0.4$ nm. The symbol m stands for the plane of symmetry

Основной особенностью структуры цеолитов, которая отличает их от полевых шпатов, является индивидуальное практически для каждого минерального вида количество в элементарной ячейке кремне- и алюмоокислородных тетраэдров, объединенных в кольца. Поэтому структура каждого цеолита отличается конфигурацией и размерами пор и каналов в каркасе, что определяется количеством объединяющихся в кольца алюмо-, кремнеокислородных тетраэдров (см. рис. 1). При описании структур цеолитов выделяют также дополнительные структурные геометрические мотивы, образующиеся при неравномерной пространственной группировке кремне- и алюмоокислородных тетраэдров. Это изометричный, субслоистый, субцепочечный мотивы. В порах и каналах каркаса цеолитов располагаются внекаркасные катионы, главным образом щелочные ионы и Ca^{2+} , компенсирующие как и в полевых шпатах отрицательный заряд каркаса. Кроме того, в порах и каналах каркаса располагаются молекулы воды, получившей название «цеолитной». Такое положение молекул воды в структуре обеспечивает цеолитам способность к дегидратации-регидратации без разрушения каркаса и структуры в целом. По кристаллохимическим особенностям вода в цеолитах неоднородна [Годовиков, 1975; Бетехтин 2008].

Другая характерная особенность многих структур цеолитов – их способность к изо- и гетеровалентному изоморфизму, что обеспечивает легкость, с которой

происходит обмен внекаркасными катионами с окружающей средой. Na^+ , например, может заместиться Ca^{2+} , и наоборот. В то же время молекулы, размер которых превышает диаметр входного окна в пору, не способны адсорбироваться цеолитами и не могут принять участия в изоморфных замещениях.

Нами исследовалась группа цеолитов из коллекции Минералогического музея им. И.К. Баженова Томского государственного университета (гармотом, натролит, сколецит, ломонтит, стеллерит), часть из которых участвует в качестве составляющей осадочных пород коллекторов нефтегазоносной площади Западной Сибири (рис. 2).

Наше внимание привлек также апофиллит из коллекции минералогического музея. Это обусловлено тем, что апофиллит некоторое время рассматривался в группе цеолитов, поскольку в субслоистой структуре апофиллита подобно цеолитам появляются квадратные и восьмиугольные полости и участвует кристаллизационная вода.

В настоящее отнесен к субслоистым галогенидосиликатам [Годовиков, 1975], а термин «апофиллит» с учетом химического состава обозначен ИМА как групповое название для трех минеральных видов: апофиллит-(KF) (флуорапофиллит или фторапофиллит) $\text{KCa}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}\text{F} \times 8\text{H}_2\text{O}$; апофиллит-(KOH) (гидроксияпофиллит) $\text{KCa}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH},\text{F}) \times 8\text{H}_2\text{O}$; апофиллит-(NaF) (натроапофиллит) $\text{NaCa}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH},\text{F}) \times 8\text{H}_2\text{O}$.

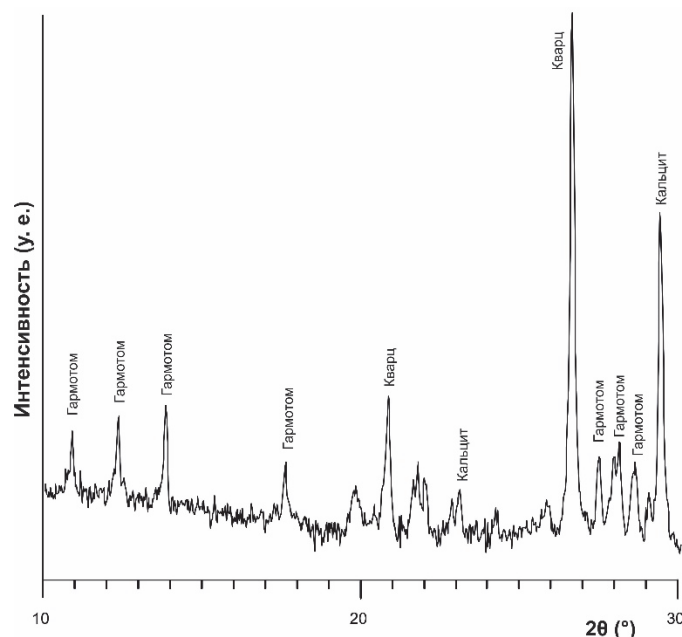


Рис. 2. Фрагмент дифрактограммы образца из осадочной породы-коллектора нефтегазоносной площади Западной Сибири

Fig. 2. The fragment of the diffraction pattern for a sample from the reservoir rock of West Siberia

Аппаратура и методика выполнения анализов

Основными методами исследования являются рентгеноструктурный и люминесцентный анализы. Рентгенограммы получены на дифрактометре X'Pert PRO. Эксперимент выполнялся при нормальных условиях по геометрии Брегга – Брентано с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Напряжение на трубке 40 кВ, ток 30 мА. Морфология кристаллов изучалась на растровом электронном микроскопе TESCAN VEGA II LMU (оператор Е.В. Корбовяк), оснащенным энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 (Si (Li)-детектор). Непроводящий образец с естественным сколом напылялся слоем углерода толщиной 25 ± 5 нм. При определении химического состава в точке рабочее ускоряющее напряжение составляло 15 кВ и более, ток пучка – 5 мА, размер пучка – 500 Å.

Спектры рентгенолюминесценции (РЛ) снимались с помощью установки, собранной на базе монохроматора МДР-12 с компьютерным управлением. Источником возбуждения служила рентгеновская

трубка БСВ-2 от аппарата UPC-55 с Мо – антикатодом ($U = 50$ кВ, $I = 10$ мА). Спектральная область от 200 до 800 нм охватывалась благодаря использованию ФЭУ-100 и сменных дифракционных решеток с рабочими областями в диапазонах 200–500 нм и 350–1 000 нм. Для регистрации диапазона 600–800 нм использовался обрезаящий фильтр Thorlabs FELH0600. Измерения проводились непрерывным сканированием выбранного спектрального диапазона со скоростью 1 нм/с. Интенсивность излучения измерялась в относительных единицах. Воспроизводимость спектров контролировалась повторными замерами. Спектры РЛ снимались и рассчитывались по методике, описанной ранее [Boroznovskaya, Nebera, 2018].

Результаты

Состав и названия исследуемых цеолитов уточнены по результатам рентгеноструктурного анализа: по основным рефлексам и их интенсивностям на дифрактограммах с использованием базы данных PDF 4 Minerals 2022 компании ICDD (таблица, рис. 3).

Рентгенографические и кристаллохимические характеристики цеолитов

Radiographic and crystallochemical characteristics of zeolite minerals

Минерал, химическая формула, место нахождения	Основные рефлексy (Å), их интенсивность и параметры элементарной ячейки	Номер карточки базы данных PDF-4 Minerals 2022 (ICDD)
Апофиллит $\text{NaCa}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})_2\text{F} \times 8\text{H}_2\text{O}$ Место нахождения неизвестно	3,92 ₁₀ ; 2,96 ₇ ; 2,47 ₃ ; 4,51 ₂ $a_0=8,9324$, $b_0=8,8616$, $c_0=15,7683$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	[00-007-0170]

Минерал, химическая формула, место нахождения	Основные рефлексы (Å), их интенсивность и параметры элементарной ячейки	Номер карточки базы данных PDF-4 Minerals 2022 (ICDD)
Гармотом $\text{Ba}_2\text{Ca}(\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}) \times 12\text{H}_2\text{O}$ Андрейсберг, Германия (коллекция Кранца)	7,14 ₁₀ ; 8,08 ₇ ; 6,37 ₇ ; 5,02 ₅ ; 4,08 ₆ ; 3,24 ₆ ; 3,16 ₈ ; 4,08 ₆ ; 3,24 ₆ ; 3,16 ₈ $a_0=9,8564$, $b_0=14,1172$, $c_0=8,6827$ $\alpha=\gamma=90^\circ$, $\beta=124.64^\circ$	[01-089-8597]
Натролит $\text{Na}_2(\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}) \times 2\text{H}_2\text{O}$ Хибины, Россия	6,50 ₁₀ ; 5,86 ₆ ; 4,65 ₄ ; 4,14 ₅ $a_0=18,7272$, $b_0=18,6507$, $c_0=6,6343$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	[04-011-7181]
Сколецит $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}) \times 3\text{H}_2\text{O}$ Исландия (коллекция Кранца)	6,59 ₁₀ ; 5,84 ₉ ; 4,40 ₆ ; 4,72 ₆ $a_0=9,8372$, $b_0=18,9207$, $c_0=6,5180$ $\alpha=\gamma=90^\circ$, $\beta=110,0139^\circ$	[01-075-1456]
Стеллерит $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_7\text{O}_{18}) \times 7\text{H}_2\text{O}$ Место нахождения неизвестно	9,06 ₁₀ ; 4,05 ₅ ; 3,02 ₃ $a_0=13,5836$, $b_0=18,2061$, $c_0=17,8250$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	[04-017-1326]
Ломонтит $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}) \times 4\text{H}_2\text{O}$ Крым, Россия	9,45 ₁₀ ; 6,85 ₃ ; 5,08 ₂ ; 4,17 ₄ ; 3,63 ₃ $a_0=14,6780$, $b_0=13,1627$, $c_0=7,5019$ $\alpha=\gamma=90^\circ$, $\beta=110,6406^\circ$	[01-080-6150]

Примечание. ICDD – международный центр дифракционных данных.

Note. ICDD – International Centre for Diffraction Data.

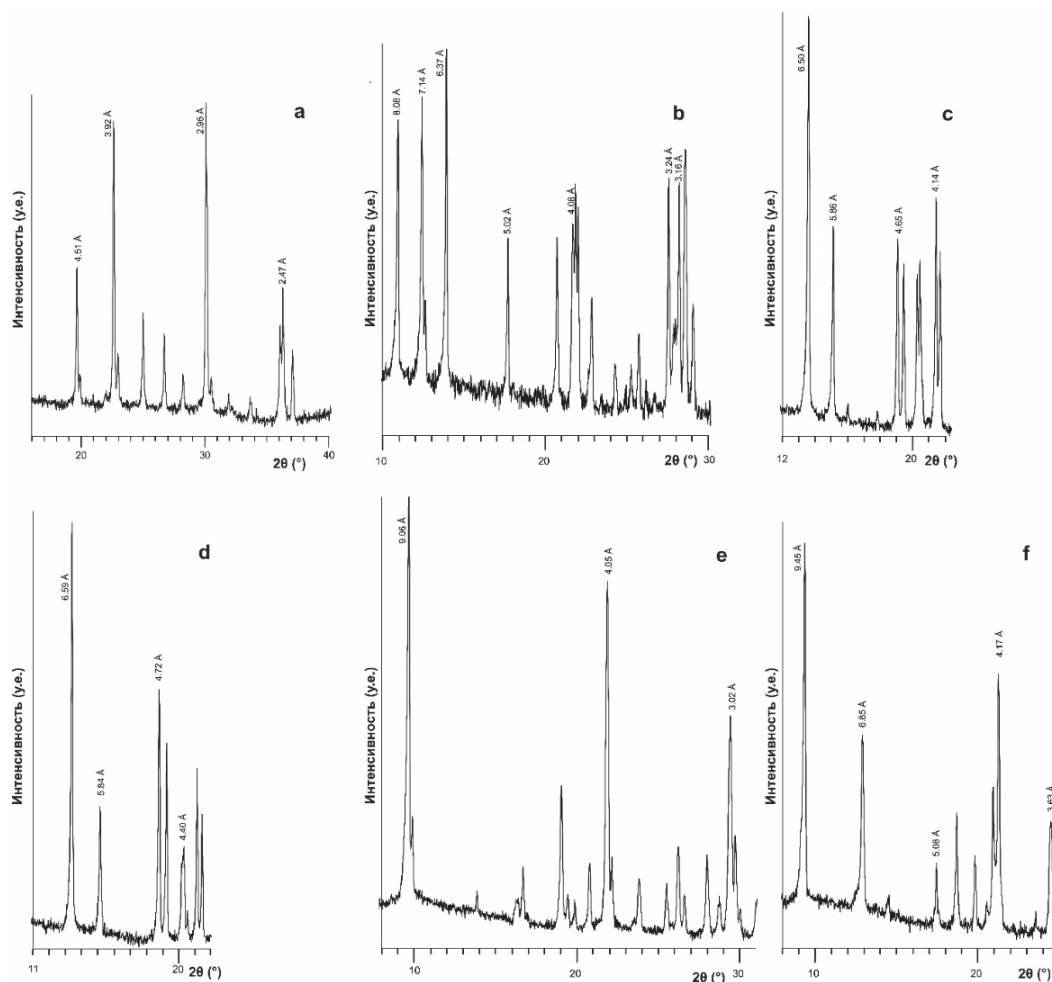


Рис. 3. Дифрактограммы цеолитов

a – апофиллит, b – гармотом, c – натролит, d – сколецит, e – стеллерит, f – ломонтит

Fig. 3. Diffraction patterns of zeolites

a – apophyllite, b – harmotome, c – natrolite, d – scolecite, e – stellerite, f – laumontite

В силу схожести дифракционных картин стеллерита и стильбита для достоверной диагностики был определен химический состав кристалла на растровом электронном микроскопе TESCAN VEGA II LMU. Согласно полученным результатам, рассчитана кристаллохимическая формула, которая соответствует составу $(\text{Ca}, \text{Na}_2, \text{K}_2)(\text{Al}_2\text{Si}_7\text{O}_{18}) \times 7\text{H}_2\text{O}$.

Кроме того, для стеллерита характерна таблитчатая форма выделения кристаллов в отличие от сноповидных выделений стильбита (рис. 4).

Получены спектры РЛ в диапазоне 200–800 нм (рис. 5). Для некоторых минералов, имеющих свечение в ИК-диапазоне, дана спектральная область длин волн 200–1 000 нм.

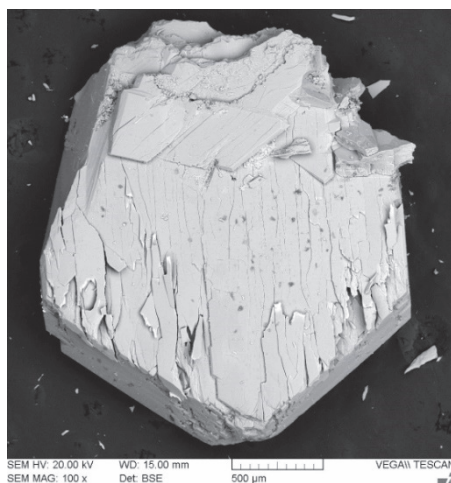


Рис. 4. Снимок таблитчатого кристалла стеллерита, $\times 500\mu\text{m}$

Fig. 4. BSE image of stellerite tabular crystal, magnification up to $500\mu\text{m}$

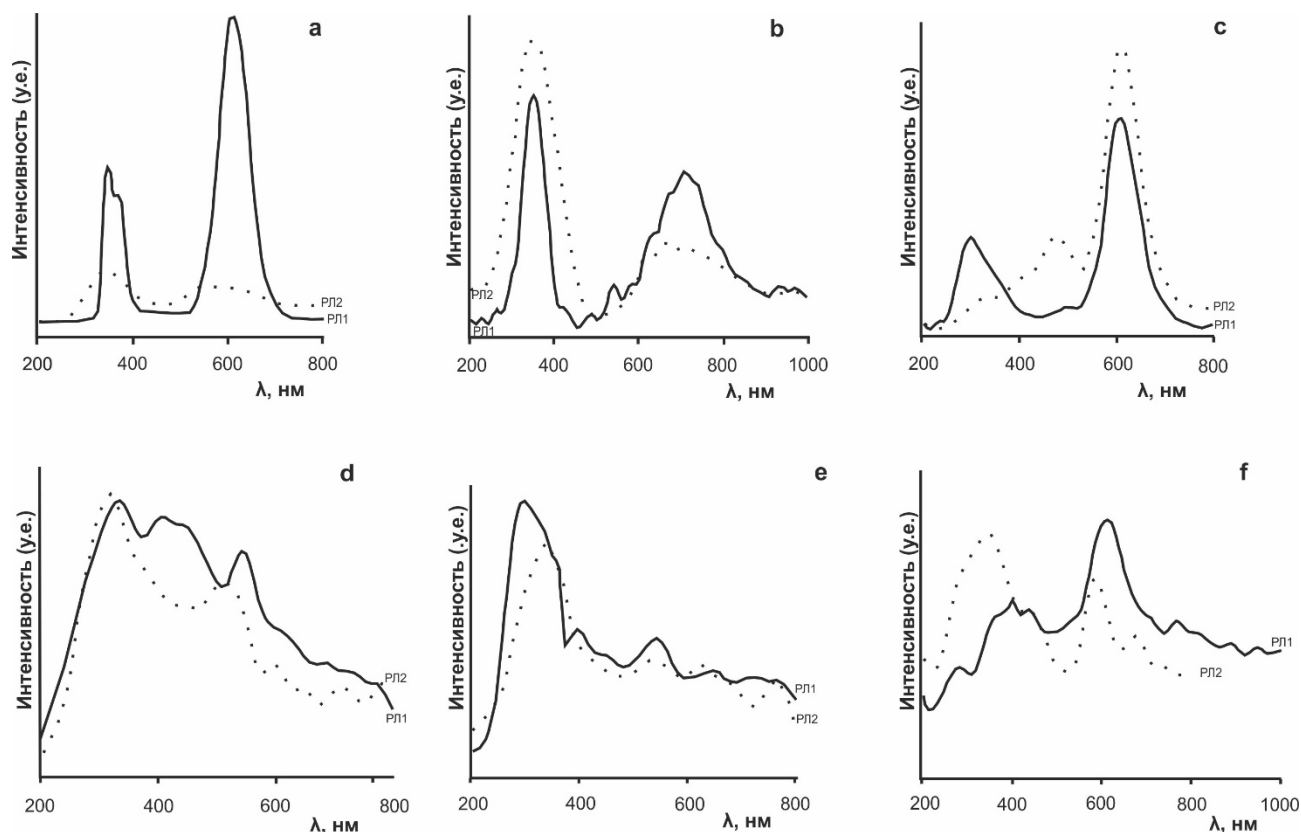


Рис. 5. Спектры рентгенолюминесценции цеолитов

a – натроапофиллит, b – гармотом, c – натролит, d – сколецит, e – стеллерит, f – ломонтит

Fig. 5. X-ray luminescence spectra of zeolites

a – natroapophyllite, b – harmotome, c – natrolite, d – scolecite, e – stellerite, f – laumontite

Чтобы получить дополнительную информацию о центрах свечения, исследовалась люминесценция исходных образцов до прокаливания (РЛ1) и после прокаливания при температуре 500 °С в условиях свободного доступа кислорода (РЛ2). Дело в том, что разные центры свечения могут по-разному реагировать на прогрев. Это несет дополнительную информацию как для диагностики минерала, так и для определения генетических особенностей. Из рис. 5 видно, что спектры РЛ для разных цеолитов заметно отличаются и влияние прокаливания на спектральный состав излучения носит индивидуальный характер. Возможные причины такого поведения центров свечения рассмотрены ниже. Привязка центров излучения дана по аналогии с другими силикатами, имеющими подобные спектры излучения [Boroznovskaya, 1989; Горобец, Рогожин, 2001; Boroznovskaya et al., 2017]. В целом спектры РЛ исследуемых цеолитов состоят из следующих широких полос излучения, часто перекрывающих друг друга (λ , nm): 280–320 (вакансии кислорода), 320–400, а иногда и более длинноволновое свечение (кислородные центры, возникающие часто за счет междоузельного кислорода), 400–550 (свечение связано с дефектами на базе алюмо-кремнекислородных тетраэдров), 560–620 (возможен Mn^{2+} , замещающий Ca^{2+} , либо Na^{+}), 650–750 (Fe^{3+} на месте Al или Si). Привязка центров свечения дана по аналогии с другими силикатами, имеющими подобные спектры излучения [Boroznovskaya, 1989; Горобец, Рогожин, 2001; Boroznovskaya et al., 2017; Boroznovskaya, Nebere, 2018].

Обсуждение результатов

Ниже рассмотрены некоторые детали состава и кристаллохимии исследуемых минералов и их влияние на люминесценцию, что дает нам возможность говорить о кристаллохимическом аспекте люминесценции.

Апофиллит. Апофиллит $NaCa_4(Si_4O_{10})_2F \times 8H_2O$ – поздний гидротермальный минерал, часто встречающийся в ассоциации с цеолитами в полостях эффузивных и интрузивных пород. Кристаллизуется в тетрагональной сингонии, дитетрагонально-дипирамидальный вид симметрии $P4/mnc$, $a_0 = 9,00$ Å, $c_0 = 15,8$ Å, $Z = 4$. Структура апофиллита состоит из правильных четырехчленных колец, соединённых вместе в неправильные восьмичленные кольца, которые образуют слои из $(Si_4O_{10})_2$. Физические и особенно оптические свойства апофиллита зависят от баланса элементов в соединении. По данным рентгеноструктурного анализа исследуемый апофиллит представляет собой апофиллит-(NaF) (натроапофеллит). Кристаллохимиче-

ские особенности натроапофиллита нашли отражение и в люминесцентных свойствах. Прежде всего, обращает на себя внимание отсутствие Al в структуре апофиллита. Это непременно должно сказаться на спектрах РЛ, поскольку исключает Al-Si замещения, играющие важную роль в люминесценции минералов [Boroznovskaya et al., 2017]. В спектрах РЛ апофиллита в оптическом диапазоне длин волн обнаружены полосы излучения Ce^{3+} (340–360 nm) и Mn^{2+} (605–615 nm). В структуре апофиллита Ce^{3+} и Mn^{2+} могут замещать Ca^{2+} , являясь при этом люминогенами. Наличие такого изоморфизма может свидетельствовать в пользу снижения щелочности среды минералообразования [Boroznovskaya, 1989]. На рис. 5, а показаны спектры РЛ натроапофиллита до (РЛ 1) и после прокаливания до 500 °С (РЛ2). Исчезновение полос излучения Ce^{3+} и Mn^{2+} после прокаливания связано, скорее всего, с тем, что нагрев в условиях свободного доступа кислорода приводит к изменению валентности Mn и Ce и, как следствие, к изменению спектра излучения. Вместе с тем после прокаливания возможно появление кислородных центров в оптическом диапазоне длин волн, чему может способствовать и расслоение натроапофиллита после прокаливания. Таким образом, отличительной особенностью люминесценции апофиллита-NaF является наличие полос излучения Ce^{3+} и Mn^{2+} , исчезающих после прокаливания с их заменой на кислородные центры.

Гармотом. Гармотом $Ba_2Ca(Al_6Si_{10}O_{32}) \times 12H_2O$ – относительно редкий минерал из группы цеолитов. Кристаллизуется в моноклинной сингонии. Кристаллохимические характеристики гармотома близки к структуре полевых шпатов. Основной элемент каркаса гармотома как и полевых шпатов – четырехчленное кольцо. Кольца, соединяясь между собой, образуют параллельные (100) и (010) каналы, в пересечении которых в горизонтальном направлении формируются восьмичленные кольца, образующие крупные полости. В этих полостях находятся внекаркасные катионы K^{+} , Na^{+} , Ba^{2+} , иногда Ca^{2+} , а также молекулы воды. Межатомные связи в каркасе гармотома имеют одинаковую прочность во всех направлениях.

Для спектров РЛ исследуемого гармотома характерны полосы излучения во всем оптическом диапазоне длин волн (рис. 5, б). По интенсивности выделяются полосы излучения в ближнем УФ (350–360 nm) и в красном (670–750 nm) диапазонах оптического спектра, за которые могут быть ответственны, соответственно, междоузельный кислород и ионы Fe^{3+} , замещающего Si и Al в структуре гармотома. Подобный спектр может быть следствием повышенной щелочности и окислительного потенциала. Таким образом, отличительной особенностью люминесценции гармо-

тома является наличие люминогена Fe^{3+} и кислородных центров на базе алюмо-кремне-кислородных тетраэдров.

Натролит. Основу структуры натролита $\text{Na}_2(\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}) \times 2\text{H}_2\text{O}$ составляют пятичленные кольца из алюмо-, кремнекислородных тетраэдров, образующих цепочку, вытянутую вдоль оси c . Для натролита характерна различная степень упорядоченности Al в структуре, что отражается на параметрах элементарной ячейки [Пеков и др., 2004] и по аналогии с полевыми шпатами может отразиться на люминесцентных свойствах. Четыре такие цепочки располагаются вокруг винтовой оси. Молекулы H_2O образуют зигзагообразную цепочку, параллельную оси c , вокруг каждой двойной винтовой оси. Ионы Na^+ окружены четырьмя нонами O^{2-} и двумя молекулами H_2O . Подобно другим цеолитам, в натролите возможно замещение ионов Na^+ другими катионами, замещенными из окружающей среды.

Для спектров РЛ исследуемого натролита характерны полосы излучения во всем оптическом диапазоне длин волн (см. рис. 5, c). По интенсивности выделяются полосы излучения в УФ (280–290 нм) и в желто-оранжевом диапазоне оптического спектра длин волн (580–610 нм), за которые могут быть ответственны, соответственно, вакансии кислорода и ионы Mn^{2+} , замещающего Na^+ в структуре натролита. На возможность такого изоморфизма в цеолитах указывалось ранее [Агудо и др., 1970]. Наличие вакансий кислорода может свидетельствовать о дефиците кислорода. После прокаливания появляются кислородные центры во всем оптическом диапазоне длин волн. Скорее всего, прокалывание в условиях доступа кислорода ведет к «залечиванию» вакансий за счет поступающего кислорода, перепоглощению и перераспределению полос излучения. Возможно участие алюмокислородных тетраэдров в образовании центров, ответственных за излучение в видимой области спектра (400–490 нм), а также водорода. В апофиллите, в структуре которого отсутствуют алюмокислородные тетраэдры (либо их недостаточно), практически отсутствует свечение в диапазоне длин волн 400–490 нм. Таким образом, для люминесценции натролита характерно наличие полос излучения в УФ и оранжево-красном диапазонах, с перераспределением спектрального состава излучения после прокаливания, что может быть связано с окислительными процессами в условиях свободного доступа кислорода.

Сколецит. Сколецит $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}) \times 3\text{H}_2\text{O}$ – цеолит со структурным типом натролита, отличающийся от него присутствием в качестве катиона Ca^{2+} , большим количеством молекул H_2O . Кристаллизуется в моноклинной сингонии, диэдрический безосный вид симметрии, псевдотетрагональный.

Для сколецита под воздействием рентгеновского излучения характерна очень слабая люминесценция в диапазоне 300–600 нм с максимальным излучением при 310–350 нм и 400–450 нм (рис. 5, d). Люминесценция обусловлена наличием кислородных возбужденных состояний на базе кремнекислородных и алюмокислородных тетраэдров. После прокаливания практически исчезает люминесценция в диапазонах 400–470 и 550–570 нм, связанная с алюминиевыми и марганцевыми центрами соответственно. За счет перераспределения в спектральном составе полос поглощения и излучения после прокаливания появляется полоса РЛ при 480–490 нм, связанная, по мнению авторов, с наличием компенсаторов, в качестве которых могут выступать ионы щелочных металлов Na^+ , Li^+ либо водород. Очень слабая люминесценция Mn^{2+} связана с тем, что в структуре Ca-содержащего сколецита (в отличие от натролита) Mn^{2+} мог бы замещать Ca^{2+} , но такому замещению препятствуют щелочные условия.

Стеллерит. Стеллерит $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_7\text{O}_{18}) \times 7\text{H}_2\text{O}$ – алюмосиликат, редкий минерал группы цеолитов – $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_7\text{O}_{18}] \times 7\text{H}_2\text{O}$, имеет субслоистый мотив каркаса. Вторичная структура представляет собой девятичленные кольца. Минерал кристаллизуется в моноклинной сингонии с неупорядоченным распределением Al и Si.

В спектре РЛ стеллерита четко выделяется всего лишь одна полоса излучения в УФ диапазоне с максимумом при 280–290 нм (вакансии кислорода). После прокаливания вместо этой полосы излучения появляется полоса с максимумом в диапазоне длин волн 330–340 нм, что связано с залечиванием вакансий за счет поступающего кислорода (рис. 5, e). Таким образом, отличительной особенностью спектров РЛ стеллерита можно считать отсутствие люминесценции, связанной с примесными дефектами, и наличие люминесценции в коротковолновом УФ, связанной предположительно с вакансией кислорода, что может быть следствием дефицита кислорода при образовании данного минерала. Обращает на себя внимание тот факт, что РЛ при 280–290 нм наиболее характерна для цеолитов с неупорядоченным распределением Al и Si.

Ломонтит. Ломонтит $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}) \times 4\text{H}_2\text{O}$ – довольно распространенный цеолит. По структуре представляет собой переходный тип от субцепочечных к субслоистым с упорядоченным распределением Si и Al. Калий или натрий могут заменять кальций, но только в очень малых количествах.

В спектре РЛ ломонтита, несмотря на слабую её интенсивность, четкие полосы излучения наблюдаются во всем оптическом диапазоне длин волн, захватывая и ближний ИК диапазон (рис. 5, f). Максимумы наблюдаются в диапазонах (нм): 280–300, 360–380, 400–410, 430–

450, 450–550, 605–620, 690–710 и 750–1 000. Большинство центров излучения связаны с возбужденными кислородными состояниями и кремний-алюминиевыми замещениями. Но наиболее интенсивная полоса излучения наблюдается за счет Mn^{2+} , замещающего кальций (605–620 нм). Это выделяет ломонтит среди других Са-содержащих цеолитов, у которых практически отсутствует люминесценция Mn^{2+} (как например, у сколецита и стеллерита). Дело в том, что ломонтит, как известно, образуется при более высоких давлениях, чем другие цеолиты. А повышение давления может способствовать образованию центров РЛ за счет Mn^{2+} . Ранее отмечалось влияние давления на люминесценцию минералов [Boroznovskaya, 1989; Boroznovskaya, Nebera, 2018].

Заключение

Исследование люминесценции ряда цеолитов показало их способность выдавать свечение в оптическом диапазоне длин волн (200–800 нм и еще более длинноволновое) под воздействием рентгеновского возбуждения. Причем спектры РЛ строго индивидуальны для каждого из исследованных цеолитов. Но при этом необходимо отметить их слабую интенсивность. Излучение примесных ионов часто отсутствует. Это можно объяснить факторами, ограничивающими пределы изоморфных замещений в цеолитах. К ним относятся расположение обменных катионов в их структуре и ионно-ситовой эффект. Наличие ионно-ситового эффекта приводит к тому, что катионы, размеры радиусов которых больше размеров входных окон цеолитов, не смогут изоморфно замещать катионы, расположенные в структуре этих минералов. И все же за спектральный состав излучения цеолитов могут быть ответственны как собственные дефекты (кислородные возбужденные состояния), так и примесные ионы типа Mn^{2+} , замещающего Na^+

в структуре цеолита и Fe^{3+} на месте Si либо Al. Со всем слабое свечение Mn^{2+} либо полное его отсутствие в кальций-содержащих цеолитах объясняется тем, что щелочные условия, в которых образуются цеолиты, могут препятствовать изоморфному замещению Ca^{2+} на Mn^{2+} . Исключение представляет ломонтит, появление РЛ марганца у которого может быть следствием более высокого давления (по сравнению с другими цеолитами) при его образовании, и натролит, интенсивная РЛ Mn^{2+} у которого может быть связана с замещением Na^+ на Mn^{2+} . Люминесценция в ближнем УФ и видимом диапазонах может быть связана с кремнеалюминиевыми замещениями в тетраэдрах и наличием компенсаторов. Такие центры, как вакансии кислорода (280 нм), могут нести информацию об окислительном потенциале среды минералообразования.

Таким образом, люминесценция цеолитов, отражая их кристаллохимические особенности и состав, является следствием изоморфных кремне-алюминиевых замещений и зависит от отношения Si/Al: чем больше Al, тем больше возможностей у компенсаторов участвовать в образовании центров люминесценции. Кроме того, интенсивность люминесценции определенных центров свечения цеолитов может служить индикатором режима кислотности-щелочности и окислительного потенциала минералообразующей среды. Рыхлость структуры и эффект молекулярного сита оказывают тормозящее влияние на люминесценцию этих минералов. Но высокая чувствительность рентгенолюминесцентного метода, простота пробоподготовки делают этот метод все же перспективным при определении видовой принадлежности цеолитов. Проведенные исследования показали необходимость комплексного подхода при изучении цеолитов, в том числе как носителя генетической информации.

Список источников

- Агудо А.Л., Бедкок Ф.Р., Стоун Ф.С. Основы предвидения каталитического действия. М. : Наука, 1970. 169 с.
- Беляев Р.А., Юрков В.В. Цеолиты – экологически и экономически эффективное, выгодное природное сырье // Дальний Восток РФ на рубеже веков – региональныйспектвозрождения России : материалы регион. науч.-практ. конф. Благовещенск : Администрация Амурской области. 1999. С. 185–187.
- Бетехтин А.Г. Курс минералогии : учеб. пособие. М. : КДУ, 2008. 738 с.
- Годовиков А.А. Минералогия. М. : Недра, 1975. 520 с.
- Горобец Б.С., Рогожин А.А. Спектры люминесценции минералов. М. : Букинист, 2011. 316 с.
- Коссовская А.Г. Генетические типы цеолитов стратифицированных формаций // Литология и полезные ископаемые. 1975. № 2. С. 23–44.
- Ловская Е.В., Пеков И.В., Кононкова Н.Н. Катионообменные свойства минералов серии филлипсита-гармотома // Минеральное разнообразие: исследование и сохранение. 2009. № 4. С. 75–79.
- Ловская Е.В., Пеков И.В., Кононкова Н.Н., Турчкова А.Г. Минералогия, геохимия и генезис поздних высококальциевых гидротермалитов Хибинского массива, Кольский полуостров // ЗВМО. 2002. № 2. С. 17–29.
- Пеков И.В., Ловская Е.В., Турчкова А.Г., Чуканов Н.В., Задов А.Е., Расцветаева Р.К., Кононкова Н.Н. Томсонит – $Sr(Sr,Ca)_2Na[Al_5Si_5O_{20}]_6 \times 7H_2O$ – новый цеолит из Хибинского массива, Кольский полуостров и изоморфная серия томсонит – Са-Томсонит-Sr // ЗВМО. 2001. № 4. С. 46–55.
- Пеков И.В., Турчкова А.Г., Ловская Е.В., Чуканов Н.В. Цеолиты щелочных массивов. М. : Экост, 2004. 168 с.
- Япаскурт О.В. Литогенез в осадочных бассейнах миегосинклиналей. М. : Изд-во Московского университета, 1989. 152 с.

- Boroznovskaya N.N. X-ray luminescence of feldspar as an indicator of its genesis // International Geology Review. 1989. V. 31. No. 4. P. 395–403.
- Boroznovskaya N.N., Nebera T.S. Luminescence of rock-forming quartz of the granitoids from the Kolyvan-Tomsk folded belt in relation to facies features of massif formation // Acta Geodynamica et Geomaterialia. 2018. V. 15, No. 1 (189). P. 57–66.
- Boroznovskaya N., Zyryanova L., Korneva A., Nebera T., Ivanova M. Crystallochemical aspect of clay and clayish matter minerals luminescence // Applied Clay Science. 2017. V. 145. P. 11–16.
- Elizondo-Villarreal N., Obregón-Guerra R., García-Méndez M., Sánchez-Espinoza A., Alcorta-García M., Torres-Barrera R., Coello V., Castaño V. Nanomodification of a natural clinoptilolite zeolite // Rev. Adv. Mater. Sci. 2016. V. 47. P. 74–78.
- Gaft M., Reisfeld R., Panczer G. Modern luminescence spectroscopy of minerals and materials. Springer Mineralogy, 2005. P. 356.
- Górnjak K., Szydlak T., Gawel A., Klimek A., Tomczyk A., Motyka J., Bahranowski K. Smectite-, silica- and zeolites-bearing raw materials (Hliník nad Hronom bentonite, Slovakia) - A new approach using integrated petrographic and mineralogical studies // Applied Clay Science. 2017. V. 141. P. 180–191.
- Karakaya M.C., Karakaya N., Yavuz F. Geology and conditions of formation of the zeolite-bearing deposits southeast of Ankara (central Turkey) // Clays and Clay Minerals. 2015. V. 63 (2). P. 85–109.
- Ostrooumov M., Cappelletti P., Gennaro R. Mineralogical study of zeolite from New Mexican deposits (Cuitzeo area, Michoacan, Mexico) // Applied Clay Science. 2012. V. 55. P. 27–35.
- Payana K.D., Karimullah A.R., Fahmita R., Titisari A.D. Mineralogy variation of zeolites, structural deformation and its impact to tuffaceous sandstone diagenetic anomaly in kebo-butak formation, sumberan, Yogyakarta // Materials Science Forum. 2017. P. 197–203.
- Pekov I.V., Grigorieva A.A., Turchkova A.G., Lovskaya E.V. Natural Ion exchange in microporous minerals: different aspects and implications // Minerals as Advanced Materials. 2008. P. 7–15.
- Poolton N.R.J., Mauz B., Lang A., Jain M., Malins A.E.R. Optical excitation processes in the near band-edge region of KAlSi_3O_8 and $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ feldspar // Radiation Measurements. 2006. V. 41. P. 542–548.
- Ulmanu M. Mineralogy of natural zeolites // Handbook of Natural Zeolites. 2012. P. 52–69.

References

- Agudo A.L., Bedkok F.R., Stoun F.S. *Osnovy predvideniya kataliticheskogo deystviya* [Fundamentals of the prediction of catalytic action], Moscow: Nauka, 1970. 169 p. In Russian
- Belyaev R.A., Yurkov V.V. *Tseolity – ekologicheski i ekonomicheski effektivnoye, vygodnoye prirodnoye syr'ye* [Zeolites – an environmentally and economically efficient, beneficial natural raw material] // The Far East of the Russian Federation at the turn of the century – a regional aspect of the revival of Russia: materials of a regional scientific and practical conference. Blagoveshchensk: Administration of the Amur Region. 1999. pp. 185–187. In Russian
- Betekhtin A.G. *Kurs mineralogii: Uchebnoye posobiye* [Course of mineralogy: Textbook]. Moscow: KDU, 2008. 738 p. In Russian
- Godovikov A.A. *Mineralogiya* [Mineralogy]. Moscow: Nedra, 1975. 520 p. In Russian
- Gorobets B.S., Rogozhin A.A. *Spektry lyuminesentsii mineralov* [Luminescence spectra of minerals]. Moscow: Bookinist, 2011. 316 p. In Russian
- Kosovskaya A.G. *Geneticheskiye tipy tseolitov stratifitsirovannykh formatsiy* [Genetic types of zeolites of stratified formations] // Lithology and minerals. 1975. 2. pp. 23–44. In Russian
- Lovskaya E.V., Pekov I.V., Kononkova H.H. *Kationoobmennyye svoystva mineralov serii fillipsita-garmotoma* [Cation-exchange properties of minerals of the phillipsite-garmotome series] // Mineral diversity: research and preservation. 2009. 4. pp. 75–79. In Russian
- Lovskaya E.V., Pekov I.V., Kononkova H.H., Turchkova A.G. *Mineralogiya, geokhimiya i genezis pozdnikh vysokokal'tsiyevykh gidrotermalitov Khibinskogo massiva, Kol'skiy poluostrov* [Mineralogy, geochemistry and genesis of late high-calcium hydrothermalites of the Khibiny massif, Kola Peninsula] // ZVMO. 2002. 2. pp. 17–29. In Russian
- Pekov I.V., Lovskaya E.V., Turchkova A.G., Chukanov N.V., Zadov A.E., Rastsvetaeva R.K., Kononkova H.H. *Tomsonit – $\text{Sr}(\text{Sr}, \text{Ca})_2\text{Na}[\text{Al}_5\text{Si}_5\text{O}_{20}]_6 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – novyy tseolit iz Khibinskogo massiva, Kol'skiy poluostrov i izomorfnyaya seriya tomsonit – Sa-Tomsonit-Sr* [Thomsonite – $\text{Sr}(\text{Sr}, \text{Ca})_2\text{Na}[\text{Al}_5\text{Si}_5\text{O}_{20}]_6 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – a new zeolite from the Khibiny massif, Kola Peninsula and the isomorphic series of thomsonite - Ca-Thomsonite-Sr] // ZVMO. 2001. No. 4. pp. 46–55. In Russian
- Pekov I.V., Turchkova A.G., Lovskaya E.V., Chukanov N.V. *Tseolity shchelochnykh massivov* [Zeolites of alkaline massifs]. Moscow: Ecost, 2004. 168 p. In Russian
- Yapaskurt O.V. *Litogenez v osadochnykh basseynakh miogeosinklinaly* [Lithogenesis in sedimentary basins of miogeosynclines]. Moscow: Publishing house of Moscow University, 1989. 152 p. In Russian
- Boroznovskaya N.N. X-ray luminescence of feldspar as an indicator of its genesis// International Geology Review. 1989. V. 31. No. 4. pp. 395–403.
- Boroznovskaya N.N., Nebera T.S. Luminescence of rock-forming quartz of the granitoids from the Kolyvan-Tomsk folded belt in relation to facies features of massif formation // Acta Geodynamica et Geomaterialia. 2018. V. 15. No. 1 (189). pp. 57–66.
- Boroznovskaya N., Zyryanova L., Korneva A., Nebera T., Ivanova M. Crystallochemical aspect of clay and clayish matter minerals luminescence // Applied Clay Science. 2017. V. 145. pp. 11–16.
- Elizondo-Villarreal N., Obregón-Guerra R., García-Méndez M., Sánchez-Espinoza A., Alcorta-García M., Torres-Barrera R., Coello V., Castaño V. Nanomodification of a natural clinoptilolite zeolite // Rev. Adv. Mater. Sci. 2016. V. 47. pp. 74–78.
- Gaft M., Reisfeld R., Panczer G. Modern luminescence spectroscopy of minerals and materials. Springer Mineralogy, 2005. pp. 356.
- Górnjak K., Szydlak T., Gawel A., Klimek A., Tomczyk A., Motyka J., Bahranowski K. Smectite-, silica- and zeolites-bearing raw materials (Hliník nad Hronom bentonite, Slovakia) – A new approach using integrated petrographic and mineralogical studies // Applied Clay Science. 2017. V. 141. pp. 180–191.
- Karakaya M.C., Karakaya N., Yavuz F. Geology and conditions of formation of the zeolite-bearing deposits southeast of Ankara (central Turkey) // Clays and Clay Minerals. 2015. V. 63 (2). pp. 85–109.

Ostrooumov M., Cappelletti P., Gennaro R. Mineralogical study of zeolite from New Mexican deposits (Cuitzeo area, Michoacan, Mexico) // *Applied Clay Science*. 2012. V. 55. pp. 27–35.

Payana K.D., Karimullah A.R., Fahmita R., Titisari A.D. Mineralogy variation of zeolites, structural deformation and its impact to tuffaceous sandstone diagenetic anomaly in kebo-butak formation, sumbeuran, Yogyakarta // *Materials Science Forum*. 2017. pp. 197–203.

Pekov I.V., Grigorieva A.A., Turchkova A.G., Lovskaya E.V. Natural Ion exchange in microporous minerals: different aspects and implications // *Minerals as Advanced Materials*. 2008. pp. 7–15.

Poolton N.R.J., Mauz B., Lang A., Jain M., Malins A.E.R. Optical excitation processes in the near band-edge region of KAlSi_3O_8 and $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ feldspar // *Radiation Measurements*. 2006. V. 41. pp. 542–548.

Ulmanu M. Mineralogy of natural zeolites // *Handbook of Natural Zeolites*. 2012. pp. 52–69.

Информация об авторах:

Борозновская Н.Н., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: boroznovskaya@mail.ru

Небера Т.С., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер, кафедра минералогии и геохимии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: tsnebera@mail.ru

Хрущева М.О., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, центр коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем»; доцент, кафедра минералогии и геохимии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: masha2904@mail.ru

Зырянова Л.А., старший преподаватель, кафедра минералогии и геохимии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: luiza@ggf.tsu.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Boroznovskaya N.N., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: boroznovskaya@mail.ru

Nebera T.S., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Lead Engineer, Department of Mineralogy and Geochemistry, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: tsnebera@mail.ru

Khrushcheva M.O., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Center for Collective Use "Analytical Center for Geochemistry of Natural Systems"; Associate Professor, Department of Mineralogy and Geochemistry, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: masha2904@mail.ru

Zyryanova L.A., Senior Lecturer, Department of Mineralogy and Geochemistry, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: luiza@ggf.tsu.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 29.12.2022; одобрена после рецензирования 25.04.2023; принята к публикации 27.11.2024

The article was submitted 29.12.2022; approved after reviewing 25.04.2023; accepted for publication 27.11.2024

Научная статья

УДК 553.86+552.321.6+553.461

doi: 10.17223/25421379/33/4



МИНЕРАЛОГИЯ УЛЬТРАМАФИТОВОГО МАССИВА БЕЗЫМЯННЫЙ (ЗАПАДНО-ТУВИНСКАЯ ОФИОЛИТОВАЯ АССОЦИАЦИЯ)

Феликс Петрович Леснов¹, Чойганмаа Кыргысовна Ойду²,
Владимир Николаевич Королюк³, Андрей Александрович Монгуш⁴

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

^{2,4} Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия

¹ lesnovfp@list.ru

² oydup_ch@mail.ru

³ camebax@igm.nsc.ru

⁴ amongush@inbox.ru

Аннотация. Изучен химический состав породообразующих и акцессорных минералов ультрамафитового массива Безымянный. Акцессорные минералы в серпентинизированных оливиновых клинопироксенитах представлены, помимо хромшпинели, магнетита, андрадита и циркона, сульфидами Ni, Cu, Co и Fe, самородной медью и самородным мышьяковистым кобальтом. Предполагается, что сульфиды, а также самородная медь образовались в процессе взаимодействия мафитового расплава с протрузией реститогенных ультрамафитов.

Ключевые слова: мафиты, ультрамафиты, минералогия, акцессорные минералы, петрогенезис, Тува

Благодарность: авторы искренне благодарят А.В. Карпова за выполнение аналитических исследований по определению изотопного возраста цирконов.

Источник финансирования: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания ИГМ СО РАН (№ 122041400057-2; № 122041400171-5) и ТувИКОПР СО РАН (№ 121031500140-2).

Для цитирования: Леснов Ф.П., Ойду Ч.К., Королюк В.Н., Монгуш А.А. Минералогия ультрамафитового массива Безымянный (Западно-Тувинская офиолитовая ассоциация) // Геосферные исследования. 2024. № 4. С. 55–72. doi: 10.17223/25421379/33/4

Original article

doi: 10.17223/25421379/33/4

MINERALOGY OF THE BEZMYANNYI ULTRAMAFIC MASSIF (WESTERN TUVA OPHIOLITE ASSOCIATION)

Felix P. Lesnov¹, Choyganmaa K. Oydup², Vladimir N. Korolyuk³, Andrey A. Mongush⁴

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

^{2,4} Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS, Kyzyl, Russia

¹ lesnovfp@list.ru

² oydup_ch@mail.ru

³ camebax@igm.nsc.ru

⁴ amongush@inbox.ru

Abstract. In rocks from mafic-ultramafic massifs distributed in the territory of Tuva, accessory minerals, with the exception of chromite and partly minerals of platinum group elements, have almost not been studied. Some accessory sulfides and arsenides of Ni, Cu, Co, and Fe from rocks and chromites of the Idzhim, Ergak, Agardag, Nizhne-Tarlashkinsk, Malokoptinsk, Brungansk, and Mazhalyk massifs, as well as from ultramafic bodies of the Kaa-Khem ophiolite zone, were analyzed in single grains. In this connection, we investigated the species affiliation, chemical composition and other properties of accessory minerals from serpentinized olivine clinopyroxenites on the example of the ultramafic Bezmyannyi massif (Tyva Republic, Russia). It was found that the accessory minerals in this massif are represented by millerite, hillebrandite, nugget copper, pentlandite, pyrrhotite, chalcocite, bornite, pyrite, as well as chromite, magnetite, and zircon. Nugget nickel and iron-nickel copper were found for the first time on the territory of Tuva. It was determined that Cu concentration in grains of nugget copper varies within

93-98 wt. %, and Ni content - within 0.9-7.2 wt. %. The content of Fe impurity in iron-nickel copper can reach 7 wt. %. The formation of nugget copper presumably occurred in the process of fluid infiltration, which formed rims along the periphery and in the microcracks of millerite and hizlewoodite grains. Pseudomorphoses of nugget copper over hizlewoodite sometimes preserved its angular microinclusions. In this process, the Ni content within each of the nugget copper outcrops was kept approximately at the same level, while it varied in the range of 0.9-7.2 wt% in its different outcrops. The formation of nugget nickel copper could be accompanied by removal of hydrogen sulfide and partially Ni from the reaction zone. Another mechanism of appearance of nugget copper phenocrysts is possible - it was released in the process of influence of copper-containing fluid on magnetite grains, in which its microinclusions were formed. In this case, the nugget copper was enriched with some amount of not only Ni, but also Fe, and the concentration of the latter in nugget copper could reach 7 wt. %, which allows us to call it iron-nickel nugget copper. In accordance with the petrogenetic model based on the study of a large number of mafic-ultramafic massifs located in Tuva, we consider the Bezmyannyi massif as a fragment of the contact-reaction zone of a larger, but very poorly eroded polygenic mafic-ultramafic body, which is part of the West Tuva area of the ophiolite association. Based on this model, we assume that olivine clinopyroxenites of the Bezmyannyi massif and the micromineralization of sulfides and nugget copper detected in them were formed as a result of magma-metasomatic interaction of the mafic melt and its fluids containing Cu with earlier restitogenic ultramafics that composed the protusia.

Keywords: *ultramafic, mineralogy, accessory minerals, petrogenesis, mafic and ultramafic rocks, Tuva*

Acknowledgments: The authors sincerely thank A.V. Karpov for performing analytical studies to determine the isotopic age of zircons.

Source of financing: The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of a state assignment of IGM SB RAS (No. 122041400057-2; No. 122041400171-5) and TuvIENR SB RAS (No. 121031500140-2).

For citation: Lesnov F.P., Oydup Ch.K., Korolyuk V.N., Mongush A.A. (2024) Mineralogy of the Bezmyannyi ultramafic massif (Western Tuva ophiolite association). *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 55–72. doi: 10.17223/25421379/33/4

Введение

Породообразующие и акцессорные минералы из пород мафит-ультрамафитовых массивов, расположенных на территории Республики Тыва, изучены ещё недостаточно, в особенности с применением современных аналитических методов. Среди акцессориев наиболее детально охарактеризованы хромшпинель [Кривенко и др., 2005], а также минералы элементов платиновой группы [Агафонов и др., 1993, 2005]. Поэтому дальнейшие исследования закономерностей распространения, химического состава и других свойств всего комплекса акцессорных минералов в породах таких массивов в этом регионе являются актуальной задачей. Изложенные в статье результаты минералогических исследований массива Безмянный, а также реконструкция по ним условий образования впервые выявленной акцессорной минерализации позволяют несколько восполнить пробел в изучении обозначенной проблемы.

Массив Безмянный, расположенный в Западной Тыве (51°07'14.17" с.ш., 90°02'34.37" в.д.) в 30 км к западу от асбестоносного Ак-Довуракского ультрамафитового массива, обнажается на площади 300 × 800 м. Совместно с подобными ему телами, структурно приуроченными к зоне субширотного разлома, он входит в состав Западно-Тувинского ареала офиолитовой ассоциации [Леснов и др., 2019]. Длинная ось массива ориентирована согласно с простираанием указанного разлома и складчатых структур вмещаю-

щих его метавулканогенно-терригенных пород чингинской свиты, с которыми он имеет тектонические контакты. В южной части массив перекрыт рыхлыми отложениями. Это позволяет предположить, что его размеры могут быть больше (рис. 1). На современном эрозионном срезе массив сложен преобладающими серпентинизированными оливиновыми клинопироксенитами, которые характеризуются широко варьирующим количественно-минеральным составом. По данным А.И. Гончаренко и соавт. в строении массива в незначительном объеме обнаруживаются перцолиты и серпентиниты [Гончаренко и др., 1994].

Методы исследований

На двух небольших участках массива из коренных обнажений была отобрана коллективная проба серпентинизированных оливиновых клинопироксенитов массой около 30 кг (рис. 1). Из образцов этой пробы изготовлено несколько пластинок-препаратов на эпоксидной смоле для изучения химического состава и других свойств породообразующих и акцессорных минералов. Остальная часть собранного материала раздроблена с целью изучения цирконов и других акцессориев в шашке-препарате.

В общей сложности выполнено более 100 анализов зерен миллерита, хизлеудита, пентландита, пирротина, халькозина, пирита, борнита, никелистой и железо-никелистой самородной меди, магнетита, хромшпинели, андрадита, циркона, клинопироксена, амфибола и серпентина.

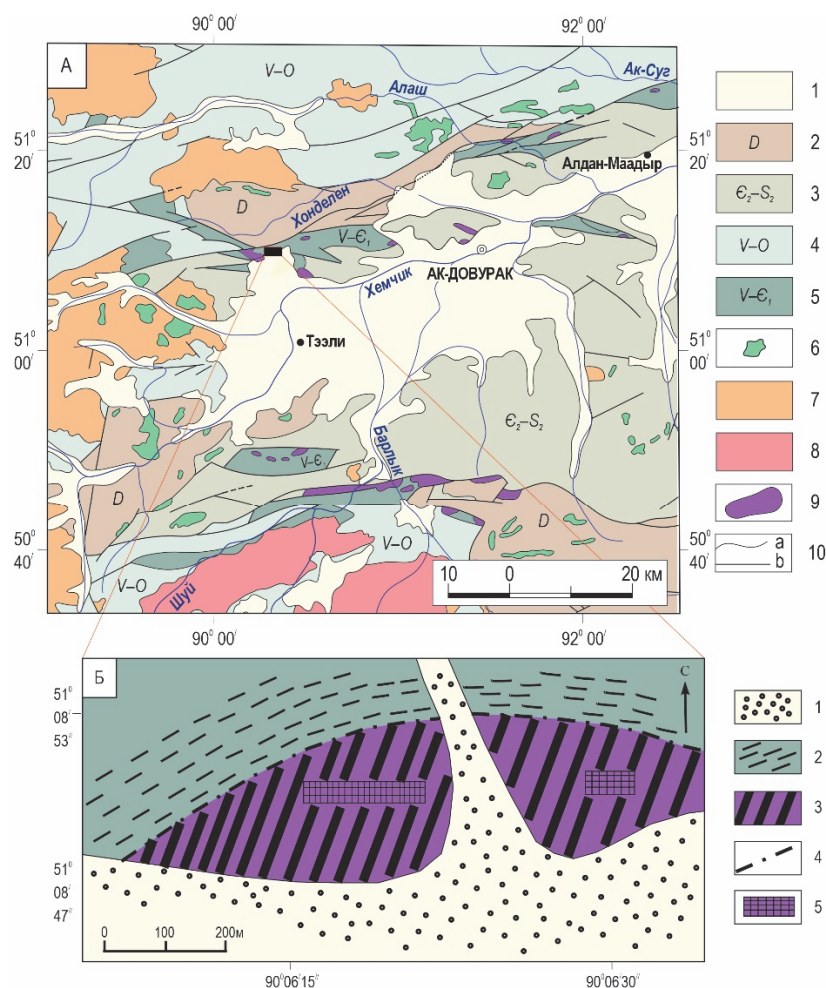


Рис. 1. Геологическое положение (А) и строение (Б) ультрамафитового массива Безымянный

А. Геологическое строение Западной Тувы и положение массива Безымянный (составлена с использованием данных [Геологическая..., 1983]). 1 – четвертичные отложения; 2 – вулканогенные и осадочные рифтогенные породы (D); 3 – осадочные отложения коллизионного прогиба (E_2-S_2); 4 – турбидитовые и молассовые отложения (V-O); 5 – осадочно-вулканогенные толщи (V- E_1); 6 – субвулканические комплексы (PZ₂₋₃); 7 – гранитоидные комплексы (PZ₂); 8 – гранитоидный комплекс (PZ₁); 9 – офиолитовые ультрамафиты; 10 – геологические границы (а), разломы (б). Черным прямоугольником показано место расположения массива.

Б. Схема геологического строения массива (составлена с использованием данных [Гончаренко и др., 1994]). 1 – четвертичные отложения; 2 – метаэффузивы основного состава, их туфы, кремнистые и хлоритовые сланцы (чингинская толща, V- E_1); 3 – преимущественно серпентинизированные оливиновые клинопироксениты; 4 – разлом; 5 – площадки отбора крупнообъемной пробы

Fig. 1. Geological position (A) and structure (B) of the Bezmyannyi ultramafic massif

A. Geological structure of Western Tuva and the position of the Bezmyannyi massif (made using the data of [Geologic..., 1983]). 1 – Quaternary deposits; 2 – volcanogenic and sedimentary riftogenic rocks (D); 3 – sedimentary deposits of the collisional trough (E_2-S_2); 4 – turbidite and molasse deposits (V-O); 5 – sedimentary volcanogenic strata (V- E_1); 6 – subvolcanic complexes (PZ₂₋₃); 7 – granitoid complexes (PZ₂); 8 – granitoid complex (PZ₁); 9 – ophiolite ultramafics; 10 – geological boundaries (a), faults (b). The black rectangle marks the location of massif.

B. Scheme of the geologic structure of the massif (made using the data of [Goncharenko et al., 1994]). 1 – Quaternary sediments; 2 – metaeffusives of basic composition, their tuffs, siliceous and chloritic shales (Chingin Formation, V- E_1); 3 – predominantly serpentinized olivine clinopyroxenites; 4 – fault; 5 – large-volume sampling sites

Анализы состава минералов и фотографии объектов в пластинах и шашке проведены с помощью электронно-зондового микроанализатора JEOL JXA-8100 с пересчетом измеренных интенсивностей в концентрацию элементов по процедуре ZAF из программного обеспечения прибора. Процедура чувствительна к неопределяемым компонентам (в данном случае H_2O и CO_2), по-

этому их содержание вводилось в расчет согласно стехиометрии минерала. Сделано шесть измерений возраста цирконов. Возраст цирконов определяли методом LA-SF-ICP-MS на масс-спектрометре Element XR (Thermo Fisher Scientific, США). Аналитические исследования выполнены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск).

Минеральный состав оливиновых клинопироксенов

Породообразующие минералы. Клинпироксен, наряду с серпентином, заместившим оливин, является главным породообразующим минералом оливиновых клинопироксенов. Он представлен короткопризматическими кристаллами размером до первых миллиметров. Некоторые из них несут следы пластических деформаций, о чем свидетельствуют наблюдаемые в них флексуобразно изогнутые трещины спайности, «залеченные» поздней генерацией серпентина в ассоциации с андрадитом (рис. 2).

По химическому составу клинопироксен отнесен к хромсодержащему диопсиду (табл. 1). Он отличается от одноименного минерала из клинопироксенов и верлитов Бирдагского, Мажалыкского, Калбадагского и Сыдыгского мафит-ультрамафитовых массивов, также входящих в указанную офиолитовую ассоциацию, несколько повышенным содержанием хрома и пониженной концентрацией TiO_2 и Al_2O_3 [Леснов и др., 2019]. В пластинках-препаратах встречаются редкие выделения амфибола, который рассматривается в качестве продукта преобразования клинопироксена. По химическому составу амфибол близок к роговой обманке (табл. 1).

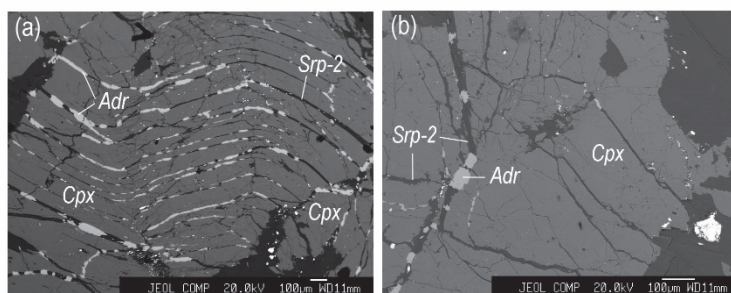


Рис. 2. Следы пластических деформаций в некоторой части клинопироксенов

(а) – фрагмент зерна клинопироксена (Cpx), пронизанного андрадит-серпентиновыми прожилками (Adr, Srp-2), которые «залечили» микротрещины спайности, флексуобразно изогнутые в результате пластических деформаций. (б) – участок недеформированного зерна клинопироксена, рассеянного разнонаправленными прожилками серпентина совместно с разобленными фрагментами выделений андрадита

Fig. 2. Traces of plastic deformations in some part of clinopyroxenes

(а) – fragment of a clinopyroxene grain (Cpx) penetrated by andradite-serpentine veinlets (Adr, Srp-2), which “healed” the microcracks of cleavage, flexurally bent as a result of plastic deformations. (b) – a fragment of undeformed clinopyroxene grain dissected by multidirectional serpentine veins together with disconnected fragments of andradite outcrops

Таблица 1

Химический состав клинопироксена и амфибола, мас. %

Table 1

The chemical composition of clinopyroxene and amphibole, wt %

№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	Сумма
П.о.	0,02	0,06	0,02	0,01	0,02	0,01	0,008	0,02	0,007	0,009	
<i>Клинпироксен (Ca_{0,909}Mg_{0,923}Fe_{0,088}Mn_{0,004}Al_{0,033}Cr_{0,020}Na_{0,025})_{2,002}Si_{1,992}O₆</i>											
1	54,96	н.п.	0,72	2,64	17,37	0,13	23,21	0,37	н.п.	0,64	100,09
2	54,99	0,06	0,80	2,92	17,03	0,12	23,18	0,48	н.п.	0,84	100,42
3	54,16	н.п.	1,06	2,99	16,94	0,14	23,54	0,21	0,01	0,63	99,72
4	54,45	н.п.	0,72	2,80	17,02	0,15	23,44	0,37	0,01	0,67	99,68
5	54,62	н.п.	0,08	2,94	16,57	0,14	23,24	0,49	н.п.	0,78	99,54
6	54,95	н.п.	1,22	3,25	17,06	0,14	23,05	0,18	н.п.	0,64	99,60
7	54,50	н.п.	0,80	2,66	17,00	0,13	23,40	0,35	н.п.	0,73	99,59
C _{cp}	54,66	–	0,77	2,88	17,0	0,14	23,29	0,35	–	0,70	99,81
S	0,317	–	0,358	0,211	0,235	0,010	0,171	0,12	–	0,081	0,327
V	0,6	–	46,5	7,3	1,4	7,1	0,7	34,3	–	11,6	0,3
<i>Амфибол (Na_{0,115}K_{0,101}Ca_{1,834}Mg_{2,444}Fe_{tot=1,945}Al_{1,609}Mn_{0,034}Ti_{0,159})_{8,241}Si_{6,450}O₂₃</i>											
1	44,68	1,47	9,46	16,11	11,36	0,28	11,86	0,41	0,55	0,02	96,20

Примечание. Здесь и далее «н.п.» – содержание компонента ниже предела его обнаружения. Пределы обнаружения компонентов указаны в строке «П.о.». Все железо представлено в виде FeO. C_{cp} – средние содержания компонентов, S – стандартные отклонения, V – коэффициенты вариации (отн. %), характеризующие рассеяние отдельных результатов относительно их среднего значения. Кристаллохимические формулы рассчитаны по среднему для выборки содержанию оксидов.

Note. Here and further “н.п.” – below the detection limits. The detection limits of the components are given in the line “П.о.” All iron is represented as FeO. C_{cp} – mean contents of components. S – standard deviations, V – coefficients of variation (relative %), characterizing the dispersion of individual results relative to their mean value. Crystallochemical formulas are calculated using the average oxide content for the sample.

Серпентин является вторым по распространенности порообразующим минералом. Минералы его подгруппы – полигенные образования. Для них характерны близкие и часто перекрывающиеся значения содержания одноименных компонентов. По этой причине состав серпентинов малоинформативен и по результатам только химического анализа на главные элементы невозможно уверенно различить полиморфы минерала и связать их с соответствующей геологической обстановкой. По-видимому, более благоприятными для этих целей могут оказаться второстепенные компоненты (Al, Cr, Mn, Ni и др.). При их невысокой концентрации относительно небольшое различие в содержании может оказаться достаточно значимым при разбраковке серпентинов на минеральные индивиды, которые могут свидетельствовать о разных этапах преобразования пород [Варлаков, 1999; Панасьян и др., 2014; Чашухин и др., 2016].

Применительно к исследованным клинопироксенам серпентины можно условно разделить на четыре группы по соотношениям с другими фазами, морфологии и отчасти по различиям в химическом составе: серпентин Srp-1, распознаваемый под микроскопом как чешуйчатый антигорит, замесивший зерна оливина и составляющий основную массу этого минерала в породе; серпентин Srp-2, «залечивший» совместно с выделениями андрадита трещины спайности в зернах клинопироксена (см. рис. 2); серпентин Srp-3, в разной степени псевдоморфно замесивший идиоморфные кристаллы хромшпинели внутри магнетитовых кайм (футляров); серпентин Srp-4, слагающий участки породы, непосредственно примыкающие к внешним границам магнетитовых кайм (рис. 3).

Результаты определений состава серпентинов внутри каждой их группы выявили заметные вариации в содержании компонентов. В ряде случаев размахи варьирования концентраций одноименных компонентов в серпентинах из разных групп перекрываются. В такой ситуации результаты отдельных анализов серпентина малоинформативны. В этом случае наглядней их представлять свернутой цифровой информацией в виде средних значений (C_{cp}), стандартных отклонений (S) и коэффициентов вариации ($V = 100 \% \times S / C_{cp}$). Подобные характеристики приведены и для сумм оксидов, дополнение которых до 100 мас. % относим на неопределяемую электронно-зондовым микроанализом H_2O . Значимость различия между концентрацией одноименных компонентов оценим по статистическому t -критерию для доверительной вероятности 95 %. Результаты обработки данных представлены в табл. 3.

Из табл. 2 и 3 следует, что серпентины фактически неразличимы по SiO_2 . Серпентин, представляющий выборку Srp-1, отличается от остальных его разновидностей существенно большим содержанием FeO и Al_2O_3 . Его средняя магнезиальность $Mg^{\#} = 96,0 \%$. Почти двукратное различие по Al_2O_3 между Srp-1 и Srp-2 статистически незначимо, поскольку в Srp-1 содержание Al_2O_3 широко варьирует (до 124 отн. %). Для этих двух разновидностей серпентинов при близости в них средних значений концентрации хрома наблюдается большой (до 102 и 65 отн. % соответственно) внутригрупповой разброс по этому элементу. Средний состав серпентина из выборки Srp-2 показал, что его $Mg^{\#} = 97,2 \%$.

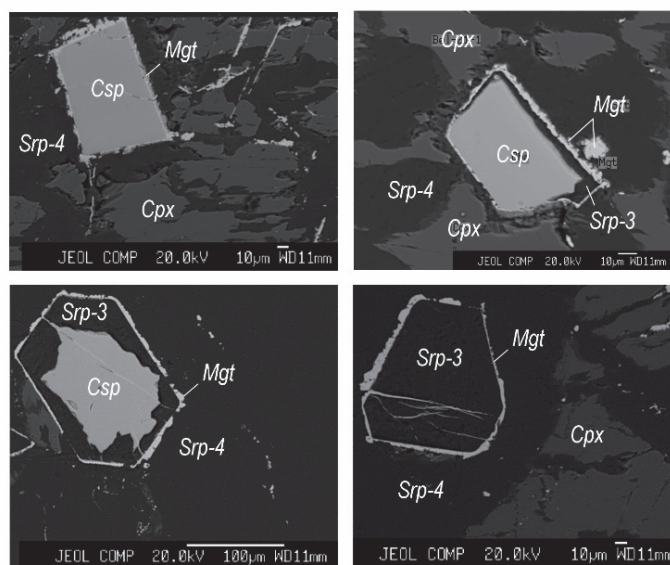


Рис. 3. Идиоморфные кристаллы хромшпинели (Csp), окруженные каймой магнетита (Mgt) и в разной мере замещенные серпентином (Srp-3)

Fig. 3. Idiomorphic crystals of chrome spinel (Csp) surrounded by a rim of magnetite (Mgt) and substituted to varying degrees by serpentine (Srp-3)

Таблица 2

Статистические параметры выделенных групп серпентина, мас. %

Table 2

Statistical data parameters of selected groups of serpentines, wt %

Величина	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	Cr ₂ O ₃	NiO	Сумма
<i>Srp-1, замесивший Ol ($Fe_{tot}=0,235Mg_{5,572}Mn_{0,011}Ni_{0,003}Al_{0,117}Cr_{0,028}$)$5,966Si_{3,981}O_{14}$, $n = 6$</i>								
C_{cp}	43,17	1,08	3,05	40,53	0,14	0,38	0,04	88,39
S	1,42	1,34	0,81	0,79	0,03	0,39	0,03	0,89
V	3,3	123,8	26,7	2,0	22,1	101,8	65,0	1,0
<i>Srp-2 из трещин в Cpx ($Fe_{tot}=0,162Mg_{5,674}Mn_{0,009}Ni_{0,002}Al_{0,068}Cr_{0,027}$)$5,942Si_{4,005}O_{14}$, $n = 10$</i>								
C_{cp}	42,90	0,62	2,07	40,77	0,11	0,37	0,03	86,87
S	0,78	0,35	0,60	0,90	0,02	0,24	0,02	1,31
V	1,8	56,8	28,7	2,2	21,8	64,6	53,3	1,5
<i>Srp-3, замесивший Csp внутри Mgt-каймы ($Fe_{tot}=0,168Mg_{5,719}Mn_{0,005}Ni_{0,007}Al_{0,038}Cr_{0,056}$)$5,993Si_{3,980}O_{14}$, $n = 17$</i>								
C_{cp}	43,07	0,35	2,17	41,51	0,06	0,77	0,09	88,02
S	0,34	0,03	0,26	0,50	0,01	0,16	0,02	0,73
V	0,8	7,7	12,0	1,2	21,6	20,4	25,6	0,8
<i>Srp-4, около внешней стороны Mgt-каймы ($Fe_{tot}=0,151Mg_{5,798}Mn_{0,006}Ni_{0,007}Al_{0,026}Cr_{0,023}$)$6,011Si_{3,982}O_{14}$, $n = 19$</i>								
C_{cp}	43,18	0,24	1,96	42,18	0,08	0,32	0,09	88,05
S	0,34	0,04	0,30	0,35	0,02	0,10	0,03	0,34
V	0,8	15,0	15,1	0,8	22,5	31,9	31,1	0,4

Примечание. Состав и химические формулы указаны без учета H₂O, n – количество анализов.

Note. Composition and chemical formulas are given without H₂O, n – number of analyses.

Таблица 3

Перечень элементов, содержание которых с вероятностью 95% значительно различается между разновидностями серпентина из оливинового клинопироксенита

Table 3

The list of elements, the content of which with a probability of 95% significantly differs between varieties of serpentines from olivine clinopyroxenite

Серпентин	Srp-2	Srp-3	Srp-4
Srp-1	Fe	Mg, Al, Cr, Mn, Fe, Ni	Mg, Al, Mn, Fe, Ni
Srp-2	–	Mg, Al, Cr, Mn, Ni	Mg, Al, Ni
Srp-3	–	–	Mg, Al, Cr, Fe

Серпентины из групп Srp-3 и Srp-4 характеризуются относительно выборок Srp-1 и Srp-2 более однородным распределением как главных, так и второстепенных компонентов. В этих серпентинах устойчиво присутствует примесь никеля. Среднее значение показателя магнетиальности серпентинов из внутренней и внешней сторон магнетитовых кайм близки и составляют 97,1 и 97,4 % соответственно. В целом можно подчеркнуть, что, за исключением SiO₂, в выделенных разновидностях серпентина наблюдаются значимые различия в содержании одноименных оксидов.

А.С. Варлаков [1999] по составу серпентинов из ультраосновных пород Урала привел сведения о закономерностях поведения некоторых компонентов, включая H₂O, в антигорите и политипных модификациях лизардита и хризотила. По его данным, количество катионов кремния в антигорите и полиморфах хризотила составляет 3,95–4,05 атомных единиц. В отношении этого признака рассмотренные нами

серпентины попадают в указанный интервал. По содержанию железа результаты противоположны. В работе А.С. Варлакова максимальное его количество указано для α -лизардита, а не для антигорита как в нашем случае. Относительно содержания H₂O наблюдается определенная согласованность с нашими данными. Так, для антигорита оно составило порядка 12 мас. %, причем по этому показателю серпентины Srp-1, Srp-3 и Srp-4 формально можно отнести к данному минералу. Серпентин Srp-2, локализованный в трещинах спайности в клинопироксене, характеризуется наибольшим расчетным количеством H₂O (13,13 мас. %). Это значение перекрывается с содержанием H₂O, определенным А.С. Варлаковым при анализе политипов лизардита и хризотила. В целом можно констатировать, что на данном уровне исследований состава серпентинов химические анализы не позволяют установить их полиморфы и поли-типы.

Акцессорные минералы. Обнаруженные в пластинках-препаратах оливинного клинопироксенита акцессорные минералы разнообразны по видовому и химическому составу. Среди них хромшпинель, магнетит и андрадит формируют в породе самостоятельные зерна. Все встреченные разновидности сульфидов Ni, Cu, Co и Fe, а также железо-никелистая самородная медь находятся в качестве микровключений в магнетите.

Хромшпинель присутствует в двух морфологических разновидностях – в виде идиоморфных и ксено-

морфных зерен размером 0,1–0,5 мм, которые в проходящем свете имеют красноватый оттенок (рис. 3, 4). Ксеноморфные индивиды образуют изредка обособленные, но в основном находящиеся в сростании с магнетитом зерна неправильных форм. Идиоморфные кристаллы представлены исключительно отдельными образованиями, заключенными в магнетитовые оболочки. В некоторых зернах наблюдается начальная стадия замещения хромшпинели магнетитом по трещинам и краевым зонам (см. рис. 4, b).

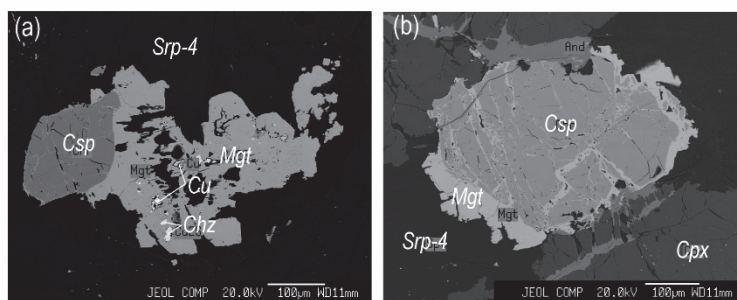


Рис. 4. Взаимоотношения хромшпинели и магнетита

(a) – сросток зерна хромшпинели (*Csp*) и зерна магнетита (*Mgt*), содержащего микровключения халькозина (*Chz*) и самородной меди (*Cu*). (b) – начальный этап замещения хромшпинели магнетитом

Fig. 4. Relationship between chromspinel and magnetite

(a) – cross-linking of chromspinel grain (*Csp*) and magnetite grain (*Mgt*) containing microinclusions of chalcocine (*Chz*) and nugget copper (*Cu*). (b) – initial stage of chromspinel replacement by magnetite

Электронно-зондовые анализы, выполненные в центральных участках вскрытых поверхностей кристаллов, показали существенное различие в концентрации отдельных компонентов от зерна к зерну (табл. 4). Среди основных оксидов наибольший разброс наблюдается по MgO (до 27 отн. %). Для Zn и особенно для Ni неоднородность их распределения в значительной степени обусловлена аналитической погрешностью рядовых определений малых содержаний, поэтому в дальнейшем статистика по микропримесям приводиться не будет. Нет оснований считать состав отдельных кристаллов переменным, поскольку их просмотр в режиме обратно рассеянных электронов не выявил зональность в пределах наблюдаемых поверхностей. Следовательно, единичный анализ в произвольной точке плоскости среза может характеризовать состав зерна в целом. По среднему химическому составу хромшпинелей рассчитаны значения показателей хромистости (72,1 %) и магнезиальности (24,2 %), которые по классификации Н.В. Павлова [1949] соответствуют субальюмоферрихромиту.

Все обнаруженные идиоморфные зерна хромшпинели окружены узкими каймами (футиярами) магнетита. Предполагается, что ее индивиды с правильными кристаллографическими очертаниями могли

образоваться в реститогенных ультрамафитах, а также выделяться позже в виде метакристаллов в результате метасоматических преобразований породы. Благодаря наличию сохранившихся магнетитовых оболочек наглядно прослеживается замещение минерала серпентином. Степень сохранности зерен хромшпинели различна – от неизменных до полностью замещенных серпентином, которые выделены в группу Srp-3 (см. рис. 3). Вполне очевидно, что это замещение произошло после образования магнетитовых кайм вокруг кристаллов хромшпинели. В растровом режиме СОМРО микроанализатора зерна хромшпинели выглядят гомогенными и без включений. Коэффициенты вариации, представляющие внутригрупповой разброс содержаний одноименных компонентов, значительно ниже таковых для ксеноморфных выделений хромшпинели. В идиоморфных кристаллах хромшпинелей среди главных оксидов наиболее значительно варьирует содержание Al_2O_3 , но степень его разброса не превышает 9 отн. %. Для усредненного состава минерала значения параметров $Cr^{\#} = 74,5 \%$, $Mg^{\#} = 25,4 \%$, т.е. по этим признакам он также относится к субальюмоферрохромиту. Между морфологически разными хромшпинелями наблюдается значимое различие по концентрации Cr, Ti, V и Zn.

Таблица 4

Химический состав хромшпиннели, мас. %

Table 4

The chemical composition of the chrome-spinel, wt %

<i>Ксеноморфные зерна ($Mg_{0.299}Fe_{0.690}Mn_{0.013}Zn_{0.004}$)$_{1.006}(Cr_{1.227}Al_{0.476}Fe^{+3}_{0.263}Ti_{0.010}V_{0.016})_{1.992}O_4$</i>												
№ анализа	Cr ₂ O ₃	FeO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	NiO	V ₂ O ₃	ZnO	Сумма	Cr [#]	Mg [#]
1	40,10	43,29	3,08	8,23	0,60	0,51	0,06	0,55	0,10	96,52	76,6	11,3
2	46,02	34,16	4,39	11,08	0,48	0,43	0,04	0,66	0,19	97,45	73,6	18,7
3	47,92	30,58	6,94	13,18	0,39	0,32	0,07	0,61	0,21	100,20	70,9	28,8
4	48,09	29,21	7,82	13,48	0,36	0,33	н.п.	0,61	0,18	100,07	70,5	32,3
5	45,23	33,14	6,20	11,85	0,46	0,39	0,04	0,52	0,16	98,00	71,9	25,0
6	41,41	37,17	5,20	11,95	0,50	0,47	0,08	0,81	0,12	97,71	69,9	20,0
7	49,85	29,75	6,89	11,66	0,43	0,35	0,06	0,51	0,14	99,63	74,1	29,2
8	46,49	30,95	6,76	13,69	0,40	0,32	0,09	0,56	0,19	99,46	69,5	28,0
С _{ср}	45,64	33,53	5,91	11,89	0,45	0,39	0,053	0,60	0,16	98,63	72,1	24,2
S	3,349	4,743	1,572	1,755	0,074	0,073	0,027	0,096	0,038	1,381	2,44	6,99
V	7,3	14,2	26,6	14,8	16,4	18,7	50,9	16,0	23,7	1,4	3,4	28,9
<i>Идиоморфные кристаллы ($Mg_{0.267}Fe_{0.720}Mn_{0.014}Zn_{0.007}$)$_{1.008}(Cr_{1.330}Al_{0.456}Fe^{+3}_{0.193}Ti_{0.006}V_{0.009})_{1.994}O_4$</i>												
1	51,06	31,29	5,32	10,86	0,45	0,23	н.п.	0,32	0,34	99,88	75,9	23,3
2	51,26	31,18	5,36	10,72	0,45	0,22	н.п.	0,29	0,30	99,78	76,2	23,4
3	46,51	32,92	5,78	13,55	0,50	0,29	0,03	0,47	0,14	100,20	69,7	23,9
4	45,21	33,20	5,74	13,47	0,71	0,33	н.п.	0,49	0,26	99,41	69,3	23,5
5	49,25	32,75	5,09	11,20	0,47	0,21	н.п.	0,27	0,34	99,58	74,7	21,7
6	49,09	32,66	5,17	11,21	0,47	0,26	0,02	0,26	0,33	99,47	74,6	22,0
7	48,63	33,09	5,05	11,32	0,46	0,25	0,02	0,37	0,26	99,45	74,2	21,4
8	48,79	32,95	5,17	11,49	0,44	0,24	н.п.	0,27	0,26	99,61	74,0	21,9
9	48,15	33,80	5,07	11,05	0,60	0,24	н.п.	0,33	0,33	99,57	74,5	21,1
10	49,28	32,54	5,14	11,50	0,43	0,21	0,02	0,27	0,24	99,63	74,2	22,0
11	51,36	30,61	5,58	11,86	0,44	0,23	0,02	0,24	0,24	100,60	74,4	24,5
12	51,11	30,66	5,59	11,91	0,44	0,20	н.п.	0,30	0,26	100,50	74,2	24,5
13	50,08	32,10	5,41	11,47	0,45	0,26	н.п.	0,30	0,25	100,30	74,6	23,1
14	50,16	32,08	5,42	11,32	0,45	0,24	н.п.	0,32	0,30	100,30	74,9	23,2
15	49,89	31,82	5,13	11,43	0,45	0,23	н.п.	0,28	0,33	99,57	74,6	22,3
16	49,57	31,86	5,26	11,53	0,45	0,22	н.п.	0,35	0,32	99,56	74,3	22,7
17	51,93	32,11	4,99	9,79	0,46	0,24	0,04	0,38	0,29	100,20	78,1	21,7
18	51,81	32,03	5,03	9,66	0,46	0,24	н.п.	0,26	0,32	99,81	78,2	21,9
С _{ср}	49,62	32,20	5,29	11,41	0,48	0,24	—	0,32	0,28	99,85	74,5	22,7
S	1,79	0,88	0,25	0,97	0,07	0,03	—	0,07	0,05	0,39	2,21	1,05
V	3,6	2,7	4,7	8,5	14,4	12,9	—	21,9	18,2	0,4	2,9	4,6

Примечание. Cr[#], % = 100×Cr/(Cr+Al), коэффициенты формульные (к.ф.). Mg[#], % = 100×Mg/(Mg+Fe), к.ф.

Note. Cr[#], % = 100×Cr/(Cr+Al), formula coefficients (c.f.). Mg[#], % = 100×Mg/(Mg+Fe), k.f.

Магнетит является вторичным минералом, возникшим, главным образом, при серпентинизации оливина. Он формирует отдельные индивиды, иногда заполняет микротрещины в зернах хромшпиннели или образует вокруг них каймы (футляры). Выделения магнетитов можно разделить на две морфологические разновидности. К первой из них отнесены обособленные ксеноморфные зерна и сростки с кристаллами хромшпиннели в серпентине (рис. 4, 5). Вторая разновидность магнетита представлена в виде кайм (футляров) (см. рис. 3).

Изучение химического состава магнетита показало, что изменение концентрации Fe от зерна к зерну незначительно и не превышает 1 отн. %, в то время как содержание оксидов Cr, Ti, Mg и V значительно варьирует. В некоторых выделениях ксеноморфного магнетита встречаются микровключения, о которых будет сказано далее.

Вторая морфологическая разновидность магнетита представлена узкими (2–10 мкм) пористыми каймами вокруг кристаллов хромшпиннели (рис. 3). В магнетите этой разновидности микровключения каких-либо фаз не обнаружены. Каймы-футляры располагаются исключительно вокруг идиоморфных кристаллов хромшпиннели. Ее кристаллическая структура аналогична магнетитовой, т.е. для роста магнетита хромшпиннель является благоприятной подложкой. Внутренним сторонам магнетитовых кайм присущи прямолинейные границы, повторяющие морфологию зерен хромшпиннели. В противоположность им внешняя поверхность кайм имеет мелкозубчатую конфигурацию.

Даже при полном замещении хромшпиннели серпентином магнетитовые каймы сохраняют первоначальный облик без видимых признаков деформирования.

Поэтому можно допустить, что образование кайм произошло позже, чем деформация кристаллов клинопироксена (см. рис. 2). Отметим, что в породах, подобных описанным нами, магнетиты футляровидной формы были представлены и ранее. В частности, формирование кайм магнетита вокруг зерен хромшпинели были обнаружены в ультрамафитах из массива Крака (Южный Урал) [Савельев и др., 2008], а также в ультрамафитах из Эгийнгольского массива (Северная Монголия) [Каримов и др., 2017].

Авторы последней работы полагали, что магнетитовые оторочки образовались на последних этапах

термической истории массива – во время низкотемпературной серпентинизации (<250 °C).

По сравнению с ксеноморфными зернами магнетитовые каймы содержат в среднем меньше железа (средние FeO 91,2 и 88,8 мас. %. соответственно), при этом в них практически отсутствует Ti (в среднем TiO₂ 0,48 и 0,00 мас. % соответственно). Дефицит этих элементов компенсируется более высокой концентрацией Cr (в среднем Cr₂O₃ 1,39 и 3,59 мас. % соответственно). Сравнивая по *t*-критерию составы двух разновидностей магнетита, отметим, что между содержанием Ti, Cr и Fe наблюдается значимое различие.

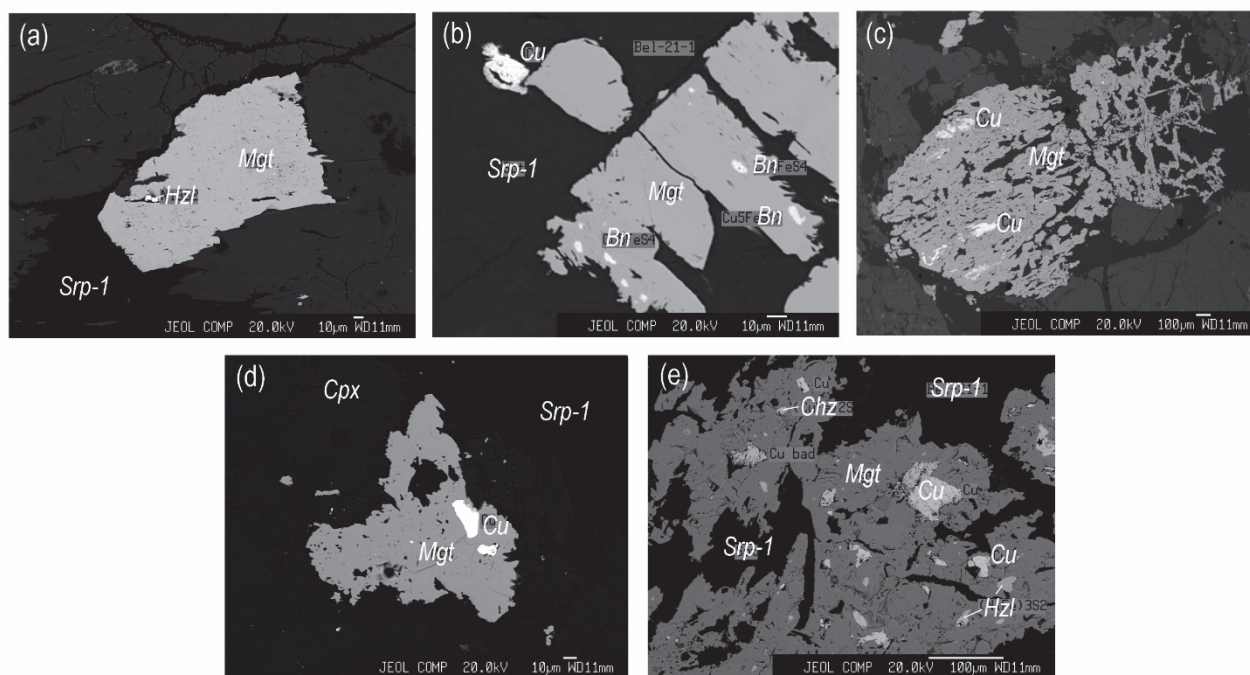


Рис. 5. Зерна магнетита и микровключения в них минералов меди

(a) – зерна магнетита (*Mgt*), содержащие микровключения хизлевудита (*Hzl*, Ni₃S₂) и (b) – борнита (*Bn*, Cu₅FeS₄), обособленное зерно самородной железо-никелистой меди (*Cu*). (c) – «скелетный» кристалл магнетита, содержащий микровключения самородной железо-никелистой меди (*Cu*). (d) – микровключения *Cu* в зерне магнетита (*Mgt*), находящегося в ассоциации с зернами клинопироксена (*Cpx*, темно-серое) и серпентина-1 (*Srp-1*, черное). (e) – микровключения *Cu*, хизлевудита (*Hzl*) и халькозина (*Chz*) в ксеноморфном зерне магнетита, расположенном в *Srp-1*

Fig. 5. Magnetite grains and microinclusions of copper minerals in them

(a) – magnetite grains (*Mgt*) containing microinclusions of hizlewoodite (*Hzl*, Ni₃S₂) and (b) – bornite (*Bn*, Cu₅FeS₄), Cu – isolated grain of native iron-nickel copper. (c) – “skeletal” magnetite crystal containing microinclusions of nugget iron-nickel copper. (d) – Cu microinclusions in a magnetite grain (*Mgt*) in association with clinopyroxene (*Cpx*, dark gray) and serpentine-1 (*Srp-1*, black) grains. (e) – Cu, hizlewoodite (*Hzl*) and chalcocite (*Chz*) microinclusions in a xenomorphic magnetite grain located in *Srp-1*

Андрадит встречается, главным образом, в виде мелких линзовидных выделений, находящихся в парагенезисе с *Srp-2*. Эти два минерала слагают микропрожилки, «залечившие» трещины спайности в зернах клинопироксена (см. рис. 2, табл. 5). По сравнению с содержащим его клинопироксеном андрадит богаче кальцием. Это позволяет предположить, что данный элемент привносился в клинопироксены при

инфильтрации флюида по трещинам спайности. Несмотря на то, что андрадит находится в парагенезисе с богатым Mg серпентином, он стерилен в отношении этого элемента. Значение параметра Fe[#] в андрадите изменяется в узком интервале (38,4–39,4 %). Выделения андрадита очень редко наблюдались вне трещин спайности в клинопироксенах, например, на рис. 4 (правое фото) он находится в сростке с зерном хромита.

Помимо описанных выше минералов в пластинках-препаратах оливинового клинопироксена были обнаружены фазы, которые не образуют обособленные индивиды, а формируются в виде мелких выделений в некоторых зернах ксеноморфного магнетита. Электронно-зондовым анализом установлено, что микровключения представлены самородными медью и кобальтом, а также сульфидами Fe, Co, Ni и Cu. В пределах отдельного зерна магнетита количество выделений минеральных видов микровключений различно.

Распределение микровключений по плоскостям сечений магнетитов хаотичное, что позволяет предположить их сингенетичность.

Самородная железо-никелистая медь. В микровключениях самородной меди (см. рис. 5, d, e) выявлена примесь Fe и Ni, концентрация которых значительно варьирует от одного ее выделения к другому, но при этом их суммарное количество не превышает 10 мас. %. Отметим, что доля Fe необычно высокая, вплоть до 7 мас. % (табл. 6). Микровключения такого состава названы нами самородной железо-никелистой медью. Между содержанием Ni и Fe проявляется обратная зависимость с коэффициентом корреляции $-0,77$.

Кобальт самородный. В единичном случае встречено небольших размеров выделение самородного кобальта с примесью As (табл. 7), других фаз мышьяка в исследуемых образцах обнаружить не удалось.

Таблица 5

Химический состав андрадита, выделения которого совместно с серпентином-2 «залечили» трещины спайности в зернах клинопироксена, мас. %

Table 5

The chemical composition of andradite, the isolation of which, together with serpentine-2 "healed" cleavage cracks in clinopyroxene grains, wt %

№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	NiO	Cr ₂ O ₃	Сумма	Fe [#]
<i>(Ca_{3.051}Mn_{0.003})_{3.054}(Fe⁺³_{1.948}Al_{0.027}Cr_{0.020})_{1.995}(Si_{2.973}Ti_{0.004})_{2.977}O₁₂</i>												
1	35,04	н.п.	0,53	27,11	н.п.	0,02	33,82	0,02	0,02	0,52	97,09	38,4
2	35,70	0,12	0,12	28,25	н.п.	0,06	33,93	0,12	0,02	0,04	98,36	39,4
3	35,37	н.п.	0,23	28,19	н.п.	0,03	33,96	н.п.	н.п.	0,08	97,87	39,2
4	35,20	н.п.	0,21	27,95	н.п.	0,02	33,90	0,09	н.п.	0,27	97,69	39,1
5	35,59	0,19	0,27	27,15	н.п.	0,05	33,83	н.п.	н.п.	0,57	97,67	38,5
C _{ср}	35,38	—	0,27	27,73	—	0,04	33,89	—	—	0,30	97,74	38,92
S	0,271	—	0,154	0,559	—	0,018	0,061	—	—	0,244	0,456	0,444
V	0,8	—	57,0	2,0	—	45,0	0,2	—	—	81,3	0,5	1,1

Примечание. Fe[#], % = 100×Fe/(Fe+Ca), к.ф.

Note. Fe[#], % = 100×Fe/(Fe+Ca), c.f.

Таблица 6

Химический состав самородной железо-никелистой и никелистой меди, мас. %

Table 6

The chemical composition of native nickel-plated and iron-nickel-plated copper, wt %

№ анализа	S	As	Ni	Co	Cu	Fe	Сумма
<i>П.о.</i>	<i>0,02</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,02</i>	<i>0,01</i>	
<i>Железо-никелистая медь</i>							
1	0,04	н.п.	5,06	0,01	93,39	0,52	99,02
2	0,03	0,05	2,90	0,02	95,43	0,97	99,4
3	0,09	0,04	2,22	0,05	90,85	6,98	100,23
4	н.п.	н.п.	0,28	0,01	97,78	1,94	100,01
5	0,04	н.п.	0,26	н.п.	99,56	1,01	100,87
C _{ср}	—	—	2,14	—	95,40	2,28	99,91
S	—	—	2,007	—	3,45	2,68	0,72
V	—	—	93,8	—	3,6	117,5	0,7
<i>Никелистая медь</i>							
1	0,03	н.п.	7,18	0,01	93,12	н.п.	100,34
2	0,02	0,08	5,01	0,03	95,72	н.п.	100,86
3	н.п.	0,03	4,62	0,03	95,02	0,02	99,72
4	н.п.	0,06	5,28	н.п.	95,67	н.п.	101,01
5	н.п.	0,10	5,80	0,01	93,78	н.п.	99,69
6	0,05	н.п.	6,53	0,01	92,78	0,04	99,41
7	0,04	0,13	6,45	0,02	92,60	н.п.	99,24
8	0,02	0,04	5,72	0,02	94,03	0,03	99,86
9	0,03	0,11	6,32	0,04	94,18	0,01	100,69
10	н.п.	0,06	4,99	0,03	94,60	н.п.	99,68
11	0,04	0,12	4,85	0,01	94,28	0,01	99,31

№ анализа	S	As	Ni	Co	Cu	Fe	Сумма
12	н.п.	0,03	5,37	0,02	95,03	0,04	100,49
13	н.п.	0,04	5,14	н.п.	95,29	0,02	100,49
14	0,03	0,07	1,64	н.п.	97,85	0,03	99,62
15	0,05	н.п.	2,28	н.п.	96,60	н.п.	98,93
16	0,02	0,08	0,87	н.п.	99,98	0,01	100,96
17	0,03	0,11	4,52	0,02	93,24	0,03	97,95
C_{cp}	—	—	4,86	—	94,93	—	99,90
S	—	—	1,73	—	1,90	—	0,82
V	—	—	35,6	—	2,0	—	0,8

Сульфиды. Микровключения сульфидов в магнетитах представлены пирротинном, пиритом, халькозинном, борнитом, миллеритом, хизлевудитом и пентландитом. Состав последнего в разных микровключениях изменяется от чисто никелистого до кобальт-пентландита (табл. 7). По среднему составу минералов рассчитаны формульные коэффициенты. Как и для железо-никелистой самородной меди, количество

анализов, приведенных в табл. 8, невелико. Малые размеры объектов исследования приводят к неприемлемым аналитическим погрешностям. По этой причине можно лишь идентифицировать минеральную принадлежность фазы. Данные по миллериту и хизлевудиту в этой таблице не приведены, поскольку по химизму они близки к их зернам из тяжелой фракции, анализы которых приводятся ниже.

Таблица 7

Химический состав микровключений сульфидов в магнетите, мас. %

Table 7

The chemical composition of accessory minerals, wt %

№ анализа	S	As	Ni	Co	Cu	Fe	Сумма
<i>Пентландит-1 ($Ni_{8,999}Fe_{0,001}Co_{0,019}Cu_{0,015}S_{9,034}$)</i>							
1	32,63	0,04	67,36	0,26	Н.п.	0,02	100,31
2	32,76	Н.п.	67,34	0,02	0,23	Н.п.	100,35
<i>Пентландит-2 ($Ni_{2,120}Fe_{3,139}Co_{3,952}Cu_{0,006}S_{9,217}$)</i>							
1	32,70	Н.п.	15,87	29,69	0,05	22,35	100,66
<i>Пентландит-3 ($Ni_{2,203}Fe_{1,771}Co_{5,119}Cu_{0,006}S_{9,099}$)</i>							
1	32,99	0,05	16,57	38,87	0,04	12,62	101,14
2	32,82	Н.п.	16,61	38,54	0,05	12,75	100,77
<i>Пентландит-4 ($Ni_{1,017}Fe_{0,166}Co_{7,705}Cu_{0,031}S_{8,914}$)</i>							
1	32,70	0,04	8,81	56,51	0,07	0,61	98,74
2	31,93	0,08	6,22	57,47	0,61	2,47	98,78
3	32,84	Н.п.	7,15	57,63	0,48	2,37	100,47
4	32,95	0,01	7,93	58,87	0,04	0,21	100,01
5	33,15	Н.п.	7,96	59,06	0,04	0,22	100,43
<i>Пирротин ($Fe_{0,973}S$)</i>							
1	36,41	0,02	Н.п.	0,02	0,02	62,87	99,34
2	36,31	0,02	0,01	Н.п.	0,04	62,82	99,20
3	38,71	Н.п.	0,03	0,07	Н.п.	61,32	100,13
4	36,14	Н.п.	Н.п.	Н.п.	Н.п.	63,09	99,23
<i>Халькозин ($Cu_{1,685}Fe_{0,125}S_{1,810}$)</i>							
1	21,86	Н.п.	0,05	0,02	72,52	4,71	99,16
2	22,00	Н.п.	Н.п.	0,03	72,76	4,73	99,52
3	21,85	Н.п.	Н.п.	Н.п.	74,15	4,87	100,87
<i>Пирит ($Fe_{0,993}As_{0,004}S_{0,997}$)</i>							
1	53,35	0,02	Н.п.	Н.п.	Н.п.	46,65	100,02
2	53,58	0,43	Н.п.	0,02	0,02	45,87	99,45
<i>Борнит ($Cu_{5,428}Fe_{1,032}S_{6,460}$)</i>							
1	24,28	Н.п.	0,03	0,03	65,31	10,91	100,56
<i>Кобальт самородный</i>							
1	Н.п.	4,64	0,05	97,14	0,02	Н.п.	101,85

Примечание. В скобках приведены средние составы минералов в формульных коэффициентах.

Note. Average compositions of minerals in formula units are given in parentheses.

Минеральный состав тяжелой и промежуточной фракций

Часть пробы, предназначенной для поиска цирконов, была измельчена в тщательно очищенной щековой дробилке, затем пробу рассеяли до получения фракции 0,31 мм, которая была подвергнута разделению на магнитном сепараторе и в бромформе. После этого под бинокляром из пробы выделили три зерна циркона и затем вместе с сопутствующими акцессорными минералами тяжелой и промежуточной фракции инплантировали в оксидную шашку-препарат.

Промежуточная фракция. К минералам этой фракции отнесены кальцит и доломит. В кальците колебание концентрации Ca от зерна к зерну не превышало 1 отн. %. В доломите вариации содержания Mg достигали к 10 отн. %, что примерно в два раза больше, чем для Ca. Между этими компонентами в доломите наблюдалась высокая отрицательная зависимость с коэффициентом корреляции $-0,88$. Очевидно, в данном случае некоторое переопределение Ca обусловлено не аналитической погрешностью, а реальным отклонением состава от идеальной стехиометрии.

Тяжелая фракция. В этой фракции оливинового клинопироксена обнаружено четыре минерала: миллерит, хизлевудит, самородная медь и циркон.

Миллерит представлен обособленными выделениями и в составе сростков с хизлевудитом. В некоторых из них по периферии, а также вдоль секущих микротрещин наблюдалось замещение миллерита самородной медью (рис. 6). В качестве микропримеси в минерале обнаружены Fe, Cu, Co и As, причем содержание Fe и Co достигали десятых долей процента (табл. 8).

Хизлевудит представлен в сростках с миллеритом и самородной медью, кроме того, он встречался в виде микровключений в ксеноморфных зернах магнетита (рис. 5, 6). В некоторых выделениях хизлевудита в качестве примеси обнаружены Fe, Co, Cu и As. В отличие от миллерита минерал содержит значительно большее количество Fe. По содержанию Cu в обоих минералах наблюдался разброс от не обнаруживаемых микрозондом количеств до отдельных выбросов в несколько мас. %. При определении содержания Cu не исключалась некоторая аналитическая неопределенность, поскольку в процессе пробоподготовки медь могла быть «натерта» на анализированные зерна сульфидов (табл. 8).

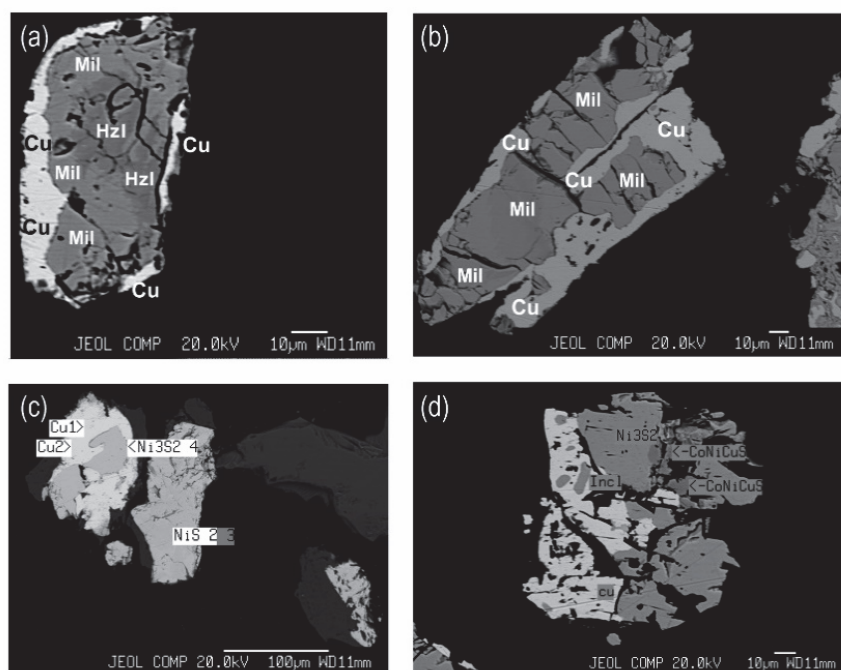


Рис. 6. Взаимоотношения минералов меди

(a) – самородная никелистая медь (Cu), образующая узкую кайму вокруг зерна, сложенного миллеритом (Mil) и хизлевудитом (Hzi). (b) – самородная никелистая медь (Cu), слагающая каймы вокруг зерна миллерита, а также вдоль микротрещины в миллерите. (c) – зерно самородной никелистой меди (Cu1> и Cu2>) с реликтовыми включениями замещенного ею зерна хизлевудита (Ni₃S₂) и зерно миллерита (NiS). (d) – сросток зерен самородной никелистой меди (Cu) и хизлевудита (Ni₃S₂)

Fig. 6. Relationships of copper minerals

(a) – naturally occurring nickeliferous copper (Cu) forming a narrow border around a grain composed of millerite (Mil) and hizlewoodite (Hzi). (b) – naturally occurring nickeliferous copper (Cu) forming borders around a grain of millerite and along a microcrack in millerite. (c) – grain of nugget nickel copper (Cu1> and Cu2>) with relict inclusions of replaced by it grain of hizlewoodite (Ni₃S₂) and grain of millerite (NiS). (d) – intergrowth of grains of nugget nickel copper (Cu) and hizlewoodite (Ni₃S₂)

Таблица 8

Химический состав миллерита и хизлевудита, мас. %

Table 8

The chemical composition of millerite and heazlewoodite, wt %

№ анализа	S	As	Ni	Co	Cu	Fe	Сумма
<i>Миллерит ($Ni_{0,997}Fe_{0,007}Co_{0,001}Cu_{0,001}$)_{1,005}S</i>							
1	35,41	н.о.	63,84	0,03	н.о.	0,38	99,66
2	35,08	0,04	63,79	0,02	н.о.	0,59	99,52
3	34,94	н.о.	63,52	0,03	н.о.	0,64	99,13
4	35,15	н.о.	63,38	0,01	н.о.	0,71	99,25
5	34,27	0,01	64,49	0,35	0,03	0,01	99,16
6	34,20	0,06	64,18	0,23	0,65	н.о.	99,32
7	35,21	н.о.	63,66	0,03	н.о.	0,34	99,24
8	35,20	н.о.	63,43	н.о.	н.о.	0,81	99,44
С _{ср}	34,93	—	63,79	0,10	—	0,50	99,34
S	0,45	—	0,38	0,13	—	0,27	0,19
V	1,3	—	0,6	—	—	54,6	0,2
<i>Хизлевудит ($Ni_{2,962}Fe_{0,051}Co_{0,001}Cu_{0,011}$)_{3,025}S₂</i>							
1	26,40	0,04	73,01	0,04	н.о.	0,02	99,51
2	26,58	0,02	73,91	н.о.	0,03	0,02	100,56
3	26,25	0,05	73,76	н.о.	0,22	0,04	100,32
4	27,10	0,08	72,18	0,02	н.о.	1,10	100,48
5	26,88	н.о.	72,08	н.о.	н.о.	0,38	99,34
6	26,51	н.о.	71,60	0,02	н.о.	1,84	99,97
7	26,75	0,04	72,77	н.о.	н.о.	0,31	99,87
8	26,99	0,05	73,00	н.о.	н.о.	0,74	100,78
9	26,67	н.о.	73,34	0,02	н.о.	0,76	100,79
10	26,83	н.о.	73,01	н.о.	н.о.	0,87	100,71
11	26,86	н.о.	72,20	0,01	н.о.	0,25	99,32
12	26,97	н.о.	72,33	0,04	н.о.	0,40	99,74
13	26,99	н.о.	71,94	0,02	1,05	0,48	100,48
14	26,25	0,05	68,18	0,12	3,37	2,17	100,14
15	25,82	0,04	71,00	0,13	0,20	3,28	100,47
16	26,83	0,06	73,01	0,04	н.о.	0,92	100,86
17	25,59	н.о.	69,01	0,01	0,03	6,30	100,94
С _{ср}	26,60	—	72,14	—	—	1,16	100,25
S	0,43	—	2,36	—	—	1,58	0,54
V	1,6	—	3,3	—	—	136,2	0,5

Никелистой медью названа самородная медь, содержащая переменное количество примеси Ni. Ее выделения обнаружены в тяжелой фракции, в которой она слагала каймы вокруг сростков и обособленных зерен миллерита и хизлевудита (см. рис. 5, 6, а). В некоторых выделениях никелистой меди присутствовали микровключения миллерита угловатой формы (рис. 6, правый фрагмент). В одном случае самородная медь наблюдалась в виде зоны вдоль стенок микротрещины в зерне миллерита (рис. 6, б). Концентрация Cu в самородной никелистой меди изменялась в интервале 93–98 мас. %, содержание Ni – в интервале 0,9–7,2 мас. %. В качестве микропримеси в ней также были обнаружены Fe, Co, S и As (табл. 6).

Циркон. Помимо описанных выше минералов в тяжелой фракции обнаружены три зерна циркона (рис. 7). Зерна Б-1 и Б-2 представлены обломками более крупных кристаллов, при этом зерна Б-1 и Б-3 имеют слегка округленную форму.

В отличие от них зерно Б-2 характеризуется отчетливо выраженным призматическим габитусом, при этом

в режиме обратно рассеянных электронов в нем прослеживалось ядро овальной формы и широкая внешняя зона. Содержание HfO₂ в ядре этого зерна несколько больше, чем в его внешней зоне, а также больше, чем в двух остальных зернах. В ядре зерна Б-2 определено относительно повышенное содержания U, Y и P. Оно отличается более низким значением параметра ZrO₂/HfO₂ по сравнению с его внешней зоной (табл. 9).

U-Pb датирование показало, что цирконы различаются по возрасту, а также по содержанию U (табл. 10). Так, для ядра и каймы зерна Б-1 определен намного более древний возраст (~1877 млн лет) по сравнению с зернами Б-2 и Б-3 (~433–482 и ~479–484 млн лет соответственно). Ядро и кайма зерна Б-2 отличаются от остальных зерен более высоким содержанием U и радиогенного изотопа ²⁰⁶Pb. Кроме того, степень дискордантности (D) для ядра зерна Б-2 намного больше, чем в остальных случаях (табл. 10). В целом значения возраста циркона ~480 млн лет характерны для возраста мафитовых пород Калбагдагского массива Тувы [Ойдул и др., 2019].

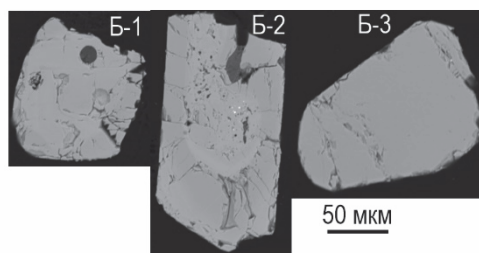


Рис. 7. Зерна циркона из серпентинизированного оливинового клинопироксенита

В зерне Б-2 наблюдается ядро округлой формы. Снимки сделаны в режиме обратно рассеянных электронов

Fig. 7. Zircon grains from serpentinized olivine clinopyroxenite

A rounded nucleus is observed in grain B-2. The images were taken in the backscattered electron mode

Таблица 9

Химический состав цирконов, мас. %

Table 9

The chemical composition of zircons, wt %

SiO ₂	ZrO ₂	HfO ₂	TiO ₂	UO ₂	Y ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Сумма	ZrO ₂ /HfO ₂
Б-1 (Zr _{0.984} Hf _{0.013}) _{0.997} Si _{1.003} O ₄								
32,56	65,49	1,53	0,01	Н.п.	Н.п.	Н.п.	99,59	42,8
Б-2* (ядро зерна) (Zr _{0.954} Hf _{0.019} U _{0.005} Y _{0.013} P _{0.015}) _{1.006} Si _{0.994} O ₄								
32,19	63,32	2,11	Н.п.	0,75	0,79	0,56	99,71	30,0
Б-2* (внешняя зона зерна) (Zr _{0.985} Hf _{0.013} U _{0.001} Y _{0.001} P _{0.005}) _{1.005} Si _{0.993} O ₄								
32,32	65,73	1,53	Н.п.	0,09	0,09	0,19	99,92	42,9
Б-3 (Zr _{0.982} Hf _{0.012}) _{0.994} Si _{1.006} O ₄								
32,77	65,59	1,37	0,01	Н.п.	Н.п.	Н.п.	99,74	47,9

Примечание. Здесь и в табл. 10 номера зерен соответствуют их номерам на рис. 7 (*) – среднее значение по результатам двух анализов.

Note. Here and in Table 10 the numbers of grains correspond to their numbers in Fig. 7 (*) – average value from the results of two analyses.

Таблица 10

Результаты U-Pb изотопного датирования цирконов

Table 10

U-Pb isotope dating of zircons results

№ анализа	U, г/г	Th/U	²⁰⁶ Pb, г/г	Изотопные отношения		Возраст, млн лет		
				²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	D, %
Б-1 (ядро зерна)	101	0,71	34	5,4104±0,1842	0,3379±0,0096	1887±15	1877±23	1,2
Б-1 (кайма зерна)	335	0,62	113	5,3734±0,1740	0,3381±0,0096	1881±14	1877±23	0,5
Б-2 (ядро зерна)	7231	0,98	502	0,6474±0,0210	0,0695±0,0020	506,8±6,5	432,9±5,9	17,1
Б-2 (внешняя зона зерна)	1376	0,22	107	0,5797±0,0186	0,0775±0,0022	464,3±6,3	481,9±6,5	-3,5
Б-3 (ядро зерна)	95	0,40	7,4	0,6064±0,0286	0,0772±0,0024	481,3±9,0	479,5±6,9	0,4
Б-3 (кайма зерна)	144	0,59	11	0,6208±0,0276	0,0780±0,0024	490,3±8,7	484,1±6,9	1,3

Примечание. Анализы выполнены методом LA-SF-ICP-MS на масс-спектрометре Element XR (Thermo Fisher Scientific) с эксимерной системой лазерной абляции Analyte Excite (Teledyne Cetac) (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск, исполнитель А.В. Карпов), D, % (степень дискордантности) = {T^{207Pb/235U} (млн лет) / T^{206Pb/238U} (млн лет) – 1} × 100.

Note. Analyses were performed by LA-SF-ICP-MS on the Element XR mass spectrometer (Thermo Fisher Scientific) with the Analyte Excite (Teledyne Cetac) excimer laser ablation system (ИГМ СО РАН, Novosibirsk, A.V. Karpov), D, % (degree of discordance) = T^{207Pb/235U} (Ma) / T^{206Pb/238U} (Ma) – 1} × 100.

Обсуждение и заключение

В связи с ограниченной распространенностью, очень неравномерным распределением в породах и субмикроскопическим размером зерен степень изученности видовой принадлежности, химического состава и других свойств акцессорных минералов из пород мафит-ультрамафитовых массивов длительное время оставалась на низком уровне. Масштабы изучения этих минералов, в том числе самородных металлов и сульфидов, в последние десятилетия существенно возросли благодаря широкому применению методов электронно-зондового микроанализа и растровой электронной микроскопии. Одним из показательных примеров детальных исследований в этом направлении является монография А.Б. Макеева [1992], в которой представлены результаты сотен анализов различных акцессорных минералов из ультрамафитов Полярного Урала.

В породах из мафит-ультрамафитовых массивов, распространенных на территории Тувы, акцессорные минералы, за исключением хромшпинели и отчасти минералов элементов платиновой группы, почти не изучались. В единичных зернах были проанализированы некоторые акцессорные сульфиды и арсениды Ni, Cu, Co и Fe из пород и хромититов Иджимского, Эргакского, Агардагского, Нижне-Тарлашкинского, Малокоптинского, Брунганского и Мажалыкского массивов, а также из ультрамафитовых тел Каа-Хемской офиолитовой зоны [Сибилев, 1980; Велинский и др., 1991, 1999; Котляров и др., 2004; Кривенко и др., 2005; Юричев, 2015]. По их данным, в этих массивах из числа акцессорных сульфидов чаще других встречались миллерит, хизлевудит, пентландит и пирит.

В связи с этим нами были исследованы видовая принадлежность, химический состав и другие свойства акцессорных минералов из серпентинизированных оливиновых клинопироксенитов на примере ультрамафитового массива Безымянный. Было установлено, что акцессорные минералы в этом массиве представлены миллеритом, хизлевудитом, самородной медью, пентландитом, пирротинном, халькозинном, борнитом, пиритом, а также хромшпинелью, магнетитом, андрадитом и цирконом. Самородная никелистая и железо-никелистая медь на территории Тувы была обнаружена впервые. Определено, что концентрация Cu в зернах самородной меди изменяется в пределах 93–98 мас. %, а содержание Ni – в пределах 0,9–7,2 мас. %. Содержание примеси Fe в железо-никелистой меди может достигать 7 мас. %.

Известно, что самородная медь является сравнительно редко встречающимся в природе образова-

нием. Она наблюдалась как в виде мелкой вкрапленности, так и в виде крупных штучков. Ее мелкая вкрапленность была обнаружена в некоторых метеоритах, а также в жилках, секущих серпентиниты и хромититы Родионовского хромитового месторождения на Южном Урале [Попов и др., 2013]. В работе Д.Е. Савельева и соавт. (2018) описана самородная железо-никелистая медь из хромититов массива Крака (Южный Урал). Содержание Ni в ней варьировало от 1,93 до 3,74 мас. %, а содержание Fe составило 0,99 мас. %. В свою очередь, в самородной меди из серпентинитов массива Рай-Из (Полярный Урал) примесь Ni не была выявлена [Макеев, 1992]. Самородная медь из пироксенитов Чешме-Бидского ультрамафитового массива (Южный Иран) образовалась, по мнению исследователей, в процессе серпентинизации этих пород в восстановительных условиях и при пониженной температуре, причем изотопный состав Cu указывает на ее мантийное происхождение [Eslami et al., 2021].

Имеются также сведения о том, что микровключения самородной меди из серпентинизированных дунитов мафит-ультрамафитового массива Маскок (Канада) также образовались в восстановительных условиях в процессе серпентинизации [Chamberlain et al., 2011]. Вкрапленность самородной меди, обнаруженной в серпентинизированных перидотитах из офиолитов Санта-Элена (Коста-Рика), как предположили исследователи, также могла образоваться во время серпентинизации этих пород путем десульфуризации первичных сульфидов меди в сильно восстановительных условиях либо после серпентинизации пород при взаимодействии высокотемпературного флюида с медьсодержащими минералами [Schwarzenbach et al., 2014].

Результаты наших исследований выделений самородной меди из оливиновых клинопироксенитов массива Безымянный позволяют предположить, что ее образование произошло в процессе инфильтрации флюида, который формировал каймы по периферии и в микротрещинах зерен миллерита и хизлевудита. В псевдоморфозах самородной меди по хизлевудиту иногда сохранялись его угловатые микровключения. В этом процессе содержание Ni в пределах каждого из выделений самородной меди сохранялось примерно на одном уровне, в то время как в разных ее выделениях оно варьировало в пределах 0,9–7,2 мас. %. Если принять во внимание реакцию восстановления меди из сульфида, предложенную Г.И. Шведовым и соавт. [2016] и имеющую вид $(\text{CuFeS}_2 + 5\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{Cu} + \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{H}_2\text{S})$, то в случае миллерита замещение его медью, привнесенной богатым водородом флюидом, могло произойти по такой схеме $\text{Cu} + \text{NiS} + \text{H}_2 \rightarrow \text{CuNi}_x + \text{H}_2\text{S} + \text{Ni}_{1-x}$. В соответствии с этой реакцией

образование самородной никелистой меди сопровождалось удалением из зоны реакции сероводорода и частично Ni.

Возможен еще один механизм появления вкрапленности самородной меди. При этом предполагается, что она выделялась в процессе воздействия медьсодержащего флюида на зерна магнетита, в которых формировались ее микровключения. В этом случае самородная медь обогащалась некоторым количеством не только Ni, но и Fe, причем концентрация последнего в самородной меди могла достигать 7 мас. %, что позволяет назвать ее железо-никелистой самородной медью. Добавим, что ограниченные размеры микровключений самородной меди не позволили оценить степень ее гомогенности.

В соответствии с петрогенетической моделью, основанной на материалах изучения большого ряда мафит-ультрамафитовых массивов, расположенных на территории Тувы [Леснов и др., 2019], а также за ее пределами [Леснов, 2015], мы рассматриваем массив Безымянный в качестве фрагмента контактово-реакционной зоны более крупного, но очень слабо вскрытого эрозией полигенного мафит-ультрамафитового тела, входящего в состав Западно-Тувинского ареала офиолитовой ассоциации. В рамках этой модели в строении офиолитовых мафит-ультрамафитовых массивов выделяются четыре пространственно сближенных, но генетически автономных структурно-вещественных компонента, которые различаются по петрографическому составу: 1) протрузия, сложенная реститогенными ультрамафитами (лерцолиты, гарцбургиты, дуниты и образованные по ним серпентиниты); 2) прорывающий протрузию габброидный интрузив, сложенный ортомагматическими габброидами (преимущественно безоливиновые габбронориты и габбро); 3) контактово-реакционная зона, рас-

положенная вдоль границ ультрамафитовой протрузии и прорывающего ее габброидного интрузива, сложенная гибридными ультрамафитами (орто- и клинопироксениты, вебстериты и их оливин- и плагиоклазсодержащие разновидности, верлиты и плагиоверлиты, плагиолерцолиты, плагиогарцбургиты, плагиодуниты), а также гибридными габброидами (оливиновые габбро и габбронориты, троктолиты различной меланократовости); 4) контактово-реакционная зона, расположенная вдоль границ габброидного интрузива с породами вмещающих толщ, сложенная гибридными габброидами (амфибол-, биотит- и кварцсодержащие габбро, габбро-диориты, диориты, кварцевые диориты).

Главными признаками более позднего внедрения габброидных интрузивов по отношению к пространственно сближенным с ними ультрамафитовой протрузией являются следующие: 1) присутствие в габброидных интрузивах ксенолитов реститогенных ультрамафитов, в различной мере преобразованных в гибридные ультрамафиты; 2) присутствие в протрузиях ультрамафитов секущих тел (штоки, дайки, жилы), сложенных гибридными габброидами и гибридными ультрамафитами; 3) наличие вдоль границ протрузий ультрамафитов и интрузивов габброидов, варьирующих по мощности и петрографическому составу контактово-реакционных зон, сложенных гибридными ультрамафитами и габброидами, часто имеющими такситовые, в том числе параллельно-полосчатые текстуры. Исходя из этой модели, мы предполагаем, что оливиновые клинопироксениты массива Безымянный и выявленная в них микроминерализация сульфидов и самородной меди сформировались в результате магмо-метасоматического взаимодействия мафитового расплава и его флюидов, содержащих Cu, с более ранними реститогенными ультрамафитами, слагавшими протрузию.

Список источников

- Агафонов Л.В., Кужугет К.С., Ойдул Ч.К., Ступаков С.И. Самородные металлы в гипербазит-базитах Тувы. Новосибирск : Изд-во ОИГТИМ СО РАН. 1993. 87 с.
- Агафонов Л.В., Лхамсүрэн Ж., Кужугет К.С., Ойдул Ч.К. Платиноносность ультрамафит-мафитов Монголии и Тувы. Улан-Батор : Изд-во Монгольского госуниверситета, 2005. 224 с.
- Варлаков А.С. Серпентины ультраосновных пород Урала // Уральский минералогический сборник. 1999. № 9. С. 78–101.
- Велинский В.В., Банников О.Л., Пальчик Н.А., Хмельникова О.С. Акцессорные минералы в серпентинитах офиолитов // Гипербазитовые ассоциации складчатых областей. Вып. 6. Минералогия, геохимия. Новосибирск : Изд-во ОИГТИМ СО РАН, 1991. С. 83–99.
- Велинский В.В., Ойдул Ч.К., Кужугет К.С., Лебедев В.И. Акцессорные минералы базит-гипербазитовых комплексов Восточной Тувы // Записки Всероссийского минералогического общества. 1999. № 4. С. 1–10.
- Геологическая карта Тувы. Масштаб 1 : 500 000. Л. : ВСЕГЕИ, 1983.
- Гончаренко А.И., Чернышов А.И., Возная А.А. Офиолиты Западной Тувы (строение, состав, петроструктурная эволюция). Томск : Изд-во Томского госуниверситета, 1994. 125 с.
- Каримов А.А., Горнова М.А., Беляев В.А., Энхбат Д. Хромшпинелиды из ультрамафитов и хромититов Эгийнольского массива (Северная Монголия) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40, № 4. С. 9–29.
- Котляров В.А., Дунаев А.Ю., Зайков В.В. Сульфиды никеля из гипербазитов Каа-Хемской офиолитовой зоны, Тува // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Кызыл : Изд-во ТувИКОПР СО РАН, 2004. С. 58–100.
- Кривенко А.П., Подлипский М.Ю., Агафонов Л.В. Рудная минерализация гипербазитов Эргакского массива и его хроминосность // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Экология природной среды и общества. Кызыл : Изд-во ТувИКОПР СО РАН, 2005. Вып. 8. С. 32–43.

Леснов Ф.П. Петрология полигенных мафит-ультрамафитовых массивов Восточно-Сахалинской офиолитовой ассоциации. Новосибирск : ГЕО, 2015. 240 с.

Леснов Ф.П., Кужугет К.С., Монгуш А.А., Ойдуп Ч.К. Геология, петрология и рудоносность мафит-ультрамафитовых массивов Республики Тыва. Новосибирск : ГЕО, 2019. 350 с.

Макеев А.Б. Минералогия альпинотипных ультрабазитов Урала. СПб. : Наука, 1992. 197 с.

Ойдуп Ч.К., Леснов Ф.П., Монгуш А.А. Состав минералов и генезис полосчатых габброидов Калбакдагского ультрамафит-мафитового массива (Центральная Тува) // Геосферные исследования. 2019. № 3. С. 37–49.

Павлов Н.В. Химический состав хромшпинелидов в связи с петрографическим составом пород ультраосновных интрузивов // Труды Института геол. наук. Серия рудных месторождений. Вып. 103, № 3. 1949. С. 10–35.

Панасьян Л.Л., Посухова Т.В., Черепецкая Е.Б., Чжан Цзини. Минералогические, петрофизические и акустические характеристики серпентинитов – индикаторы палеодинамических условий их преобразования (на примере зоны Главного Уральского разлома) // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 12. С. 1828–1840.

Попов В.А., Колесниченко С.В., Блинов И.А. Никелистая медь и накауринит из голубой жилы в ультрамафитах (Верхне-уфалейский район, Южный Урал) (Предварительное сообщение) // Всероссийские чтения памяти Ильменского минералога В.О. Полякова, № 14. Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН. 2013. С. 13–24.

Савельев Д.Е., Сергеев С.Н., Блинов И.А. Акцессорная минерализация в хромититах мантийного разреза офиолитов Крака // Вестник АН Республики Беларусь. 2018. Т. 29, № 4. С. 63–72.

Сибилев А.К. Петрология и асбестовосность офиолитов. Новосибирск : Наука, 1980. 213 с.

Чашухин И.С., Вотяков С.Л., Шапова Ю.В. Ламели серпентина – продукты распада клинопироксена в шпинелевом лерцолите Кемпирсайского массива // Ежегодник-2015. Тр. ИГТ УрО РАН. 2016. Вып. 163. С. 210–212.

Шведов Г.И., Барков А.Ю., Олешкевич О.И. Рудные минеральные ассоциации в ультрамафитах массива Огнит, Иркутская область, Восточный Саян // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2016. № 1. С. 49–60.

Юричев А.Н. Сульфиды из ультрамафитов офиолитов: структурные и химические особенности, вопросы генезиса // Минералы: строение, свойства, методы исследований : материалы VII Всероссийской молодежной научной конференции. Екатеринбург : Изд-во Института геологии и геохимии УрО РАН, 2015. С. 134–136

Chamberlain J.A., McLeod C.R., Traill R.J., Lachance G.R. Native metals in the Muskix intrusion // Canadian Journal of Earth Sciences. 2011. V. 2. No. 3. P. 188–215.

Eslami A., Malvoisin B., Grieco G. et al. Native copper formation associated with serpentinization in the Cheshmeh-Bid ophiolite massif (Southern Iran) // Lithos. 2021. P. 382–383. Article 105957.

Schwarzenbach E.M., Gazel E., Caddick M. Hydrothermal processes in partially serpentinized peridotites from Costa Rica: evidence from native copper and complex sulfur assemblages // Contrib Mineral Petrol. 2014. V. 168. P. 1–21.

References

Agafonov L.V., Kuzhuget K.S., Oidup Ch.K., Stupakov S.I. *Samorodnyye metally v giperbazit-bazitakh Tuvy*. [Native metals in ultramafic-mafic rocks of Tuva]. Novosibirsk: Publishing House of OIGGiM Siberian branch of RAN. 1993. 87 p. In Russian

Agafonov L.V., Lkhamsuren J., Kuzhuget K.S., Oydup Ch.K. *Platinonosnost' Mongolii i Tuvy* [Platinum content of ultramafic-mafic rocks of Mongolia and Tuva]. Ulaanbaatar: Publishing House of the Mongolian State University. 2005. 224 p. In Russian

Varlakov A.S. *Serpentiny ul'traosnovnykh porod* [Serpentinities of ultrabasic rocks] // Ural Mineralogical collection. 1999. No. 9. pp. 78–101. In Russian

Velinsky V.V., Bannikov O.L., Pal'chik N.A., Khmelnikova O.S. *Aktsessornyye mineraly v serpentinitakh ofiolitov* [Accessory minerals in serpentinites of ophiolites [Hyperbasic associations of folded areas] // Issue 6. Mineralogy, geochemistry. Novosibirsk: Publishing House of OIGGiM. Siberian Branch of RAN, 1991. pp. 83–99. In Russian

Velinsky V.V., Oidup Ch.K., Kuzhuget K.S., Lebedev V.I. Accessory minerals of mafic-hyperbasic complexes of Eastern Tuva // Proceedings of the Russian Mineralogical Society. 1999. No. 4. pp. 1–10. In Russian

Goncharenko A.I., Chernyshov A.I., Voznaya A.A. *Ophiolity Zapadnaya Tuva (stroyeniye, sostav, petrostrukturnaya evolyutsiya)* [Ophiolites of Western Tuva (structure, composition, petrostructural evolution). Tomsk: Publishing House of Tomsk State University, 1994. 125 p. In Russian

Geologicheskaya karta Tuvy. Masshtab 1 : 500 000 [Geological map of Tuva. Scale 1 : 500 000]. Leningrad: VSEGEI, 1983. In Russian

Karimov A.A., Gornova M.A., Belyaev V.A., Enkhbat D. *Khromshpinelidy iz ul'tramafitov i khromititov Egiyngol'skogo massiva (Severnaya Mongoliya)* [Chromospinelides from ultramafites and chromitites of Egiingol massif (North Mongolia) // Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits. 2017. Vol. 40. No. 4. pp. 9–29. In Russian

Kotlyarov V.A., Dunaev A.Yu., Zaikov V.V. *Sul'fidy nikelya iz giperbazitov Kaa-Khemskoy ofiolitovoy zony, Tuva* [Nickel sulfides from ultramafic rocks of the Kaa-Khem ophiolite zone, Tuva] State and development of natural resources of Tuva and adjacent regions of Central Asia. Kyzyl: Publishing House of TuvIKOPR. Siberian branch of RAS, 2004. pp. 58–100. In Russian

Krivenko A.P., Podlipsky M.Yu., Agafonov L.V. *Rudnaya mineralizatsiya giperbazitov Ergakskogo massiva i yego khromitonosnost'* [Ore mineralization of ultramafic rocks of the Ergak massif and chromite content [Status and development of natural resources of Tuva and adjacent regions of Central Asia. Ecology of the natural environment and society] // Issue 8. Kyzyl: Publishing house of TuvIKOPR Siberian branch of RAN. 2005. pp. 32–43. In Russian

Lesnov F.P. *Petrologiya poligennykh mafit-ul'tramafitovykh massivov Vostochno-Sakhalinskoy ofiolitovoy assotsiatsii*. [Petrology of polygenic mafic-ultramafic massifs of the East Sakhalin ophiolite association]. Novosibirsk: Publishing house «GEO», 2015. 240 p. In Russian

Lesnov F.P., Kuzhuget K.S., Mongush A.A., Oydup Ch.K. *Geologiya, petrologiya i rudonosnost' mafit-ul'tramafitovykh massivov Respubliki Tyva*. [Geology, petrology and ore content of mafic-ultramafic massifs of the Tyva Republic] // Novosibirsk: Publishing house «GEO». 2019. 350 p. In Russian

Makeev A.B. *Mineralogiya al'pinotipnykh ul'trabazitov Urala* [Mineralogy of alpine-type ultramafic rocks of the Urals. St. Petersburg: «Nauka». St. Petersburg branch. 1992. 197 p. In Russian

- Oydup Ch.K., Lesnov F.P., Mongush A.A. Minerals composition and genesis of the banded gabbroids of the Kalbakdag ultramafic-mafic massif (Central Tuva) // *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2019. 3. pp. 37–49. doi: 10.17223/25421379/11/2. In Russian
- Pavlov N.V. *Khimicheskiy sostav khromshpinelidov v svyazi s petrograficheskim sostavom porod ul'traosnovnykh intruzivov*. [Chemical composition of chrome-spinels in connection with the petrographic composition of rocks of ultrabasic intrusives. [Proceedings of the Institute of Geol. Sciences. A series of ore deposits] // Issue. 103. No. 3. 1949. pp. 10–35. In Russian
- Panas'yan L.L., Posukhova T.V., Cherepetskaya E.B. and Zhang Jini. *Mineralogical, petrophysical and acoustic features of serpentinites – indicators of the paleodynamic conditions of their genesis (by the example of the Main Ural Fault zone)* // *Russian Geology and Geophysics*. 2014. V. 55. No. 12. pp. 1828–1840. In Russian
- Popov V.A., Kolesnichenko S.V., Blinov I.A. *Nikelistaya med' i nakaurit iz goluboy zhily v ul'tramafitakh (Verkhneufaleyskiy rayon, Yuzhnyy Ural) (Predvaritel'noye soobshcheniye)* [Nickel copper and nakaurite from a blue vein in ultramafites (Verkhneufaleisky region, Southern Urals) (Preliminary report)] // All-Russian readings in memory of the Ilmensky mineralogist V.O. Polyakova, No. 14. South Ural Federal Research Center for Mineralogy and Geoecology, Ural Branch of RAS, 2013. pp. 13–24. In Russian
- Saveliev D.E., Sergeev S.N., Blinov I.A. Accessory mineralization in chromitites of the mantle section of the Krak ophiolites // *Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Belarus*. 2018. Vol. 29. No. 4. pp. 63–72. In Russian
- Sibilev A.K. *Petrologiya i asbestonosnost' ofiolitov* [Petrology and asbestos content of ophiolites]. Novosibirsk: Publishing house «Nauka», Siberian branch. 1980. 213 p. In Russian
- Chashchukhin I.S., Votyakov S.L., Shchapova Yu.V. *Lameli serpentina – produkty raspada klinopiroksena v shpinelevom lertsolite Kempirsayskogo massiva* [Serpentine lamellas are decomposition products of clinopyroxene in spinel lherzolite of the Kempirsai massif] // *Yearbook-2015. Tr. IGG UB RAS*. Issue 163. 2016. pp. 210–212. In Russian
- Shvedov G.I., Barkov A.Yu., Oleshkevich O.I. *Rudnyye mineral'nyye assotsiatsii v ul'tramafitakh massiva Ognit, Irkutskaya oblast', Vostochnyy Sayan* [Associations of ore minerals in ultramafic rocks of the Ognit complex, Irkutskaya oblast, Eastern Sayans] // *Proceedings of Voronezh state university. Series: Geology*. 2016. No. 1. pp. 49–60. In Russian
- Yurichev A.N. *Sul'fidy iz ul'tramafitov ofiolitov: strukturnyye i khimicheskiye osobennosti, voprosy genezisa* [Sulfides from ultramafic ophiolites: structural and chemical features, issues of genesis] // *Minerals: structure, properties, research methods*. [Materials of the VII All-Russian Youth Scientific Conference. Ekaterinburg: Publishing House of the Institute of Geology and Geochemistry] // Ural Branch of RAS, 2015. pp. 134–136. In Russian
- Chamberlain J.A., McLeod C.R., Traill R.J., Lachance G.R. Native metals in the Muskix intrusion // *Canadian Journal of Earth Sciences*. 2011. V. 2. No. 3. pp. 188–215.
- Eslami A., Malvoisin B., Grieco G. et al. Native copper formation associated with serpentinization in the Cheshmeh-Bid ophiolite massif (Southern Iran) // *Lithos*. V. 382–383. 2021. Article 105957.
- Schwarzenbach E.M., Gazel E., Caddick M. Hydrothermal processes in partially serpentinized peridotites from Costa Rica: evidence from native copper and complex sulfur assemblages // *Contrib Mineral Petrol*. 2014. V. 168. pp. 1–21.

Информация об авторах:

Леснов Ф.П., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: lesnovfp@list.ru

Ойду́п Ч.К., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия.

E-mail: oydup_ch@mail.ru

Королюк В.Н., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: camebax@igm.nsc.ru

Монгуш А.А., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия.

E-mail: amongush@inbox.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Lesnov F.P., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Scientific Collaborator, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: lesnovfp@list.ru

Oydup Ch.K., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Scientific Collaborator, Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS, Kyzyl, Russia.

E-mail: oydup_ch@mail.ru

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

E-mail: camebax@igm.nsc.ru

Mongush A.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Scientific Collaborator, Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS, Kyzyl, Russia.

E-mail: amongush@inbox.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 06.06.2023; одобрена после рецензирования 02.11.2023; принята к публикации 27.11.2024

The article was submitted 06.06.2023; approved after reviewing 02.11.2023; accepted for publication 27.11.2024

ГЕОМОРФОЛОГИЯ, ГЕОГРАФИЯ

Научная статья

УДК 913; 528.88

doi: 10.17223/25421379/33/5

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОБЩЕДОСТУПНЫХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ПО АБСОЛЮТНОЙ ВЫСОТЕ ДЛЯ РАВНИННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ

Михаил Евгеньевич Буковский¹, Кирилл Алексеевич Кузьмин²

^{1,2} Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, Тамбов, Россия

¹ mikezzz@mail.ru

² ka_kuzmin@mail.ru



Аннотация. Для равнинных территорий лесостепи на примере Тамбовской области оцениваются шесть общедоступных глобальных цифровых моделей рельефа (ЦМР) по показателю абсолютной высоты. Установлено, что из ЦМР с разрешением 90 м наилучшей точностью по высоте обладает MERIT HYDRO. Среди ЦМР с разрешением 30 м лучшую точность на открытой местности показала Copernicus DEM, менее точными моделями являются SRTM Plus и AW3D30. Худшая точность по высоте выявлена у ASTER GDEM V3. Почти у всех моделей точность высоты в лесистой местности заметно хуже, чем на открытых пространствах.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа (ЦМР), геоинформационная система (ГИС), морфометрический анализ, абсолютная высота, среднеквадратичная ошибка (СКО), коэффициент корреляции Пирсона (r), равнина, лесостепная зона, Тамбовская область

Источник финансирования: публикация подготовлена при финансовой поддержке гранта Тамбовского государственного университета имени Г.Р. Державина для поддержки научных коллективов, Приказ № 490/1 от 02.09.2024 г.

Для цитирования: Буковский М.Е., Кузьмин К.А. Оценка точности общедоступных цифровых моделей рельефа по абсолютной высоте для равнинных территорий лесостепной зоны // Геосферные исследования. 2024. № 4. С. 73–86. doi: 10.17223/25421379/33/5

Original article

doi: 10.17223/25421379/33/5

ASSESSMENT OF THE ACCURACY OF PUBLICLY AVAILABLE DIGITAL ELEVATION MODELS BY ABSOLUTE HEIGHT FOR PLAIN TERRITORIES OF THE FOREST-STEPPE ZONE

Mikhail E. Bukovskiy¹, Kirill A. Kuzmin²

^{1,2} Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia

¹ mikezzz@mail.ru

² ka_kuzmin@mail.ru

Abstract. An important step in any study containing geospatial analysis is the selection of a reliable source of primary geographic data. Digital elevation models (DEMs) are widely used, providing information on the structure of the earth's surface, expressed in quantitative terms. For the flat areas of the forest-steppe, using the Tambov region as an example, six publicly available global digital elevation models (DEMs) are evaluated in terms of absolute height: SRTM Plus, SRTM 4.1, ASTER GDEM V3, ALOS WORLD 3D, Copernicus DEM, MERIT HYDRO.

Anchored in the ground by geodetic methods and high-precision navigation, ground control points (GCPs) are the most reliable sources of reference height data. For the reference data, the heights of 209 points of the astronomical and geodetic network of the 1st and 2nd classes were taken, which were divided into points of open and wooded areas. A statistical analysis of the obtained deviations was carried out and regular errors in the display of heights in a wooded area were identified. The calculation of absolute height deviations was carried out using the tools of the free software product Quantum GIS.

During visual inspection of the DEM, false relief elements are found in the form of contrasting spots and lines: forests, forest protection plantations along fields, beams, reservoirs, and infrastructure.

It has been established that of the DEM with a resolution of 90 m, the best accuracy in absolute height, both in open and in wooded areas, is MERIT HYDRO. This DEM is noticeably cleared of anomalous height values caused, among other things, by

high vegetation. The root mean-square error (RMSE) in the open area was 1.68 m, in the wooded area – 3.7 m. The maximum error in modulus was 12 m, the Pearson correlation coefficient was $r = 0.99$.

Among DEMs with a resolution of 30 m, the Copernicus DEM has the best accuracy in open areas (RMSE = 1.84 m, $r = 0.99$). Less accurate models are SRTM Plus (RMSE = 3.41 m, $r = 0.99$) and AW3D30 (RMSE = 3.64 m, $r = 0.99$). The worst absolute height accuracy was found in ASTER GDEM V3, for open areas: RMSE = 11.16 m, $r = 0.92$; for wooded: RMSE = 7.25 m, $r = 0.95$; the maximum error in modulus is 30.7 m.

For all models except MERIT HYDRO, height accuracy in wooded areas is noticeably worse than in open spaces (RMSE from 6.61 to 10.46 m at $r = 0.93$ – 0.97). In open spaces, all DEMs, except for MERIT HYDRO, tend to underestimate the absolute height. There is a tendency to overestimate the absolute height of the area covered with forests for all DEMs, except for ASTER GDEM V3.

The use of existing publicly available DEMs should be preceded by their preparation with the correction of heavily distorted heights.

For regional studies, an alternative to using ready-made global satellite models is the construction of a DEM based on digitized topographic map data. In this case, the detail and reliability of the extracted relief parameters will depend on the scale of the map.

For local land areas an alternative would be to create a DEM based on field survey data obtained by satellite positioning and correction technologies from reference stations, as well as aerial photography and laser scanning data from unmanned aerial vehicles (UAVs).

Keywords: digital elevation model (DEM), geographic information system (GIS), morphometric analysis, absolute height, root mean squared error (RMSE), Pearson correlation coefficient (r), plain, forest-steppe zone, Tambov region

Source of financing: This work was financially supported by the Derzhavin Tambov State University Grant to Support Research Team (Order № 490/1 dated 02.09.2024).

For citation: Bukovskiy M.E., Kuzmin K.A. (2024) Assessment of the accuracy of publicly available digital elevation models by absolute height for plain territories of the forest-steppe zone. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 73–86. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/33/5

Введение

С развитием геоинформационных технологий науки о Земле включили в свой арсенал мощный инструментарий получения, обработки и анализа пространственных данных. Для решения большого круга задач первостепенное значение приобрели цифровые модели рельефа (ЦМР). В классическом определении ЦМР являются средством цифрового представления трёхмерных пространственных объектов (рельефа, поверхностей) в виде трёхмерных данных как совокупности высот (глубин, иных значений аппликат) в узлах регулярной сети с образованием матрицы высот либо нерегулярной сети или как совокупность записей горизонталей или иных изолиний [Баранов и др., 1999]. Кратко ЦМР можно назвать цифровой моделью местности, содержащей информацию о её рельефе [ГОСТ 28441-99].

Цифровые данные о рельефе имеют действительно богатый опыт применения и останутся востребованными в самых разных областях знаний. На основе ЦМР решаются задачи картографирования зон затопления во время паводков и паводков [Борщ и др., 2013; Бубер и др., 2016] или риска подъёма уровня моря [Kuleli et al., 2009], создания почвенных карт [Гопп, 2013] и карт интенсивности смыва почв, получаемых по расчётам эрозионных моделей [Мальцев и др., 2018]. Методики выявления активных эрозионных процессов, таких как оврагообразование, и оценки их динамики часто опираются на первичную высотную основу. Причём возможно использование

как готовых ЦМР, предлагаемых научным сообществом [Сидорчук, 2020], так и создание собственных оригинальных высотных данных, получаемых путём аэросъёмки [Тулохонов и др., 2018].

Много исследований посвящено геоморфологическому районированию территорий, созданию геоморфологических карт и выделению морфокомплексов на основании количественных характеристик рельефа [Чупина и др., 2012; Остроухов, 2018; Кривцов и др., 2019]. Наложением расчётной сетки с заданным шагом может проводиться интегральная оценка эрозионной опасности [Кондратьева, Чашин, 2021].

Весьма широко в качестве первоисточника ЦМР используются в исследованиях структуры речных бассейнов, являющихся хорошо идентифицируемой пространственной единицей с сильными внутренними связями [Корытный, 2017; Бондарев, 2020]. Пространственный охват таких исследований бывает самым разным – от изучения отдельных водосборов или их части [Мальцев, Шарифуллин, 2017] – до создания электронных карт бассейнов в масштабах больших географических регионов [Ермолаев и др., 2017].

В силу того, что неоднородность рельефа влияет на распределение влаги, радиационного баланса и, вместе с тем, на скорости почвообразования, в ряде работ ЦМР использовались для оценок агроклиматического потенциала территорий [Буряк, Терехин, 2019], картографирования теплообеспеченности [Рыбалко и др., 2016], расчёта скоростей почвообразования для чернозёмов [Лисецкий и др., 2012].

Отдельным направлением использования цифровых орографических данных стала батиметрия [Митяев, Хасанкаев, 2007], где для исследований океанического дна создаются специализированные ЦМР, отображающие значения глубины [Jakobsson et al., 2012]. Также ЦМР служат основой для создания ортофотопланов [Гусев и др., 2022].

Такое широкое использование ЦМР обусловлено тем, что во многих программах для работы с геоинформационными системами (ГИС) реализованы инструменты морфометрического анализа, с помощью которых и можно получить различные характеристики рельефа, такие как крутизна, длина и экспозиция склонов, вертикальное и горизонтальное расчленение рельефа на единицу площади, кривизна земной поверхности, индекс топографического положения.

Перед исследователем встаёт закономерный вопрос: откуда брать данные о рельефе или как их получить? Источниками данных для цифрового моделирования рельефа выступают топографические карты, материалы полевых съёмок и спутникового позиционирования, фотограмметрическая обработка снимков, как правило, произведённых с беспилотного летательного аппарата (БПЛА), а также данные космических съёмок. Каждый из источников имеет свои достоинства и недостатки, и выбор будет зависеть от цели и задач конкретного исследования, сроков выполнения, допустимой точности, пространственного охвата, кроме того, могут сказываться финансовые и технические возможности исследователей.

Оцифровка топографических карт остаётся одним из основных источников информации о рельефе для цифрового моделирования [Павлова, 2017]. Недостатком является трудоёмкость процедуры. Даже если векторизация элементов рельефа проводилась в полуавтоматическом режиме инструментом трассировки или путём сканирования, уйдёт время на корректировку и исправление ошибок.

Собственные полевые съёмки, опирающиеся, как правило, на спутниковую систему навигации (GNSS), дают весьма точные данные в высотном и плановом положении. Подобный метод хорошо подойдёт для создания высотной основы на небольшую территорию, до нескольких квадратных километров. В случае более масштабного исследования встаёт та же проблема трудоёмкости процесса. Кроме того, далеко не всегда интересующий объект доступен для полевого наблюдения в силу своей отдалённости или непроходимости.

Съёмка с БПЛА и обработка снимков методами фотограмметрии применима в исследованиях локального и регионального характера [Тулохонов и др., 2018; Скрипка и др., 2020] и накладывает техническое ограничение, требуя компетенций оператора БПЛА.

Цифровые данные о рельефе, полученные со спутников, основываются на таких технологиях, как лидар, мультиспектральная съёмка, радиолокационная интерферометрия [Новаковский, Пермьяков, 2019]. Такие матрицы высот имеют определённое ограничение по пространственному разрешению, но благодаря глобальному охвату и доступности получили широкое признание.

Объекты и методы

В настоящей работе была поставлена цель сравнить точность по абсолютной высоте у глобальных ЦМР и выявить степень возникающих отклонений применительно к лесостепным равнинным территориям на примере Тамбовской области. Для этого сначала были отобраны шесть глобальных некоммерческих ЦМР, доступных на территорию Тамбовской области.

Отметим, что в англоязычной терминологии существуют несколько понятий, близких русскому термину «цифровые модели рельефа». Те матрицы высот, что содержат не только земной рельеф, но и объекты, закрывающие его: растительность, искусственные постройки, являются DSM (digital surface model). В среде русскоязычных ГИС-специалистов DSM часто переводят термином «цифровая модель местности» (ЦММ). В то время как собственно термин «цифровая модель рельефа» (ЦМР) ближе к английскому «digital terrain model» (DTM). DTM содержит высоты исключительно земной поверхности, отображая подлинный рельеф. Для термина DEM (digital elevation model) нет универсального определения, но он часто используется как общее обозначение DSM и DTM. Среди рассматриваемых в настоящей работе данных космической съёмки есть как DSM, так и DTM, поэтому для удобства будем называть все рассматриваемые продукты цифровыми моделями рельефа. Определённо существуют проблемы перевода англоязычных терминов на русский язык.

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) – научно-исследовательская работа по получению ЦМР путём радиолокационной съёмки большей части земного шара (от 60° с.ш. до 54° ю.ш.), проведённой американским шаттлом Endeavour в феврале 2000 г. Полученные данные о высоте стали первой действительно глобальной ЦМР высокой точности, открытой для общественности (первая версия вышла в 2003 г.). Существует несколько версий SRTM. Первоначально она была доступна в виде растровых плиток с разрешением ячейки в 3 угловые секунды, что соответствует порядку 90 м в районе экватора.

С 2014 г. доступна улучшенная версия SRTM v3, известная также как SRTM Plus, с разрешением 1 угловая секунда (≈30 м на экваторе) [NASA Earth Observation Data].

Кроме того, вариант матрицы в 3 угловые секунды также был доработан путём заполнения пропусков. Эта улучшенная версия SRTM 4.1 доступна на сайте геопортала CGIAR-CSI [Jarvis et al., 2008]. Для нашего анализа были взяты обе актуальные версии – SRTM Plus и SRTM 4.1, с разрешением 1 и 3 угловые секунды соответственно.

ASTER GDEM – совместный проект Министерства экономики, торговли и промышленности Японии (METI) и Национального управления США по авиации и исследованию космического пространства (NASA). Эта ЦМР создана на основе оптических стереоданных, полученных усовершенствованным космическим радиометром теплового излучения и отражения (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – ASTER*), установленным на борту спутника Terra. Покрывает 99% земной суши от 83° с.ш. до 83° ю.ш. и имеет разрешение в 1 угловую секунду (30 м). Первая версия выпущена в 2009 г. В нашей работе проведена оценка улучшенной версии ASTER GDEM V3, доступной с 2019 г. [NASA Earth Observation Data].

ALOS WORLD 3D – 30m (AW3D30) – глобальная ЦМР, предоставляемая Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA). Является результатом работы панхроматического прибора дистанционного зондирования для стереокартирования (PRISM) с борта усовершенствованного спутника наблюдения за сушей (*Advanced Land Observing Satellite – ALOS*). Данные получались с 2006 по 2011 г., а первая глобальная версия ЦМР выпущена в 2016 г. [Takaku et al., 2016]. Общедоступная модель с разрешением в 30 м сгенерирована из более детальных матриц с разрешением 2,5 и 5 м, распространяемых на коммерческой основе. Для территории нашего исследования доступна версия 3.1 с 2020 г. [Site ALOS World 3D].

Copernicus DEM получена из данных интерферометрического радара с синтезированной апертурой (SAR) во время миссий спутников-близнецов TanDEM-X и TerraSAR-X, финансируемой Немецким аэрокосмическим центром (DLR) и компанией Airbus Defence and Space. Данные получены в период 2011 – 2015 гг. и предоставлены для использования с 2019 г. [Site Copernicus DEM]. Имеется несколько вариантов ЦМР. Версия EEA-10 с разрешением 10 м ($\approx 1/3$ угловой секунды) доступна на территорию 39 стран Европы, версии GLO-30 и GLO-90 с разрешением 30 и 90 м соответственно обеспечивают глобальное покрытие. Для оценивания взят 30-метровый вариант, покрывающий территорию России и Тамбовской области в частности.

MERIT DEM (Multiple-Error-Removed Improved-Terrain) – глобальная ЦМР с разрешением 3 угловые

секунды, полученная в 2017 г. коллективом разработчиков [Yamazaki et al., 2017] путём обработки существующих глобальных ЦМР (таких как SRTM, AW3D30, некоторых других локальных данных о рельефе). Используя несколько наборов спутниковых данных и различные методы фильтрации, удалось устранить некоторые компоненты ошибок: абсолютное смещение, спекл-шум, шум полос, высота деревьев.

Кроме того, в 2019 г. разработана улучшенная ЦМР *MERIT HYDRO* с тем же разрешением 3 угловые секунды, содержащая гидрологически скорректированные высоты и ширину русел крупных рек, выверенные направления водных потоков [Yamazaki et al., 2019]. Таким образом, данные продукты позиционируются как DTM, очищенные от «ложного рельефа». Для анализа точности взята гидрологически скорректированная MERIT HYDRO.

Таким образом, было отобрано шесть ЦМР, разработанных в разное время разными специалистами. Из них четыре модели имеют пространственное разрешение 1 угловая секунда (≈ 30 м на экваторе), две модели (SRTM 4.1 и MERIT HYDRO) обладают разрешением 3 угловые секунды (≈ 90 м на экваторе). Для территории Тамбовской области 1 угловая секунда по широте составляет порядка 18–19 м. Горизонтальные координаты всех ЦМР даны в проекции WGS-84, абсолютные высоты представлены на основе модели геоида EGM-96 (у составленной из более новых спутниковых данных Copernicus DEM – на основе уточнённого геоида EGM-2008).

В исследованиях разных авторов оценка вертикальной точности глобальных ЦМР опиралась на различные источники. В качестве эталона для сравнения высот используются наземные опорные пункты (в англоязычной литературе применяется сокращение GCP – ground control points), получаемые, например, по результатам топографической съёмки [Трофимов, Филиппова, 2014; Santillan et al., 2016] или использованием спутниковых систем навигации [Hirano et al., 2003; Florinsky et al., 2018]. Также в оценках точности ЦМР используются пункты национальных геодезических сетей [Tighe, Chamberlain, 2009; Florinsky et al., 2019].

Другие исследователи сравнивали спутниковые ЦМР с моделями, построенными путём оцифровки топографических карт [Ben-Haim et al., 2015; Мальцев и др., 2018; Рязанов, Кулагина, 2022].

При отсутствии доступа к крупномасштабным картам и данным наземных контрольных точек могут использоваться данные лидарной съёмки. Лидарные данные спутника NASA ICESat (по наблюдению за высотой льда, облаков и суши) применялись для глобальной оценки точности по высоте таких цифровых моделей, как Copernicus DEM [Copernicus

DEM Validation Report] и AW3D30 [Takaku et al., 2016].

Технология лидар (от англ. LIDAR – Light Detection and Ranging) определяет расстояние путём замера времени, требуемого лазерному импульсу, чтобы отразиться от объекта и вернуться обратно на спутник. Зная это расстояние, вместе с характеристиками наведённого лазера и положением спутника в момент времени, можно определить X,Y,Z-координаты объекта. Однако лидар распознаёт как поверхность не только непосредственно землю, но и

полог леса, крыши зданий, т.е. любые отражающие цели, получая в определённой степени искажённые высоты рельефа.

Таким образом, опорные точки, закреплённые на местности геодезическими методами и высокоточной навигацией, следует считать наиболее надёжными источниками эталонных данных о высоте. Для оценки точности высоты глобальных ЦМР на территории Тамбовской области в качестве эталонных значений взяты пункты астрономо-геодезической сети 1-го и 2-го классов (рис. 1).

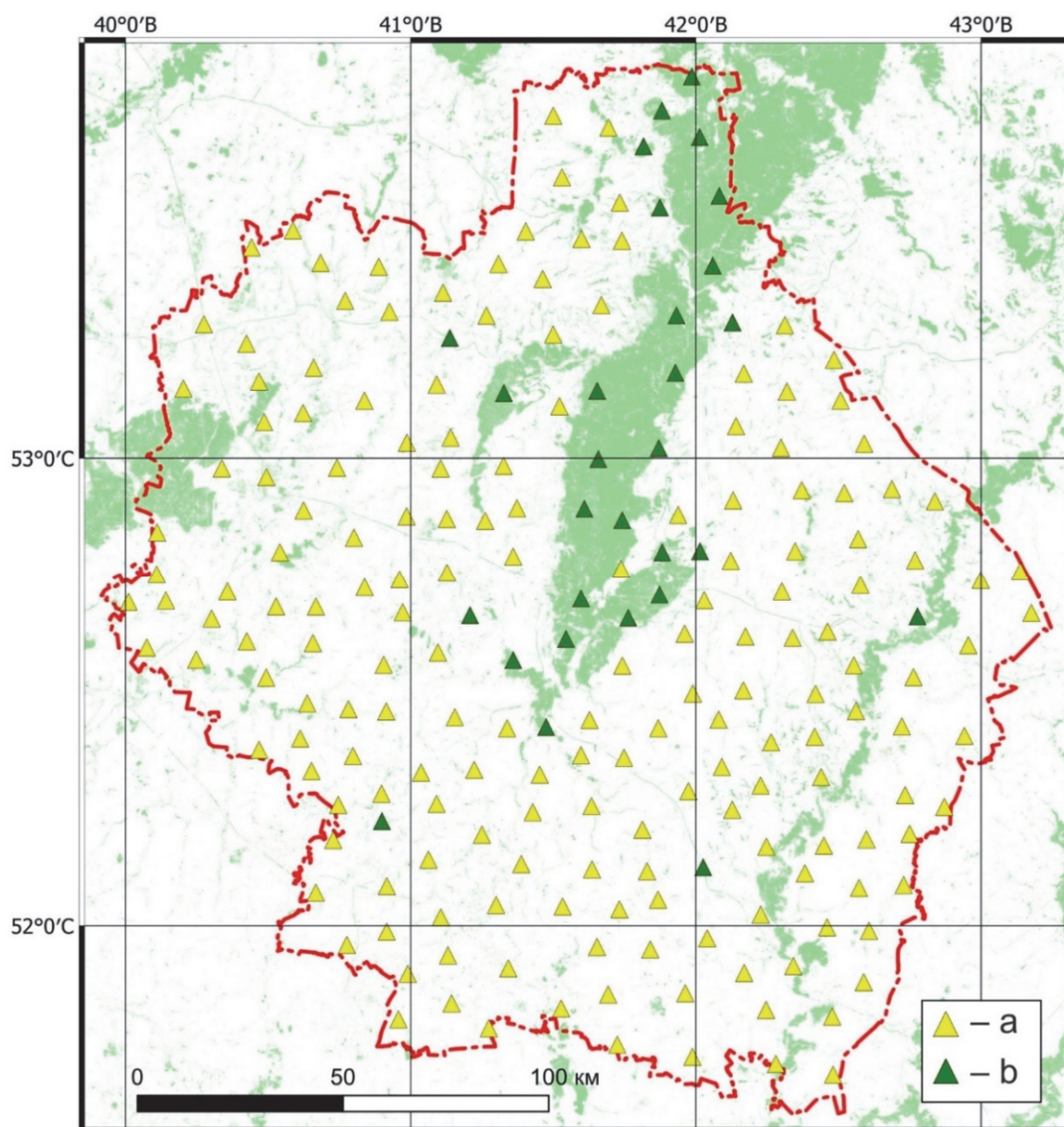


Рис. 1. Расположение пунктов астрономо-геодезической сети 1-го и 2-го классов на территории Тамбовской области

a – на открытой местности; b – в лесистой местности

Fig. 1. Location of points of the astronomical and geodetic network of the 1st and 2nd classes on the territory of the Tambov region

a – in open area; b – in a wooded area

Астрономо-геодезическая сеть (АГС) входит в структуру государственной геодезической сети, которая предназначена для распространения на территорию России государственной системы координат и обеспечивает осуществление геодезических и картографических работ по всей территории страны. Построение АГС выполняется как классическими геодезическими методами триангуляции и полигонометрии, так и астрономическими наблюдениями.

Закладывались пункты АГС на ровной местности, не подвергаемой различным деформациям грунтов, с глубоким залеганием грунтовых вод, в стороне от дорожной инфраструктуры и мест проведения строительных и прочих работ. Место расположения геодезического пункта должно обеспечивать его долговременную сохранность и устойчивость в плане и по высоте [Приказ Росреестра...]. Поэтому пункты АГС представляются весьма удачным выбором для эталона сравнения высоты, тем более учитывая их регламентированное и относительно равномерное распределение по территории.

Данные о месте нахождения пунктов АГС 1-го и 2-го классов взяты с карты Федерального портала пространственных данных [Федеральный портал...]. Вместе с тем информация о пункте АГС, в частности абсолютная высота, уточнялись по сервисному portalу GEOBRIDGE [Сайт портала GEOBRIDGE], популярному среди специалистов, работающих в сфере геодезических и инженерных изысканий. По итогу собраны сведения о 209 пунктах АГС 1-го и 2-го классов, расположенных на территории Тамбовской области. Абсолютная высота пунктов АГС измеряется в Балтийской системе высот 1977 г., принятой до настоящего времени в качестве единой для всех видов геодезических работ.

В программной среде Quantum GIS был создан векторный слой с пунктами АГС и информацией об их абсолютной высоте. Координаты пунктов известны в системе координат ГСК-2011, соответственно, она была задана и созданному векторному слою. Затем из первоначально скачанных листов шести рассматриваемых ЦМР инструментами объединения и обрезки растров создавались фрагменты, покрывающие Тамбовскую область. Для корректности вычислений необходимо, чтобы все слои имели единую проекцию, поэтому фрагменты растров переводились в проекцию векторного слоя с пунктами из WGS-84 в ГСК-2011. Перепроецирование было реализовано преобразованием Гельмерта с помощью библиотеки для выполнения преобразований проекций PROJ [Site PROJ], поддерживаемой в Quantum GIS.

В калькуляторе полей атрибутивной таблицы векторного слоя с помощью функций «raster_value» и «\$geometry» для пунктов АГС были извлечены значения высот из раstra в предварительно созданную для них новую колонку. Такая операция проводилась поочередно с каждой ЦМР. Далее полученные атрибуты переводились в Microsoft Excel для статистического анализа.

Результаты и обсуждение

Для рассматриваемых ЦМР рассчитывались: средняя разница относительно эталонных значений высот пунктов АГС, максимальная и минимальная ошибки по модулю, средняя квадратичная ошибка (СКО) и коэффициент корреляции Пирсона (r) между извлечёнными из ЦМР значениями высот и эталонными значениями при уровне значимости 99% ($p = 0,01$) (табл. 1).

Таблица 1

Результаты расчёта точности по абсолютной высоте относительно эталонных значений

Table 1

Results of the calculation of the accuracy in absolute height relative to the reference values

Цифровая модель рельефа	Средняя разница, м	Модуль максималь- ного значения ошибки, м	Модуль минималь- ного значения ошибки, м	Средняя квадратичная ошибка, м	Коэффициент Пирсона (r)
SRTM 4.1	-2,09	14,70	0,00	4,19	0,98
SRTM Plus	-1,96	14,70	0,10	4,01	0,98
ASTER GDEM V3	-7,26	30,70	0,00	10,70	0,92
AW3D30	-1,73	20,70	0,00	4,55	0,97
Copernicus DEM GLO-30	0,66	21,95	0,00	4,25	0,97
MERIT HYDRO	0,89	12,00	0,00	2,08	0,99

По СКО и r лучшие результаты точности показывает «очищенная» MERIT HYDRO, кроме того, демонстрируя и наименьшее максимальное значение ошибки по модулю. Далее примерно равные ошибки показывают матрицы высот SRTM с чуть меньшими

значениями у SRTM Plus. Это предсказуемо, так как модель 90-метрового разрешения сгенерирована из матрицы 30-метрового разрешения путём усреднения данных. Модели AW3D30 и Copernicus DEM показали схожие СКО и r , уступая моделям SRTM.

Наибольшие ошибки абсолютной высоты, причём с заметным отрывом от остальных моделей, выявлены у ASTER GDEM V3. Как видно из таблицы, у данной ЦМР ошибки высоты в отдельных случаях достигали более 30 м, причём как в сторону превышения, так и в сторону занижения.

У глобальных ЦМР в силу ограничений спутникового зондирования существует проблема включения в рельеф высокой растительности и других «нерельефных» структур, что осложняет морфометрический анализ лесных и лесостепных ландшафтов. В полной мере такие сложности имели бы место при пространственном анализе территорий Тамбовской области, общая лесистость которой составляет 10, 6% [Доклад..., 2022]. Крупные лесные массивы занимают значительные площади в центральной, северной и западной части региона.

Визуальный осмотр глобальных ЦМР обнаруживает множество элементов ложного рельефа в виде контрастных пятен и линий, в которых легко узнаются лесные области и лесозащитные насаждения вдоль полей, балок, искусственных водоёмов, объектов инфраструктуры (рис. 2).

Таким образом, закрывающий земную поверхность полог леса завышает высоту, отображаемую ячейками ЦМР. Чтобы показать это статистически, разделим использованные в роли эталонов абсолютной высоты пункты АГС на две группы. Первую группу составили пункты, расположенные на открытой местности, вторую – те, что скрыты под высокой растительностью, т.е. расположенные в лесных массивах или в глубине широких лесополос. Число пунктов из первой группы составило 180 единиц, т.е. подавляющее большинство, во вторую группу вошли 29 пунктов.

Для наглядности визуализируем ошибки абсолютной высоты у рассматриваемых ЦМР с помощью графиков, на которых в порядке возрастания расположены эталонные значения высот пунктов АГС (рис. 3).

На открытых пространствах все ЦМР, кроме MERIT HYDRO, имеют тенденцию к занижению абсолютной высоты. Наиболее явно это прослеживается у моделей SRTM и AW3D30, имеющих крайне мало положительных ошибок высоты. В то время как MERIT HYDRO в большинстве случаев немного завышает высоту открытой местности. При этом, как видно из рис. 2, *b*, у всех моделей, кроме ASTER GDEM V3, прослеживается тенденция к завышению абсолютной высоты местности, покрытой лесом.

Посмотрим, как изменяется СКО абсолютной высоты и r , если разделить статистику для открытых пространств и лесистой местности (табл. 2).

Можно наблюдать, что после исключения «лесных» пунктов СКО абсолютной высоты в разной степени сократились почти у всех ЦМР. Расстановка моделей в порядке ухудшения точности по высоте немного меняется. Наилучший результат по-прежнему показывает модель MERIT HYDRO, при этом её СКО сократилась несущественно. Также несущественно сократились СКО у 30- и 90-метровой SRTM. У Copernicus DEM GLO-30 значение СКО сократилось в 2,3 раза, точность по высоте на открытой местности у данной ЦМР оказалась сравнительно высокой. У модели AW3D30 СКО для открытой местности снизилась в 1,3 раза. ASTER GDEM V3 явно проигрывает в точности остальным моделям, более того, с вычетом высот по лесистой местности из статистики, её СКО даже возросла. У всех моделей, кроме ASTER GDEM V3, коэффициент Пирсона ($r = 0,99$) показал высокую корреляцию сравниваемых значений высот на открытых пространствах.

Между тем в лесистой местности СКО абсолютной высоты у всех ЦМР существенно превышают таковые на открытых пространствах. MERIT HYDRO здесь снова характеризуется наименьшими ошибками и наиболее высокой корреляцией по r , обладая, соответственно, лучшей точностью отображения высоты в лесах. Остальные модели демонстрируют схожие СКО порядка 6,6–10,5 м при $r = 0,93–0,97$.

Обращает внимание то, что модель Copernicus DEM GLO-30, имеющая хорошую точность на открытых пространствах, вместе с тем показала наибольшие ошибки в лесистой местности. У моделей SRTM значения СКО в лесу ниже, что, скорее всего, связано с более мощной проникающей способностью радиоволны в кроны деревьев. Нельзя также исключать изменения в высоте лесного покрова в местах расположения пунктов АГС за периоды съёмок (2000-е, 2011–2015 гг.), правда, проверить это довольно сложно, учитывая, что выборка из 29 точек совсем невелика.

У модели ASTER GDEM V3 СКО для лесистой местности оказалась меньше, чем для открытых пространств. В целом статистические данные и сравнение с другими ЦМР говорят о системном характере искажения высоты в этой модели, связанном больше не с высоким растительным покровом, а с технологией получения первичных данных о рельефе.

При визуальной оценке видно, что данная ЦМР содержит многочисленные артефакты в виде хаотичных узоров и «кочек», что отмечали и другие исследователи [Ben-Haim et al., 2015; Мальцев и др., 2018; Florinsky et al., 2018], а также большая группа специалистов в своём отчёте [ASTER Global GDEM..., 2009].

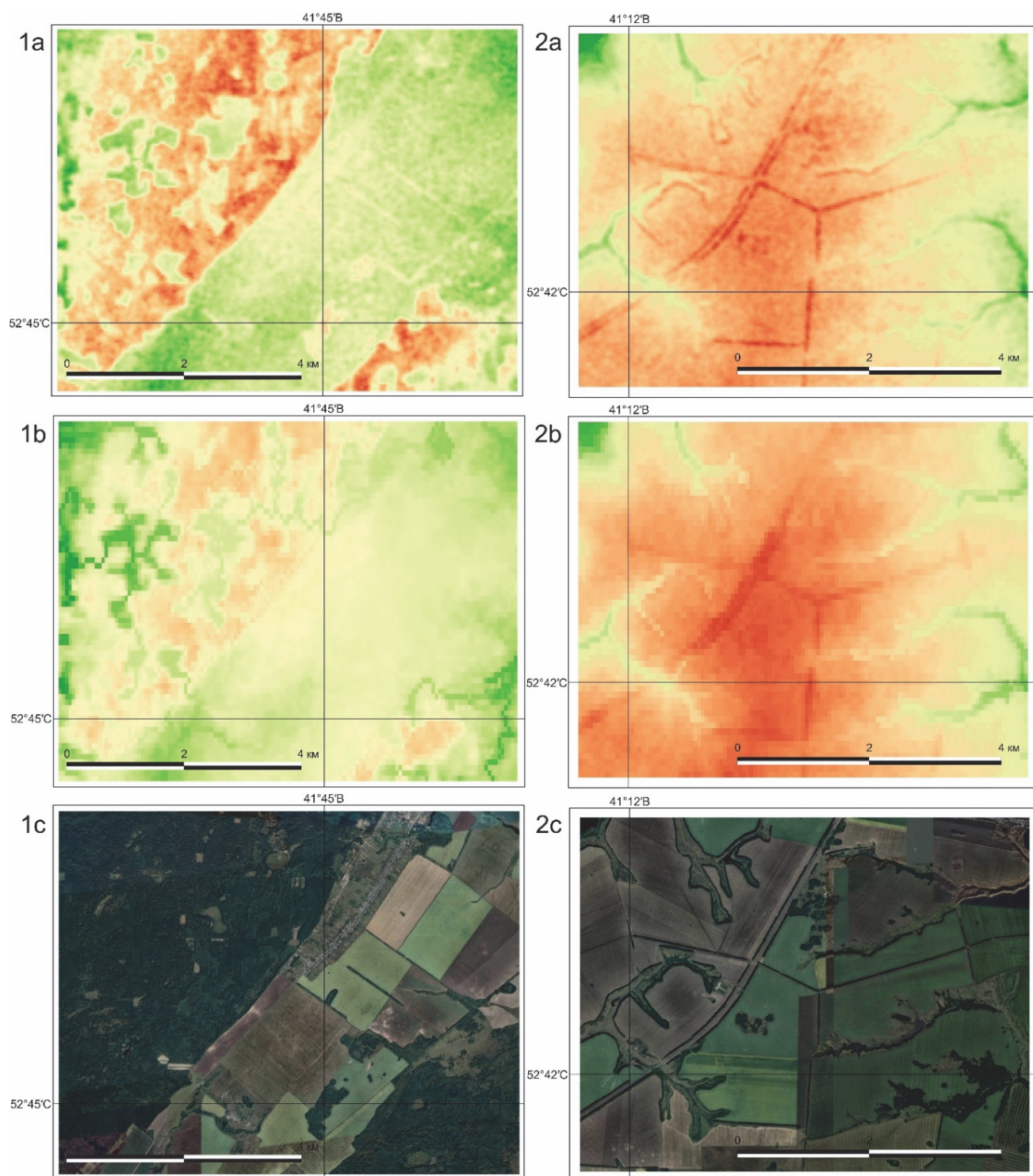


Рис. 2. Примеры включения высокой растительности в ЦМР

1 – фрагмент с лесным массивом, 2 – фрагмент с лесополосами между полей, вдоль балок и трассы: а – SRTM Plus (разрешение 1 угловая секунда); б – MERIT HYDRO (разрешение 3 угловые секунды); в – спутниковый снимок Google

Fig. 2. Examples of including tall vegetation in the DEM

1 – fragment with forest, 2 – fragment with forest belts between fields, along beams and the road: а – SRTM Plus (resolution 1 arc second); б – MERIT HYDRO (resolution 3 arc seconds); в – Google satellite image

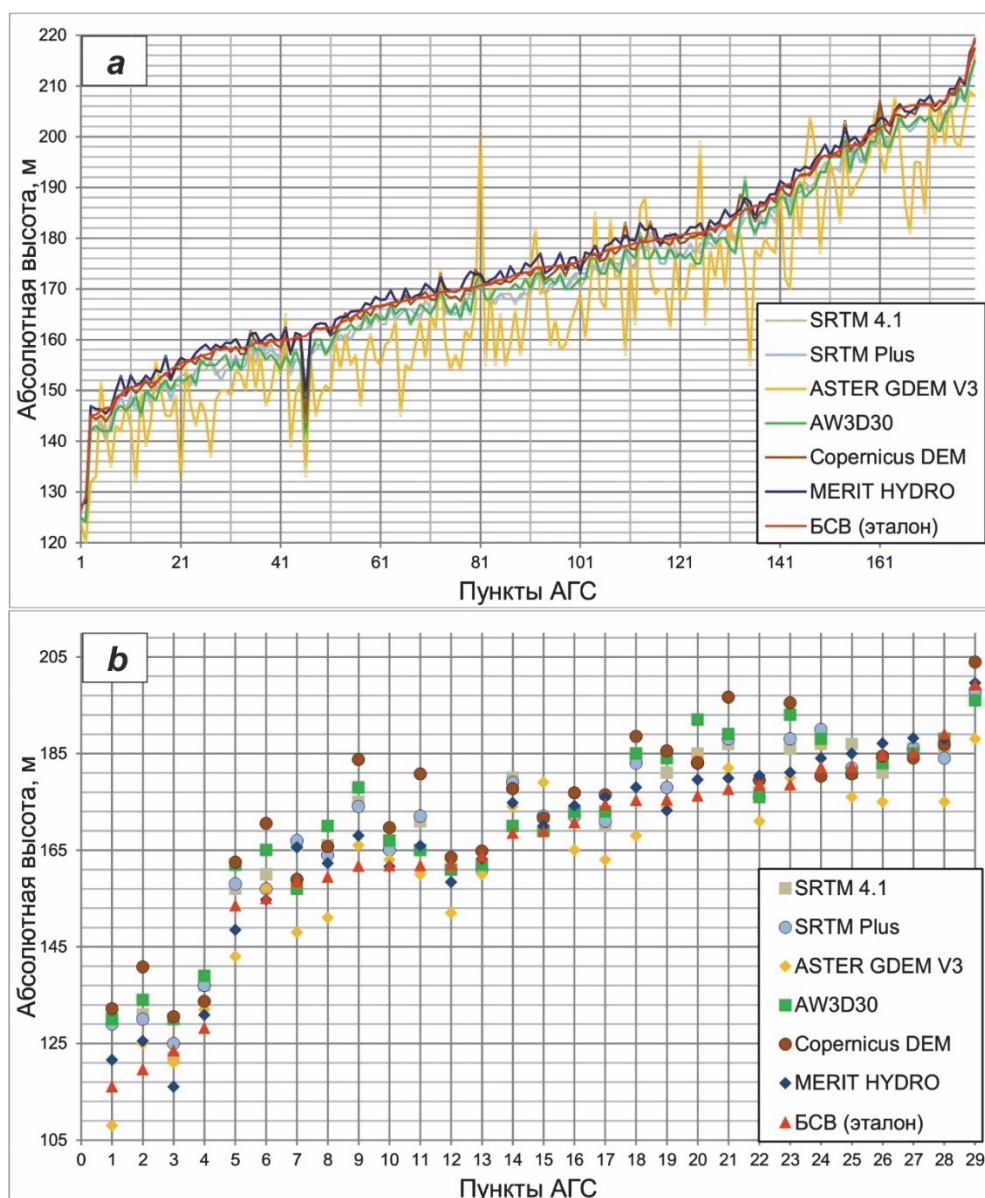


Рис. 3. Ошибки абсолютной высоты у разных ЦМР относительно эталонных значений

a – на открытой местности; b – в лесистой местности

Fig. 3. Errors of the absolute height for different DEMs relative to the reference values

a – in open area; b – in a wooded area

Результаты расчёта СКО абсолютной высоты и коэффициента Пирсона (r) относительно эталонных значений для открытой и лесистой местности

Таблица 2

Table 2

The results of calculating of the RMSE of the absolute height and the Pearson coefficient (r) relative to the reference values for open and wooded areas

Цифровая модель рельефа	Для открытой местности		Для лесистой местности	
	Средняя квадратичная ошибка, м	Коэффициент Пирсона (r)	Средняя квадратичная ошибка, м	Коэффициент Пирсона (r)
SRTM 4.1	3,57	0,99	6,86	0,97
SRTM Plus	3,41	0,99	6,61	0,97
ASTER GDEM V3	11,16	0,92	7,25	0,95
AW3D30	3,64	0,99	8,20	0,95
Copernicus DEM GLO-30	1,84	0,99	10,46	0,93
MERIT HYDRO	1,68	0,99	3,70	0,99

Можно отметить, что сравнительная оценка качества представленных в настоящей работе ЦМР, часто вместе с полученными количественными значениями, вполне соотносятся с результатами других исследователей, рассматривавших вопрос точности данных продуктов в широком географическом охвате [Farr et al., 2007; Takaku et al., 2016; Santillan et al., 2016; Alganci et al., 2018]. Также примечательно, что авторы исследования по оценке точности нескольких ЦМР для лесной и пойменной зоны национального парка «Нижняя Кама» получили аналогичный порядок увеличения вертикальной точности: ASTER GDEM, AW3D30, SRTM, MERIT DEM [Рязанов, Кулагина, 2022].

Заключение

Работы по количественной и качественной оценке существующих в свободном доступе моделей высот должны помочь исследователям в выборе основы, которая наилучшим образом будет отвечать задачам их исследований. Проведённая оценка точности абсолютной высоты глобальных общедоступных ЦМР, покрывающих Тамбовскую область, дала следующие результаты.

Продукт MERIT HYDRO показал наилучшую точность по абсолютной высоте, имея наименьшие значения СКО и максимальной ошибки по модулю. Это справедливо как для открытой местности (СКО = 1,68 м), так и для территорий, покрытых высокой растительностью (СКО = 3,7 м). Коэффициент корреляции Пирсона ($r \approx 0,99$) показывает высокую корреляцию извлечённых высот с эталонными значениями. Сравнительный анализ с другими ЦМР показывают, что данная модель действительно прошла существенную обработку в целях устранения ошибок высоты. Между тем визуальный анализ и статистика ошибок между открытой и лесистой местностью показывает, что искажения рельефа, хотя и менее сильные, всё же сохранились. Кроме того, на момент исследования данная ЦМР доступна только в разрешении 90 м, чего может быть недостаточно для решения ряда таких задач, как изучение мезоформ рельефа, анализ структуры водотоков и водосборов низких порядков, выделение геоморфологических комплексов и т.д.

Если говорить о более детальных моделях с 30-метровым разрешением, то применительно к рассматриваемому региону в качестве источника данных наиболее подходящим выбором из рассмотренных продуктов станет Copernicus DEM GLO-30 (СКО = 1,84 м + наиболее свежая спутниковая съёмка). Менее точными моделями являются SRTM Plus (СКО = 3,41 м) и AW3D30 (СКО = 3,64 м). Отметим, что это справедливо лишь по отношению к открытым территориям,

так как для лесистой местности все рассмотренные ЦМР, за исключением MERIT HYDRO, дают сопоставимые и довольно заметные ошибки по высоте (СКО = 6,61–10,46 м).

Продукт ASTER GDEM V3 в целом по региону показал наибольшую СКО и максимальные ошибки высот по модулю, а также наименьшее значение r , обладая соответственно весьма низкой точностью в сравнении с аналогами.

Можно также предполагать, что рассмотренные ЦМР имеют схожую вертикальную точность и в соседних с Тамбовской областью равнинных территориях лесостепной зоны, с похожим характером и условиями формирования рельефа, что, конечно, требует экспериментального подтверждения.

Глобальные общедоступные ЦМР, полученные спутниковой съёмкой, как правило, используют после предварительной подготовки. В специализированных для морфометрического анализа программах, таких как SAGA GIS, реализованы процедуры удаления фрагментов с искажённой высотой и последующего заполнения пустот интерполяционными методами. Возможно и ручное редактирование растров с высотами.

Для региональных исследований с широким пространственным охватом альтернативой использования готовых глобальных спутниковых моделей является построение ЦМР на основе оцифрованных данных топографических карт. Важным моментом при этом является выбор масштаба карты, так как от него будет зависеть детальность и достоверность извлекаемых параметров рельефа. Но следует учесть, что далеко не всегда на интересующий участок могут иметься карты нужного масштаба.

Для локальных участков суши, чей анализ потребует принципиальной точности извлекаемых характеристик, адекватным вариантом станет создание собственной ЦМР на основе данных полевой съёмки, полученных технологиями спутникового позиционирования и корректировки с опорных станций. Также для целей 3D-моделирования местности применяются БПЛА посредством проведения аэрофотосъёмки с последующей фотограмметрической обработкой снимков, а также лазерного сканирования лидаром с борта БПЛА.

Сфер применения данных о рельефе весьма много, каждое отдельное исследование ставит разные цели и задачи, использует собственные критерии оценки изучаемых объектов и явлений. Полностью готовых решений на все случаи не существует, выбор источника геопространственных данных зависит от решаемой задачи и, в конечном счёте, остаётся за исследователем.

Список источников

- Баранов Ю.Б. и др. Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов. М. : ГИС-Ассоциация, 1999. 204 с.
- Бондарев В.П. Водосборный бассейн как комплексная социоприродная иерархическая система // Жизнь Земли. 2020. Т. 42, № 3. С. 293–303.
- Борщ С.В., Самсонов Т.Е., Симонов Ю.А., Львовская Е.А. Визуализация гидрологической обстановки в бассейнах крупных рек средствами ГИС-технологий // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2013. № 349. С. 47–62.
- Бубер И.А., Чурсин И.Н., Филиппов Д.В., Орлянкин В.Н. Применение ГИС и данных дистанционного зондирования при картографировании прогнозируемых уровней воды в зонах затопления рек // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2016. № 6. С. 96–99.
- Буряк Ж.А., Терехин Э.А. Оценка агроклиматического потенциала территории юга среднерусской возвышенности (на примере Белгородской области) // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2019. Т. 43, № 3. С. 286–293.
- Гопи Н.В. Алгоритмический подход при составлении цифровых почвенных карт на основе лабораторно-полевых и спутниковых данных // Исследование Земли из космоса. 2013. № 3. С. 58–73.
- ГОСТ 28441-99. Картография цифровая. Термины и определения. Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. 13 с.
- Гусев В.Л., Потапов С.Л., Синькова М.Г. Оценка точности цифровых моделей рельефа и цифровых моделей местности из открытых источников // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2022. Т. 66, № 1. С. 52–63.
- Доклад о состоянии окружающей среды Тамбовской области в 2021 году. Тамбов, 2022. 184 с.
- Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Мухарамова С.С. и др. Картографическая модель речных бассейнов Европейской России // География и природные ресурсы. 2017. № 2. С. 27–36.
- Кондратьева М.А., Чашин А.Н. Оценка эрозионной опасности рельефа на основе цифрового моделирования // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2021. Т. 27, № 2. С. 241–252.
- Корыгин Л.М. Бассейновая концепция: от гидрологии к природопользованию // География и природные ресурсы. 2017. № 2. С. 5–16.
- Кривцов В.А., Водорезов А.В., Комаров М.М. Геоморфологическое районирование территории Рязанской области на локальном уровне // Вестник Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина. 2019. № 3 (64). С. 152–162.
- Лисецкий Ф.Н., Чепелев О.А., Кириленко Ж.А. Энергетическая оценка почвообразовательного процесса // Проблемы региональной экологии. 2012. № 2. С. 87–90.
- Мальцев К.А., Голосов В.Н., Гафуров А.М. Цифровые модели рельефа и их использование в расчетах темпов смыва почв на пахотных землях // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. 2018. Т. 160, № 3. С. 514–530.
- Мальцев К.А., Шарифуллин А.Г. Морфологическая классификация малых водосборов в речных бассейнах освоенных равнин // Геоморфология. 2017. № 3. С. 76–87.
- Митяев М.В., Хасанкаев В.Б. Вертикальная расчлененность рельефа центральной части Баренцевоморского шельфа // Арктика и Антарктика / Российская академия наук, Научный совет по изучению Арктики и Антарктики. Вып. 5 (39). М. : Наука, 2007. С. 66–71.
- Новаковский Б.А., Пермьяков Р.В. Комплексное геоинформационно-фотограмметрическое моделирование рельефа : учеб. пособие. М. : Изд-во МИИГАиК, 2019. 175 с.
- Остроухов А.В. Применение данных радарной съемки Земли SRTM 4.1 и их производных для создания геоморфологической основы ландшафтно-инвентаризационных карт // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2018. Т. 62, № 1. С. 45–51.
- Павлова А.И. Анализ методов интерполирования высот точек для создания цифровых моделей рельефа // Автометрия. 2017. Т. 53, № 2. С. 86–94.
- Приказ Росреестра от 19.09.2022 № п/0344 «Об установлении структуры государственной геодезической сети и требований к созданию государственной геодезической сети, включая требования к геодезическим пунктам». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202301110016> (дата обращения 12.04.2023).
- Рыбалко Е.А., Баранова Н.В., Твардовская Л.Б. Разработка крупномасштабной картографической модели пространственного распределения теплообеспеченности на территории Крыма для культуры винограда с учётом морфометрических особенностей рельефа // Научные труды Северо-Кавказского зонального научно-исследовательского института садоводства и виноградарства. 2016. Т. 11. С. 17–22.
- Рязанов С.С., Кулагина В.И. Сравнительная оценка вертикальной точности цифровых моделей высот – SRTM, ALOS WORLD 3D, ASTER GDEM и MERIT DEM на примере лесной и пойменной зон национального парка «Нижняя Кама» // Географические исследования. 2022. № 1. С. 107–117. doi: 10.17223/25421379/22/8
- Сайт портала GEOBRIDGE. URL: <https://geobridge.ru/> (дата обращения: 05.04.2023).
- Сидорчук А.Ю. Оценка овражного потенциала территории на примере центрального Ямала // География и природные ресурсы. 2020. № 2 (161). С. 109–118.
- Скрипка Г.И., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А. и др. Мониторинг опасных береговых процессов Цимлянского водохранилища с использованием ГИС-технологий // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2020. Т. 26, № 2. С. 253–263.
- Трофимов А.А., Филиппова А.В. Оценка точности матрицы высот SRTM по материалам топографических съёмок // Геопрофи. 2014. № 6. С. 13–17.
- Тулохонов А.К., Цыдыпов Б.З., Содномов Б.В. и др. Оценка развития линейной эрозии на примере оврага в Селенгинском среднегорье // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2018. Т. 62, № 3. С. 327–336.
- Федеральный портал пространственных данных. URL: <https://portal.fppd.cgkipd.ru/main> (дата обращения: 05.04.2023).
- Чупина Д.А., Зольников И.Д., Лямина В.А. ГИС-картографирование морфокомплексов на основе морфометрических характеристик и управляемых классификаций // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. Т. 1, № 1. С. 3–6.

- Alganci U., Besol B., Sertel E.** Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models // *IJGI*. 2018. V. 7 (3). P. 114. doi: 10.3390/ijgi7030114
- ASTER** Global DEM Validation Summary Report. Prepared by ASTER GDEM Validation Team: METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS. In cooperation with NGA and Other Collaborators. 2009. URL: https://lpdaac.usgs.gov/documents/28/ASTER_GDEM_Validation_1_Summary_Report.pdf (дата обращения: 12.04.2023).
- Ben-Haim G., Dalyot S., Doytsher Y.** Local Absolute Vertical Accuracy Computation of Wide-Coverage Digital Terrain Models // *Advances in Spatial Data Handling and Analysis*. 2015. P. 209–225. doi: 10.1007/978-3-319-19950-4_13
- Copernicus** Digital Elevation Model Validation Report. URL: https://spacedata.copernicus.eu/documents/20123/121239/GEO1988-CopernicusDEM-RP-001_ValidationReport_I3.0.pdf/c80c5e85-9aea-356d-c877-80d8b5e028bb?t=1668162072523 (дата обращения: 12.04.2023).
- Farr T.G. et al.** The Shuttle Radar Topography Mission // *Reviews of Geophysics*. 2007. V. 45. doi: 10.1029/2005RG000183
- Florinsky I.V., Skrypitsyna T.N., Luschikova O.S.** Comparative accuracy of the AW3D30 DSM, ASTER GDEM, and SRTM1 DEM: A case study on the Zaoksky testing ground, Central European Russia // *Remote Sensing Letters*. 2018. V. 9 (7). P. 706–714. doi: 10.1080/2150704X.2018.1468098
- Florinsky I.V., Skrypitsyna T.N., Trevisani S., Romaikin S.V.** Statistical and visual quality assessment of nearly-global and continental digital elevation models of Trentino, Italy // *Remote Sensing Letters*. 2019. V. 10 (8). P. 726–735. doi: 10.1080/2150704X.2019.1602790
- Hirano A., Welch R., Lang H.** Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2003. V. 57(5–6), P. 356–370. doi: 10.1016/S0924-2716(02)00164-8
- Jakobsson M. et al.** The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0 // *Geophysical Research Letters*. 2012. V. 39. doi: 10.1029/2012GL052219
- Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E.** Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90 m Database, 2008. (<http://srtm.csi.cgiar.org>).
- Kuleli T., Senkal O., Erdem M.** National assessment of sea level rise using topographic and census data for Turkish coastal zone. // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2009. V. 156. P. 425–434. doi: 10.1007/s10661-008-0495-z
- NASA** Earth Observation Data Site. URL: <https://search.earthdata.nasa.gov/search> (дата обращения: 05.04.2023).
- Santillan J., Makinano-Santillan M., Makinano R.** Vertical accuracy assessment of ALOS World 3D – 30M Digital Elevation Model over northeastern Mindanao, Philippines // *IGARSS*. 2016. doi: 10.1109/IGARSS.2016.7730400
- Site ALOS World 3D – 30m (AW3D30).** URL: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm (дата обращения: 05.04.2023).
- Site Copernicus DEM.** URL: <https://spacedata.copernicus.eu/collections/copernicus-digital-elevation-model> (дата обращения: 05.04.2023).
- Site PROJ contributors.** PROJ coordinate transformation software library. Open Source Geospatial Foundation. URL: <https://proj.org/>. 2023. doi: 10.5281/zenodo.5884394
- Takaku J., Tadono T., Tsutsui K., Ichikawa M.** Validation of AW3D Global DSM Generated from ALOS PRISM // *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2016. V. III-4, P. 25–31. doi: 10.5194/isprsannals-III-4-25-2016
- Tighe M., Chamberlain D.** Accuracy Comparison of the SRTM, ASTER, NED, NEXTMAP USA Digital Terrain Model over Several USA Study Sites DEMs // *Proceedings of the ASPRS/MAPS2009 Fall Conference*. 2009.
- Yamazaki D., Ikeshima D., Sosa J., Bates P.D., Allen G.H., Pavelsky T.M.** MERIT Hydro: A high-resolution global hydrography map based on latest topography datasets // *Water Resources Research*. 2019. V. 55. P. 5053–5073. doi: 10.1029/2019WR024873
- Yamazaki D., Ikeshima D., Tawatari R., Yamaguchi T., O'Loughlin F., Neal J.C., Sampson C.C., Kane S., Bates P.D.** A high accuracy map of global terrain elevations // *Geophysical Research Letters*. 2017. V. 44. P. 5844–5853. doi: 10.1002/2017GL072874

References

- Baranov Yu.B. et al. *Geoinformatika. Tolkovyj slovar' osnovnyh terminov* [Geoinformatics. Explanatory dictionary of basic terms]. Moscow: GIS-Association, 1999. 204 p. In Russian
- Bondarev V.P. *Vodosbornyj bassejn kak kompleksnaya socioprirodnaya ierarhicheskaya sistema* [Drainage basin as a complex socio-natural hierarchical system] // *Life of the Earth*. 2020. T. 42, No. 3. pp. 293–303. In Russian
- Borsch S.V., Samsonov T.E., Simonov Yu.A., Lvovskaya E.A. *Vizualizaciya gidrologicheskoy obstanovki v bassejnah krupnyh rek sredstvami GIS-tehnologii* [Visualization of the hydrological situation in the basins of large rivers using GIS technologies] // *Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*. 2013. No. 349. pp. 47–62. In Russian
- Buber I.A., Chursin I.N., Filippov D.V., Orlyankin V.N. *Primenenie GIS i dannyh distancionnogo zondirovaniya pri kartografirovanii prognoziruemyh urovnej vody v zonah zatopleniya rek* [Application of GIS and remote sensing data for mapping predicted water levels in river flood zones] // *News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*. 2016. No. 6. pp. 96–99. In Russian
- Buryak Zh.A., Terekhin E.A. *Ocenka agroklimaticheskogo potenciala territorii yuga srednerusskoj vozvyshehnosti (na primere Belgorodskoj oblasti)* [Assessment of the agro-climatic potential of the territory of the south of the Central Russian Upland (on the example of the Belgorod region)] // *Scientific Bulletin of the Belgorod State University. Series: Natural Sciences*. 2019. V. 43, No. 3. pp. 286–293. In Russian
- Gopp N.V. *Algoritmicheskij podhod pri sostavlenii cifrovyyh pochvennyh kart na osnove laboratorno-polevyh i sputnikovyyh dannyh* [Algorithmic approach to compiling digital soil maps based on laboratory-field and satellite data] // *Research of the Earth from space*. 2013. No. 3. pp. 58–73. In Russian
- GOST 28441-99. Kartografiya tsifrovaya. Terminy i opredeleniya* [State Standard 28441-99. Digital cartography. Terms and Definitions]. Minsk: Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 1999. – 13 p. In Russian
- Gusev V.L., Potapov S.L., Sinkova M.G. *Ocenka tochnosti cifrovyyh modelej rel'efa i cifrovyyh modelej mestnosti iz otkrytyh istochnikov* [Estimation of the accuracy of digital terrain models and digital terrain models from open sources] // *News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*. 2022. V. 66, No. 1. pp. 52–63. In Russian

- Doklad o sostoyanii okruzhayushchej sredy Tambovskoj oblasti v 2021 godu* [Report on the state of the environment of the Tambov region in 2021]. Tambov, 2022. 184 p. In Russian
- Ermolaev O.P., Maltsev K.A., Mukharamova S.S. et al. *Kartograficheskaya model' rechnyh bassejnov Evropejskoj Rossii* [Cartographic model of river basins in European Russia] // *Geography and Natural Resources*. 2017. No. 2. pp. 27–36. In Russian
- Kondratieva M.A., Chashchin A.N. *Ocenka erozionnoj opasnosti rel'efa na osnove cifrovogo modelirovaniya* [Erosion hazard assessment of relief based on digital modeling] // *InterKarto*. InterGIS. 2021. V. 27, No. 2. pp. 241–252. In Russian
- Korytny L.M. *Bassejnovaya koncepciya: ot gidrologii k prirodopol'zovaniyu* [Basin concept: from hydrology to nature management] // *Geography and natural resources*. 2017. No. 2. pp. 5–16. In Russian
- Krivtsov V.A., Vodorezov A.V., Komarov M.M. *Geomorfologicheskoe rajonirovanie territorii Ryazanskoj oblasti na lokal'nom urovne* [Geomorphological zoning of the territory of the Ryazan region at the local level] // *Bulletin of the Ryazan State University named after S.A. Yesenin*. 2019. No. 3(64). pp. 152–162. In Russian
- Lisetsky F.N., Chepelev O.A., Kirilenko Zh.A. *Energeticheskaya ocenka pochvoobrazovatel'nogo processa* [Energy assessment of the soil-forming process] // *Problems of regional ecology*. 2012. No. 2. pp. 87–90. In Russian
- Maltsev K.A., Golosov V.N., Gafurov A.M. *Cifrovye modeli rel'efa i ih ispol'zovanie v raschyotah tempov smyva pochv na pahotnyh zemlyah* [Digital elevation models and their use in calculating the rate of soil erosion on arable land] // *Scientific notes of Kazan University. Series: Natural Sciences*. 2018. V. 160, No. 3. pp. 514–530. In Russian
- Maltsev K.A., Sharifullin A.G. *Morfologicheskaya klassifikaciya malyh vodosborov v rechnyh bassejnah osvoennyh ravnin* [Morphological classification of small watersheds in river basins of developed plains] // *Geomorfologiya* [Geomorphology]. 2017. No. 3. pp. 76–87. In Russian
- Mityaev M.V., Khasankaev V.B. *Vertikal'naya raschlenennost' rel'efa central'noj chasti Barentsevomorskogo shel'fa* [Vertical dissection of the relief of the central part of the Barents Sea shelf] // *Arctic and Antarctic / Russian Academy of Sciences, Scientific Council for the Study of the Arctic and Antarctic. Volume Issue 5 (39)*. Moscow: Nauka, 2007. pp. 66–71. In Russian
- Novakovskiy B.A., Permyakov R.V. *Kompleksnoe geoinformacionno-fotogrammetricheskoe modelirovanie rel'efa: uchebnoe posobie* [Integrated Geoinformation-Photogrammetric Modeling of Relief: A Study Guide]. Moscow: Publishing house MIIGAiK, 2019. 175 p. In Russian
- Ostroukhov A.V. *Primenenie dannyh radarnoj s"emki Zemli SRTM 4.1 i ih proizvodnyh dlya sozdaniya geomorfologicheskoy osnovy landshaftno-inventarizatsionnyh kart* [Application of SRTM 4.1 Earth Radar Survey Data and Their Derivatives to Create a Geomorphological Basis for Landscape Inventory Maps] // *News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*. 2018. V. 62, No. 1. pp. 45–51. In Russian
- Pavlova A.I. *Analiz metodov interpolirovaniya vysot toчек dlya sozdaniya cifrovyyh modelej rel'efa* [Analysis of methods for interpolating point heights for creating digital elevation models] // *Autometry*. 2017. V. 53, No. 2. pp. 86–94. In Russian
- Order of Rosreestr dated September 19, 2022 No. p/0344 *Ob ustanovlenii struktury gosudarstvennoj geodezicheskoy seti i trebovaniy k sozdaniyu gosudarstvennoj geodezicheskoy seti, vlyuchaya trebovaniya k geodezicheskim punktam* [On establishing the structure of the state geodetic network and requirements for the creation of a state geodetic network, including requirements for geodetic points]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202301110016> (Date of accessed 04.12.2023). In Russian
- Rybalko E.A., Baranova N.V., Tvardovskaya L.B. *Razrabotka krupnomasshtabnoj kartograficheskoy modeli prostranstvennogo raspredeleniya teploobespechennosti na territorii Kryma dlya kul'tury vinograda s uchytom morfometricheskikh osobennostej rel'efa* [Development of a large-scale cartographic model of the spatial distribution of heat supply on the territory of the Crimea for the cultivation of grapes, taking into account the morphometric features of the relief] // *Scientific works of the North Caucasian Zonal Research Institute of Horticulture and Viticulture*. 2016. V. 11. pp. 17–22. In Russian
- Ryazanov S.S., Kulagina V.I. Comparative assessment of the vertical accuracy of digital elevation models – SRTM, ALOS WORLD 3D, ASTER GDEM and MERIT DEM on the example of the forest and floodplain zones of the Nizhnyaya Kama National Park // *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2022. No. 1. pp. 107–117. doi: 10.17223/25421379/22/8 In Russian
- Website of the GEOBRIDGE portal. URL: <https://geobridge.ru/> (Date of accessed 04.05.2023).
- Sidorchuk A.Yu. *Ocenka ovrazhnogo potentsiala territorii na primere central'nogo Yamala* [Evaluation of the ravine potential of the territory on the example of the central Yamal] // *Geografiya i prirodnyye resursy* [Geography and natural resources]. 2020. No. 2(161). pp. 109–118. In Russian
- Skipka G.I., Ivlieva O.V., Bepalova L.A. et al. *Monitoring opasnyh beregovyyh processov Cimlyanskogo vodohranilishcha s ispol'zovaniem GIS-tekhnologij* [Monitoring of hazardous coastal processes of the Tsimlyansk reservoir using GIS technologies] // *InterKarto*. InterGIS. 2020. V. 26, No. 2. pp. 253–263. In Russian
- Trofimov A.A., Filippova A.V. *Ocenka tochnosti matricy vysot SRTM po materialam topograficheskikh s"yomok* [Assessment of the accuracy of the SRTM DEM based on topographic surveys] // *Geoprofi*. 2014. No. 6. pp. 13–17. In Russian
- Tulokhonov A.K., Tsydygov B.Z., Sodnomov B.V. [et al.] *Ocenka razvitiya linejnoj erozii na primere ovraga v Selenginskom srednegor'e* [Evaluation of the development of linear erosion on the example of a ravine in the Selenginsky middle mountains] // *News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*. 2018. V. 62, No. 3. pp. 327–336. In Russian
- Federal portal of spatial data. URL: <https://portal.fppd.cgkipd.ru/main> (Date of accessed 04.05.2023).
- Chupina D.A., Zolnikov I.D., Lyamina V.A. *GIS-kartografirovaniye morfokompleksov na osnove morfometricheskikh harakteristik i upravlyaemykh klassifikacij* [GIS-mapping of morphocomplexes based on morphometric characteristics and managed classifications] // *Interexpo Geo-Siberia*. 2012. V. 1, No. 1. pp. 3–6. In Russian
- Alganci U., Besol B., Sertel E. Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models // *IJGI*. 2018. V. 7(3). P. 114. doi: 10.3390/ijgi7030114
- ASTER Global DEM Validation Summary Report. Prepared by ASTER GDEM Validation Team: METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS. In cooperation with NGA and Other Collaborators. 2009. URL: https://lpdaac.usgs.gov/documents/28/ASTER_GDEM_Validation_1_Summary_Report.pdf (Date of accessed 04.12.2023).
- Ben-Haim G., Dalyot S., Doytsher Y. Local Absolute Vertical Accuracy Computation of Wide-Coverage Digital Terrain Models // *Advances in Spatial Data Handling and Analysis*. 2015. pp 209–225. doi: 10.1007/978-3-319-19950-4_13

Copernicus Digital Elevation Model Validation Report. URL: https://spacedata.copernicus.eu/documents/20123/121239/GEO1988-CopernicusDEM-RP-001_ValidationReport_I3.0.pdf/c80c5e85-9aea-356d-c877-80d8b5e028bb?t=1668162072523 (Date of accessed 04.12.2023).

Farr T.G. [et al.] The Shuttle Radar Topography Mission // Reviews of Geophysics. 2007. V. 45. doi: 10.1029/2005RG000183

Florinsky I.V., Skrypitsyna T.N., Luschikova O.S. Comparative accuracy of the AW3D30 DSM, ASTER GDEM, and SRTM1 DEM: A case study on the Zaoksky testing ground, Central European Russia // Remote Sensing Letters. 2018. V 9(7), pp. 706–714. doi: 10.1080/2150704X.2018.1468098

Florinsky I.V., Skrypitsyna T.N., Trevisani S., Romaikin S.V. Statistical and visual quality assessment of nearly-global and continental digital elevation models of Trentino, Italy // Remote Sensing Letters. 2019. V.10(8), pp. 726–735. doi: 10.1080/2150704X.2019.1602790

Hirano A., Welch R., Lang H. Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2003. V. 57(5–6), pp. 356–370. doi: 10.1016/S0924-2716(02)00164-8

Jakobsson M. et al. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0 // Geophysical Research Letters. 2012. V. 39. doi: 10.1029/2012GL052219

Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E. Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90 m Database, 2008. (<http://srtm.csi.cgiar.org>).

Kuleli T., Senkal O., Erdem M. National assessment of sea level rise using topographic and census data for Turkish coastal zone. // Environmental Monitoring and Assessment. 2009. Vol. 156, pp. 425–434. doi: 10.1007/s10661-008-0495-z

NASA Earth Observation Data Site. URL: <https://search.earthdata.nasa.gov/search> (Date of accessed 04/05/2023).

Santillan J, Makinano-Santillan M., Makinano R. Vertical accuracy assessment of ALOS World 3D – 30M Digital Elevation Model over northeastern Mindanao, Philippines // IGARSS. 2016. doi: 10.1109/IGARSS.2016.7730400

Site ALOS World 3D – 30m (AW3D30). URL: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm (Date of accessed 04.05.2023).

Site Copernicus DEM. URL: <https://spacedata.copernicus.eu/collections/copernicus-digital-elevation-model> (Date of accessed 04.05.2023).

Site PROJ contributors. PROJ coordinate transformation software library. Open Source Geospatial Foundation. URL: <https://proj.org/>. 2023. doi: 10.5281/zenodo.5884394

Takaku J., Tadono T., Tsutsui K., Ichikawa M. Validation of AW3D Global DSM Generated from ALOS PRISM // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. V. III-4, pp. 25–31. doi: 10.5194/isprannals-III-4-25-2016

Tighe M, Chamberlain D. Accuracy Comparison of the SRTM, ASTER, NED, NEXTMAP USA Digital Terrain Model over Several USA Study Sites DEMs // Proceedings of the ASPRS/MAPPS2009 Fall Conference. 2009.

Yamazaki D., Ikeshima D., Sosa J., Bates P.D., Allen G.H., Pavelsky T.M. MERIT Hydro: A high-resolution global hydrography map based on latest topography datasets // Water Resources Research. 2019. V. 55, pp. 5053–5073. doi: 10.1029/2019WR024873

Yamazaki D., Ikeshima D., Tawatari R., Yamaguchi T., O'Loughlin F., Neal J.C., Sampson C.C., Kanae S., Bates P.D. A high accuracy map of global terrain elevations // Geophysical Research Letters. 2017. V. 44, pp. 5844–5853. doi: 10.1002/2017GL072874

Информация об авторах:

Буковский М.Е., кандидат географических наук, заведующий лабораторией мониторинга агроклиматического и водно-ресурсного потенциалов территорий; доцент, кафедра экологии и природопользования, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, Тамбов, Россия.

E-mail: mikezzz@mail.ru

Кузьмин К.А., научный сотрудник, лаборатория мониторинга агроклиматического и водно-ресурсного потенциалов территорий, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, Тамбов, Россия.

E-mail: ka_kuzmin@mail.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Bukovskiy M.E., Cand. Sci. (Geography), Head of the Laboratory for Monitoring Agro-Climatic and Water-Resource Potentials of the Territories; Associate Professor of the Department of Ecology and Nature Management, Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia.

E-mail: mikezzz@mail.ru

Kuzmin K.A., Researcher of the Laboratory for Monitoring Agro-Climatic and Water-Resource Potentials of the Territories, Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia.

E-mail: ka_kuzmin@mail.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.06.2023; одобрена после рецензирования 15.04.2024; принята к публикации 27.11.2024

The article was submitted 16.06.2023; approved after reviewing 15.04.2024; accepted for publication 27.11.2024

Научная статья

УДК 631.482.1(631.487) + 549

doi: 10.17223/25421379/33/6

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ КАК ИНДИКАТОР ВОЗРАСТА АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ПОЧВ В ПОЙМЕ РЕКИ АМУР

Александр Викторович Мартынов¹

¹ Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Благовещенск, Россия, lexxm@ascnet.ru

Аннотация. В пойме среднего течения р. Амур радиоуглеродным методом определен возраст почв и рентгендифрактометрическим методом – фракционный состав почвенных минералов. Это позволило определить скорости выветривания первичных и формирования вторичных минералов в аллювиальных почвах. Были разработаны регрессионные модели, позволяющие по содержанию минералов определять возраст аллювиальных почв. Установлено, что в качестве индикаторов возраста аллювиальных почв лучше всего использовать кварц, калиевые полевые шпаты, хлорит и каолинит.

Ключевые слова: хронопоследовательность, минералы, возраст почв, выветривание, р. Амур, регрессионный анализ, радиоуглеродный анализ

Источник финансирования: Министерство науки и высшего образования Российской Федерации по теме НИР № 122041800128-5.

Для цитирования: Мартынов А.В. Минералогический состав как индикатор возраста аллювиальных почв в пойме реки Амур // Геосферные исследования. 2024. № 4. С. 87–106. doi: 10.17223/25421379/33/6

Original article

doi: 10.17223/25421379/33/6

MINERALOGICAL COMPOSITION AS AN INDICATOR OF THE AGE OF ALLUVIAL SOILS IN THE FLOODPLAIN OF THE AMUR RIVER

Alexander V. Martynov¹

¹ Institute of Geology and Nature Management, FEB RAS, Blagoveshchensk, Russia, lexxm@ascnet.ru

Abstract. The age of soils is the most important variable determining the physical and chemical parameters of soils and is of great interest not only in soil, but also in geographical, geomorphological, paleogeographic and archaeological studies. The process of soil formation can be directly observed only for several decades, so the problem of determining the age of soils often arises. Currently existing methods for determining the age of soils require certain, not always feasible, conditions and material support. This led to the widespread use of the chronosequences method. To use this method, it is necessary that the stages of one or more pedogenetic processes used as indicators are clearly manifested in the soils in the identified sequence. This position is optimally matched by alluvial soils and the processes of weathering and formation of soil minerals occurring in them. Similar studies have not been conducted in the Russian Far East before, and to compensate for this gap, a chronosequence was laid in the floodplain of the middle course of the Amur River. Within its limits, 9 soil sections were laid, forming hydromorphic and automorphic series. Samples were taken from the soil-forming horizons, in which the fractional mineralogical composition and age were determined by the radiocarbon method. The obtained data were used to create regression models characterizing the time spent on the weathering of primary and formation of clay minerals. In the future, these models will allow determining the age of soils in the floodplain of the middle course of the Amur River without the use of instrumental methods for determining age. The observed time interval was 4000 thousand years in the automorphic series and 1100 years in the hydromorphic one. It is established that there is no stable unidirectional formation of the mineralogical composition of soils with age. Plagioclases, amphiboles, micas and smectite show pronounced chronodynamics, but their models either do not differ in accuracy or strongly depend on the hydrological regime. Quartz and potassium feldspar models include mainly large fractions (>25, 25–10 microns) and are characterized by high accuracy: quartz ACS and PCS $R^2 = 0.99$ $P = 0.00$ and potassium feldspars ACS $R^2 = 0.96$ $P = 0.00$; PCS $R^2 = 0.85$ $P = 0.02$. The models based on chlorite and kaolinite also high accuracy: chlorite ACS $R^2 = 0.90$ $P = 0.03$; PCS $R^2 = 0.99$ $P = 0.01$ and kaolinite ACS $R^2 = 0.98$ $P = 0.00$; PCS $R^2 = 0.97$ $P = 0.02$, but the whole spectrum of the fractions under consideration is involved in their construction (from >25 to < 1 microns). It was found that in young soils, it is more expedient to use quartz and potassium feldspar to assess the age. In ancient soils, the rate of weathering of frame minerals slows down and it is better to give priority to clay minerals.

Keywords: chronosequence, alluvial soils, minerals, soil age, weathering, Amur River, regression analysis, radiocarbon analysis



Source of financing: Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the subject of Research Work No. 122041800128-5.

For citation: Martynov A.V. (2024) Mineralogical composition as an indicator of the age of alluvial soils in the floodplain of the Amur River. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. 87–106. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/33/6

Введение

Большинство почвенных свойств являются переменными, зависящими от времени [Markewich et al., 2017], поэтому определение возраста почв представляет большой интерес не только при почвенных, но и при геоморфологических, палеогеографических и археологических исследованиях [Markewich et al., 1989; Birkeland, 1999]. Поскольку почвообразование невозможно наблюдать непосредственно в течение более чем нескольких десятилетий, то, наряду с методами датировки (спорово-пыльцевой и радиоуглеродный), широкое распространение получил метод хронопоследовательности.

При данном методе время заменяется на пространство, а все почвообразующие факторы остаются постоянными в максимально возможной степени, за исключением времени [Walker et al., 2010]. Следовательно, почвенная хронопоследовательность – это генетически связанная группа почв, образовавшихся на геоморфологических поверхностях разного возраста, для которых почвообразующие факторы – климат, биота, рельеф и исходный почвообразующий материал, были примерно эквивалентны с течением времени [Birkeland, 1999]. Хотя в большинстве исследований эти факторы никогда не бывают по-настоящему постоянными во времени, в хронопоследовательности время оказывает такое непропорционально большое влияние по сравнению с другими факторами, что его влияние на педогенез можно оценить [Schaetzl, Thompson, 2015]. Данная особенность хронопоследовательностей делает их ценнейшим инструментом для понимания скорости и направления педогенных изменений [Dortonsoro, Alonso, 1994; Shaw et al., 2003].

Использование метода хронопоследовательностей имеет ряд ограничений. Не во всех почвах возможно построение хронопоследовательности. Необходимо, чтобы в почвах в идентифицированной последовательности четко проявлялись стадии одного или нескольких педогенетических процессов. Часто это возможно только на молодых или контрастных геоморфологических поверхностях: поймах, морских террасах, вулканических отложениях, селевых потоках, лессовых и моренных отложениях. Можно использовать ландшафты, трансформированные человеком, такие как заброшенные пастбища и поля, лесные вырубки и пожары, обработанные рудники, хвостохранилища и другие [Stevens, Walker, 1970; Huggett, 1998].

Также для применения метода хронопоследовательности нужны исходные данные о скорости протекания педогенетических, геоморфологических или антропогенных процессов в близкой или аналогичной местности. Это подразумевает наличие калибровочных данных, полученных с использованием методов датирования, чтобы в дальнейшем экстраполировать данные согласно сравнительно-географическому методу [Роде, 1947; Huggett, 1998].

Не менее важен и педогенетический процесс, изучаемый в хронопоследовательности, который можно потом использовать в качестве индикатора. За более чем 80 лет применения этого метода были проведены исследования по пространственно-временной динамике: углерода органического вещества [Lilienfein et al., 2003; Dumig et al., 2011]; фосфора и его фракций [Vincent et al., 2013; Chiu et al., 2021]; реакции среды, обменных катионов и солевых отложений [Burgess, Drover, 1953; Gorham, 1953; Campbell, 1971]; оксидов железа, кальция, алюминия [Burgess, Drover, 1953; McFadden, Hendricks, 1985; Barrett, 2001] и многие другие. Наиболее же перспективными и многообещающими оказались исследования по временной трансформации минералогического состава [Brady, 1990]. Присутствие диагностических минералов в почве является ключом к процессам почвообразования, скорости их протекания и влияет на управление почвой в целом [Eghbal, Southard, 1993], что подтверждается многочисленными научными работами по всему миру [Ryan, Huertas, 2009; Caner et al., 2010].

Несмотря на существующие исследования, ведущую роль в их трактовке играет геоклиматический контекст. Данные, полученные на одной территории, часто не применимы на другой, отличающейся по своим физико-географическим характеристикам. Необходимы новые данные, заполняющие существующие пробелы в понимании скорости протекания педогенетических процессов в разных регионах. Поэтому в данной работе исследованы минералогические изменения в хронологической последовательности аллювиальных почв поймы среднего течения р. Амур, демонстрирующей их эволюцию от самой примитивной начальной стадии почвообразования до трансформации в зональный тип почв, и определены затраты времени, необходимые для этих процессов. Так как большинство исследований хронопоследовательностей предполагают построение математических функций, описывающих изменения свойств почв во времени [Huggett, 1998], то полученные в

ходе этого исследования данные лягут в основу хронофункции, позволяющей в дальнейшем устанавливать возраст почв поймы р. Амур с помощью только минералогического состава.

Выбор пойменных территорий обусловлен способностью речного рельефа формировать поверхности разного возраста в пределах небольшого по масштабу пространства, что часто используется при хронологических исследованиях [Stevens, Walker, 1970; Huggett, 1998]. Река Амур, будучи одной из крупнейших рек мира, из-за ее трансграничного расположения изучена недостаточно. Минералогические исследования в почвах, развитых в пойме р. Амур, ранее проводились [Григорьев 1958; Chizhikova et al., 2004], но их мало, и они никогда не рассматривались в тесной связи с хронопедогенетическими процессами.

Объект и методы исследования

Исследования проводились в пределах поймы среднего течения р. Амур, перед устьем р. Бурей в южной части Зейско-Буреинской равнины (рис. 1). Пойма сформирована в пределах русла, относящегося к широкопойменному типу. Ширина поймы до 10 км и состоит из трех частей. Приустьевая пойма с высотой пойменного рельефа 2–4 м относительно условного уреза воды в р. Амур и шириной до 2 км. Центральная пойма с высотой пойменного рельефа 4–8 м и шириной 4–5 км и притеррасная пойма с высотой пойменного рельефа 6–8 м, плавно переходящая в разрушенную склоновыми процессами первую надпойменную террасу, где, по С.С. Воскресенскому [1973], образовалась такая форма рельефа, как террасо-увал.

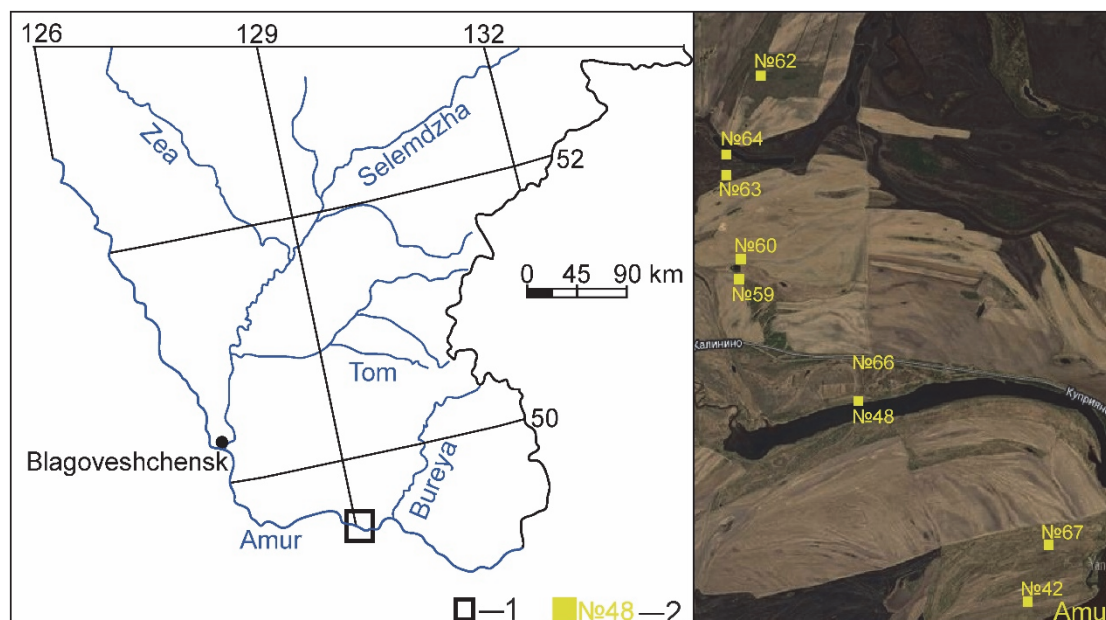


Рис. 1. Карта-схема и спутниковый снимок расположения хронокатены на территории Амурской области
1 – расположение хронопоследовательности на территории Амурской области; 2 – расположение почвенных разрезов на спутниковом снимке

Fig. 1. Schematic map and satellite image of the location of the chronosequences on the territory of the Amur Region

1 – location of the chronosequence on the territory of the Amur region; 2 – location of soil sections on a satellite image

Почвы диагностировались и классифицировались по Классификации и диагностике почв России [Шিশов и др., 2004] и WRB [IUSS Working Group, 2014]. Были выделены аллювиальные серогумусовые почвы «Umbric Fluvisols», аллювиальные перегнойно-глеевые почвы «Gleyic Mollic Fluvisols» и аллювиальные слоистые почвы «Protic Fluvisols».

На возвышенных участках поймы интразональные процессы практически не участвуют в почвообразую-

щих процессах, что привело к формированию остаточно-аллювиальных лугово-бурых почв. Несмотря на значительные площади, которые занимают эти почвы на территории Дальнего Востока вопрос о их классификации остается открытым. В Классификации и диагностике почв России [2004] они отсутствуют. В классификации почв ландшафтов Приморья [Нестерова и др., 2020] они, в зависимости от преобладающих почвообразующих процессов, отнесены

сразу к двум отделам – текстурно-дифференцированному и гидрометаморфическому. В классификации Оздобихина и др. [1994] они соотносятся с брунземами, по аналогии с почвами американских прерий. В силу своей нестабильности и слабозрелости по WRB они были отнесены к Fluvic Cambisols.

Отдельно рассматривались автоморфная почвенная хронопоследовательность (АПХ) и гидроморфная почвенная хронопоследовательность (ГПХ) аллювиальных почв. В качестве исходного состояния выбрана аллювиальная слоистая почва, сформированная в пределах бечевника и минимально затронутая педогенетическими процессами. Автоморфный ряд представлен пятью почвенными разрезами, заложенными на пойменных возвышенностях по всей длине поймы с учетом морфологических особенностей, показывающих усиление зональных признаков почвообразования. Аналогично были заложены три почвенных разреза в пойменных понижениях, но акцент сделан на морфологических признаках, указывающих на усиление признаков глеевых процессов.

Образцы отбирались из почвообразующего горизонта. Выбор горизонта обусловлен строением аллювиальных почв, где, в соответствии с Классификацией и диагностикой почв России [2004], почвообразующий горизонт расположен под гумусово-аккумулятивным горизонтом. В органических горизонтах постоянно синтезируется новый углерод, что не дает возможности определить возраст горизонта. Подстилающие горизонты изменяются медленно, так как процессы выветривания развиваются сверху вниз, и часто даже на поздних стадиях развития в этих горизонтах наблюдаются минимальные изменения. Всего было отобрано девять проб из девяти почвенных разрезов. На радиоуглеродный анализ отбирались пробы весом 1,5 кг так, чтобы не затронуть во время отбора каких-либо затеков и карманов, содержащих органическое вещество, инфильтрованное с гумусово-аккумулятивного горизонта.

Минералогический состав фракции более 25 мкм определялся в лаборатории рудогенеза ИГиП ДВО РАН. Исходная масса навески 20 г. Глинистые минералы были удалены посредством отмучивания образца методом декантации. Магнитная фракция была отделена ручным магнитом с последующим разделением остатка на тяжелую и легкую фракции в бромформе. Минералы определялись под бинокулярным микроскопом МБС-10 и ПОЛАМ-211. Для более точного диагностирования минералов применялся метод капельных реакций.

Минералогический состав фракции менее 25 мкм определялся в лаборатории минералогии и микроморфологии почв Почвенного института им. В.В. Докучаева. Выделение фракций ила (<1 мкм), тонкой

пыли (1–5 мкм) и средней пыли (5–10 мкм) проводилось по методике Н.И. Горбунова [1971]. Ориентированные препараты фракций ила, тонкой и средней пыли исследованы рентгендифрактометрическим методом на аппаратуре фирмы Carl Zeiss Jena (Германия). Управление съемкой велось программой «Дифрактометр-Авто» (разработчик ООО «Ирис» v. 2016). Расшифровка дифрактограмм произведена с помощью программы WinScaler. Рентгендифрактограммы получены для воздушно-сухих образцов, насыщенных этиленгликолем и прокаленных при температуре 550 °C в течение 2 ч. Диагностика минералов проведена по общепринятым руководствам [Браун, 1965; Градусов, 1976].

Полуколичественное содержание основных минеральных фаз во фракции менее 1 мкм определено по методике Biscaye [1965]. Измеряли относительные площади дифракционных максимумов в области 7,0; 10,0; 17,0–18,0 Å на рентгенограммах насыщенных этиленгликолем препаратов, что соответствует интенсивностям базальных рефлексов, соответственно, каолинита и хлорита, гидрослюды и смешаннослойных образований. Затем были рассчитаны величины площадей дифракционных пиков к их сумме с поправкой на структурные факторы. Для гидрослюды использовали пересчетный коэффициент 4, для 7,0 Å рефлекса каолинита и хлорита – 2, для смешаннослойных образований – 1.

Полуколичественное содержание основных минеральных фаз во фракции 1–5 и 5–10 мкм определялось по методике Cook и соавт. [1975]. Суть методики заключается в произвольной разбивке рентгендифрактограммы на несколько отрезков. К каждому отрезку проводится касательная. Для определения содержания минералов данной фракции необходимо для каждого компонента измерить общую длину (расстояние от касательной до максимума пика всех соответствующих рефлексов (в миллиметрах)). Полученные значения для каждого минерала умножают на соответствующий поправочный коэффициент и складывают. Например, поправочные коэффициенты для хлорита, каолинита, шпатов, кварца и смешаннослойных образований, соответственно, равны 4,95, 2,25, 4,3, 1,3. Сумма принимается за 100 %, и рассчитывается процентное содержание каждого компонента.

Возраст почв определялся в ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» при Институте географии РАН. Из восьми отправленных образцов датирующую фракцию углерода в необходимом количестве извлекли только в четырех. Возраст остальных почв был определен условно за счет соотнесения морфологических особенностей и топографии, с почвами чей возраст был установлен.

Статистическая обработка данных и построение регрессионных моделей осуществлялись в программе Statistica v. 10. Данные по возрасту почв не соотносятся с данными о минералогическом составе из-за их несоразмерности и ненормального распределения. Поэтому, в расчетах они использовались в виде десятичного логарифма.

Результаты

Возраст почв. Самая молодая из исследованных почв – аллювиальная слоистая (разрез № 42) – расположена в пределах бечёвника и представляет собой морфологически однородную толщу, слабо измененную процессами почвообразования. Однородность толщи указывает на то, что почвообразующий субстрат для этой почвы был отложен одновременно мощным паводком. Последний крупный паводок на р. Амур, прошедший перед исследованиями, был в 1984 г. Поэтому возраст данной почвы на момент отбора пробы был 37 лет. Возраст аллювиальной серогумусовой почвы, сформированной на вершине самой высокой пойменной гряды в центре прирусловой поймы (разрез № 67), по результатам радиоуглеродного анализа составил 750 ± 80 лет, т.е. возраст почв прирусловой поймы не превышает 800 лет (табл. 1).

В центральной пойме был определен возраст аллювиальной перегнойной почвы (разрез № 59), расположенной в болотистом понижении, и аллювиальной серогумусовой почвы (разрез № 63), сформированной на высоком уступе возле пойменного озера. Возраст аллювиальной перегнойной почвы составил 1100 ± 100 лет. Поэтому рядом расположенная аллювиальная серогумусовая почва (разрез № 60), вследствие ее более высокого гипсометрического положения и потому более старшего возраста, условно датирована в 1 200–1 300 лет. Аналогично датирована возрастом 800–900 лет аллювиальная перегнойная почва (разрез № 64), сформированная возле уреза пойменного озера, следовательно, она моложе почвы из разреза № 63 возрастом 950 ± 90 лет (табл. 1).

Аллювиальная серогумусовая почва (разрез № 48) и аллювиальная перегнойно-глеевая почва (разрез № 66) расположены в пределах центральной поймы и потому они старше почв прирусловой поймы. Но морфологически они развиты слабее остальных почв на центральной пойме, поэтому отнесены к возрастам 800–900 и 700–800 лет соответственно. Следовательно, возраст почв центральной поймы не превышает 1 500 лет. Возраст брунзема остаточно-пойменного (разрез № 62), сформированного на стыке высокой части притеррасной поймы и террасо-увала,

составил 4050 ± 80 лет (табл. 1). Причину столь значительного разрыва в возрасте между почвами центральной поймы и притеррасной поймы можно объяснить редкими останцами в пределах центральной поймы. На останцах сформированы почвы, которые по своим морфологическим признакам более древние в сравнении с остальными почвами центральной поймы. Вероятно, в интервале от 4 000 до 1 500 лет на данном участке изменился характер аккумуляции, и река размывала часть изначальной поймы.

Состав минералов фракции более 0,25 мкм. Минералогический состав исследуемых почв отличается однотипностью и небольшим количеством компонентов. В легкой фракции доминируют каркасные минералы – кварц и полевые шпаты, в незначительном количестве содержится слюда. Тяжелой фракцией аллювиальные почвы обеднены, она составляет в среднем не более 3 % от образца, что свойственно для почв, сформированных на осадочных породах, к которым относятся и аллювиальные почвы. Основными минералами в составе тяжелой фракции выступают полевые шпаты и амфиболы, в незначительном количестве содержатся эпидот, циркон и ильменит (табл. 1). Какие-либо закономерности, связанные с возрастом почв, прослеживаются только в содержании кварца и полевых шпатов в составе легкой фракции. Данная закономерность часто упоминается в литературе и выражается отношением $KПШ/SiO_2$ [Dorronsoro, Alonso, 1994]. В автоморфном ряду данное отношение с высокой достоверностью изменяется с 0,3 до 3,3, в гидроморфном – с 0,2 до 4,2 (рис. 2).

Состав минералов фракций менее 25 мкм. Основными компонентами в составе фракций 25–10 и 5–10 мкм являются каркасные минералы: кварц, КПШ, плагиоклазы и амфиболы. Построенные уравнения линейной регрессии показывают, что и в ГПХ, и в АПХ содержание каркасных минералов во фракции 25–10 мкм в большинстве случаев имеет тенденцию снижаться с возрастом почв. Содержание кварца снижается с 40 до 15 % ($R^2 = 0,5–0,6$), КПШ с 30 до 15 % ($R^2 = 0,6–0,9$). При этом в динамике плагиоклазов и амфиболов в ГПХ каких-либо тенденций не выявлено. Во фракциях 10–5 и 1–5 мкм кварц, КПШ и плагиоклазы в обеих хронопоследовательностях проявляют слабо выраженную (с 0,2 до 2–5 %) тенденцию к накоплению, достоверную ($R^2 = 0,9$) только в ГПХ. Амфиболы во фракции 1–5 мкм с возрастом почв аккумулируются с 0,01 до 0,3 в АПХ и до 0,2 в ГПХ при $R^2 = 0,5–0,7$. Во фракции 10–5 мкм в АПХ содержание амфиболов снижается с 0,3 до 0,1 ($R^2 = 0,3$), а в ГПХ увеличивается с 0,05 до 0,3 ($R^2 = 0,8$) (рис. 3).

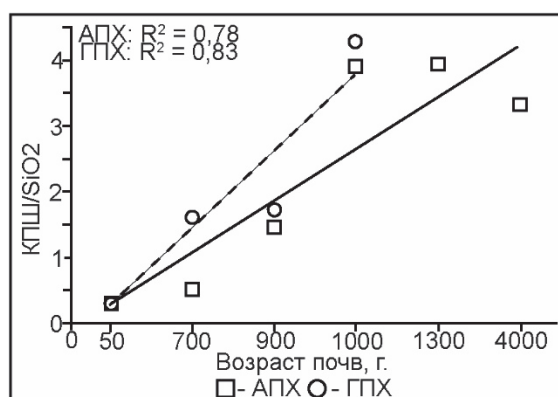


Рис. 2. Изменение отношения КПШ/SiO₂ с возрастом почв

Fig. 2. Change in the K-feldspar/quartz ratio with soil age

Таблица 1

Возраст почв и минералогический состав фракции более 25 мкм

Table 1

Soil age and mineralogical composition of the fraction more 25 μ m

Условия формирования почв	№ разреза	Возраст почв	Вес образца, г	Фракция	Вес фракции, г	Минералы, %															
						Полевой шпат	Кварц	Слюда	Амфиболы	Эпидот	Сфен	Циркон	Гранат	Ильменит	Рутил	Лейкоксен	Магнетит	Апатит	Гидроокислы Mn	Гидроокислы Fe	Сланцы
Авто-морф-ные	42	до 50	10,26	Т (Э+М+Н)*	0,32	26,2	—	—	50,8	6,5	—	1,3	5,2	6,5	0,3	—	3	0,2	—	—	—
				Л	9,94	77	21	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1
	67	750±80	10,1	Т (Э+М+Н)	0,28	71,1	—	—	23,7	2	—	3,1	—	—	0,1	—	—	—	—	—	—
				Л	9,82	58	30	11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1
	48	≈900	9	Т (Э+М+Н)	0,22	11,8	—	—	70,6	10	2,7	1	0,36	3,1	—	0,4	—	—	—	—	—
				Л	8,77	40	58	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	63	950±90	4,1	Т (Э+М+Н)	0,18	3,3	5	—	36,3	22,3	9,4	6,6	5	11,5	—	—	—	—	—	—	—
				Л	5,92	20	78	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1
	60	≈1300	6,1	Т (Э+М+Н)	0,057	9,4	—	—	82,1	7	—	—	3,6	0,1	—	—	—	—	—	—	—
				Л	4,04	20	79	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
62	4050±80	1,53	Т (Э+М+Н)	0,016	50,1	—	—	39,2	9,4	—	0,7	—	—	0,4	—	—	—	—	—	—	
			Л	1,51	22	73	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5	—	—
Гидро-морфные	66	≈ 700	10,2	Т (Э+М+Н)	0,44	5,3	8,7	—	52	23	2,7	1,6	2,2	4,4	—	—	—	—	—	—	—
				Л	9,76	37	60	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	64	≈ 900	9,8	Т (Э+М+Н)	0,07	7,4	2,9	—	55	23	2,1	7,8	—	1,7	—	—	—	—	—	—	—
				Л	3,93	35	60	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	2
	59	1100±100	4	Т (Э+М+Н)	0,31	12,6	0,1	—	76,6	0,1	5	0,4	—	0,6	—	1,8	—	—	—	2,7	—
Л				9,49	18	77	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5	—

Примечание. * – сумма магнитной, электромагнитной и немагнитной фракций.

Note. * – sum of magnetic, electromagnetic and non-magnetic fractions.

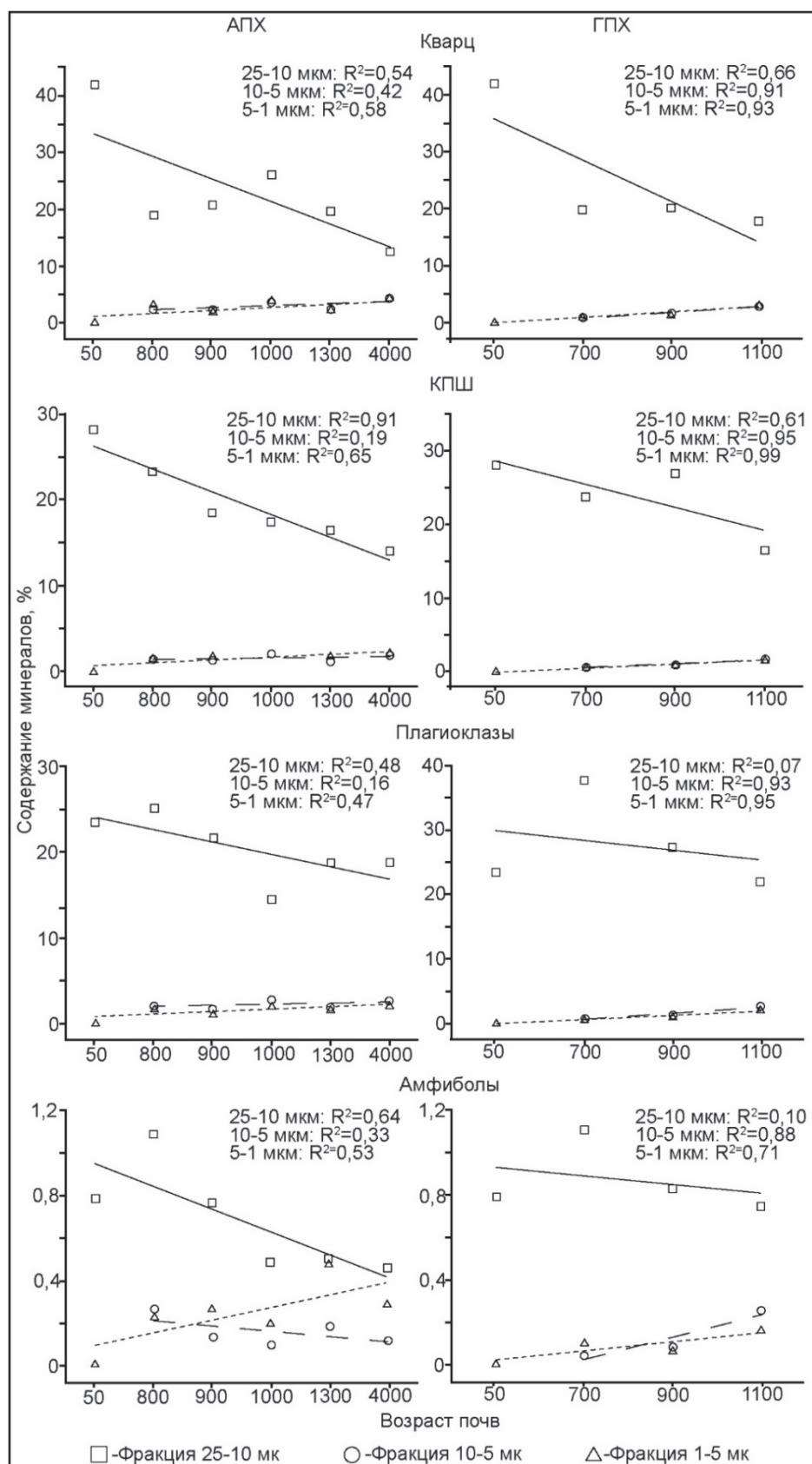


Рис. 3. Изменение минералогического состава аллювиальных почв (кварц, КПШ, плаггиоклазы, амфиболы) с возрастом

Fig. 3. Changes in the mineralogical composition of alluvial soils (quartz, K-feldspar, plagioclases, amphiboles) with age

Во фракциях ила и тонкой пыли преобладают глинистые минералы: слюды, гидрослюда, хлорит, каолинит и смектит. Слюда преимущественно биотитового типа, часто с примесью мусковита. Их содержание во фракции тонкой пыли с возрастом почв значительно увеличивается (в АПХ с 0,2 до 6 % при $R^2 = 0,9$ и в ГПХ с 0,2 до 4 % при $R^2 = 0,9$). Во фракции средней пыли наблюдается незначительное увеличение слюд, а во фракции крупной пыли – снижение содержания, в обоих случаях более выраженное в ГПХ

(рис. 4). Хлориты в почвах магнезиально-железистые, со значительным увеличением содержания в ходе эволюции почв во фракции 5–1 мкм (в АПХ с 0,2 до 6,2 % при $R^2 = 0,9$ и в ГПХ с 0,2 до 3,8 % при $R^2 = 1$). В иле доля хлоритов также возрастает, но меньше, с 0,05 до 1,5 % в АПХ ($R^2 = 0,8$) и до 1 % в ГПХ ($R^2 = 0,1$). Хронодинамика хлорита в фракциях крупной и средней пыли незначительна, в фракциях крупной пыли, а также в средней пыли в АПХ снижается, а в ГПХ – увеличивается (рис. 4).

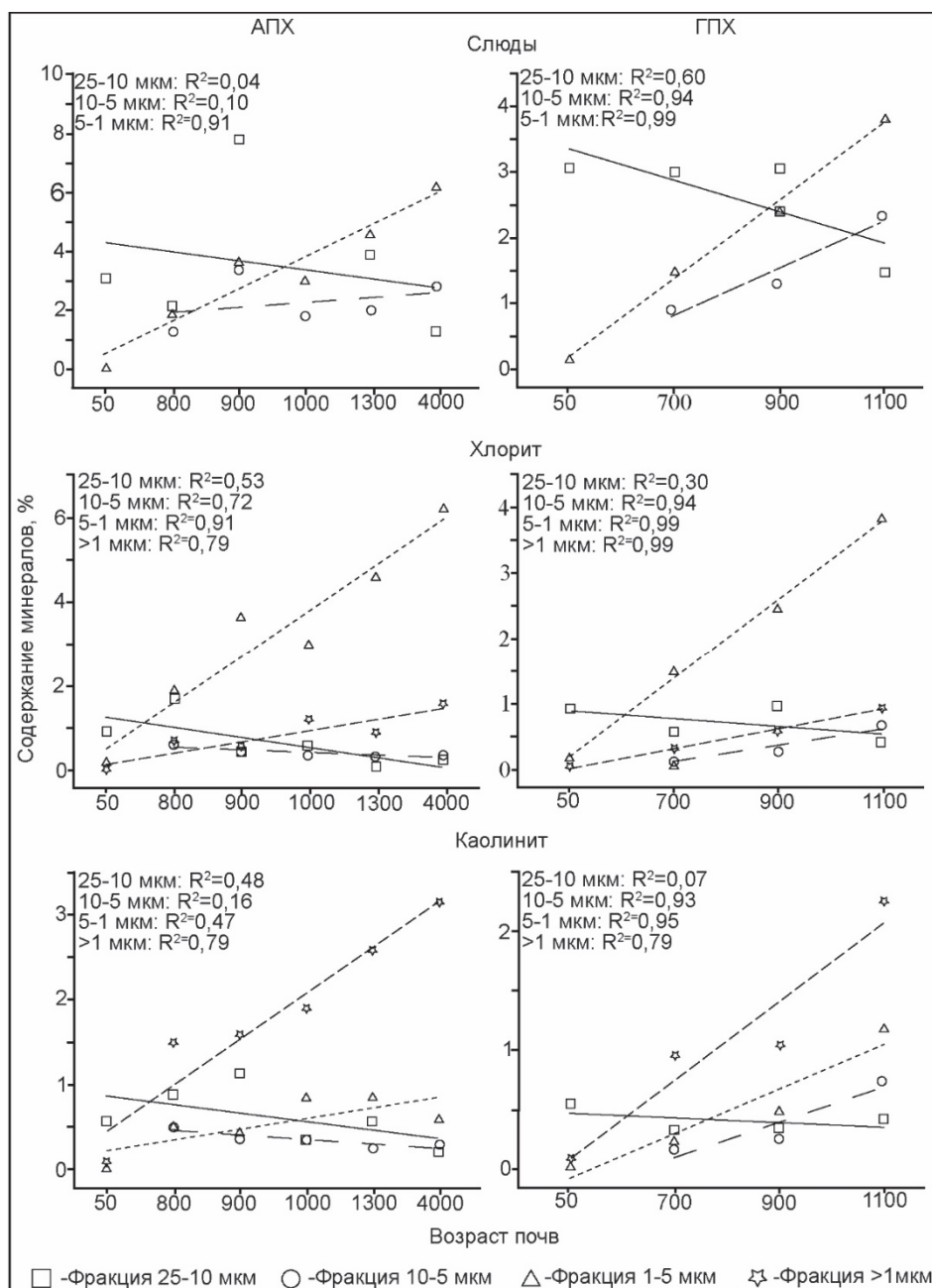


Рис. 4. Изменение минералогического состава аллювиальных почв (слюды, хлорит, каолинит) с возрастом

Fig. 4. Changes in the mineralogical composition of alluvial soils (mica, chlorite, kaolinite) with age

Каолинит в одних почвах характеризуется рефлексом в области 1,31 нм, что дает основание отнести его к смешаннослойному слюда-сметитовому образованию с тенденцией к упорядоченному чередованию слюдистых сметитовых пакетов по типу АВ, т.е. он принадлежит к ректориту. В других почвах широкое основание рефлекса при 0,7 нм и его асимметрия в сторону малых углов свидетельствуют о принадлежности каолинита к категории смешаннослойных каолинит-сметитовым образованиям с низким содержанием сметитовых пакетов. Для каолинита в хронопоследовательности свойственно значительное увеличение содержания во фракции ила (в АПХ с 0,1 до 3 % при $R^2 = 0,8$ и в ГПХ с 0,1 до 2 % при $R^2 = 0,8$), а также среднее увеличение во фракциях тонкой пыли (в АПХ с 0,03 до 0,6 % при $R^2 = 0,5$ и в ГПХ с 0,03 до 1,2 % при $R^2 = 0,9$) и средней пыли в ГПХ (с 0,16 до 0,74, $R^2 = 0,9$). Во фракциях крупной пыли и средней пыли в АПХ содержание каолинита незначительно снижается при слабо выраженной достоверности аппроксимации линейного уравнения (см. рис. 4).

Гидрослюда в исследуемых почвах триоктаэдрические (вермикулит), иногда с диоктаэдрическими структурами. В хронопоследовательностях содержание гидрослюд во фракции ила с возрастом почв значительно увеличивается (в АПХ с 0,2 до 9 % при $R^2 = 0,9$ и в ГПХ с 0,2 до 4 % при $R^2 = 0,8$) (рис. 5). Сметит в большинстве почв характеризуется низким содержанием (менее 50 %) сметитовых пакетов. Он определялся только во фракции ила, где его содержание резко увеличивается с возрастом почв (в АПХ с 0,17 до 10,5 % при $R^2 = 0,8$ и в ГПХ с 0,17 до 8,6 % при $R^2 = 0,9$) (рис. 5).

Обсуждение

Кварц, благодаря своей стабильности и устойчивости к выветриванию, многими исследователями используется для оценки однородности исходного материала, в качестве показателя для количественной оценки почвообразования [Al Janabi, Drew, 1967; Sudom, Arnaud, 1971]. Наше исследование частично подтверждает общепринятое мнение о кварце, как об эталоне стабильности. Но оно справедливо не для всех почвенных фракций. Содержание кварца с возрастом почв стабильно увеличивается во фракциях более 0,25, 10–5 и 5–1 мкм с высокой достоверностью, что позволяет их использовать для определения возраста почв. Но во фракции 25–10 мкм содержание кварца в ходе эволюции почв снижается (см. рис. 3). И здесь наблюдается некоторое противоречие. Как правило, скорость растворения кварца увеличивается с уменьшением размера частиц, т.е. с увеличением

удельной поверхности [Singh, 2022]. И более ожидаемо снижение содержания кварца во фракциях 10–5 и 5–1 мкм. Эту нестыковку частично можно объяснить работой Santos и соавт. [1986]. В соответствии с ней кварц с повреждённым поверхностным слоем кристаллической решетки обладает аномально высокой степенью растворения и способен физически распадаться на более мелкие фракции, вплоть до 2 мкм. Вероятно, поверхностный слой кварца 25–10 мкм, в сравнении с частицами более 25 мкм, несет на своей поверхности больше дефектов, формируемых в ходе гидрогенного выветривания. В результате в почвах кварц начинает активно разрушаться и растворяться, формируя фракции 10–5 и 5–1 мкм, почти отсутствующие в аллювиальных почвах на начальном этапе эволюции. Мелкие частицы кварца также растворяются, но из-за несоответствия скоростей выветривания наблюдается постепенное их накопление. Вероятно, дальнейшая эволюция почв приведет к снижению всех фракций кварца, так как сильно выветрившиеся почвы часто имеют низкое содержание кварца [Wilson, 2020].

Необходимо отметить, что несмотря на доказанное влияние почвенных факторов на растворение и накопление минералов кварца [Wilson, 2020], в нашем случае направленность процессов хронодинамики и затраты времени на нее в автоморфных и гидроморфных условиях почти сопоставимы. Тем не менее, для гидроморфных почв характерны более высокие уровни достоверности этой динамики (см. рис. 3), что отражает повышенную активность процессов выветривания при развитии гидроморфизма. Поэтому использование минералов кварца для определения возраста аллювиальных почв предпочтительнее применять в отношении гидроморфных почв. В целом регрессионные модели, использующие хронодинамику кварца, обладают высокой достоверностью и точностью, но основаны они преимущественно на крупных фракциях более 25 и 10–28 мкм (табл. 2). Данная особенность нашла отражения и во фракционных моделях, где кварц принимает активное участие во фракциях от менее 25 до 10–5 мкм (табл. 3).

Выветривание полевых шпатов играет важную роль в формировании почв, так как их физическая дезинтеграция и химическое разложение с сопутствующей потерей растворимых элементов в почвенный раствор приводят к формированию нерастворимых оксидов – оксигидроксидов и водных алюмосиликатов, известных как глинистые минералы [Горбунов, 1974; Mishra, Samant, 2020]. Как правило, скорость выветривания плагиоклазов более высокая, чем у КППШ. Это связано с уменьшением содержания Al и Ca в составе кристаллической решетки минералов

[Garrels, Mackenzie, 1967; Huang, 1989]. Петрографические и рентгенологические эксперименты [Nesbitt et al., 1980] показали, что во время выветривания плагиоклазов образуется большое количество кандитов – каолинита, галлуазита, диккита. Выветривание КППШ, в свою очередь, приводит к формированию таких вторичных минералов, как галлуазит, каолинит, гиббсит, монтмориллонит и иллит [Mishra, Samant, 2020].

Таким образом, эволюция почв подразумевает снижение содержания полевых шпатов, что подтверждается изучением хронопоследовательностей в

пойме р. Новая [Harris et al., 1980] и на прибрежных террасах Северной Каролины [Smith et al., 1976].

Следует отметить, что в ряде случаев высокое содержание полевых шпатов может сохраняться даже в хорошо развитых почвах, что часто связано с наличием выше расположенного слабопроницаемого горизонта, блокирующего процессы выветривания [Allen, Hajek, 1989].

В исследуемых пойменных почвах КППШ и плагиоклазы, во фракции более 25 мкм, не разделялись и оценивалось их суммарное выветривание.

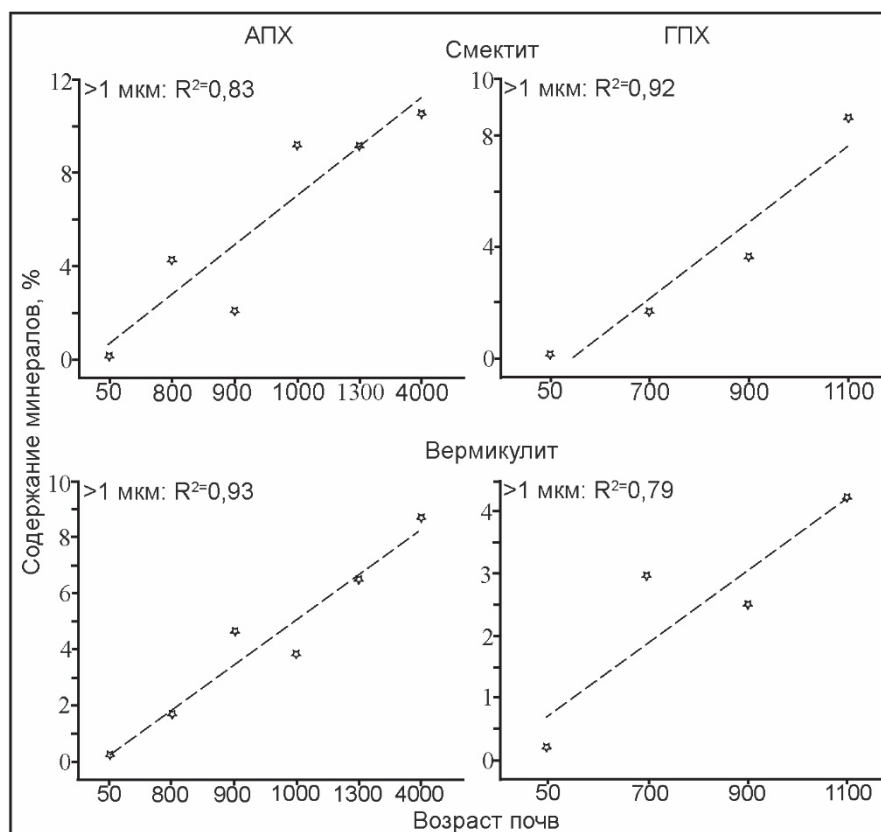


Рис. 5. Изменение минералогического состава аллювиальных почв (сметит, вермикулит) с возрастом

Fig. 5. Changes in the mineralogical composition of alluvial soils (smectite, vermiculite) with age

Регрессионные модели оценки возраста пойменных почв по содержанию минералов

Таблица 2

Table 2

Regression models for estimating the age of floodplain soils based on mineral content

Минералы	Условия формирования
<i>Автоморфный ряд</i>	
Кварц	$Lg_{10}T = 3,2 + 0,1 \cdot K_{B5-10} - 0,04 \cdot K_{B10-25} + 0,01 \cdot K_{B>25}$ ($R^2 = 0,99$; $p = 0,00$)
КППШ	$Lg_{10}T = 1,6 + 0,85 \cdot K_{ППШ1-5}$ ($R^2 = 0,96$; $p = 0,00$)
Плагиоклазы	$Lg_{10}T = 1,8 + 0,57 \cdot П_{Л5-10}$ ($R^2 = 0,83$; $p = 0,01$)
Амфиболы	$Lg_{10}T = 3,4 + 5,7 \cdot A_{M5-10} - 1,9 \cdot A_{M10-25}$ ($R^2 = 0,79$; $p = 0,09$)
Слюды	$Lg_{10}T = 1,97 + 0,28 \cdot I_{5-10}$ ($R^2 = 0,84$; $p = 0,01$)
Хлорит	$Lg_{10}T = 1,74 + 1,15 \cdot X_{Л5-10} + 0,9 \cdot X_{Л<1}$ ($R^2 = 0,90$; $p = 0,03$)
Каолинит	$Lg_{10}T = 1,66 + 1,1 \cdot K_{A5-10} + 0,5 \cdot K_{A<1}$ ($R^2 = 0,98$; $p = 0,00$)

Минералы	Условия формирования
Смектит	$Lg_{10}T = 2,2+0,1 \cdot C_{M<1}$ ($R^2 = 0,65$; $p = 0,05$)
Вермикулит	$Lg_{10}T = 2,13+0,18$ ($R^2 = 0,75$; $p = 0,02$)
<i>Гидроморфный ряд</i>	
Кварц	$Lg_{10}T = 4-0,06 \cdot K_{B10-25}$ ($R^2 = 0,99$; $p = 0,00$)
КПШ	$Lg_{10}T = 3,6-0,02 \cdot КПШ_{>25}$ ($R^2 = 0,85$; $p = 0,02$)
Плагиоклазы	$Lg_{10}T = 2,9-10,2 \cdot П_{L1-5}+8,2 \cdot П_{L5-10}$ ($R^2 = 0,92$; $p = 0,07$)
Амфиболы	$Lg_{10}T = 1,99+7,82 \cdot A_{M1-5}$ ($R^2 = 0,866$; $p = 0,09$)
Слюды	$Lg_{10}T = 2,9+14,7_{5-10} - 13,9_{1-5}$ ($R^2 = 0,85$; $p = 0,07$)
Хлорит	$Lg_{10}T = 1,6+5,5 \cdot X_{L<1}-3,4 \cdot X_{L1-5}$ ($R^2 = 0,99$; $p = 0,01$)
Каолинит	$Lg_{10}T = 3,97-4,1 \cdot K_{A10-25}+0,4 \cdot K_{L<1}$ ($R^2 = 0,97$; $p = 0,02$)
Смектит	$Lg_{10}T = 2,3+0,1 \cdot C_{M<1}$ ($R^2 = 0,41$; $p = 0,2$)
Вермикулит	$Lg_{10}T = 1,79+0,35$ ($R^2 = 0,85$; $p = 0,02$)

Таблица 3

Регрессионные модели оценки возраста пойменных почв по минералогическому составу фракций

Table 3

Regression models for estimating the age of floodplain soils based on the mineralogical composition of fractions

Фракция, мкм	Условия формирования
<i>Автоморфный ряд</i>	
> 25	$Lg_{10}T = 10,6-0,07 \cdot K_B-0,09 \cdot КПШ$ ($R^2 = 0,91$; $p = 0,02$)
25–10	$Lg_{10}T = 4,74-0,05 \cdot КПШ-0,03 \cdot K_B$ ($R^2 = 0,93$; $p = 0,02$)
10–5	$Lg_{10}T = 2,3-5,5 \cdot K_A+4 \cdot X_L+0,3 \cdot K_B$ ($R^2 = 0,99$; $p = 0,05$)
5–1	$Lg_{10}T = 1,7+0,5 \cdot КПШ+0,1 \cdot C_L$ ($R^2 = 0,93$; $p = 0,01$)
< 1	$Lg_{10}T = 1,9+0,5 \cdot K_A$ ($R^2 = 0,83$; $p = 0,01$)
<i>Гидроморфный ряд</i>	
>25	$Lg_{10}T = 3,6-0,02 \cdot КПШ$ ($R^2 = 0,85$; $p = 0,02$)
25–10	$Lg_{10}T = 3,9-0,05 \cdot K_B$ ($R^2 = 0,90$; $p = 0,01$)
10–5	$Lg_{10}T = 2,8+0,13 \cdot КПШ$ ($R^2 = 0,90$; $p = 0,04$)
5–1	$Lg_{10}T = 1,6-2,6 \cdot X_L+1,1 \cdot C_L$ ($R^2 = 0,99$; $p = 0,00$)
< 1	$Lg_{10}T = 1,9+0,3 \cdot ГиСЛ$ ($R^2 = 0,878$; $p = 0,05$)

За 1 300 лет содержание шпатов в автоморфном ряду снизилось в 3 раза: с 77 до 20 %. При этом в почвах возрастом 4 000 лет содержание шпатов такое же, как в почве возрастом 1 300 лет. В почвах гидроморфного ряда за 1 100 лет содержание полевых шпатов снизилось до 18 %, но видно, что более интенсивно шпаты разрушались на начальных стадиях эволюции почв (см. рис. 3). Данная закономерность в данной фракции наблюдается и у кварца. По всей видимости, как отмечалось выше, утяжеление с возрастом гранулометрического состава почв способно приводить к торможению процессов разрушения каркасных минералов. В целом для хронопоследовательностей часто наблюдается эффект замедления истощения первичных минералов с возрастом почв [White, 2003]. Следует отметить, что скорость выветривания полевых шпатов и кварца, как правило, значительно различа-

ется [Sverdrup, 1990; White et al., 1996]. В наших исследованиях наибольшая асимметрия в выветривании прослеживается во фракции более 25 мкм (см. табл. 1, рис. 2), что позволяет использовать отношение кварц/шпаты в данной фракции, как хороший индикатор степени выветренности почв.

В остальных фракциях выветривание полевых шпатов, как КПШ, так и плагиоклазов, протекает по одной схеме. Во фракции 25–10 мкм их содержание снижается, а во фракциях 10–5 и 5–1 мкм увеличивается (см. рис. 3). Здесь в выветривании этих минералов наблюдается поведение аналогичное кварцу. Крупная фракция разрушается, формируя более мелкие промежуточные фракции. Необычным является тот факт, что разрушение (25–10 мкм) и накопление (10–5, 5–1 мкм) КПШ, в сравнении с плагиоклазами, протекает более активно и лучше прослеживается,

что противоречит литературным данным. Хронодинамика плагиоклаза позволяет построить достоверную модель для определения возраста почв (см. табл. 2). Но в отношении аллювиальных почв поймы Амура, предпочтительней использовать КППШ, так как во фракционные модели плагиоклазы не попали, что подчёркивает повышенную надежность КППШ как хроноиндикатора (см. табл. 3).

Амфиболы достаточно устойчивые к выветриванию минералы, особенно в холодных регионах, что позволяет использовать их в качестве индикатора устойчивости к выветриванию [Loughnan, 1969] наряду с кварцем. Хотя в некоторых исследованиях сообщается, что сильно выветрившиеся почвы часто лишены амфиболов, даже если они сформированы из богатой ими материнской породы [Gilkes et al., 1973]. В зависимости от климата, pH, Eh, ионной активности раствора и интенсивности хелатирования выветривание амфиболов приводит к формированию таких глинистых минералов, как хлорит, гематит, бейделлит, гиббсит и вермикулит [Huang, 1989].

В пойменных почвах р. Амур содержание амфиболов во фракциях более 25 мкм незначительное и суммарно по всем фракциям составляет около 1 %. В почвах АПХ разрушение амфиболов протекает более активно и охватывает две фракции (25–10 и 10–5 мкм), в сравнении с ГПХ, где наблюдается слабо выраженное выветривание амфиболов только во фракции 25–10 мкм. Фракция 5–1 мкм в обоих почвенных рядах накопительная (см. рис. 3). Модели, построенные на основе выветривания амфиболов наименее устойчивые в ряду каркасных минералов и амфиболы не попали во фракционные модели (см. табл. 2, 3). Следовательно, использовать амфиболы для оценки возраста аллювиальных почв в данном исследовании не представляется возможным. Но наличие хронодинамики может предполагать, что повышение репрезентативности выборки за счет увеличения количества проб повысит достоверность и точность модели.

Для слюд (мусковит и биотит) характерен ионный обмен, поэтому они легко, без особых структурных перестроек в зависимости от факторов окружающей среды, а также от состава и структуры исходного минерала слюды, дают разнообразные продукты выветривания. В общей форме этот трансформационный ряд выглядит следующим образом: слюда–иллит–вермикулит–монтмориллонит [Wilson, 1975; Соколова и др., 2005]. Поэтому предполагается, что с возрастом почв содержания в них слюд должно уменьшаться. Но в исследуемых аллювиальных почвах снижение содержания слюд наблюдается только во фракции 10–25 мкм. Во фракциях 5–10 и 1–5 мм содержание слюд увеличивается (см. рис. 4). Объяснение данного явления можно найти в работе Jigyasu и соавт.

[2014], где показывается, что биотит во время химического выветривания разрушается с краев. Это приводит к постепенному уменьшению физической размерности и образованию более мелких частиц.

Интенсивность выветривания слюд в гидроморфных почвах более высокая в сравнении с автоморфными. Это обусловлено тем, что полимеризация алюминия, выделяющегося при гидролитическом выветривании слюд, находится в сильной зависимости от реакции среды [Sverdrup et al., 1994]. В работе Bain и соавт. [1977], проведенной в почвах Шотландского нагорья, также утверждается, что влажность и высокая кислотность, свойственные для гидроморфных почв, – важнейшие переменные при преобразовании слюд в вермикулиты.

Оценивая индикаторные свойства содержания слюды как признака возраста почв, можно отметить для регрессионных моделей обоих почвенных рядов характерны достоверные R (табл. 2). Но в ГПХ низкая значимость модели может указывать на сильную зависимость интенсивности выветривания слюд от характера увлажнения почв, так как развитие почв по гидроморфному типу не означает, что у них одинаковый уровень увлажнения. Если же брать фракционные регрессионные модели, то здесь слюды участвуют только во фракции 1–5 мкм (табл. 3). Учитывая полученные данные, можно сказать, что слюды могут использоваться как индикатор возраста почв, и лучше всего для этого подходит фракция 1–5 мкм.

Хлориты – довольно редкие минералы в почвах и выветриваются с образованием вермикулита и смектита, но данные об их устойчивости противоречивы. В одних работах указывается, что хлориты легко разрушаются, что делает их чувствительными индикаторами выветривания [Schulze, 2005], в других – что хлориты устойчивы к химическому выветриванию [Graham et al., 1989] и первичный хлорит может сохраняться на протяжении длительного времени почвенной эволюции [Bain, 1977].

В обзорной работе Wilson [2004] указывается, что многие исследователи считают основным процессом, обуславливающим разрушение хлоритов, кислотное растворение. Органические кислоты усиливают растворение хлорита, в сравнении с неорганическими кислотами, примерно в 3 раза. В исследовании Bain и соавт. [2003] также подчеркивается, что скорость образования вторичных хлоритов зависит от величин pH. То есть чем кислее почвы, тем активнее растворяется первичный хлорит. Развитие глеевых процессов приводит к выделению железа из кристаллической решетки хлоритов и ускоряет их растворение при параллельной хлоритизации глинистых минералов и слюд [Зайдельман, 2009].

Однако обзор литературных данных, приведенный в работе Tolpeshta и соавт. [2010], показывает, что в гумидном климате почвенные хлориты устойчивы в интервале pH 4,5–6. Помимо реакции среды почвенного раствора устойчивость хлоритов также зависит от типа минерала, по которому шла хлоритизация (вермикулит или монтмориллонит), вида иона в составе добавочного октаэдрического слоя (железа или алюминия), содержания органического вещества и отношения OH/Al .

В наших исследованиях хлорит ведет себя аналогично слюде. Наблюдается снижение содержания крупных фракций (25–5 мкм) и увеличение мелких фракций (5–1 мкм) (см. рис. 4). Можно было бы предположить, что здесь также идет уменьшение физической размерности. Однако обзор литературы показывает, что хлорит в мелких фракциях присутствует преимущественно в виде новообразований и остатки первичного хлорита и новообразованный «вторичный» хлорит различить достаточно трудно [Mokma et al. 1973; Dietel et al., 2017].

Характер и затраты времени на выветривание первичного и формирование вторичного хлорита в АПХ и ГПХ сопоставимы. За 1 000 лет содержание фракции более 10 мкм снизилось с 1 % до 0,5–0,4, а фракции 1–5 мкм увеличилось с 0,8 до 3 % (рис. 4). Данный факт противоречив. Согласно большинству проанализированных литературных данных, в ГПХ разрушение хлоритов должно протекать быстрее. С одной стороны, данный факт свидетельствует скорее в пользу мнения о устойчивости хлоритов к почвенным факторам выветривания. С другой стороны, полученные цифры подтверждают мнение авторов [Dietel et al., 2017] о прогрессирующем почвенном выветривании хлорита. Регрессионные модели, основанные на выветривании хлоритов, характеризуются высокой достоверностью и значимостью с четкой выраженной ролью фракции более 1 мкм (см. табл. 2). В фракционных моделях хлориты участвуют в формировании фракции 10–5 мкм в автоморфном ряду и 5–1 мкм – в гидроморфном ряду (см. табл. 3).

Каолинит формируется из полевых шпатов или из вулканического материала, проходя при этом через стадию аморфных продуктов по схеме: полевой шпат – аморфные продукты – галлуазит – неупорядоченный каолинит – упорядоченный каолинит [Градузов, 1976]. Данный процесс может протекать еще до формирования почв, но это не значит, что каолинит не может формироваться в современных условиях почвообразования. В зависимости от типа почв, активное формирование педогенного каолинита может начинаться с первых десятилетий внутрипочвенного выветривания [Mavris, 2011].

Данные о динамике каолинита в ходе эволюции почв также противоречивы. В почвах Атлантической прибрежной равнины содержание каолинита в старых почвах падает [Daniels et al., 1970], и, по мнению автора, это обусловлено химическим разложением каолинита до гиббсита. В хронокатене поймы р. Новая, расположенной в Северной Америке установлено увеличение содержания каолинита с возрастом почв [Harris et al., 1980]. Вероятно, поведения каолина в почвенном профиле зависит от условий почвообразования и климатических особенностей региона. Это подтверждается данными, что каолин рассматривается как потенциальный индикатор изменения климата в голоцене, позволяя восстанавливать информацию о климате, в котором формировались эти почвы [Srivastava et al., 1998; Pal, 2014].

Важнейшим условием для формирования каолинита является десиликация или вымывание кремнезема из первичной породы [Горбунов, 1974]. По В.А. Ковда [1985], десиликация – универсальный биогеохимический процесс, характерный для всех природных зон. Он обладает широким диапазоном растворимости Si (не зависит от реакции среды в интервале pH от 0 до 9) с дальнейшим переходом Si в раствор и его миграцией с окислами щелочных и щелочноземельных оснований вниз по профилю. Для возникновения процесса десициации необходим промывной режим (свободный дренаж). Следовательно, формирование каолинита в почве находится в тесной связи с условиями промывного режима и наличием щелочных и щелочноземельных элементов. Опосредованно влияет и pH, изменяя лабильность элементов, с которыми Si формирует комплексы [Dill, 2016]. В работе Sharma и соавт. [2019] также подчеркивается, что благоприятными для образования каолинита являются кислая реакция среды и достаточная концентрация кремнезема.

Направленность хронодинамики каолинита в наших исследованиях тождественна хлоритовой. С возрастом почв снижается содержание крупных фракций каолинита и увеличивается содержание мелких. Но скорость протекания процессов не симметрична. В сравнении с хлоритом, первичный каолинит медленнее разрушается (для фракции 20–10 мкм с 0,5 до 0,2 % в АПХ и с 0,5 до 0,4 в ГПХ), а вторичный быстрее формируется (для фракции более 1 мкм с 0,08 до 3,2 % в АПХ и с 0,08 до 2,2 % в ГПХ) (рис. 4). Необходимо отметить, что формирование хлорита и каолинита протекает при разных климатических условиях. Часто, хотя и бывают исключения, хлорит рассматривается как высокоширотный глинистый минерал, а каолинит – как низкоширотный [Маслов и др., 1999], и формирование одного минерала исключает возможность формирования другого.

В нашем случае параллельное формирование этих минералов может быть связано с климатическими особенностями Амурской области, находящейся на границе муссонно-континентального режима. Жаркое, контрастное по уровню выпадения осадков лето способствует накоплению каолинита. Холодные и часто сухие весна и осень создают более благоприятные условия для формирования хлоритов. Также есть теория о «холодной» каолинизации, которая подразумевает формирование небольших количеств каолина в средних широтах при достаточном уровне влаги [Dill, 2016].

В АПХ и ГПХ скорости разрушения первичного и формирования вторичного каолинита, как и у хлорита, совпадают. Но ГПХ процессы формирования каолинита формируют более достоверные линии трендов, характеризуя стабильные условия для формирования каолинита при избыточной влаге. Это подтверждают данные Д.С. Орлова [1985]: процесс десиляции, от которого зависит формирование каолина, наиболее интенсивно протекает на рисовых полях. Регрессионные модели оценки возраста на основе содержания каолинита характеризуются высокой достоверностью и значимостью (см. табл. 2). Наибольший вклад в модели дает фракция меньше 1 мкм. Также при создании моделей по фракционному составу в АПХ каолинит показал наибольшую значимость, в сравнении с другими минералами, для фракции менее 1 мкм (см. табл. 3).

Сведения об образовании смектитовых минералов в естественных условиях скудны [Caner et al., 2010]. В своей работе Pal [2014] подчеркивал, что смектит формируется из биотита в засушливых условиях и способен долго сохраняться в почве, что позволяет использовать его потенциальный индикатор изменений климата в голоцене. Данные, полученные с острова Олерон [Caner et al., 2010], показывают, что для образования смектита в результате выветривания иллита требуется менее 188 лет, а процесс образования смектита обусловлен влиянием комплексобразующих органических кислот во время разложения подстилки из сосновых иголок. Они вызывают быстрое обезуглероживание, подкисление и последующее превращение глинистых минералов в песчаный, плохо забуференный исходный материал. В работе Egli и соавт. [2003] указывается, что смектит можно рассматривать как своего рода «минерал-слепок» для определения интенсивности выветривания в альпийских почвах. Они продемонстрировали для швейцарских альпийских регионов, что смектит является конечным продуктом химического выветривания хлорита и слюды в сильно подкисленных почвенных горизонтах. Данный обзор показывает, что смектит способен формироваться в широком спектре почвенных условий, о чем упоминается в работе Горбунова [1974].

В нашей работе смектит с возрастом почв стабильно увеличивается с 0,2 до 9 % за 1 000 лет (см. рис. 5). Скорость формирования в АПХ и ГПХ сопоставима, т.е. в исследуемых почвах реакция среды и характер дренажа не являются приоритетными. В пойменных ландшафтах почвы молоды и богаты питательными веществами, а по Dietrich и Perron [2006], выветривание в таких ландшафтах контролируется биологическими процессами, которые опосредуют химические реакции, способствуя разрушению и формированию почвенных минералов. Вероятно, значительная разница в структуре растительного покрова автоморфных и гидроморфных ландшафтов и набора органических кислот, ими синтезируемых, нивелирует повышенную деструктивную минералогическую деятельность глеевых процессов.

Интересно, что несмотря на высокую достоверность линейной регрессии, регрессионные модели подобной достоверностью не характеризуются. У смектита она самая низкая из всех анализируемых минералов (табл. 2). В модели по фракциям он также не вошел (табл. 3). На основе полученных данных и литературного обзора можно констатировать, что смектит целесообразнее использовать для характеристики климатических условий, в которых формировалась почва, чем использовать его как индикатор возраста почв.

Вермикулит формируется в почвах путем превращения биотита при высвобождении межслоевого K^+ и окисления структурного Fe^{2+} [Douglas, 1989]. Этому процессу благоприятствуют хороший дренаж и окислительные условия [Weitkamp et al., 1996]. Кислотность и влажность также являются важными переменными, определяющими образование вермикулитов из слюды [Bain et al., 1990]. Следовательно, активное формирование вермикулита идет в рыхлых кислых почвах в условиях влажного климата. Кроме того, вермикулит относительно нестабилен и может быстро превращаться в другие минералы, такие как смектит или каолинит [Hawkins, Graham, 2017].

Негативное влияние застойного режима на формирование вермикулита нашло подтверждение и в наших исследованиях. Скорость формирования вермикулитов в ГПХ ниже, чем в АПХ (с 0,2 до 3 % и с 0,2 до 5 % соответственно) (рис. 5). И линейная регрессия, и регрессионные модели характеризуются высокими R^2 и $p > 0,05$, что позволяет использовать вермикулит для определения возраста почв (табл. 2, 3). Но поймы крайне динамичные ландшафты, и аллювиальные почвы могут переходить из автоморфного состояния в гидроморфное и наоборот.

А вермикулит при смене условий почвообразования способен полностью трансформироваться в смектит или каолинит [Hawkins, Graham, 2017]. Поэтому

в случае аллювиальных почв при использовании вермикулита как хроноиндикатора есть риск получения искаженных данных об их возрасте.

Заключение

Анализ динамики содержания минералов в почвенной хронопоследовательности поймы р. Амур и создание на этой основе регрессионных моделей для оценки возраста почв показали, что фактически все почвенные минералы подходят для этой задачи. Амфиболы и смектит показывают выраженную хронодинамику, но их модели не отличаются точностью и, возможно, требуют большую выборку данных, чем используемая в данной работе. Плаггиоклазы и биотит аналогично показывают четкие тенденции, но их модели для гидроморфных почв характеризуются низкой значимостью и также требуют лучшей выборки. Вермикулит показывает хорошие индикаторные свойства, но литературные дан-

ные показывают, что его использование требует четкого знания изменения почвообразующих свойств во времени, а это не всегда возможно. Самые лучшие результаты показали кварц, калиевые полевые шпаты, хлорит и каолинит, которые позволяют при небольшой выборке создать достоверные модели оценки возраста аллювиальных почв. Модели в гидроморфных почвах отличаются повышенной точностью, но разница незначительна. В целом развитие глеевых процессов не оказывает существенного влияния на выветривание этих минералов. Учитывая более высокую сложность и повышенные трудозатраты для определения вторичных глинистых минералов, при относительной молодости почв целесообразнее использовать кварц и калиевые полевые шпаты, которые показывают соизмеримую точность при определении затрат времени на эволюцию почв. В возрастных почвах скорость выветривания каркасных минералов замедляется, приоритет лучше отдавать глинистым минералам.

Список источников

- Браун Г. Рентгеновские методы изучения и структура глинистых минералов. М. : Мир, 1965. 599 с.
- Воскресенский С.С. Геоморфология Амуро-Зейской равнины и низогорья Малого Хингана. М. : МГУ, 1973. Ч. 1. 275 с.
- Горбунов Н.И. Методы минералогического и микроморфологического изучения почв. М. : Наука, 1971. 175 с.
- Горбунов Н.И. Минералогия и коллоидная химия почв. М. : Наука, 1974. 314 с.
- Градусов Б.П. Минералы со смешанослойной структурой в почвах. М. : Наука, 1976. 128 с.
- Григорьев Д.П. Материалы к физико-географической характеристике и хозяйственной оценке различных типов равнин юга Амурской области // Зейско-Буреинская равнина. М. : АН СССР, 1958. С. 52–84.
- Зайдельман Ф.Р. Генезис и экологические основы мелиорации почв и ландшафтов. М. : КДУ, 2009. 720 с.
- Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова. М. : Наука, 1985. 264 с.
- Маслов А.В., Гареев Э.З., Крупенин М.Т., Демчук И.Г. Тонкая алюмосиликокластика в верхнедокембрийском разрезе Башкирского мегантиклинория (к реконструкции условий формирования). Екатеринбург : ИГиГ УрО РАН, 1999. 324 с.
- Нестерова О.В., Пуртова Л.Н., Крупская Л.Т., Назаркина А.В., Пилипушка В.Н., Семаль В.А., Старожилов В.Т., Бриксман А.В. Почвы ландшафтов Приморья. Владивосток : Издательство Дальневосточного федерального университета, 2020. 136 с.
- Ознобихин В.И., Синельников Э.П., Рыбачук Н.А. Классификация и агропроизводственные группировки почв Приморского края. Владивосток : ДВО РАН, 1994. 93 с.
- Орлов Д.С. Химия почв. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1985. 376 с.
- Роде А.А. Почвообразовательный процесс и эволюция почв. М. : Географгиз, 1947. 142 с.
- Соколова Т.Я., Дронова Т.Я., Толпешта И.И. Глинистые минералы в почвах. Тула : Гриф и К, 2005. 336 с.
- Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск : Ойкумена, 2004. 342 с.
- Al-Janabi A., Drew J.V. Characterization and genesis of a Sharpsburg Wymore soil sequence in southeastern Nebraska // Soil Science Society of America Journal. 1967. V. 31. P. 238–244. doi: 10.2136/SSSAJ1967.03615995003100020028X
- Allen B.L., Hajek B.F. Mineral Occurrence in Soil Environments // Minerals in soil environments. Madison : Soil Science Society of America, 1989. P. 199–278.
- Bain D.C., Strand L.T., Gustafsson J.P., Melkerud P.A., Fraser A.R. Chemistry, mineralogy and morphology of spodosols at two Swedish sites used to assess methods of counteracting acidification // Water, Air and Soil Pollution: Focus. 2003. V. 3. P. 29–47. doi: 10.1023/A:1024167128215
- Bain D.C. The weathering of chloritic minerals in some Scottish soils // European Journal of Soil Science. 1977. V. 28. P. 144–164. doi: 10.1111/J.1365-2389.1977.TB02303.X
- Bain D.C., Mellor A., Wilson M.J. Nature and origin of an aluminous vermiculitic weathering product in acid soils from upland catchments in Scotland // Clay Minerals. 1990. V. 25. P. 467–475. doi: 10.1180/CLAYMIN.1990.025.4.05
- Barrett L.R. A strand plain soil development sequence in Northern Michigan, USA // Catena. 2001. V. 44. P. 163–186. doi: 10.1016/S0341-8162(00)00170-3
- Birkeland P.W. Soils and geomorphology. New York : Oxford University Press, 1999. 430 p.
- Biscay P.E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and Adjacent Seas and Oceans // Geol. Soc. Amer. Bull. 1965. V. 76. No. 7. P. 803–832. doi: 10.1130/0016-7606(1965)76[803:MASORD]2.0.CO;2
- Brady N.C. The nature and properties of soils. New York : Macmillan Publishing Company, 1990. 621 p.
- Burges A., Drover D.P. The rate of podzol development in sands of the Woy Woy district, N.S.W. // Australian Journal of Botany. 1953. V. 1. P. 83–94. doi: 10.1071/BT9530083

- Campbell I.B.** A weathering sequence of basaltic soils near Dunedin, New Zealand // *New Zealand Journal of Soil Science*. 1971. V. 14. P. 907–924.
- Caner L., Joussein E., Salvador-Blanes S., Hubert F., Schlicht J.-F., Duigou N.** Short-time clay-mineral evolution in a soil chronosequence in Oléron Island (France) // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2010. V. 4, No. 173. P. 591–600. doi: 10.1002/JPLN.200800351.
- Chizhikova N.P., Kharitonova G.V., Matyushkina L.A., Sirotskii S.E.** Mineralogical composition of the clay fraction in soils, bottom sediments, and suspended matter in the middle and low reaches of the Amur River // *Eurasian Soil Science*. 2004. V. 37. No. 8. P. 876–888.
- Chiu C.-Y., Baillie I., Jien S.-H., Hallett L., Hallett S.** Sequestration of P fractions in the soils of an incipient ferrallisation chronosequence on a humid tropical volcanic island // *Botanical Studies*. 2021. V. 62. P. 20. doi: 10.1186/s40529-021-00326-5
- Cook H.E., Johnson P.D., Matti J.C. and Zemmels I.** Methods of sample preparation and X-ray diffraction data analysis, X-ray Mineralogy Laboratory, Deep Sea Drilling Projekt, University of California, Riverside // *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*. 1975. V. 28. P. 999–1007. doi: 10.2973/DSDP.PROC.28.APP4.1975
- Daniels R.B., Gamble E.E., Cady J.G.** Some relations among Coastal Plain soils and geomorphic surfaces in North Carolina // *Soil Science Society of America Proceedings*. 1970. V. 34, No. 648–653. doi: 10.2136/SSSAJ1970.03615995003400040031X
- Dietel J., Dohrmann R., Guggenberger G., Meyer-Stüve S., Turner S., Schippers A., Kaufhold S., Butz-Braun R., Condrón L.M., Mikutta R.** Complexity of clay mineral formation during 120,000 years of soil development along the Franz Josef chronosequence, New Zealand // *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*. 2017. V. 60, No. 1. P. 23–35. doi: 10.1080/00288306.2016.1245668
- Dietrich W.E., Perron J.T.** The search for a topographic signature of life // *Nature*. 2006. V. 439. P. 411–418. doi: 10.1038/nature04452
- Dill H.G.** Kaolin: Soil, rock and ore: From the mineral to the magmatic, sedimentary and metamorphic environments // *Earth-Science Reviews*. 2016. V. 161. P. 16–129. doi: 10.1016/J.EARSCIREV.2016.07.003
- Dorransoro C., Alonso P.** Chronosequence in Almar River fluvial-terrace soil // *Soil Science Society of America Journal*. 1994. V. 58. P. 910–925. doi: 10.2136/SSSAJ1994.03615995005800030039X
- Douglas L.A.** Vermiculites // *Minerals in the soil environment*. Madison : Soil Science Society of America, 1989. P. 635–674. doi: 10.2136/sssabookser1.2ed.c13
- Dumig A., Smittenberg R., Kogel-Knabner I.** Concurrent evolution of organic and mineral components during initial soil development after retreat of the Damma glacier, Switzerland // *Geoderma*. 2011. V. 163. P. 83–94. doi: 10.1016/J.GEODERMA.2011.04.006
- Eghbal M.K., Southard R.J.** Stratigraphy and genesis of Durorthids and Haplargids on dissected alluvial fans, western Mojave Desert, California // *Geoderma*. 1993. V. 59. P. 151–174. doi: 10.1016/0016-7061(93)90067-U
- Egli M., Mirabella A., Fitze P.** Formation rates of smectites derived from two Holocene chronosequences in the Swiss Alps // *Geoderma*. 2003. V. 117. No. 1–2. P. 81–98. doi: 10.1016/S0016-7061(03)00136-8
- Garrels M., Mackenzie F.T.** Origin of the chemical compositions of some springs and lakes // *Equilibrium Concepts in Natural Water Systems*. 1967. V. 67. P. 222–242. doi: 10.1021/BA-1967-0067.CH010
- Gilkes R.J., Scholz G., Dimmock G.M.** Lateritic deep weathering of granite // *European Journal of Soil Science*. 1973. V. 24. P. 523–536. doi: 10.1111/J.1365-2389.1973.TB02319.X
- Gorham E.** Chemical studies on the soils and vegetation of waterlogged habitats in the English Lake District // *Journal of Ecology*. 1953. V. 41. P. 345–360. doi: 10.2307/2257046
- Graham R.C., Weed S.B., Bowen L.H., Amarasiwardena D.D., Buol S.W.** Weathering of iron-bearing minerals in soils and saprolite on the North Carolina Blue Ridge Front: II. Clay mineralogy // *Clays & Clay Minerals*. 1989. V. 37. P. 29–40. doi: 10.1346/CCMN.1989.0370104
- Harris W.G., Iyengar S.S., Zelazny L.W., Parker J.E., Lietzke D.A., Edmonds W.J.** Mineralogy of a chronosequence formed in New River alluvium // *Soil Science Society of America Journal*. 1980. V. 44. P. 862–868. doi: 10.2136/SSSAJ1980.03615995004400040041X
- Hawkins W.A., Graham R.C.** Soil mineralogy of a vernal pool catena in Southern California // *Soil Science Society of America Journal*. 2017. Vol. 81. P. 214–223. doi: 10.2136/SSSAJ2016.08.0257
- Huang P.M.** Feldspars, olivines, pyroxenes, and amphiboles // *Minerals in soil environments*. Madison : Soil Science Society of America, 1989. P. 975–1050.
- Huggett R.J.** Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review // *Catena*. 1998. V. 32. P. 155–172. doi: 10.1016/S0341-8162(98)00053-8
- IUSS Working Group WRB.** World reference base for soil resources international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: World Soil Resources Reports. № 106. FAO, 2014. 181 p. doi: 10.2136/SSSAJ1970.03615995003400040031X
- Jgyasu D.K.** Chemical weathering of biotite in the Ganga Alluvial Plain // *Current Science*. 2014. V. 106, No. 11. P. 1484–1486. doi: 10.18520/CS/V106/I11/1484-1486
- Lilienfein J., Qualls R.G., Uselman S.M., Bridgham S.D.** Soil formation and organic matter accretion in a young andesitic chronosequence at Mt. Shasta, California // *Geoderma*. 2003. V. 116. P. 249–264.
- Loughnan F.E.** Chemical weathering of the silicate minerals. New York : Elsevier Publ. Co., 1969. 154 p.
- Markewich H.W., Pavich M.J., Wysocki D.A.** Soils as relative-age dating tools // *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology*. John Wiley & Sons, 2017. P. 1–14. doi: 10.1002/9781118786352.WBIEG0437
- Markewich H.W., Pavich M.J., Mausbach M.J., Gonzalez V.M.,** A guide to using soil and weathering profile data in chronosequence studies of the Coastal Plain of the United States. U.S. // *U.S. Geological Survey Bulletin 1589-D*. Washington Government Printing Office, 1989. 39 p. doi: 10.3133/B1589D
- Mavris C., Plötze M., Mirabella A., Giaccari D., Valboa G., Egli M.** Clay mineral evolution along a soil chronosequence in an Alpine proglacial area // *Geoderma*. V. 165. 2011. P. 106–117. doi: 10.1016/j.geoderma.2011.07.010

- McFadden L.D., Hendricks D.M.** Changes in the content and composition of pedogenic iron oxyhydroxides in a chronosequence of soils in southern California // *Quaternary Research*. 1985. V. 23. P. 189–204. doi: 10.1016/0033-5894(85)90028-6
- Mishra M., Samant B.** Feldspars: Life-Sustaining Minerals on the Earth // *Minerals and their properties. Novel approach for applications*. New York : Nova science publisher, 2020. P. 250–257.
- Mokma D.L., Jackson M.L., Syers J.K., Gibbons F.R.** Mineralogy of a chronosequence of soils derived from greywacke and mica-schist alluvium from Westland, New Zealand // *New Zealand Journal of Science*. V. 16. 1973. P. 769797.
- Nesbitt H.W., Markovics G., Price R.C.** Chemical processes affecting alkalies and alkaline earths during continental weathering // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1980. V. 44. P. 1659–1666. doi: 10.1016/0016-7037(80)90218-5
- Pal D.K.** Minerals in soils and sediments as evidence of climate change: A Review // *Gondwana Geological Magazine*. 2014. V. 29. No. 1–2. P. 87–94.
- Ryan P.C., Huertas F.J.** The temporal evolution of pedogenic Fe–smectite to Fe–kaolin via interstratified kaolin–smectite in a moist tropical soil chronosequence // *Geoderma*. 2009. V. 1–2. No. 151. P. 1–15. doi: 10.1016/J.GEODERMA.2009.03.010.
- Santos M.C.D., Arnaud R.J.S., Anderson D.W.** Iron redistribution in three Boralfs (Gray Luvisols) of Saskatchewan // *Soil Science Society of America Journal*. 1986. V. 50. P. 1272–1277. doi: 10.2136/SSSAJ1986.03615995005000050038X
- Singh B.** Primary minerals // *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier, 2022. doi: 10.1016/B978-0-12-822974-3.00132-4
- Schaetzl R.J., Thompson M.L.** Soils: Genesis and geomorphology. Cambridge : Cambridge University Press, 2015. 778 p.
- Schulze D.G.** Clay minerals // *Encyclopedia of Soils in the Environment*. 2005. V. 1. P. 246–254.
- Sharma R.P., Singh R.S., Singh S.K.** Significance of clay minerals in development of alluvial soils of Aravalli range // *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*. 2019. V. 48, No. 11. P. 1783–1795.
- Shaw J.N., Odom J.W., Hajeck B.F.** Soils on Quaternary terraces of the Tallapoosa River, Central Alabama // *Soil Science*. 2003. V. 168 (10). P. 707–717. doi: 10.1097/01.ss.0000095144.68539.9b
- Smith B.R., Granger M.A., Buol S.W.** Sand and coarse silt mineralogy of selected soils on the lower Coastal Plain of North Carolina // *Soil Science Society of America Journal*. 1976. V. 40. P. 928–932. doi: 10.2136/sssaj1976.03615995004000060033x
- Srivastava P., Parkash B., Pal D.K.** Clay minerals in soils as evidence of Holocene climatic change, central Indo-Gangetic Plains, north-central India // *Quater. Res.* 1998. V. 50. P. 230–239. doi: 10.1006/qres.1998.1994
- Stevens R., Walker T.W.** The chronosequence concept and soil formation // *The Quarterly Review of Biology*. 1970. V. 45. P. 333–350. doi: 10.1086/406646
- Sudom M.D., Arnaud R.J.St.** Use of quartz, zirconium and titanium as indices in pedological studies // *Canadian Journal of Soil Science*. 1971. V. 51. P. 385–396. doi: 10.4141/CJSS71-052
- Sverdrup H., Warfvinge P., Nihlgård B.** Assessment of soil acidification effects on forest growth in Sweden // *Water, Air, & Soil Pollution*. 1994. V. 78. P. 1–36. doi: 10.1007/BF00475665.
- Sverdrup H.U.** The Kinetics of Base Cation Release Due to Chemical Weathering. Sweden : Lund Univ. Press, 1990. 246 p.
- Tolpeshta I.I., Sokolova T.A., Bonifacio E., Falcone G.** Pedogenic chlorites in podzolic soils with different intensities of hydromorphism: origin, properties, and conditions of their formation // *Eurasian Soil Science*. 2010. V. 43, No. 7. P. 777–787.
- Vincent A.G., Vestergren J., Gröbner G., Persson P., Schleucher J., Giesler R.** Soil organic phosphorus transformations in a boreal forest chronosequence // *Plant and Soil*. 2013. V. 1–2. No. 367. P. 149–162. doi: 10.1007/s11104-013-1731-z
- Walker L.R., Wardle D.A., Bardgett R.D., Clarkson B.D.** The use of chronosequences in studies of ecological succession and soil development // *Journal of Ecology*. 2010. V. 98. P. 725–736. doi: 10.1111/j.1365-2745.2010.01664.x
- Weitkamp W.A., Graham R.C., Anderson M.A., Amrhein C.** Pedogenesis of a vernal pool Entisol-Alfisol-Vertisol catena in southern California // *Soil Science Society of America Journal*. 1996. V. 60. P. 316–323. doi: 10.2136/sssaj1996.03615995006000010048x
- White A.F., Brantley S.L.** The effect of time on the weathering of silicate minerals: why do weathering rates differ in the laboratory and field? // *Chemical Geology*. 2003. V. 202. No. 3–4. P. 479–506. doi: 10.1016/J.CHEMGEO.2003.03.001
- White A.F., Blum A.E., Schulz M.S., Bullen T.D., Harden J.W., Peterson M.L.** Chemical weathering rates of a soil chronosequence on granitic alluvium: I. Quantification of mineralogical and surface area changes and calculation of primary silicate reaction rates // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1996. V. 60, No. 14. P. 2533–2550. doi: 10.1016/0016-7037(96)00106-8
- Wilson M.J.** Chemical weathering of some primary rock-forming minerals // *Soil Science*. 1975. V. 119, No. 5. P. 349–355. doi: 10.1097/00010694-197505000-00004
- Wilson M.J.** Weathering of the primary rock-forming minerals: processes, products and rates // *Clay Minerals*. 2004. V. 39. P. 233–266. doi: 10.1180/0009855043930133
- Wilson M.J.** Dissolution and formation of quartz in soil environments: a review // *Soil Science Annual*. 2020. V. 71, No. 2. P. 99–110. doi: 10.37501/почва/122398

References

- Voskresenskiy S.S. *Geomorfologiya Amuro-Zeyskoy ravniny i nizkogor'ya Malogo Khingana* [Geomorphology of the Amur-Zeya Plain and the Lowlands of the Lesser Khingan Mountains]. Moscow: MGU, 1973. V. 1. 275 p. In Russian
- Gorbunov N.I. *Metody mineralogicheskogo i mikromorfologicheskogo izucheniya pochv* [Methods of mineralogical and micromorphological study of soils]. Moscow : Izdatel'stvo «Nauka», 1971. 175 p. In Russian
- Gorbunov N.I. *Mineralogiya i kolloidnaya himiya pochv* [Mineralogy and colloidal chemistry of soils]. Moscow: Izdatel'stvo «Nauka», 1974. 314 p. In Russian
- Gradusov B.P. *Mineraly so smeshanosloynoy strukturoy v pochvakh* [Minerals with a mixed layer structure in soils]. Moscow: Izdatel'stvo «Nauka», 1976. 128 p. In Russian
- Grigor'ev D.P. *Materialy k fiziko-geograficheskoy kharakteristike i khozyaystvennoy otsenke razlichnykh tipov ravnin yuga Amurskoy oblasti* [Materials for the physical-geographical characteristics and economic assessment of various types of plains in the south of the Amur region] // *Zeysko-Bureinskaya ravnina*. Moscow: AN SSSR, 1958. pp. 52–84. In Russian

- Zaydel'man F.R. *Genesis i ekologicheskie osnovy melioratsii pochv i landshaftov* [Genesis and ecological foundations of soil and landscape reclamation]. Moscow: KDU, 2009. 720 p. In Russian
- Kovda V.A. *Biogeokhimiya pochvennogo pokrova* [Soil cover biogeochemistry]. Moscow: Izdatel'stvo «Nauka», 1985. 264 p. In Russian
- Maslov A.V., Gareev E.Z., Krupenin M.T., Demchuk I.G. *Tonkaya alyumosilikoklastika v verhnedokembrijskom razreze Bashkirskogo megantiklinoriya (k rekonstrukcii uslovij formirovaniya)* [Thin aluminosilicoclastics in the Upper Precambrian section of the Bashkir megacyclororium (reconstruction of formation conditions)]. Ekaterinburg: IGIG UrO RAN, 1999. 324 p. In Russian
- Nesterova O.V., Purtova L.N., Krupskaja L.T., Nazarkina A.V., Pilipushka V.N., Semal' V.A., Starozhilov V.T., Brikmans A.V. *Pochvy landshaftov [Primor'ja Soils of Primorye landscapes]*. Vladivostok: Izdatel'stvo Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta, 2020. 136 p. In Russian
- Oznobikhin V.I., Sinelnikov E.P., Rybachuk N.A. *Klassifikatsiya i agroproduktivnyye gruppировки почв Приморского края* [Classification and agro-industrial groupings of soils in Primorsky Krai]. Vladivostok: DVO RAN, 1994. 93 p. In Russian
- Orlov D.S. *Khimiya почв* [Soil chemistry]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo un-ta, 1985. 376 p. In Russian
- Braun G. *Rentgenovskie metody izucheniya i struktura glinistykh mineralov* [X-ray methods for studying and the structure of clay minerals]. Moscow: Izdatel'stvo «Mir», 1965. 599 p. In Russian
- Rode A.A. *Pochvoobrazovatel'nyy protsess i evolyutsiya почв* [Soil formation process and soil evolution]. Moscow: Geografiz, 1947. 142 p. In Russian
- Sokolova T.YA., Dronova T.YA., Tolpeshta I.I. *Glinistye mineraly v почвах* [Clay minerals in soils] Tula: Izdatel'stvo «Grif i K», 2005. 336 p. In Russian
- Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I. Gerasimova M.I. *Klassifikatsiya i diagnostika почв России* [Classification and diagnostics of Russian soils]. Smolensk: Izdatel'stvo «Oykumena», 2004. 342 p. In Russian
- Al-Janabi A., Drew J.V. Characterization and genesis of a Sharpsburg Wymore soil sequence in southeastern Nebraska // Soil Science Society of America Journal. 1967. V. 31. pp. 238–244. doi: 10.2136/SSSAJ1967.03615995003100020028X
- Allen B.L., Hajek, B.F. Mineral Occurrence in Soil Environments // Minerals in soil environments. Madison : Soil Science Society of America, 1989. pp. 199–278.
- Bain D.C., Strand L.T., Gustafsson J.P., Melkerud P.A., Fraser A.R. Chemistry, mineralogy and morphology of spodosols at two Swedish sites used to assess methods of counteracting acidification // Water, Air and Soil Pollution: Focus. 2003. V. 3. pp. 29–47. doi: 10.1023/A:1024167128215
- Bain D.C. The weathering of chloritic minerals in some Scottish soils // European Journal of Soil Science. 1977. V. 28. pp. 144–164. doi: 10.1111/J.1365-2389.1977.TB02303.X
- Bain D.C., Mellor A., Wilson M.J. Nature and origin of an aluminous vermiculitic weathering product in acid soils from upland catchments in Scotland // Clay Minerals. 1990. V. 25. pp. 467–475. doi: 10.1180/CLAYMIN.1990.025.4.05
- Barrett L.R. A strand plain soil development sequence in Northern Michigan, USA // Catena. 2001. V. 44. pp. 163–186. doi: 10.1016/S0341-8162(00)00170-3
- Birkeland P.W. Soils and geomorphology. New York: Oxford University Press, 1999. 430 p.
- Biscay P.E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and Adjacent Seas and Oceans // Geol. Soc. Amer. Bull. 1965. V. 76. No. 7. pp. 803–832. doi: 10.1130/0016-7606(1965)76[803:MASORD]2.0.CO;2
- Brady N.C. The nature and properties of soils. New York: Macmillan Publishing Company, 1990. 621 p.
- Burges A., Drover D.P. The rate of podzol development in sands of the Woy Woy district, N.S.W. // Australian Journal of Botany. 1953. V. 1. pp. 83–94. doi: 10.1071/BT9530083
- Campbell I.B. A weathering sequence of basaltic soils near Dunedin, New Zealand // New Zealand Journal of Soil Science. 1971. V. 14. pp. 907–24.
- Caner L., Joussein E., Salvador-Blanes S., Hubert F., Schlicht J.-F., Duigou N. Short-time clay-mineral evolution in a soil chronosequence in Oléron Island (France) // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2010. V. 4. No. 173. pp. 591–600. doi: 10.1002/JPLN.200800351
- Chizhikova N.P., Kharitonova G.V., Matyushkina L.A., Sirotskii S.E. Mineralogical composition of the clay fraction in soils, bottom sediments, and suspended matter in the middle and low reaches of the Amur River // Eurasian Soil Science. V. 37. No. 8. 2004. pp. 876–888.
- Chiu C.-Y., Baillie I., Jien S.-H., Hallett L., Hallett S. Sequestration of P fractions in the soils of an incipient ferraliation chronosequence on a humid tropical volcanic island // Botanical Studies. 2021. V. 62. p. 20. doi: 10.1186/s40529-021-00326-5
- Cook H.E., Johnson P.D., Matti J.C. and Zemmels I. Methods of sample preparation and X-ray diffraction data analysis, X-ray Mineralogy Laboratory, Deep Sea Drilling Projekt, University of California, Riverside // Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project. 1975. V. 28. pp. 999–1007. doi: 10.2973/DSDP.PROC.28.APP4.1975
- Daniels R.B., Gamble E.E., Cady J.G. Some relations among Coastal Plain soils and geomorphic surfaces in North Carolina // Soil Science Society of America Proceedings. 1970. V. 34. No. 648–653.
- Dietela J., Dohrmann R., Guggenberger G., Meyer-Stüve S., Turner S., Schippers A., Kaufhold S., Butz-Braun R., Condron L.M., Mikutta R. Complexity of clay mineral formation during 120,000 years of soil development along the Franz Josef chronosequence, New Zealand // New Zealand Journal of Geology and Geophysics. 2017. V. 60. № 1. P. 23–35. doi: 10.1080/00288306.2016.1245668
- Dietrich W.E., Perron J.T. The search for a topographic signature of life // Nature. 2006. V. 439. pp. 411–418. doi: 10.1038/nature04452
- Dill H.G. Kaolin: Soil, rock and ore: From the mineral to the magmatic, sedimentary and metamorphic environments // Earth-Science Reviews. 2016. V. 161. pp. 16–129. doi: 10.1016/J.EARSCIREV.2016.07.003
- Dorransoro C., Alonso P. Chronosequence in Almar River fluvial-terrace soil // Soil Science Society of America Journal. 1994. V. 58. pp. 910–925. doi: 10.2136/SSSAJ1994.03615995005800030039X
- Douglas L.A. Vermiculites // Minerals in the soil environment. Madison : Soil Science Society of America, 1989. pp. 635–674. doi: 10.2136/sssabookser1.2ed.c13

- Dumig A., Smittenberg R., Kogel-Knabner I. Concurrent evolution of organic and mineral components during initial soil development after retreat of the Damma glacier, Switzerland // *Geoderma*. 2011. V. 163. pp. 83–94. doi: 10.1016/J.GEODERMA.2011.04.006
- Eghbal M.K., Southard R.J. Stratigraphy and genesis of Durorthids and Haplargids on dissected alluvial fans, western Mojave Desert, California // *Geoderma*. 1993. V. 59. pp. 151–174. doi: 10.1016/0016-7061(93)90067-U
- Egli M., Mirabella A., Fitze P. Formation rates of smectites derived from two Holocene chronosequences in the Swiss Alps // *Geoderma*. 2003. V. 117. No. 1–2. pp. 81–98. doi: 10.1016/S0016-7061(03)00136-8
- Garrels M., Mackenzie F.T. Origin of the chemical compositions of some springs and lakes // *Equilibrium Concepts in Natural Water Systems*. 1967. V. 67. pp. 222–242. doi: 10.1021/BA-1967-0067.CH010
- Gilkes R.J., Scholz G., Dimmock G.M. Lateritic deep weathering of granite // *European Journal of Soil Science*. 1973. V. 24. pp. 523–536. doi: 10.1111/J.1365-2389.1973.TB02319.X
- Gorham E. Chemical studies on the soils and vegetation of waterlogged habitats in the English Lake District // *Journal of Ecology*. 1953. V. 41. pp. 345–360. doi: 10.2307/2257046
- Graham R.C., Weed S.B., Bowen L.H., Amarasiwardena D.D., Buol S.W. Weathering of iron-bearing minerals in soils and saprolite on the North Carolina Blue Ridge Front: II. Clay mineralogy // *Clays & Clay Minerals*. 1989. V. 37. pp. 29–40. doi: 10.1346/CCMN.1989.0370104
- Harris W.G., Iyengar S.S., Zelazny L.W., Parker J.E., Lietzke D.A., Edmonds W.J. Mineralogy of a chronosequence formed in New River alluvium // *Soil Science Society of America Journal*. 1980. V. 44. pp. 862–868. doi: 10.2136/SSSAJ1980.03615995004400040041X
- Hawkins W.A., Graham R.C. Soil mineralogy of a vernal pool catena in Southern California // *Soil Science Society of America Journal*. 2017. V. 81. pp. 214–223. doi: 10.2136/SSSAJ2016.08.0257
- Huang P.M. Feldspars, olivines, pyroxenes, and amphiboles // *Minerals in soil environments*. Madison: Soil Science Society of America, 1989. pp. 975–1050.
- Huggett R.J. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review // *Catena*. 1998. V. 32. pp. 155–172. doi: 10.1016/S0341-8162(98)00053-8
- IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: World Soil Resources Reports. № 106. FAO, 2014. 181 p.
- Igyasu D.K. Chemical weathering of biotite in the Ganga Alluvial Plain // *Current Science*. 2014. V. 106. No. 11. pp. 1484–1486. doi: 10.18520/CS/V106/11/1484-1486
- Singh B. Primary minerals // *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier, 2022. doi: 10.1016/B978-0-12-822974-3.00132-4
- Lilienfein J., Qualls R.G., Uselman S.M., Bridgman S.D. Soil formation and organic matter accretion in a young andesitic chronosequence at Mt. Shasta, California // *Geoderma*. 2003. V. 116. pp. 249–264.
- Loughnan F.E. Chemical weathering of the silicate minerals. New York: Elsevier Publ. Co., 1969. 154 p.
- Markewich H.W., Pavich M.J., Wysocki D.A. Soils as relative-age dating tools // *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology*. John Wiley & Sons, 2017. pp. 1–14. doi: 10.1002/9781118786352.WBIEG0437
- Markewich H.W., Pavich M.J., Mausbach M.J., Gonzalez V.M., A guide to using soil and weathering profile data in chronosequence studies of the Coastal Plain of the United States. U.S. // *U.S. Geological Survey Bulletin 1589-D*. Washington Government Printing Office: 1989. 39 p. doi: 10.3133/B1589D
- Mavris C., Plötze M., Mirabella A., Giaccari D., Valboa G., Egli M. Clay mineral evolution along a soil chronosequence in an Alpine proglacial area // *Geoderma*. V. 165. 2011. pp. 106–117. doi: 10.1016/j.geoderma.2011.07.010
- McFadden L. D., Hendricks D. M. Changes in the content and composition of pedogenic iron oxyhydroxides in a chronosequence of soils in southern California // *Quaternary Research*. 1985. V. 23. pp. 189–204. doi: 10.1016/0033-5894(85)90028-6
- Mishra M., Samant B. Feldspars: Life-Sustaining Minerals on the Earth // *Minerals and their properties. Novel approach for applications*. New York: Nova science publisher, 2020. pp. 250–257.
- Mokma D.L., Jackson M.L., Syers J.K., Gibbons F.R. Mineralogy of a chronosequence of soils derived from greywacke and mica-schist alluvium from Westland, New Zealand // *New Zealand Journal of Science*. 1973. V. 16. P. 769797.
- Nesbitt H.W., Markovics G., Price R.C. Chemical processes affecting alkalies and alkaline earths during continental weathering // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1980. V. 44. pp. 1659–1666. doi: 10.1016/0016-7037(80)90218-5
- Pal D.K. Minerals in soils and sediments as evidence of climate change: A Review // *Gondwana Geological Magazine*. 2014. V. 29. No. 1–2. pp. 87–94.
- Ryan P.C., Huertas F.J. The temporal evolution of pedogenic Fe–smectite to Fe–kaolin via interstratified kaolin–smectite in a moist tropical soil chronosequence // *Geoderma*. 2009. V. 1–2. No. 151. pp. 1–15. doi: 10.1016/J.GEODERMA.2009.03.010
- Santos M.C.D., Arnaud R.J.S., Anderson D.W. Iron redistribution in three Boralfs (Gray Luvisols) of Saskatchewan // *Soil Science Society of America Journal*. 1986. V. 50. pp. 1272–1277. doi: 10.2136/SSSAJ1986.03615995005000050038X
- Schaetzl R.J., Thompson M.L. Soils: Genesis and geomorphology. Cambridge : Cambridge University Press, 2015. 778 p.
- Schulze D.G. Clay minerals // *Encyclopedia of Soils in the Environment*. 2005. V. 1. pp. 246–254.
- Sharma R.P., Singh R.S., Singh S.K. Significance of clay minerals in development of alluvial soils of Aravalli range // *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*. 2019. V. 48. No. 11. pp. 1783–1795.
- Shaw J.N., Odom J.W., Hajeck B.F. Soils on Quaternary terraces of the Tallapoosa River, Central Alabama // *Soil Science*. 2003. V. 168(10). P. 707–717. doi: 10.1097/01.ss.0000095144.68539.9b
- Smith B.R., Granger M.A., Buol S.W. Sand and coarse silt mineralogy of selected soils on the lower Coastal Plain of North Carolina // *Soil Science Society of America Journal*. 1976. V. 40. pp. 928–932. doi: 10.2136/sssaj1976.03615995004000060033x
- Srivastava P., Parkash B., Pal, D.K. Clay minerals in soils as evidence of Holocene climatic change, central Indo-Gangetic Plains, north-central India // *Quater. Res*. 1998. V. 50. P. 230–239. doi: 10.1006/qres.1998.1994
- Stevens R., Walker T.W. The chronosequence concept and soil formation // *The Quarterly Review of Biology*. 1970. V. 45. pp. 333–350. doi: 10.1086/406646
- Sudom M.D., Arnaud R.J.St. Use of quartz, zirconium and titanium as indices in pedological studies // *Canadian Journal of Soil Science*. 1971. V. 51. P. 385–396. doi: 10.4141/CJSS71-052

- Sverdrup H., Warfvinge P., Nihlgård B. Assessment of soil acidification effects on forest growth in Sweden // *Water, Air, & Soil Pollution*. 1994. V. 78. pp. 1–36. doi: 10.1007/BF00475665
- Sverdrup H.U. The Kinetics of Base Cation Release Due to Chemical Weathering. Sweden: Lund Univ. Press., 1990. 246 p.
- Tolpeshta I.I., Sokolova T.A., Bonifacio E., Falcone G. Pedogenic chlorites in podzolic soils with different intensities of hydromorphism: origin, properties, and conditions of their formation // *Eurasian Soil Science*. 2010. V. 43. No. 7. pp. 777–787.
- Vincent A.G., Vestergren J., Gröbner G., Persson P., Schleucher J., Giesler R. Soil organic phosphorus transformations in a boreal forest chronosequence // *Plant and Soil*. 2013. V. 1–2. No. 367. pp. 149–162. doi: 10.1007/s11104-013-1731-z
- Walker L.R., Wardle D.A., Bardgett R.D., Clarkson B.D. The use of chronosequences in studies of ecological succession and soil development // *Journal of Ecology*. 2010. V. 98. pp. 725–736. doi: 10.1111/j.1365-2745.2010.01664.x
- Weitkamp W.A., Graham R.C., Anderson M.A., Amrhein C. Pedogenesis of a vernal pool Entisol-Alfisol-Vertisol catena in southern California // *Soil Science Society of America Journal*. 1996. V. 60. pp. 316–323. doi: 10.2136/sssaj1996.03615995006000010048x
- White A.F., Brantley S.L. The effect of time on the weathering of silicate minerals: why do weathering rates differ in the laboratory and field? // *Chemical Geology*. 2003. V. 202. No. 3–4. pp. 479–506. doi: 10.1016/J.CHEMGEO.2003.03.001
- White A.F., Blum A.E., Schulz M.S., Bullen T.D., Harden J.W., Peterson M.L. Chemical weathering rates of a soil chronosequence on granitic alluvium: I. Quantification of mineralogical and surface area changes and calculation of primary silicate reaction rates // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1996. V. 60. No. 14. pp. 2533–2550. doi: 10.1016/0016-7037(96)00106-8
- Wilson M.J. Chemical weathering of some primary rock-forming minerals // *Soil Science*. 1975. V. 119. No. 5. pp. 349–355. doi: 10.1097/00010694-197505000-00004
- Wilson M.J. Dissolution and formation of quartz in soil environments: a review // *Soil Science Annual*. 2020. V. 71. No. 2. pp. 99–110. doi: 10.37501/почва/122398
- Wilson M.J. Weathering of the primary rock-forming minerals: processes, products and rates // *Clay Minerals*. 2004. V. 39. pp. 233–266. doi: 10.1180/0009855043930133.

Информация об авторе:

Мартынов А.В., кандидат географических наук, научный сотрудник, лаборатория геоэкологии, Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Благовещенск, Россия.
E-mail: lexxm@ascnet.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about author:

Martynov A.V., Cand. Sci. (Geography), Researcher, Laboratory of Geoecology, Institute of Geology and Nature Management, FEB RAS, Blagoveshchensk, Russia.
E-mail: lexxm@ascnet.ru

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.05.2023; одобрена после рецензирования 02.05.2024; принята к публикации 27.11.2024

The article was submitted 15.05.2023; approved after reviewing 02.05.2024; accepted for publication 27.11.2024

ГЕОЭКОЛОГИЯ, ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 543.31.51:[675.088.3+504.45](282.256.341.9+282.256.341)

doi: 10.17223/25421379/33/7

ГЕОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЁННЫХ СТОКОВ НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ НА ПРИМЕРЕ г. СЛЮДЯНКА, р. ПОХАБИХА И ЮЖНОГО БАЙКАЛА



Евгений Павлович Чебыкин¹, Наталья Николаевна Куликова²,
Елена Валентиновна Лихошвай³, Александр Николаевич Сутурин⁴

^{1, 2, 3, 4} *Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия*

¹ *epcheb@yandex.ru*

² *kulikova@lin.irk.ru*

³ *likhoshway@mail.ru*

⁴ *san@lin.irk.ru*

Аннотация. Разработан геохимический метод для оценки степени влияния локальных источников загрязнения на последовательно расположенные водные объекты (река-водоем) на примере сточных вод г. Слюдянка, р. Похабиха, оз. Байкал. Определены водные и геохимические вклады сточных вод. Их суммарный геохимический вклад в р. Похабиха составляет 348 %, и, по мере разбавления, падает: 216–71 % в прибрежной зоне Байкала (латерально до 90 м от устья) и 25–20 % в секторе 50 м от уреза. В пелагиали Байкала на расстоянии 3 км от берега влияния сточных вод не обнаружено.

Ключевые слова: сточные воды, химические элементы, ИСП-МС, предельно допустимые концентрации, озеро Байкал

Благодарности: авторы благодарят команду и капитана И.Ю. Бархокова НИС «Г.Ю. Верещагин» за помощь в отборе проб.

Источник финансирования: работа выполнена по государственному заданию ЛИИ 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. 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. doi: 10.17223/25421379/33/7

Original article

doi: 10.17223/25421379/33/7

GEOCHEMICAL METHOD OF ASSESSMENT OF THE IMPACT OF POLLUTED DRAINS ONTO WATER BODIES ILLUSTRATED BY SLYUDYANKA CITY, THE POKHABIKHA RIVER AND SOUTH BAIKAL

Eugene P. Chebykin¹, Natalya N. Kulikova², Yelena V. Likhoshway³, Alexander N. Sutin⁴

^{1, 2, 3, 4} *Limnological Institute of SB RAS, Irkutsk, Russia*

¹ *epcheb@yandex.ru*

² *kulikova@lin.irk.ru*

³ *likhoshway@mail.ru*

⁴ *san@lin.irk.ru*

Abstract. The assessment of anthropogenic factors impact onto water bodies is one of actual ecological tasks. On the base of analyzed publications (RSCI data base, www.elibrary.ru) and our own data, a geochemical method for assessment of degree of local pollution sources impact onto a series of water bodies (river – water reservoir) was developed.

Concentration of 32 informative chemical elements in waste waters of wastewater treatment facilities (WTF) in Slyudyanka City, in the Pokhabikha R. (above and below waste waters income) as well as in surface water of Lake Baikal littoral at different distance from the river mouth was determined using inductively coupled plasma mass-spectrometry method.

The method consists of two consequent calculation procedures – calculation of water contributions from the sources at each mixing stage and calculation of geochemical contribution by each element (GCC) and their sum (SGCC) from a pollution source.

The algorithm for calculation of water contributions from mixing sources (waste waters, clean riverine waters, Baikalian background waters) was realized using concentrations of contrast conservative chemical elements. For each mixing object (riverine water below waste waters discharge, Lake Baikal littoral water in the zone of influence of polluted riverine waters), a set of such elements is individual and depends on the peculiarities of geochemical composition of mixing sources.

Calculation of geochemical contributions (GCC) from pollution sources is performed taking into account a probable non-conservative behavior of elements on biogeochemical barriers. For this, water contributions of all mixing sources and their geochemical compositions are taking into account.

It is found out that water contribution of waste waters from WTF of Slyudyanka City into total riverine drainage of the Pokhabikha R. is 1.75 % – this is a rather great value due to small size of the river itself. Water contribution of polluted riverine waters in Lake Baikal littoral is 55–11 % in the coastal zone (~ 1 m from water cut and remotely up to 90 m laterally from the mouth) and 2–3 % in surface water in the sector of ~ 50 m from water cut opposite to the mouth. Water contributions of waste waters in Lake Baikal littoral are 0.97–0.20 % and ~0.04–0.05 %, respectively.

It is found out that the Pokhabikha R. is most effected geochemically by waste waters. The most valuable GCC for it are by following elements: P (56 %), Cl (43 %), Sb (39 %), Na (36 %), Zr (25 %), K (24 %), Cs (22 %), Ga (20 %), Ni (20 %), As (19 %), Rb (16 %), Br (10 %) and Ti (10 %). Lake Baikal coastal zone is characterized by valuable GCC by such elements as P (44–16 %), Cl (35–13 %), Zr (20–7 %), Na (17–3 %), Cs (16–5 %), Ga (16–5 %), K (13–3 %) and Rb (12–4 %). In the sector of 50 m from water cut, there is a considerable effect from waste waters by Mn (~ 7–6 %), P (~ 5–4 %) Cl (~ 4–3 %), Zr (~ 2 %), Cs (1.4–1 %), Ga (1.3–1 %) and Rb (~ 1 %).

In Lake Baikal coastal zone, effect of the Pokhabikha R. waste waters is clearly observed by major part of elements minimally 50 m leftward and 90 m rightward from the mouth. Due to a strong dilution of waste waters in the sector of ~ 50 m from water cut, their water and geochemical contributions are determined with a great error (105–190 relative %), this does not allow to establish reliably a boundary of their spreading. It is probable that influence of the Pokhabikha R. polluted waters by some elements (Mn, P, Cl) may extend further than to 50 m frontally from the mouth.

Maximal summary geochemical contribution (SGCC) of waste waters from WTF of Slyudyanka City calculated as sum of GCC by normative elements is characteristic for the Pokhabikha R. – 348 %. In Lake Baikal littoral, so far as waste waters are diluted, SGCC decreases and is 216–71 % in coastal zone and 20–25 % in the sector of ~ 50 m from water cut. In the latter case, due to great dilution degree and consequently – to great determination errors (52–69 relative %), the assessments obtained are to be accepted with caution.

We found out in waste waters from WTF of Slyudyanka City exceeding of norms by P (45 MAC), Mn (4.7 MAC) and V (2 MAC) established for waste waters discharged by centralized and local water drainage systems in settlements or urban districts within central and buffer ecological zones of Baikal Natural Territory.

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 to the crew and captain I.Yu. Barkhokov of the research vessel "G.Yu. Vereshchagin" 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. (2024) 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*. 4. pp. 107–136. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/33/7

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 [Грачев, 2015; Суторин 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.

Большинство исследований, посвящённых этой теме, как правило, ограничивается установлением фактов природного или антропогенного влияния, реже оценкой границ / масштабов явления. В акваториях напротив густонаселённых поселений и туристических баз геофизическими методами [Минаев и др., 2017, 2019] выявляются зоны субаквальной разгрузки подземных вод, которые часто антропогенно

загрязнены – содержат большое количество патогенных фекальных микроорганизмов и характерных химических маркеров, таких как Cl [Сутурин и др., 2016]. В работах [Алексеев и др., 2018; Алексеева и др., 2023] показано, что вода в ряде колодцев и скважин местного населения пос. Листвянка содержит нитраты, Mn, Fe и патогенные фекальные микроорганизмы, превышающие нормативы качества питьевой воды. Контаминация водоносных горизонтов происходит за счёт утечек хозяйственно-бытовых стоков из неправильно оборудованных септиков близ расположенных гостиничных комплексов. Открытые водотоки (особенно мелкие), протекающие по территории пос. Листвянка, также подвергаются антропогенному микробиологическому и химическому загрязнению [Мальник и др., 2009; Сутурин и др., 2016; Malnik et al., 2022]. Поступление в литоральную зону озера неочищенных и плохо очищенных хозяйственно-бытовых стоков в связи с возросшей туристической нагрузкой (с 2010 г.) при отсутствии адекватной инфраструктуры по очистке стоков, скорее всего, является главной причиной наблюдаемого экологического кризиса на Байкале [Сутурин и др., 2016; Timoshkin et al., 2018]. Очаги таких кризисных явлений, как правило, приурочены к наиболее «злачным» местам, от которых они распространяются в более удалённые районы побережья озера [Timoshkin et al., 2018]. Об этом свидетельствует характер распространения нитчатых водорослей рода *Spirogira* [Timoshkin et al., 2018] и их биогеохимический состав. В работе [Куликова и др., 2021] показано, что *Spirogira* на участках, сопряжённых с населёнными пунктами и туристическими рекреациями, накапливает большее количество химических элементов (особенно Li, Na, Cl, Mn, Co и Ba) по сравнению с фоновыми. Биогеохимический состав водорослей *Spirogira* частично коррелирует с составом интерстициальных вод в заплесковой зоне, где происходит накопление подвижных элементов (за счёт площадного смыва и пр.) и их последующее поступление в литоральную зону. На проблемных участках концентрация Na, Mg, Si, P, S, Cl, K, Mn, Co и Ba в интерстициальных водах больше, чем на фоновых. Дополнительным стрессовым фактором могут быть лесные пожары, которые приводят к разрушению почвенно-грунтового слоя и интенсивному выносу таких элементов, как P, S, K, Ca, Mn, Zn, Mo, Cd и Ba, которые на протяжении нескольких лет могут поступать в литораль Байкал с сопряжённых выгоревших участков [Kulikova et al., 2020].

Работ по количественной оценке влияния источников загрязнения на элементы экосистемы Байкала практически нет в силу трудоёмкости и сложности учёта всех необходимых объектов и их характеристик. Так, в работе [Чебыкин и др., 2018] рассчитаны

максимальные вклады химических элементов при таянии загрязнённого снега в среднегодовой баланс речного стока в зоне влияния пос. Листвянка (Южный Байкал); показано, что поступление токсичных элементов и элементов, способствующих эвтрофикации, с загрязненными талыми водами незначительно, по сравнению с поверхностным и подземным стоком, и не может быть определяющим фактором развития экологического кризиса на Байкале в данном районе.

Поиск в базе данных РИНЦ (www.elibrary.ru) показал (дата обращения 07 августа 2023 г.), что по ключевым словам «влияние сточных вод» (в названиях, аннотациях, ключевых словах), имеется 3 122 публикации (статьи в журналах, книги). Из них 333 посвящены влиянию сточных вод различного генезиса на качество вод загрязняемых объектов. В большинстве случаев приводятся факты увеличения концентрации исследуемых компонентов в объектах влияния в сопоставлении с условно фоновыми участками и оценивается качество вод (в том числе и сточных) в сопоставлении с соответствующими нормативами. Такой подход без количественных балансовых оценок даёт лишь отчасти понимание степени влияния загрязняющего источника. В некоторых работах предлагаются и (или) используются способы расчёта допустимых нагрузок точечных и диффузных источников загрязнения [Михайлов, 2000; Петрова, 2008; Мискевич, 2017; Титова и др., 2017; Хатмуллина и др., 2017; Панов и др., 2018; Лозовик, Галахина, 2019; Наумова и др., 2019, 2022; Селезнева и др., 2019; Кириленко, Тучков, 2020; Соколов, 2020], критикуются недостатки существующих методик нормирования антропогенных воздействий [Данилович, Довлатова, 2014; Марков и др., 2020; Серпуховитина и др., 2021; Киселева, 2022; Попов, 2022; Шаликовский, Курганович, 2023] и применения некоторых интегральных показателей [Магасумова и др., 2012; Хатмуллина и др., 2018]. В ряде работ, при наличии достаточного количества индикаторов и регулярности наблюдений, используются утверждённые или предлагаются новые частные и комплексные баллы, показатели и индексы загрязнения [Ежегодники...; Никаноров и др., 2011; Мингазова и др. 2011; Угланов и др., 2013; Овчарова, Кадацкая, 2014; Гарицкая, Алеева, 2016; Овчарова и др., 2016; Наумова, Бухарина, 2017; Дрововозова, Манжина, 2019; Лозовик, Галахина, 2019; Пашенко и др., 2021; Румянцева, Бобровицкая, 2021; Солдатова и др., 2022а; Двинских и др., 2023], рассчитываются категории опасности предприятий [Крестников и др., 2013; Никольская, Маркин, 2016], перечисляются способы выделения значимых загрязнителей с использованием метода нейросетевой кластеризации [Тунакова и др., 2023]. Предлагаются интегральные показатели загрязнения и самоочищения для учёта

материкового стока [Булавина, 2018]. Разрабатываются математические модели влияния источников загрязнения на водотоки [Холоднов, Лебедева, 2015; Гагарина, Куртеева, 2017; Наумов, 2017], акватории [Огородникова и др., 2004; Рябцев и др., 2021] и болота [Лавров, 2018], предлагается методология управления геохимическим балансом водосборов в различных природных и антропогенных условиях [Савичев, Гусева, 2020], исследуются процессы массопереноса загрязняющих веществ в водных объектах и их трансформация [Бреховских и др., 2017, 2019], проводится моделирование и оценка загрязнения тяжёлыми металлами в водосборах [Фащевская, Мотовилов, 2020], создаются информационные системы [Калинкина и др., 2019]. Наиболее интересные и близкие к нашим подходам являются работы [Селезнева и др., 2019; Селезнев, 2021], в которых разработан и апробирован метод оценки антропогенной нагрузки на реки от сброса загрязняющих веществ (ЗВ) в составе сточных вод. В методе используются необходимые характеристики для расчёта балансовых оценок по загрязняющим веществам (водные расходы и концентрации ЗВ в условно фоновых створах рек и точечных источниках сточных вод), их интегральные показатели, в том числе и нормированные на бассейновые допустимые концентрации (БДК), за которые, при сложностях определения фоновых значений, использованы рыбохозяйственные ПДК. Метод позволяет сравнивать между собой реки, отличающиеся по величине водного стока и расположенные в различных природно-климатических условиях. Его можно использовать как для всей реки, так и для оценки антропогенной нагрузки на отдельных водохозяйственных участках рек, что позволяет расставить приоритеты для составления и реализации программ снижения антропогенной нагрузки. Для более полного понимания картины влияний также необходимо получить пространственно-временную динамику поступления и распределения поллютантов [Никаноров и др., 2011].

В большинстве случаев в качестве индикаторов загрязнения рассматриваются взвешенные вещества, характерные тяжёлые металлы (Fe, Mn, Al, Cu, Zn, Ni, Pb) и гидрохимические показатели: главные ионы, общая минерализация, биогенные компоненты (аммоний, нитриты, нитраты, фосфаты), pH, растворённый кислород, нефтепродукты, СПАВ, БПК, ХПК. Реже изучается микробиологическая составляющая [Копылов и др., 2006; Кузякина, Хурина, 2007; Бузалева и др., 2008; Белова и др., 2013; Щетинина и др., 2013; Худяков и др., 2014; Волчек, Чезлова, 2015; Платонов и др., 2015, 2019; Беляева и др., 2017; Зацаринная и др., 2017; Левченко и др., 2019; Иванова и др., 2020; Насурдинов и др., 2022; Malnik et al., 2022],

сильно токсичные (Hg – [Янин, 2012; Гертман, Станкевич, 2020], As – [Абдувалиев, Худайбергенова, 2016; Маргарян, 2017; Анищенко и др., 2023]) и радиоактивные элементы [Леонова и др., 2005, 2006; Зверева, Крупская, 2012; Панов и др., 2022], фармацевтические препараты [Самойленко, Ермакович, 2014; Дубровская, Андруняк, 2015; Новикова и др., 2018; Козлова, 2020; Лыков, 2020; Константинова, 202] и паразиты [Иванова, Миропольская, 2008; Платонов и др., 2014; Тоноева и др., 2018; Кокколова и др., 2022]. Работ, в которых исследуется расширенный геохимический состав (более 20 элементов) загрязняемых вод, мало [Рябинин и др., 2008; Иванова и др., 2020; Солдатова и др., 2022а; Анищенко и др., 2023], и ещё меньше тех, где дополнительно апробируются сами источники загрязнения [Даувальтер и др., 2009; Акбарпур, Лукьянов, 2014].

По проведённому поисковому запросу также найдено множество работ по фито- (37 публикаций) и зоомониторингу (56 публикаций) водных объектов в зоне загрязнения, в том числе и с использованием биосенсоров и биотест-систем [Штамм и др., 2011], однако их обзор выходит за рамки нашего исследования.

Для определения степени воздействия сточных вод на загрязнение водотоков и водоёмов рассмотрение только растворённых компонентов недостаточно, поскольку некоторые из них частично мигрируют в составе взвешенных веществ [Фащевская, Мотовилов, 2020] и, при сопутствующих процессах сорбции и образования вторичных минералов, формируют обогащенные донные отложения [Панкратова и др., 1993; Войцыцкий, 2008; Опекунов и др., 2010; Белова и др., 2013; Даувальтер, Кашулин, 2014, 2015; Кадычагов и др., 2016; Иванов и др., 2018; Чувычкин и др., 2018; Блинова, Чеснокова, 2019; Харько, Плохов, 2019; Шабанов, 2019; Даувальтер, 2020; Макаренко и др., 2020; Савичев и др., 2020; Халиков, Лукьянова, 2020; Красавцева, Сандимиров, 2021; Орехова и Овсяный, 2021; Солдатова и др., 2022b; Хомченко, 2022; Radnaeva et al., 2022; Ницкая, Антоненко, 2023]. При изменении физико-химических условий такие осадки могут стать источниками вторичного загрязнения вод [Путилина и др., 2014, 2016; Искандарова и др., 2019; Шабанов, 2019; Усманов, Магай, 2020].

Ярким примером антропогенного воздействия на оз. Байкал является сброс сточных вод канализационных очистных сооружений (КОС) г. Слюдянка в р. Похабику – малый приток оз. Байкал. Канализационные очистные сооружения г. Слюдянка аккумулируют как промышленные, так и жилищно-коммунальные стоки и ежегодно сбрасывают около 1 млн м³ недостаточно очищенных сточных вод [Гагаринова, 2016], что составляет около 2 % от стока реки, учитывая ее многолетний среднегодовой расход 1,5 м³/с

[Автоматизированная..., 2023]. Согласно Приказу Минприроды РФ № 83 [Приказ..., 2020], в сточных водах, сбрасываемых централизованными и локальными системами водоотведения поселений или городских округов в пределах центральной и буферной экологических зон БПТ, нормируется содержание 35 химических элементов: Li, Be, B, Na, Mg, Al, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Mo, Cd, Sn, Te, I, Cs, Ba, W, Hg и Pb. Периодические исследования сточных вод КОС г. Слюдянки (в 2014, 2017 и 2020 гг.), проводимые нами в рамках бюджетных проектов ЛИН СО РАН, выявили постоянные превышения нормативов по P (26–38 ПДК), Mn (1,8–5,5 ПДК) и Cu (1,2–2 ПДК) и эпизодические по V (2–3 ПДК), Fe (1,2 ПДК) и Mo (1,5–1,9 ПДК). Кроме того, сточные воды КОС г. Слюдянки характеризуются плохими санитарно-микробиологическими показателями (энтерококки и *E. coli* > 40 тыс. КОЕ / 100 мл [Malnik et al., 2022]), что свидетельствует о неудовлетворительной работе очистных сооружений. По данным водолазных исследований (устное сообщение И.В. Ханаева), антропогенное влияние р. Похабиха на литораль Байкала (нарушение растительных поясов, гибель эндемичных губок, развитие нитчатой водоросли рода *Spirogyra*) прослеживается как минимум на 100 м в сторону открытого Байкала напротив устья реки.

Цель данного исследования – на примере исследуемого района разработать методы для количественной оценки водных и геохимических вкладов сточных вод в загрязняемые водные объекты и выявить основные контуры рассеяния загрязнителей в литорали Байкала в зоне их влияния.

1. Материалы и методы

1.1. Описание района работ, отбор и фиксация проб

Город Слюдянка расположен на юго-западном окончании оз. Байкал (рис. 1). Это довольно крупный районный центр с населением ~18 тыс. человек (на 2020 г., [Итоги..., 2020]). Сточные воды КОС г. Слюдянки сбрасываются в небольшой приток Байкала – р. Похабиху в 500 м от берега озера (рис. 1). Согласно данным Государственного водного реестра [Поиск...], длина р. Похабиха составляет 20 км, площадь водосборного бассейна – 64,4 км². В базе данных [R-ArcticNet...] представлены среднемесячные расход воды р. Похабиха за 49 лет (с 1951 по 1999 г.) в створе 2,2 км выше устья.

Согласно этим данным, наиболее низкие расходы воды приходятся на зимне-весенний период (январь–апрель: 0,97–0,73 м³/с), наиболее высокие – на летне-осенний (июль – 2,24, август – 2,60, сентябрь –

2,45 м³/с), а многолетний среднегодовой расход составляет 1,49 м³/с. По данным Федерального агентства водных ресурсов [Автоматизированная..., 2023], средние показатели расхода воды р. Похабихи за период 2008–2021 гг. практически не изменились: наиболее низкие расходы приходятся на январь–апрель (0,95–0,69 м³/с), наиболее высокие – на июль (2,01 м³/с), август (2,50 м³/с) и сентябрь (2,39 м³/с), многолетний среднегодовой расход составил 1,50 м³/с.

Отбор проб произведён 6 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. Проба сточных вод (ст. WW) была отобрана непосредственно из трубы сброса. Пробы речной воды были взяты в ~ 100 м выше трубы сброса сточных вод (ст. Riv up) и в приустьевом участке (ст. Riv) перед небольшим озером, перекрытым дамбой у самого берега Байкала. Интерстициальная вода (ст. h) отобрана у левого берега р. Похабиха вблизи дамбы. Прибрежные воды (~ 1 м от уреза) отбирали напротив устья (ст. CW), и латерально от него 50 м влево (ст. CW50L) и 90 м вправо (ст. CW90R). В секторе ~ 50 м от уреза были отобраны поверхностные воды напротив устья (ст. 50), под углом влево (ст. 50L) и вправо (ст. 50R) от устья.

В более удалённых от берега секторах геохимическое влияние малых притоков, как правило, обнаружить не удастся (из опыта предыдущих исследований), поэтому мы ограничились сектором 50 м от уреза. Фоновая проба 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 бутылки ПЭТ.

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 Эппендорфа (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 (Saville DST-1000

sub-boiling distillation system, Япония), содержащая индий (1 008 ppb) в качестве внутреннего стандарта.

Консервант добавляли в пробирки Эппендорфа весовым методом. Пробирки с отобранными образцами воды взвешивали и рассчитывали точное содержание азотной кислоты (типично 2 %) и индия (типично 30 ppb). Все необходимые взвешивания проводились на аналитических весах Mettler Toledo AG104 (погрешность взвешивания $\pm 0,0003$ г).

Для определения гидрохимических и физико-химических параметров образцы воды отбирали в бутылки ПЭТ. Измерения pH проводили сразу же после отбора проб pH-метром testo 252 (Германия, точность определения $\pm 0,02$ pH).

1.2. Многоэлементный ИСП-МС анализ

Подготовленные пробы воды измеряли на квадрупольном ИСП-МС масс-спектрометре Agilent 7500 се 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 «горячей плазмы» (мощность генератора плазмы 1 580 Вт) без столкновительной ячейки.

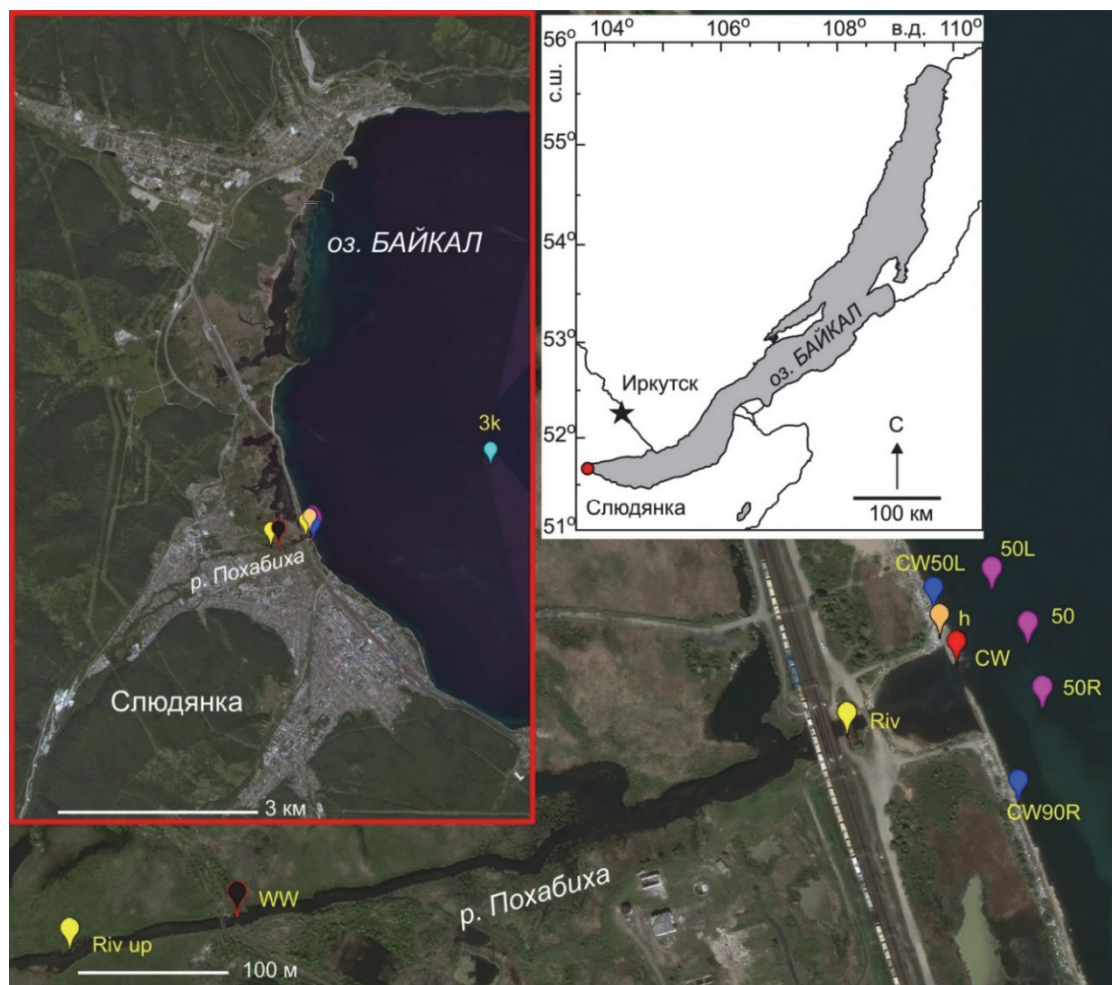


Рис. 1. Карта-схема оз. Байкал и космоснимки с указанием мест отбора проб в зоне влияния КОС г. Слюдянки

Космоснимки взяты из открытых источников (SAS Planet, <https://sasplanet.ru/>). Желтыми символами отмечены места отбора речных проб (Riv up – 100 м выше трубы сброса КОС, Riv – устье), черным – сточных вод (WW – труба сброса КОС), красным – прибрежная вода напротив устья реки (CW), синими – прибрежная вода 50 м от устья влево (CW50L) и 90 м от устья вправо (CW90R), розовыми – поверхностная вода в секторе ~ 50 м от уреза (50, 50L, 50R), голубым – фоновая станция в 3 км от берега (3k)

Fig. 1. Schematic map of Lake Baikal and satellite images with indication of sampling sites in the zone of influence of Slyudyanka City WWT

Satellite images are taken from open sources (SAS Planet, <https://sasplanet.ru/>). Yellow symbols mark sites of riverine samples collection (Riv up – 100 m upstream of WWT discharge channel, Riv – mouth), black ones – waste waters (WW – WWT discharge channel), red ones – coastal water opposite the river mouth (CW), blue ones – coastal water in 50 m left from the mouth (CW50L) and in 90 m right from the mouth (CW90R), pink ones – surface water in the sector ~ 50 m from water cut (50, 50L, 50R), light blue ones – background station in 3 km from the coast (3k)

Таблица 1

Описание и координаты отобранных проб воды в зоне влияния КОС г. Слюдянки

Table 1

Description and coordinates of the collected water samples in the zone of influence of Slyudyanka City WTF

Станция	Описание	С.Ш.	В.Д.
Riv up	р. Похабиха, 100 м выше сброса КОС г. Слюдянки	51,6706°	103,7011°
WW	Труба сброса КОС г. Слюдянки	51,6709°	103,7027°
Riv	р. Похабиха, устье	51,6719°	103,7086°
h	Интерстициальная вода вблизи устья р. Похабиха	51,6725°	103,7095°
CW	Байкал, прибреж. вода напротив устья р. Похабиха	51,6723°	103,7096°
CW50L	Байкал, прибреж. вода 50 м влево от устья р. Похабиха	51,6727°	103,7094°
CW90R	Байкал, прибреж. вода 90 м вправо от устья р. Похабиха	51,6715°	103,7102°
50	Байкал, поверхн. вода, 50 м по трансекте от устья р. Похабиха	51,6725°	103,7103°
50L	Байкал, поверхн. вода, 50 м от устья р. Похабиха под углом влево	51,6728°	103,7100°
50R	Байкал, поверхн. вода, 50 м от устья р. Похабиха под углом вправо	51,6721°	103,7104°
3k	Байкал, Ф. слой (0–25 м), 3 км по трансекте от устья р. Похабиха	51,6815°	103,7480°

Растворы измерялись в сканирующем режиме с дополнительным заглублением сигналов в 30 раз для изотопов Na₂₃, Al₂₇, Si₂₈, K₃₉ и In₁₁₅ (три 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 азотнокислой среде, S и P в форме серной ортофосфорной кислот соответственно, галогениды – 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 к-нта вариации (RSD %) от величины аналитического сигнала (N, имп./с): $RSD \% = 125,71 \times N^{-0,33103}$, где $N = 20 - 20\,000$ 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 мкг/дм³ – RSD >25 %; 0,001–0,1 мкг/дм³ – RSD 25–10 %; 0,1–1 мкг/дм³ – RSD 10–5 %; >1 мкг/дм³ – 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 формы угольной кислоты ([HCO₃⁻], [CO₃²⁻] и [CO₂]), 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⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, PO₄³⁻. При содержании кремния менее 2 мМоль (56 мг/дм³) полагали, что он находится в

виде ортокремневой кислоты (H_4SiO_4 , слабодиссоциируемой при $\text{pH} < 9$), при более высоких концентрациях – в её полимерных формах, условно, в виде линейного полимера $(\text{H}_2\text{SiO}_3)_n$ [Мышляева, Краснощевков, 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:

$$\bar{\sigma}^* = \frac{\sigma^*}{t^*} = \sqrt{\frac{(\bar{\sigma}_1 \times t_1)^2 + (\bar{\sigma}_2 \times t_2)^2 + (\bar{\sigma}_3 \times t_3)^2}{t^{*2}}}, \quad (2)$$

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:

$$t \pm \sigma^* = \frac{t_1 \times t_2}{t_3} \pm t^* \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{t_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{t_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_3}{t_3}\right)^2} = \frac{t_1 \times t_2}{t_3} \pm t^* \times \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{t_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{t_2^2} + \frac{\sigma_3^2}{t_3^2}}. \quad (3)$$

Относительные ошибки:

$$\bar{\sigma}^* = \frac{\sigma^*}{t^*} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{t_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{t_2^2} + \frac{\sigma_3^2}{t_3^2}}. \quad (4)$$

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. Слюдянки в исследуемый период превышают

установленные нормативы [Приказ..., 2020] по Р (45 ПДК), Mn (4,7 ПДК) и V (2 ПДК) и близки к предельно допустимым концентрациями (ПДК) по Cu (0,9 ПДК), Mo (0,9 ПДК) и Fe (0,8 ПДК).

Концентрации всех информативных химических элементов в сточных водах больше, чем в речных (на участке 100 м выше трубы сброса, табл. 2, рис. 2). Наибольшее различие (> 10 раз), характерно для Р (56 раз), Cl (43), Na (31), Ni (33), Sb (30), Zr (21), K (18), Mn (16), Ga (13), Rb (11) и Cs (11). Общая минерализация сточных вод г. Слюдянки составляла 470 мг/дм^3 , что в 2,35 раза выше, чем в р. Похабиха.

При сравнении геохимического состава речных вод в устье и на участке 100 м выше трубы сброса КОС влияние сточных вод обнаруживается по большинству указанных выше элементов (рис. 2): Р (1,8 раз), Cl (1,7), Na (1,5), Ni (3), Sb (1,3), Zr (1,5), K (1,4), Mn (3,1) и Rb (1,2). Заметное влияние также обнаруживается по Fe (3,5), Li (1,2), В (1,5), Co (1,2), Br (1,2) и Mo (1,1). Относительно высокие степени обогащения речной воды в устье по Mn (3,1) и Fe (3,5) могут быть также связаны с дополнительной мобилизацией этих элементов из заболоченных проток.

Из соотношений концентраций консервативных (не меняющих своей концентрации при прохождении физико-химических и биогеохимических барьеров) и наиболее контрастных (значительно различающихся по концентрации) элементов в сточных водах (C_{ww}), в реке до (C_{riv_up}) и после (C_{riv}) смешения (в устье) можно рассчитать соотношение потоков сточных (F_{ww}) и речных вод (F_{riv_up}):

$$\frac{F_{ww}}{F_{riv_up}} = \frac{C_{riv} - C_{riv_up}}{C_{ww} - C_{riv}}. \quad (5)$$

Принимая условно $F_{riv_up} = 1$, доля сточных вод ($Part_{ww_riv}$) в общем речном стоке определяется формулой

$$Part_{ww_riv} = \frac{F_{ww}}{1 + F_{ww}} = \frac{C_{riv} - C_{riv_up}}{C_{ww} - C_{riv_up}}. \quad (6)$$

Наиболее консервативными элементами для пресноводных экосистем являются Na и Cl, они же в рассматриваемом случае являются и наиболее контрастными (см. выше, а также табл. 2, рис. 2). Расчёт $Part_{ww_riv}$ по Na составляет $1,76 \pm 0,32 \%$, а по Cl – $1,74 \pm 0,26 \%$. Т.е. доля сточных вод КОС г. Слюдянки в общем стоке р. Похабиха на момент исследования в среднем составляет $\sim 1,75 \pm 0,21 \%$.

Важно отметить, что способ определения водных вкладов источников смешения с использованием консервативных контрастных химических элементов имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами, поскольку не требует выполнения сложных и трудоёмких затрат на измерение расходов воды. Кроме того, данный способ позволяет оперативно определить соотношение водных

потоков на момент исследования, а также в сложных условиях, таких как зона смешения в литорали, где использование традиционных методов невозможно.

Влияние источников загрязнения на литораль Байкала определяется вкладами их компонентов, наличием физико-химических и биогеохимических барьеров, а также гидрологических процессами (береговые течения) и погоднo-климатическими факторами (ветровое перемешивание, ледостав, апвеллинг и пр.). По полученным в работе данным мы можем дать оценки степени воздействия источников загрязнения на прибрежные и поверхностные воды литорали на момент исследования в конкретных погоднo-климатических условиях путём сравнения концентраций исследуемых компонентов в источниках загрязнения, связующих водотоках (при их наличии) и в воде Байкала на различном удалении от их выходов. При таком сравнении следует различать влияние на литораль источника загрязнения и влияние самой реки. Большинство притоков Байкала более пресные, по сравнению с водами самого озера, содержат меньшее

количество растворённых веществ и химических элементов, их влияние может выражаться в снижении концентрации компонентов в литоральной зоне по сравнению с фоновыми участками пелагических областей. Так, концентрация Na в устье р. Похабиха даже с учётом вклада сточных вод составляет 2 500 мкг/дм³, что в 1,4 раза ниже, чем в фотическом слое на удалении 3 км от берега (3 500 мкг/дм³, ст. 3k) и в глубинной воде озера (3 400 мкг/дм³), см. табл. 2. Это приводит к тому, что прибрежные воды (~ 1 м от уреза воды) вблизи устья р. Похабиха обеднены этим компонентом: 2 600 мкг/дм³ напротив устья (ст. CW), 3 100 мкг/дм³ – 50 м влево от устья (ст. CW50L) и 3 400 мкг/дм³ – 90 м вправо от устья (ст. CW90R). В последнем случае концентрация Na практически такая же, как на фоновой станции (3 500 мкг/дм³, ст. 3k), что очерчивает зону влияния загрязнённых вод р. Похабиха по Na в прибрежном секторе. На удалении 50 м от уреза на всех станциях этого сектора (ст. 50, 50L и 50R) концентрация Na такая же (в рамках точности определения), как и на фоновой станции.

Таблица 2

Концентрация информативных химических элементов (мкг/дм³) и общая минерализация (ОМ, мг/дм³) в отобранных пробах воды в зоне влияния КОС г. Слюдянки. В скобках указаны ошибки определения (отн. %)

Table 2

Concentration of informative chemical elements (µg/dm³) and total mineralization (ОМ, mg/dm³) in collected water samples in the zone of Slyudyanka City WTF influence. Determination errors are in brackets (rel. %)

Станция	Al	As	B	Ba	Br	Ca	Cl	Co	Cr	Cs	Fe
Riv up	3,6 (5,0)	0,06 (17)	4,8 (5,0)	30 (5,0)	4,4 (6,8)	33 000 (5,0)	1100 (5,0)	0,135 (6,0)	0,30 (9,3)	0,0031 (19)	33 (5,0)
WW	20,0 (5,0)	0,44 (8,6)	40 (5,0)	37 (5,0)	32 (5,0)	51 000 (5,0)	47 000 (5,0)	0,66 (5,0)	0,96 (6,4)	0,033 (8,7)	250 (5,0)
Riv	4,5 (5,0)	0,041 (19)	7,3 (5,0)	31 (5,0)	5,4 (6,4)	34 000 (5,0)	1900 (5,0)	0,157 (5,7)	0,29 (9,5)	0,0026 (20)	117 (5,0)
h	15,3 (5,0)	0,49 (8,3)	11,4 (5,0)	54 (5,0)	13,7 (5,0)	58000 (5,0)	1900 (5,0)	0,29 (5,0)	0,26 (9,8)	0,0036 (18)	35 (5,0)
CW	4,0 (5,0)	0,18 (12)	6,6 (5,0)	22 (5,0)	7,0 (5,9)	27 000 (5,0)	1080 (5,0)	0,122 (6,2)	0,20 (11)	0,0023 (21)	70 (5,0)
CW50L	3,3 (5,0)	0,32 (9,6)	6,0 (5,0)	15,1 (5,0)	8,5 (5,5)	22 000 (5,0)	810 (5,0)	0,096 (6,7)	0,14 (12)	0,0024 (21)	40 (5,0)
CW90R	3,3 (5,0)	0,33 (9,5)	6,1 (5,0)	11,9 (5,0)	8,9 (5,4)	18 700 (5,0)	720 (5,0)	0,082 (7,1)	0,12 (13)	0,0011 (27)	24 (5,0)
50	2,8 (5,0)	0,38 (9,1)	6,4 (5,0)	11,4 (5,0)	9,2 (5,4)	17 500 (5,0)	620 (5,0)	0,071 (7,4)	0,07 (15)	0,0018 (23)	15,2 (5,0)
50L	2,7 (5,0)	0,39 (9,0)	6,2 (5,0)	11,1 (5,0)	9,4 (5,3)	17 200 (5,0)	590 (5,0)	0,070 (7,5)	0,10 (13)	0,0008 (30)	13,4 (5,0)
50R	2,6 (5,0)	0,38 (9,1)	6,4 (5,0)	11,1 (5,0)	9,5 (5,3)	17 400 (5,0)	610 (5,0)	0,065 (7,7)	0,10 (13)	0,0018 (23)	14,2 (5,0)
3k	2,4 (5,0)	0,36 (9,2)	6,3 (5,0)	10,8 (5,0)	9,5 (5,3)	16 600 (5,0)	570 (5,0)	0,065 (7,6)	0,07 (15)	0,0012 (26)	11,0 (4,9)
Станция	Ga	K	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P	Pb	Rb
Riv up	0,0040 (24)	720 (5,0)	0,86 (5,0)	7300 (5,0)	3,0 (5,0)	0,27 (6,9)	1630 (5,0)	0,038 (15)	80 (5,0)	0,052 (8,3)	1,05 (5,0)
WW	0,049 (10)	13 300 (5,0)	4,6 (5,0)	11 900 (5,0)	47 (5,0)	0,90 (5,0)	51 000 (5,0)	1,26 (5,0)	4500 (5,0)	0,17 (5,6)	11,9 (5,0)
Riv	0,004 (23)	980 (5,0)	1,00 (5,0)	7600 (5,0)	9,2 (5,0)	0,30 (6,7)	2500 (5,0)	0,11 (10)	142 (5,0)	0,094 (6,9)	1,27 (5,0)
H	0,012 (16)	1900 (5,0)	2,8 (5,0)	10000 (5,0)	5,9 (5,0)	0,84 (5,0)	4200 (5,0)	0,43 (6,6)	136 (5,0)	0,034 (9,6)	1,69 (5,0)

CW	0,0030 (26)	890 (5,0)	1,47 (5,0)	5800 (5,0)	7,7 (5,0)	0,76 (4,9)	2600 (5,0)	0,18 (8,7)	75 (5,0)	0,041 (9,0)	0,93 (5,0)
CW50L	0,0006 (50)	920 (5,0)	1,83 (5,0)	4400 (5,0)	3,1 (5,0)	1,07 (5,0)	3100 (5,0)	0,15 (9,3)	59 (5,0)	0,042 (9,0)	0,72 (5,0)
CW90R	0,0014 (33)	960 (5,0)	2,0 (5,0)	3700 (5,0)	1,40 (5,0)	1,24 (5,0)	3400 (5,0)	0,17 (8,9)	52 (5,0)	0,036 (9,4)	0,62 (5,0)
50	0,0020 (30)	990 (5,0)	2,2 (5,0)	3400 (5,0)	0,29 (5,0)	1,36 (5,0)	3500 (5,0)	0,21 (8,3)	43 (5,0)	0,040 (9,1)	0,62 (5,0)
50L	0,0007 (42)	980 (5,0)	2,2 (5,0)	3300 (5,0)	0,29 (5,0)	1,32 (5,0)	3500 (5,0)	0,17 (9,0)	48 (5,0)	0,035 (9,5)	0,59 (5,0)
50R	0,0016 (32)	980 (5,0)	2,2 (5,0)	3400 (5,0)	0,37 (5,0)	1,34 (5,0)	3500 (5,0)	0,19 (8,6)	44 (5,0)	0,037 (9,3)	0,59 (5,0)
3k	0,0018 (31)	950 (5,0)	2,2 (5,0)	3200 (5,0)	0,096 (6,2)	1,37 (5,0)	3500 (5,0)	0,29 (7,5)	46 (5,0)	0,012 (13)	0,57 (5,0)
Станция	S	Sb	Si	Sr	Ti	U	V	W	Zn	Zr	OM
Riv up	3900 (5,0)	0,009 (22)	6000 (5,0)	127 (5,0)	0,40 (11)	0,28 (5,0)	0,61 (5,0)	0,016 (15)	1,13 (5,8)	0,006 (19)	200 (3,2)
WW	13 500 (5,0)	0,27 (7,0)	9100 (5,0)	145 (5,0)	2,2 (6,1)	0,57 (5,0)	2,0 (5,0)	0,023 (13)	5,0 (5,0)	0,127 (6,9)	470 (2,2)
Riv	4000 (5,0)	0,012 (20)	5900 (5,0)	131 (5,0)	0,38 (11)	0,28 (5,0)	0,60 (5,0)	0,017 (15)	1,10 (5,9)	0,009 (16)	210 (3,1)
h	4200 (5,0)	0,10 (9,7)	5900 (5,0)	290 (5,0)	0,90 (8,1)	1,43 (5,0)	0,93 (5,0)	0,044 (11)	0,70 (6,9)	0,016 (14)	330 (3,4)
CW	3000 (5,0)	0,020 (17)	3500 (5,0)	123 (5,0)	0,37 (11)	0,39 (5,0)	0,50 (5,0)	0,028 (13)	1,43 (5,4)	0,0022 (27)	160 (3,2)
CW50L	2800 (5,0)	0,027 (15)	1680 (5,0)	116 (5,0)	0,29 (12)	0,47 (5,0)	0,45 (5,0)	0,039 (11)	1,08 (5,9)	0,0017 (29)	130 (3,2)
CW90R	2700 (5,0)	0,039 (13)	780 (5,0)	112 (5,0)	0,24 (13)	0,51 (5,0)	0,43 (5,0)	0,044 (11)	1,36 (5,5)	0,0009 (36)	110 (3,1)
50	2400 (5,0)	0,028 (15)	550 (5,0)	112 (5,0)	0,21 (13)	0,54 (5,0)	0,39 (5,0)	0,049 (10)	1,80 (5,0)	0,0013 (31)	110 (3,1)
50L	2500 (5,0)	0,028 (15)	510 (5,0)	111 (5,0)	0,18 (14)	0,54 (5,0)	0,41 (5,0)	0,045 (11)	1,46 (5,4)	0,0012 (33)	100 (3,1)
50R	2200 (5,0)	0,039 (13)	600 (5,0)	112 (5,0)	0,23 (13)	0,55 (5,0)	0,40 (5,0)	0,046 (11)	1,80 (5,0)	0,0018 (28)	110 (3,2)
3k	2700 (5,0)	0,061 (11)	690 (5,0)	110 (5,0)	0,20 (13)	0,53 (5,0)	0,38 (5,0)	0,053 (10)	1,76 (5,0)	0,0028 (24)	100 (3,1)

Картина влияния р. Похабиха по Cl аналогичная Na, но более чёткая за счёт большего и обратного контраста по соотношению концентраций Cl в устье реки (1 900 мкг/дм³) и на фоновой станции (570 мкг/дм³) – различие в 3,3 раза (см. табл. 2, рис. 2). Воды прибрежного сектора литорали обогащены Cl относительно фоновой станции в 1,3–1,9 раза (рис. 2). Так же как и по Na, наиболее сильное влияние испытывает прибрежная вода напротив устья реки (1,9 раз, ст. CW), в меньшей степени в 50 м влево от устья (1,4 раза, ст. CW50L) и в 90 м вправо от устья (1,3 раза ст. CW90R). То есть в отличие от Na, влияние по Cl в прибрежном секторе не ограничивается 90-метровой зоной. Небольшая степень обогащения Cl поверхностной воды в секторе 50 м от уреза (1,04–1,09 раза) не является статистически значимой (пересечение доверительных интервалов концентраций, табл. 2, рис. 2), т.е. достоверно не обнаруживается.

Распространяя данную логику рассуждений на другие информативные химические элементы, можно составить «тепловую карту» геохимических различий объектов, окрашивая ранги различий (диапазоны

отношений концентраций элементов) в условные цвета (рис. 2). При этом ранги различий менее ± 10 % интерпретируются как малозначимые или не достоверные (перекрывание доверительных интервалов) и не окрашены. Тепловая карта геохимических различий ранжирована по убыванию рангов воды в устье р. Похабиха относительно фоновой станции (ст. 3к). Из рис. 2 следует, что в целом чем сильнее различие по концентрации элемента в устье реки и в воде фоновой станции (высокие и низкие ранги), тем большее влияние по данному элементу обнаруживается в прибрежной зоне напротив устья, что вполне ожидаемо. По мере удаления от устья в латеральном направлении эта закономерность становится менее выраженной, а во фронтальном направлении в секторе 50 м от уреза исчезает.

В прибрежной зоне влияние р. Похабиха обнаруживается по большинству рассматриваемых элементов (Mn, Fe, Si, Pb, Cr, Cl, P, Ba, Co, Mg, Rb, Ga, Cs, OM, Ca, Ti, Al, V, S, Sr, Na, Zn, Br, U, Li, Ni, W, Mo, Sb, As) за исключением Zr, В и К. В первом случае концентрация Zr в прибрежных водах сильно низка (1–2 нг/дм³) для

надёжного сопоставления, а в двух последних случаях это связано с исходно слабыми рангами бора (1,16) и калия (1,03) в устье р. Похабиха. При латеральном удалении от устья влияние речных вод пропадает по Ga, S, Sr и As в 50 м влево от устья и дополнительно по Rb, Cs, Ti, Na, Br, U и Li в 90 м вправо от устья. Больше всего влияние в прибрежной зоне проявляется по элементам, имеющим наиболее сильные (высокие и низкие) ранги – Mn, Fe, Si, P, Mo и As.

В секторе 50 м от уреза влияние р. Похабиха формально обнаруживается по восьми элементам (Mn,

Fe, Pb, Cr, Al, Zn, Ni и Sb, рис. 2). В случае с Mn и Fe, это связано с их исходно высокими рангами геохимических различий в устье реки: Mn (96), Fe (11). Al и Cr, вероятно, дополнительно поступают в литоральную зону за счёт береговой абразии в виде тонкодисперсной взвеси.

Pb, возможно, имеет также и другие источники поступления (площадной смыв, дренаж интерстициальных вод). Наличие таких источников, очевидно, будет искажать картину влияния самой реки (её поверхностного стока).

WW *	WW **	Riv **	h *	Riv *	Элемент	CW *	CW 50L*	CW 90R*	50*	50L*	50R*
						Прибрежная зона			Сектор ~ 50 м от уреза		
490	16	3,1	61	96	Mn	80	32	15	3,0	3,0	3,9
23	7,6	3,5	3,2	11	Fe	6,4	3,6	2,2	1,4	1,2	1,3
13	1,5	0,98	8,6	8,6	Si	5,1	2,4	1,1	0,80	0,74	0,87
14	3,3	1,8	2,8	7,8	Pb	3,4	3,5	3,0	3,3	2,9	3,1
14	3,2	0,97	3,7	4,1	Cr	2,9	2,0	1,7	1,00	1,4	1,4
82	43	1,7	3,3	3,3	Cl	1,9	1,4	1,3	1,09	1,04	1,07
45	21	1,5	5,7	3,2	Zr	0,79	0,61	0,32	0,46	0,43	0,64
98	56	1,8	3,0	3,1	P	1,6	1,28	1,13	0,93	1,04	0,96
3,4	1,23	1,03	5,0	2,9	Ba	2,0	1,40	1,10	1,06	1,03	1,03
10	4,9	1,16	4,5	2,4	Co	1,9	1,48	1,3	1,09	1,08	1,00
3,7	1,6	1,04	3,1	2,4	Mg	1,8	1,38	1,16	1,06	1,03	1,06
21	11	1,2	3,0	2,2	Rb	1,6	1,26	1,09	1,09	1,04	1,04
27	12	1,00	6,7	2,2	Ga	1,7	0,33	0,78	1,11	0,39	0,89
28	11	0,84	3,0	2,2	Cs	1,9	2,0	0,92	1,50	0,67	1,50
4,7	2,4	1,05	3,3	2,1	OM	1,6	1,30	1,10	1,10	1,00	1,10
3,1	1,5	1,03	3,5	2,0	Ca	1,6	1,33	1,13	1,05	1,04	1,05
11	5,5	0,95	4,5	1,9	Ti	1,9	1,45	1,20	1,05	0,90	1,15
8,3	5,6	1,3	6,4	1,9	Al	1,7	1,38	1,4	1,17	1,13	1,08
5,3	3,3	0,98	2,4	1,6	V	1,3	1,18	1,13	1,03	1,08	1,05
5,0	3,5	1,03	1,6	1,5	S	1,11	1,04	1,00	0,89	0,93	0,81
1,3	1,14	1,03	2,6	1,19	Sr	1,12	1,05	1,02	1,02	1,01	1,02
6,3	8,3	1,5	1,8	1,16	B	1,05	0,95	0,97	1,02	0,98	1,02
14	18	1,4	2,0	1,03	K	0,94	0,97	1,01	1,04	1,03	1,03
15	31	1,5	1,2	0,71	Na	0,74	0,89	0,97	1,00	1,00	1,00
2,8	4,4	0,97	0,40	0,63	Zn	0,81	0,61	0,77	1,02	0,83	1,02
3,4	7,3	1,2	1,4	0,57	Br	0,74	0,89	0,94	0,97	0,99	1,00
1,08	2,0	1,00	2,7	0,53	U	0,74	0,89	0,96	1,02	1,02	1,04
2,1	5,3	1,2	1,3	0,45	Li	0,67	0,83	0,91	1,00	1,00	1,00
4,3	33	2,9	1,5	0,38	Ni	0,62	0,52	0,59	0,72	0,59	0,66
0,43	1,4	1,06	0,83	0,32	W	0,53	0,74	0,83	0,92	0,85	0,87
0,66	3,3	1,1	0,61	0,22	Mo	0,55	0,78	0,91	0,99	0,96	0,98
4,4	30	1,3	1,6	0,20	Sb	0,33	0,44	0,64	0,46	0,46	0,64
1,2	7,3	0,68	1,4	0,11	As	0,50	0,89	0,92	1,06	1,08	1,06

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 (перекрывание доверительных интервалов)
(7*) 0,91-1,1 раз – нет достоверных отличий	

Рис. 2. Тепловая карта геохимических различий (в размах) сточных, речных, интерстициальных и поверхностных вод литорали в зоне влияния р. Похабиха

* – относительно фотического слоя в 3 км от уреза, ** – относительно р. Похабиха выше сброса сточных вод, OM – общая минерализация

Fig. 2. Heat map of geochemical differences (in times) of waste, riverine, interstitial and surface waters of littoral in the Pokhabikha River influence zone

* – relative to photic layer in 3 km from water cut, ** – relative to the Pokhabikha River above the waste waters discharge, OM – total mineralization

Другой причиной такого искажения могут быть противоположные процессы – утилизация элементов из водного тела, как это видно на примере Ni и Sb, влияние по которым кажущееся. Эти элементы с довольно низкими исходными рангами в устье реки имеют аномалии их понижения в секторе 50 м от уреза, по сравнению с другими элементами низкого ранга (W, Mo, As). Другим примером может быть Si, который имеет высокий исходный ранг ($Riv^* = 8,6$). Прибрежные воды заметно обогащены Si относительно фотического слоя на фоновой станции (в 1,1–5,1 раза), в то время как поверхностные воды в секторе 50 м от уреза им обеднены (их ранги = 0,74–0,78, см. рис. 2), что свидетельствует об активной биологической утилизации кремния в этом секторе.

Из-за наличия дамбы в устье р. Похабиха интерстициальная вода отбиралась ближе к речному берегу, поэтому она должна иметь большее сходство с речной водой, нежели с прибрежной. При сравнении геохимических составов h^* и Riv^* (см. табл. 2, рис. 2) видно, что содержание главных гидрохимических элементов, находящихся в анионной форме (S, Cl, Si), а также P в интерстициальной и в речной воде практически одинаковое. Концентрация Cr, Mn, Zn, Pb и Fe в интерстициальной воде меньше, чем в речной, что, вероятно, обусловлено процессами фильтрации и сорбции органо-минеральных коллоидов на частицах горных пород в окислительной среде. Однако при взаимодействии воды с горными породами происходит обратный процесс обогащения водной среды большинством элементов. Кроме физико-химических процессов этому могут активно способствовать биологические процессы и наличие органических кислот в грунте. В наибольшей степени интерстициальная вода обогащена относительно речной типичными диагенетическими элементами (в размах) – As (12) и Sb (8), относительно высокие степени обогащения характерны также для U (5), Ni (3,9), Al (3,4) и Ga (3). Обогащение главными гидрохимическими металлами также довольно заметное: K (1,9), Ca (1,7), Na (1,7), Mg (1,3). В результате общая минерализация интерстициальной воды в 1,6 раза выше речной.

Используя логику формул (5) и (6), можно вычислить долю речных вод (загрязнённых речных вод в случае р. Похабиха) на различных участках литорали при смешении с байкальской водой ($Part_{riv_lit}$), аналогично тому, как это делалось для сточных вод при смешении с речными (см. (6)):

$$Part_{riv_lit} = \frac{C_{lit} - C_{bw}}{C_{riv} - C_{bw}}, \quad (7)$$

где C_{lit} – концентрация элемента в воде литорали на исследуемой станции, C_{bw} – концентрация элемента в байкальской воде в фотическом слое на фоновой станции, C_{riv} – концентрация элемента в речной воде в устье.

Для этого используем концентрации наиболее контрастных консервативных элементов в системе р. Похабиха (устье) – фотический слой на фоновой станции (ст. 3к в 3 км от уреза). Для этой системы наиболее контрастными среди консервативных элементов являются Cl, Ba, Mg, Ca, Li и Mo (рис. 2). Результаты расчётов представлены в табл. 3, из которых следует, что доля загрязнённых вод р. Похабиха в прибрежной зоне максимальна напротив устья (55 % в среднем) и уменьшается с расстоянием – 26 % в 50 м влево от устья и 11 % в 90 м вправо от устья. В секторе ~ 50 м от уреза доля речных вод составляет ~2–3 %.

Перемножив полученные доли загрязнённых речных вод в литорали $Part_{riv_lit}$ на долю сточных вод в общем речном стоке ($Part_{ww_riv} \sim 1,75\%$, см. выше), можно определить долю сточных вод в воде литорали ($Part_{ww_lit}$):

$$Part_{ww_lit} = Part_{riv_lit} \times Part_{ww_riv}. \quad (8)$$

Согласно расчётам, доля сточных вод в среднем составляет в прибрежной зоне 0,97–0,20 %, а в секторе 50 м от уреза 0,04–0,05 % (см. табл. 3).

Водный вклад, определяемый по (6), является обратной величиной n – кратности общего разбавления сточных вод в водотоке, расчет которой является стандартной задачей при определении нормативов допустимых сбросов (НДС) загрязняющих веществ в водные объекты [Приказ... № 1118, 2020]. Однако при кажущейся простоте пересчетов n в водные вклады, инструментария [Приказ... № 1118, 2020] недостаточно, чтобы решать обратные задачи для сложных объектов, где имеются несколько источников с исходно разными фоновыми составами (речные и озерные), таких как литораль озера в зоне влияния загрязнённых речных вод. В этом случае необходимо пользоваться логикой формул (7) и (8). Использование же нашей модифицированной формулы (6) в выражениях (3), (25) и (39) Методики НДС [Приказ... № 1118, 2020] позволяет оценить во сколько раз надо разбавить стоки, чтобы достичь целевых показателей (ПДК) в контролируемых створах. Причем эта задача решается только для простых случаев «стоки–водоем», где имеется один тип условно фоновых вод водоема-приемника. Мы же решаем обратную задачу – оцениваем степень влияния источника (или же одновременно нескольких источников) по факту, «как есть», без каких либо условностей (ПДК, временных расходов, кратности начального разбавления и пр.) на момент исследования, как по его водному вкладу, так и по его отдельным компонентам.

Очевидно, что геохимические вклады ($ГХВ$) по отдельным компонентам сточных вод могут быть как больше, так и меньше, чем доля сточных вод в целом. Это зависит от степени загрязнённости сточных вод относительно объектов смешения:

$$Part_E_ww_riv = Part_ww_riv \times C_ww / C_riv, \quad (9)$$

где $Part_E_ww_riv$ – доля элемента сточных вод E_ww от общего содержания элемента E_riv в реке после смешения (в устье).

$$Part_E_ww_lit = Part_ww_lit \times C_ww / C_lit, \quad (10)$$

где $Part_E_ww_lit$ – доля элемента сточных вод E_ww от общего содержания элемента E_lit в воде литорали.

Таблица 3

Доли загрязнённых вод р. Похабиха на различных участках литорали при смешении с байкальскими водами (фотический слой на фоновой станции в 3 км от уреза), рассчитанные по наиболее контрастным и консервативным элементам, а также средние доли сточных вод КОС г. Слюдянки на различных участках литорали

Table 3

Fractions of the Pokhabikha River polluted waters at different littoral sites at mixing with Baikalian waters (photic layer on the background station in 3 km from water cut) calculated by most contrast and conservative elements as well as average fractions of WTF waste waters from Slyudyanka City at different littoral sites

Параметр	FC*	CW	CW50L	CW90R	50	50L	50R
		Прибрежная зона			Сектор ~ 50 м от уреза		
Доля р. Похабиха, расчёт по Cl, %	3,3	38	18	11	3,8	1,5	3,0
Доля р. Похабиха, расчёт по Ba, %	2,9	55	21	5,4	3,0	1,5	1,5
Доля р. Похабиха, расчёт по Mg, %	2,4	59	27	11	4,5	2,3	4,5
Доля р. Похабиха, расчёт по Ca, %	2,0	60	31	12	5,2	3,4	4,6
Доля р. Похабиха, расчёт по Li, %	2,2**	61	31	17	0	0	0
Доля р. Похабиха, расчёт по Mo, %	4,6**	57	28	12	0,93	4,7	2,8
Средняя доля р. Похабиха ($Part_riv_lit$), %		55	26	11	2,9	2,2	2,7
Error_Part_riv_lit, ± отн. % ***		6,9	12	27	104	134	110
Средняя доля сточных вод г. Слюдянки ($Part_ww_lit$), %		0,97	0,46	0,20	0,05	0,04	0,05
Error_Part_ww_lit, ± отн. % ***		14	17	29	105	135	110

Примечания: FC = C_riv / C_bw – фактор контрастности; ** – для $C_riv / C_bw < 1$ значения взяты с обратным знаком; *** – ошибка определения средних величин (отн. %).

Note: FC = C_riv / C_bw – Factor of contrast; ** – for $C_riv / C_bw < 1$ the values are taken with reversed sign; *** – error of average values determination (rel. %).

Следует заметить, что геохимические вклады сточных вод в состав воды литорали Байкала могут быть точно рассчитаны только при учёте всех источников, влияющих на литораль, а также при условии консервативного смешения элементов. При существенном влиянии других вероятных источников поступления элементов (субаквальная разгрузка подземных вод, береговое влияние, локальное антропогенное загрязнение) требуется модификация формул (7), (8) и (10). В нашем случае мы не имеем информации о других источниках и в первом приближении полагаем, что они не оказывают существенного влияния на литораль. В любом случае неконсервативное поведение (утилизация, ремобилизация) некоторых элементов будет приводить к неверным оценкам их вкладов, если в качестве C_lit брать их измеренные концентрации. Поэтому необходимо использовать расчётные значения C_lit' , исходя из водных вкладов источников смешения, полученных на предыдущем этапе (7), и их геохимических составах:

$$C_lit' = Part_riv_lit \times C_riv + Part_bw_lit \times C_bw, \quad (11)$$

$$Part_bw_lit = (1 - Part_riv_lit) \times C_bw, \quad (12)$$

где $Part_bw_lit$ – водный вклад байкальских вод в литорали.

Геохимические вклады сточных вод г. Слюдянки в состав р. Похабиха и в состав прибрежных и поверхностных вод литорали Байкала в зоне влияния р. Похабиха, рассчитанные по (9) и (10) с учётом (11), представлены на рис. 3 в виде тепловой карты и ранжированы по убыванию в секторе ~ 50 м от уреза.

Из полученных данных следует, что максимальное влияние сточных вод на р. Похабиха проявляется по Р (56 %), рангом ниже по Cl (43 %), Sb (39 %) и Na (36 %), затем по Zr (25 %), K (24 %), Cs (22 %), Ga (20 %) и Ni (20 %), потом по As (19 %), Rb (16 %), Br (10 %) и Ti (10 %). Вклады по остальным элементам составляют менее 10 %.

В прибрежной зоне литорали Байкала наибольшее влияние сточных вод проявляется по Р (16–44 %) и Cl (13–35 %). Далее следуют Zr (7–20 %), Na (3–17 %), Cs (5–16 %), Ga (5–16 %), K (3–13 %) и Rb (4–12 %). Вклады по остальным элементам составляют менее 10 %.

Зона	Устье	Прибрежная зона			Сектор ~ 50 м от уреза		
Станция	Riv	CW	CW 50L	CW 90R	50	50L	50R
Ошибка ГХВ ± отн. %	12-28	15-26	19-30	36-45	133-138	168-190	140-156
Part_ww, %	1,75	0,97	0,46	0,20	0,05	0,04	0,05
Mn	9,0	8,9	8,7	8,3	6,6	6,1	6,5
P	56	44	29	16	4,7	3,7	4,4
Cl	43	35	23	13	3,9	3,1	3,7
Zr	25	20	13	7,3	2,2	1,7	2,1
Cs	22	16	9,6	4,9	1,35	1,05	1,28
Ga	21	16	9,4	4,8	1,33	1,04	1,26
Rb	16	12	7,2	3,7	1,02	0,79	0,97
Fe	3,7	3,5	3,0	2,2	0,90	0,73	0,86
Na	36	17	7,2	3,0	0,75	0,57	0,71
K	24	13	6,3	2,8	0,71	0,55	0,67
Cr	5,8	4,8	3,4	2,0	0,64	0,50	0,61
Pb	3,2	2,9	2,3	1,6	0,60	0,48	0,57
Si	2,7	2,5	2,0	1,4	0,55	0,44	0,52
Ti	10	7,1	4,1	2,0	0,54	0,42	0,52
Co	7,4	5,5	3,4	1,8	0,50	0,38	0,47
Al	7,8	5,4	3,1	1,5	0,41	0,32	0,39
B	9,6	5,6	2,8	1,3	0,32	0,25	0,30
V	5,8	3,9	2,1	0,99	0,26	0,20	0,25
S	5,9	3,8	2,0	0,95	0,25	0,19	0,24
OM	3,9	2,8	1,7	0,84	0,23	0,18	0,22
Sb	39	7,7	2,6	1,0	0,23	0,18	0,22
Ni	20	6,4	2,4	0,9	0,22	0,17	0,21
Mg	2,7	2,0	1,3	0,65	0,18	0,14	0,17
Br	10	4,3	1,7	0,71	0,17	0,13	0,16
Ba	2,1	1,6	1,1	0,57	0,17	0,13	0,16
Ca	2,6	1,9	1,1	0,55	0,15	0,12	0,14
Zn	8,0	3,5	1,4	0,60	0,15	0,11	0,14
Li	8,1	2,9	1,1	0,45	0,11	0,08	0,10
Sr	1,9	1,2	0,57	0,26	0,07	0,05	0,06
As	19	2,3	0,73	0,27	0,06	0,05	0,06
U	3,6	1,4	0,56	0,23	0,06	0,04	0,05
Mo	5,3	1,1	0,38	0,15	0,03	0,03	0,03
W	2,4	0,67	0,24	0,09	0,02	0,02	0,02
СГХВ, %	440	263	157	86	29	24	28
Ошибка СГХВ, ± отн. %	4,3	4,8	6,2	11	46	61	49
СГХВ Пр. № 83, %	348	216	130	71	25	20	24
Ошибка СГХВ Пр. № 83, ± отн. %	4,1	5,1	6,8	13	52	69	55

ГХВ сточных вод	
> 50 %	1-2 %
30-50 %	0,5-1 %
20-30 %	0,3-0,5 %
10-20 %	0,2-0,3 %
5-10 %	0,1-0,2 %
3-5 %	0,01-0,1 %
2-3 %	< 0,01 %

Рис. 3. Тепловая карта геохимических вкладов (ГХВ, %) загрязняющих компонентов сточных вод г. Слюдянки в состав р. Похабиха и в состав воды литорали оз. Байкал в зоне влияния р. Похабиха 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]. OM – общая минерализация

Fig. 3. Heat map of geochemical contributions (ГХВ, %) of polluting components of waste waters from Slyudyanka City into the water composition of the Pokhabikha River and into the water composition of Lake Baikal littoral in the zone of influence of the Pokhabikha River compared to aquatic contributions of waste waters (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

В секторе ~ 50 м от уреза в литорали Байкала наибольшее влияние сточных вод проявляется по Mn (~ 6–7 %), рангом ниже по P (~ 4–5 %) и Cl (~ 3–4 %), затем по Zr (~ 2 %), Cs (1–1,4 %), Ga (1–1,3 %) и Rb (~ 1 %). Вклады по остальным элементам составляют менее 1 %. Следует заметить, что вследствие сильного разбавления сточных вод ошибки определения их водных и геохимических вкладов (см. рис. 3) в секторе

~ 50 м от уреза довольно большие (> 104–135 %), что снижает точность полученных оценок.

Для оценки степени антропогенной нагрузки от точечных источников загрязнения, полученные нами геохимические вклады сточных вод по отдельным элементам, могут быть приведены к нормированным нагрузкам (НН), предложенным в работах [Селезнева и др. 2019; Селезнёв, 2021]. По физическому смыслу

HH – это отношение количества вещества, поступающего со сточными водами, к количеству данного вещества, поступающего с фоновыми водами водосбора. В ходе выполнения НИР по бюджетным проектам нами ранее было установлено, что селитебная территория г. Слюдянка не оказывает влияния на геохимический состав р. Похабиха, поэтому для нее фоновыми можно принять воды выше сброса сточных вод КОС г. Слюдянка. Для оз. Байкал фоновыми водами водосбора являются сами воды озера на фоновых участках, достаточно удалённых от берега. В первом приближении те же воды можно принять за фоновые для литоральной зоны Байкала. Таким образом, HH по элементу E в наших обозначениях выглядит следующим образом.

Для р. Похабиха:

$$HH_{E_riv} = \frac{Part_ww_riv}{1 - Part_ww_riv} \times \frac{C_ww}{C_riv_up}, \quad (13)$$

для литорали Байкала:

$$HH_{E_lit} = \frac{Part_ww_lit}{1 - Part_riv_lit} \times \frac{C_ww}{C_bw}. \quad (14)$$

Нормированные нагрузки (в %), полученные по формулам (13) и (14) представлены на рис. 4 в виде тепловой карты и ранжированы в той же последовательности, что и GXB на рис. 3. Видно, что HH во всех случаях выше, чем геохимические вклады, что логично следует из определения понятия HH . При этом различия между HH и геохимическими вкладами для разных объектов смешения и элементов непропорциональны.

В работах [Селезнева и др. 2019; Селезнёв, 2021] для оценки и сравнения по степени антропогенного воздействия разных водных объектов и (или) их участков предлагается также использовать суммарную нормированную нагрузку (CHH), которая является суммой HH по нормируемым загрязняющим веществам. В нашем случае, согласно приказу № 83 Минприроды [Приказ..., 2020], такими веществами являются все элементы, указанные на рис. 4, за исключением, Zr, Ga, Si, OM, Sb и U. Из полученных данных следует (рис. 4), что наибольшее антропогенное влияние испытывает прибрежная зона Байкала в месте впадения речных вод (ст. CW), которая характеризуется $CHH = 1\,870\%$. По мере удаления от устья суммарная антропогенная нормированная геохимическая нагрузка на литораль ослабевает. В прибрежной зоне на ст. CW50L и ст. CW90R CHH составляет 538 и 198 % соответственно, а в секторе ~ 50 м от уреза находится в пределах 35–45 %. В литорали Байкала основной вклад в CHH вносят Mn, P, Cl и Cs (рис. 4), которые в сумме составляют ~80 % от величины CHH . Из них на долю Mn приходится 56 %, P – 11 %, Cl – 9,5 % и Cs – 3,2 %.

Величина CHH для р. Похабиха (534 %) сопоставима со ст. CW50L в прибрежной зоне литорали Бай-

кала, однако набор элементов, по которым наблюдаются основные антропогенные нагрузки, заметно отличается вследствие геохимических различий фоновых речных и байкальских вод (% от CHH): P (19), Cl (14), Ni (11), Na (10), K (6,2), Mn (5,2), Rb (3,8), Cs (3,6), B (2,8), Fe (2,5), As (2,5) и Br (2,4).

Аналогично понятию CHH , в нашем случае мы можем ввести понятие суммарного геохимического вклада ($CGXB$), интегральный показатель, который является суммой полученных геохимических вкладов (GXB) по каждому компоненту. Из сопоставления с CHH видно (ср. рис. 3 и 4), что $CGXB$ по абсолютным значениям меньше CHH и закономерно падает с уменьшением водного вклада сточных вод ($Part_ww$). Наибольший $CGXB$ от сточных вод испытывает р. Похабиха. По элементам, нормируемым Приказом № 83 Минприроды [Приказ..., 2020], он равен 348 %, затем следует прибрежная зона: CW – 216 %, CW50L – 130 %, CW90R – 71 %. В секторе ~ 50 м от уреза $CGXB$ составляет 20–25 %, что весьма ощутимо, несмотря на очень низкий водный вклад сточных вод ($Part_ww = 0,04–0,05\%$). Очевидно, что при таких больших степенях разбавления рассматриваемые характеристики определяются с достаточно большой ошибкой $Part_ww$ – 105–135 отн. % (табл. 3), $CGXB$ – 52–69 отн. % (рис. 3), и для сектора ~ 50 м от уреза их следует принимать с осторожностью.

Какой из двух способов оценки степени влияния источников загрязнения – предлагаемый нами «геохимический метод» (GXB , $CGXB$) или «нормированные нагрузки» (HH и CHH) более правильный – вопрос дискуссионный и зависит от контекста исследования. По нашему мнению, для оценки степени воздействия точечных источников загрязнения в последовательном ряду разнотипных водоёмов (река, озеро и пр.) лучше использовать GXB , $CGXB$, которые более просты для восприятия. Для оценки антропогенной нагрузки на конкретный участок водоёма, возможно, «нормированные нагрузки» – более правильный способ, однако здесь могут возникать сложности с выбором фоновых вод водосбора. Например, в нашем случае трудно определить, какие фоновые воды лучше использовать для активной зоны смешения речных и байкальских вод в литорали (особенно в прибрежной зоне). По-видимому, надо использовать их смесь в разной пропорции для разных участков, что затрудняет расчёты.

Трудности метода «нормированных нагрузок» и других им подобных состоят также в сложности учёта поступления объёмов загрязнённых стоков и условно чистых вод, информацию о которых, как правило, берут из официальных источников (Федеральное агентство водных ресурсов), куда она поступает от крупных водопользователей и служб Росгидромета.

Детальность и достоверность данной информации оценки, особенно при исследовании небольших водоемов или их участков.

Зона	Устье	Прибрежная зона			Сектор ~ 50 м от уреза		
Станция	Riv	CW	CW 50L	CW 90R	50	50L	50R
Ошибка $HH \pm$ отн. %	12-28	14-35	17-37	30-44	105-110	135-138	110-115
Part_ww, %	1,75	0,97	0,46	0,20	0,05	0,04	0,05
Mn	28	1052	303	111	26	20	24
P	100	210	61	22	5,1	3,9	4,8
Cl	76	177	51	19	4,3	3,3	4,1
Zr	38	97	28	10	2,4	1,81	2,2
Cs	19	59	17	6,3	1,44	1,10	1,36
Ga	22	59	17	6,2	1,42	1,09	1,34
Rb	20	45	13	4,8	1,09	0,83	1,03
Fe	14	49	14	5,2	1,19	0,91	1,12
Na	56	31	9,0	3,3	0,76	0,58	0,72
K	33	30	8,7	3,2	0,73	0,56	0,69
Cr	5,7	29	8,5	3,1	0,72	0,55	0,68
Pb	5,8	30	8,8	3,2	0,74	0,57	0,70
Si	2,7	28	8,2	3,0	0,69	0,53	0,65
Ti	9,8	24	6,8	2,5	0,58	0,44	0,54
Co	8,7	22	6,3	2,3	0,53	0,41	0,50
Al	9,9	18	5,2	1,90	0,44	0,33	0,41
B	15	14	3,9	1,45	0,33	0,25	0,31
V	5,8	11	3,3	1,20	0,28	0,21	0,26
S	6,2	11	3,1	1,14	0,26	0,20	0,25
OM	4,2	10	2,9	1,07	0,25	0,19	0,23
Sb	54	9,5	2,7	1,01	0,23	0,18	0,22
Ni	59	9,3	2,7	0,99	0,23	0,17	0,21
Mg	2,9	8,0	2,3	0,85	0,19	0,15	0,18
Br	13	7,2	2,1	0,77	0,18	0,13	0,17
Ba	2,2	7,4	2,1	0,78	0,18	0,14	0,17
Ca	2,8	6,6	1,90	0,70	0,16	0,12	0,15
Zn	7,9	6,1	1,76	0,65	0,15	0,11	0,14
Li	9,5	4,5	1,29	0,48	0,11	0,08	0,10
Sr	2,0	2,8	0,82	0,30	0,07	0,05	0,07
As	13	2,6	0,76	0,28	0,06	0,05	0,06
U	3,6	2,3	0,67	0,24	0,06	0,04	0,05
Mo	5,9	1,41	0,41	0,15	0,03	0,03	0,03
W	2,6	0,93	0,27	0,10	0,02	0,02	0,02
CHH, %	653	2066	595	219	50	38	47
Ошибка $CHH, \pm$ отн. %	4,6	8,5	10	16	56	72	59
CHH Пр. № 83, %	534	1870	538	198	45	35	43
Ошибка CHH Пр. № 83, $\pm$ отн. %	4,5	9,2	11	18	61	79	65

HH сточных вод	
> 50 %	1-2 %
30-50 %	0,5-1 %
20-30 %	0,3-0,5 %
10-20 %	0,2-0,3 %
5-10 %	0,1-0,2 %
3-5 %	0,01-0,1 %
2-3 %	< 0,01 %

Рис. 4. Тепловая карта нормированных нагрузок (HH , в %, по [Селезнева и др., 2019; Селезнев, 2021]) загрязняющих компонентов сточных вод г. Слюдянки на р. Похабиха и на воды литорали оз. Байкал в зоне влияния р. Похабиха в сопоставлении с водными вкладами сточных вод ($Part_{ww}$)

CHH – суммарные нормированные нагрузки по всем компонентам, CHH Пр. № 83 – суммарные нормированные нагрузки по элементам, нормируемым Приказом № 83 Минприроды [Приказ..., 2020]. OM – общая минерализация

Fig. 4. Heat map of normalized charges (HH , in %, by [Selezneva et al., 2019; Seleznev, 2021]) of polluting components of waste waters from Slyudyanka City into the water composition of the Pokhabikha River and into the water composition of Lake Baikal littoral in the zone of influence of the Pokhabikha River compared to aquatic contributions of waste waters ($Part_{ww}$)

CHH – summary normalized charges by all components, CHH Пр. № 83 – summary normalized charges by elements according to the Order No 83 of Ministry of Natural Resources [Order..., 2020]. OM – total mineralization

Важное преимущество предлагаемого нами «геохимического метода» состоит в том, что он позволяет надежно, дешево и просто определить водные вклады источников на каждом этапе смешения в любых

сложных объектах (см. (5)–(8)) на момент исследования, что невозможно сделать, опираясь на официальные справочные данные и (или) при использовании традиционных методов измерения расходов воды.

На следующем этапе информация о водных вкладах позволяет легко рассчитать геохимические вклады от источников загрязнения в исследуемые водные объекты. Очевидно, что при совместном определении других загрязняющих веществ в источниках и объектах смешения, данный метод позволяет рассчитать и их вклады. В такой модификации «геохимический метод» становится универсальным и может быть использован для оценки степени влияния источников загрязнения водных объектов по любым интересующим поллютантам.

Очевидно, что чем больше элементов берётся для оценки *СНН* и *СГХВ*, тем больше будет её величина, поэтому при сопоставлении степени антропогенной нагрузки различных водных объектов и (или) их участков необходимо придерживаться одного и того же набора элементов. Нам кажется, что для более достоверной оценки степени влияния загрязняющих источников необходимо использовать весь набор имеющихся компонентов, а не только те, что указаны в нормативных документах.

Такие количественные оценки являются лишь первым шагом для оценки степени воздействия источников загрязнения на водные объекты, поскольку реакция гидробионтов на химический и геохимический состав воды очень сложна и неоднозначна. Для получения более достоверной картины необходимо проводить биогеохимические исследования различных групп водной флоры и фауны, которые различаются по толерантности к поллютантам и степени их накопления, изучать их количественный и качественный таксономический состав, проводить биотестирование качества вод с использованием различных типов биосенсоров и групп тестовых организмов. В некоторых случаях необходимо также изучать геохимический состав донных отложений и подвижность в них химических элементов.

Заключение

Разработан геохимический метод для оценки степени влияния локальных источников загрязнения на последовательно расположенные водные объекты (река–озеро). В качестве примера выбраны сточные воды канализационных очистных сооружений г. Слюдянка, р. Похабиха, оз. Байкал.

Метод состоит из двух последовательных вычислительных процедур – расчете водных вкладов источников на каждом этапе смешения и расчете геохимических вкладов по каждому элементу и их сумме от источника загрязнения. Алгоритм расчёта водных вкладов источников смешения (сточные воды, чи-

стые речные воды, байкальские фоновые воды) реализован с использованием концентраций контрастных консервативных химических элементов. Для каждого объекта смешения (речная вода ниже сброса сточных вод, вода литорали Байкала в зоне влияния загрязнённых речных вод) набор таких элементов индивидуален и зависит от особенностей геохимического состава источников смешения. Расчёт геохимических вкладов от источника загрязнения проведен с учётом возможного неконсервативного поведения химических элементов на физико-химических и биогеохимических барьерах.

Установлено, что водный вклад сточных вод КОС г. Слюдянки в общий речной сток р. Похабиха составляет 1,75 % – довольно большая величина вследствие небольших размеров самой реки. Водный вклад загрязнённых речных вод в литорали Байкала составляет 55–11 % в прибрежной зоне (~ 1 м от уреза и на удалении до 90 м латерально от устья) и 2–3 % в поверхностной воде в секторе ~ 50 м от уреза напротив устья. Соответствующие водные вклады сточных вод в литорали Байкала составляют 0,97–0,20 % и ~0,04–0,05 %.

Геохимический вклад сточных вод в р. Похабиха был наиболее значим по Р (56 %), Cl (43 %), Sb (39 %), Na (36 %), Zr (25 %), K (24 %), Cs (22 %), Ga (20 %), Ni (20 %), As (19 %), Rb (16 %), Br (10 %) и Ti (10 %), в прибрежной зоне Байкала – по Р (44–16 %), Cl (35–13 %), Zr (20–7 %), Na (17–3 %), Cs (16–5 %), Ga (16–5 %), K (13–3 %) и Rb (12–4 %), а в секторе 50 м от уреза в озере Байкал уменьшался и составлял по Mn (~ 7–6 %), Р (~ 5–4 %) Cl (~ 4–3 %), Zr (~ 2 %), Cs (1,4–1 %), Ga (1,3–1 %) и Rb (~ 1 %).

Наибольший суммарный геохимический вклад сточных вод КОС г. Слюдянки, рассчитанный как сумма вкладов по нормативным элементам, для р. Похабиха составил 348 %, в прибрежной зоне Байкала – 216–71 %, а в секторе 50 м от уреза в озере Байкал – 20–25 %.

В сточных водах КОС г. Слюдянка обнаружено превышение нормативов по Р (45 ПДК), Mn (4,7 ПДК) и V (2 ПДК), установленных для сточных вод, сбрасываемых централизованными и локальными системами водоотведения поселений или городских округов в пределах центральной и буферной экологических зон Байкальской природной территории.

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

- Абдувалиев А.М., Худайбергенова Б.М. Сезонная миграция загрязняющих веществ в поверхностных водах в результате деятельности горнодобывающей компании в Кыргызстане // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 1. С. 27–32.
- Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов // Состояние поверхностных вод – Среднесуточные расходы воды рек, ручьев, каналов по постам, куб. м/с: Инф. сист. 2023. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=186> (дата обращения: 23.08.2023).
- Акбарпур Д., Лукьянов В.А. Антропогенное влияние специальной экономической энергетической зоны Парса провинции Бушер на прибрежные воды и экосистему Персидского залива // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7. География. 2014. № 4. С. 197–204.
- Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Шолохов П.А., Оргильянов А.И., Кононов А.М. Качество подземных и поверхностных вод в районе пос. Листвянка (юго-западное побережье оз. Байкал) // География и природные ресурсы. 2018. № 4. С. 105–114.
- Алексеева Л.П., Алексеев С.В., Шолохов П.А., Кононов А.М. Мониторинг качества подземных вод в поселке Листвянка (юго-западное побережье озера Байкал) // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 44, № 2. Статья 0697.
- Анищенко Ю.Д., Анищенко О.В., Зуев И.В., Иванова Е.А., Колмакова А.А. Оценка антропогенного воздействия на экосистему р. Енисей в черте г. Красноярск на основе элементного анализа макрофитов и воды // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. 2023. Т. 16, № 1. С. 87–108.
- Белова Е.А., Юхневич Г.Г., Лосева Л.П. Экологический мониторинг поверхностных вод р. Неман вблизи выпусков сточных вод // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Сер. 5. Экономика. Социология. Биология. 2013. № 3 (161). С. 131–137.
- Беляева П.Г., Кадочникова П.И., Галымина В.В., Саралов А.И. Влияние сточных вод на гидрохимические, микробиологические и альгологические характеристики малой р. Юг (Пермский край) // Вода: химия и экология. 2017. № 4 (106). С. 22–28.
- Блинова Е.Г., Чеснокова М.Г. Биотехнологические аспекты анализа донных осадков и гидрохимический режим водотока // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 10. С. 75–80.
- Бреховских В.Ф., Островская Е.В., Волкова З.В., Монахов С.К., Перекальский В.М., Абрамов Н.Н., Немировская И.А., Савенко А.В., Покровский О.С., Агатова А.И., Лапина Н.М., Торгунова Н.И., Брезгунов В.С., Петрова Н.В., Курдина Л.В., Курапов А.А., Зубанов С.А., Непоменко Л.Ф. Загрязняющие вещества в водах Волжско-Каспийского бассейна. Астрахань : ИП Сорокин Роман Васильевич, 2017. 408 с.
- Бреховских В.Ф., Брезгунов В.С., Волкова З.В., Перекальский В.М., Абрамов Н.Н., Кременецкая Е.Р., Ломова Д.В. Процессы массопереноса в водных объектах. Черноголовка : Институт проблем химической физики РАН, 2019. 156 с.
- Бузалева Л.С., Калитина Е.Г., Безвербная И.П., Кривошеева А.М. Микробные сообщества поверхностных прибрежных вод бухты Золотой рог в условиях высокого антропогенного загрязнения // Океанология. 2008. Т. 48, № 6. С. 882–888.
- Булаваина А.С. Районирование водосбора белого моря по степени воздействия материкового стока на морскую водную среду // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2018. Т. 21, № 1. С. 117–127.
- Волчек А.А., Чезлова О.Е. Оценка влияния микробиологической составляющей животноводческих стоков земледельческих полей орошения на дренажные воды (на примере СГЦ «Западный») // Природопользование. 2015. № 27. С. 95–100.
- Войцыцкий А.В. Оценка уровня загрязнения донных отложений Амурского залива // Научные труды Дальрыбвтуза. 2008. № 20. С. 3–12.
- Гагарина О.В., Куртеева А.Г. Исследование разбавления сточных вод в городских реках, попадающих под воздействие организованных источников загрязнения в условиях повышенного гидрохимического фона (на примере реки Карлутка в пределах города Ижевска) // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2017. Т. 27, № 4. С. 427–436.
- Гаринина О.В. Водно-экологические проблемы центральной экологической зоны Байкальской природной территории // Евразийский союз ученых. 2016. № 30-5. С. 7–11.
- Гарицкая М.Ю., Алеева О.Н. Экологическая характеристика качества поверхностных природных вод, находящихся в зоне влияния Ольховского месторождения // Вода: химия и экология. 2016. № 8 (98). С. 26–31.
- Гертман Л.Н., Станкевич А.П. Оценка поступления особо опасных загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты с предприятий Республики Беларусь // Природные ресурсы. 2020. № 2. С. 41–48.
- Грачёв М.А. Что грозит Байкалу? // В мире науки. 2015. № 1. С. 4–15.
- Данилович Д.А., Довлатова Е.В. Состояние системы нормирования сбросов загрязняющих веществ и совершенствование механизмов защиты водных объектов // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 4. С. 14–21.
- Даувальтер В.А. Геохимия озёр в зоне влияния арктического железорудного предприятия // Геохимия. 2020. Т. 65, № 8. С. 797–810.
- Даувальтер В.А., Даувальтер М.В., Салтан Н.В., Семенов Е.Н. Химический состав поверхностных вод в зоне влияния комбината «Североникель» // Геохимия. 2009. № 6. С. 628–646.
- Даувальтер В.А., Кашулин Н.А. Химический состав донных отложений системы реки Пасвик в условиях глобального и локального загрязнения // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. № 2 (17). С. 106–120.
- Даувальтер В.А., Кашулин Н.А. Влияние деятельности горно-металлургических предприятий на химический состав донных отложений озера Имандра, Мурманская область // Биосфера. 2015. Т. 7, № 3. С. 295–314.
- Двинских С.А., Ларченко О.В., Оськина М.А. Разработка системы экологических индикаторов, отражающих водохозяйственные аспекты предприятия в свете устойчивого развития // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 1. С. 140–147.
- Дрововозова Т.И., Манжина С.А. Экологическая оценка состояния малых водных объектов в зоне влияния гидромелиоративных систем // Экология и водное хозяйство. 2019. № 3 (3). С. 14–26.
- Дубровская О.Г., Андруняк И.В. Деконтаминация сточных вод медицинских комплексов как основа экологической безопасности водопользования // В мире научных открытий. 2015. № 11-3 (71). С. 1279–1288.
- Ежегодники о загрязнении окружающей среды // Гидрохимический институт Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/ezhegodniki/> (дата обращения: 07.08.2023)

- Зацаринная Е.А., Круглова А.П., Ефремова Е.С., Калчугина В.Д., Трунякова А.С. Изменчивость антибиотикорезистентности общих колиформных бактерий, выделенных из реки-приёмника очищенных сточных вод // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 2. С. 59–64.
- Зверева В.П., Крупская Л.Т. Оценка влияния золоотвалов теплоэлектростанций на объекты окружающей среды (на юге Дальнего Востока) // Экологическая химия. 2012. Т. 21. № 4. С. 225–233.
- Иванов Д.В., Шагидуллин Р.Р., Зиганшин И.И., Паймикина Э.Е., Марасов А.А., Маланин В.В., Хасанов Р.Р., Мустафина Л.К. Мониторинг донных отложений нижнего течения реки Казанка // Российский журнал прикладной экологии. 2018. № 2 (14). С. 11–16.
- Иванова И.Б., Миропольская Н.Ю. Гельминтозы: статистика и реальность // Дальневосточный журнал инфекционной патологии. 2008. № 13 (13). С. 164–169.
- Иванова И.С., Савичев О.Г., Солдатова Е.А., Наливайко Н.Г., Корнеев Д.С., Гусева Н.В., Смирнова Н.А. Условия трансформации коммунально-бытовых сточных вод в болотных экосистемах (на примере Обского болота, Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 3. С. 39–51.
- Искандарова Ш.Т., Усманов И.А., Хасанова М.И. Влияние донных отложений на качество воды малых рек // Экология и строительство. 2019. № 1. С. 19–24.
- Итоги Всероссийской переписи населения 2020 года. Федеральная служба государственной статистики РФ. URL: https://rosstat.gov.ru/vpn_porul (дата обращения: 12.05.2023).
- Кадычагов П.Б., Русских И.В., Ельчанинова Е.А., Стрельникова Е.Б., Филатов Д.А. Определение химического состава органических загрязнителей вод и донных отложений бассейна р. Обь // Экологический вестник России. 2016. № 5. С. 39–44.
- Калинкина Н.М., Коросов А.В., Теканова Е.В. Экологическая информационная система «ОНЕГО» // Принципы экологии. 2019. № 1 (31). С. 72–88.
- Кириленко В.И., Тучков В.К. Оценка допустимых сбросов и перспективные технологии защиты водоемов от загрязнения нефтесодержащими сточными водами // Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2020. № 7 (8). С. 161–170.
- Киселева Н.П. Обзор современного состояния и направлений совершенствования системы производственного экологического контроля в части специфики водопользования и охраны водных объектов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2022. № 4 (48). С. 47–65.
- Козлова М.А. Лекарственное загрязнение природных и сточных вод: методы очистки и результаты исследования // Экологический Вестник Северного Кавказа. 2020. Т. 16, № 1. С. 77–80.
- Коколова Л.М., Сафронев А.Э., Гаврильева Л.Ю., Степанова С.М., Дулова С.В., Верховцева Л.А. Экологическая характеристика и заражённость паразитами щуки *Esox lucius* (Linnaeus, 1758) в среднем течении реки Лена // Иппология и ветеринария. 2022. № 3 (45). С. 142–149.
- Константинова Н.А. Загрязнение вод как фактор экологической медицины // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2022. Т. 56, № 6. С. 16–22.
- Копылов А.И., Косолапов Д.Б., Романенко А.В., Косолапова Н.Г., Мыльникова З.М., Минеева Н.М., Крылов А.В. Гетеротрофные микроорганизмы в планктонных трофических сетях речных экосистем // Успехи современной биологии. 2006. Т. 126. № 3. С. 273–284.
- Красавцева Е.А., Сандимиров С.С. Состояние водных объектов в зоне влияния горно-перерабатывающих предприятий на примере ООО "Ловозерский ГОК" // Вода и экология: проблемы и решения. 2021. № 2 (86). С. 3–13.
- Крестников И.С., Крусир Г.В., Соколова И.Ф. Индексная оценка экологической опасности винодельческих предприятий // Экологічна безпека. 2013. № 1 (15). С. 96–98.
- Кузякина Т.И., Хурина О.В. Участие микроорганизмов в превращениях соединений азота в антропогенном водоеме (оз. Култучное, Камчатка) // Успехи современного естествознания. 2007. № 9. С. 93–94.
- Куликова Н.Н., Чебыкин Е.П., Волкова Е.А., Бондаренко Н.А., Жученко Н.А., Тимошкин О.А., Сутурин А.Н. Элементный состав водорослей рода *Spirogyra* как индикатор загрязнения прибрежной зоны Байкала хозяйственно-бытовыми стоками // География и природные ресурсы. 2021. № 2. С. 79–91.
- Лавров С.А. Математическое моделирование процесса распространения сточных вод и загрязняющих веществ при их сбросе на болота // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 2. С. 57–77.
- Левченко Д.А., Меньшикова Е.А., Курбатова Е.М., Титова С.В., Кругликов В.Д., Архангельская И.В., Ренгач М.В. Влияние гидрохимических показателей воды рек Дон и Темерник на обнаружение холерных вибрионов // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии им. Ю.А. Овчинникова. 2019. Т. 15, № 3. С. 25–31.
- Леонова Г.А., Бобров В.А., Торопов А.В., Маликов Ю.И., Мельгунов М.С., Сухоруков Ф.В. Загрязнение компонентов экосистемы нижней томи техногенными радионуклидами // Экология промышленного производства. 2005. № 3. С. 15–22.
- Леонова Г.А., Торопов А.В., Бобров В.А., Маликов Ю.И., Мельгунов М.С., Сухоруков Ф.В. Радиоактивное загрязнение биогидроценоза реки Томь в зоне влияния предприятий ядерно-топливного цикла // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геохронология. 2006. № 3. С. 225–234.
- Лозовик П.А., Галахина Н.Е. Оценка загрязнённости водных объектов и нормирование допустимой антропогенной нагрузки на них // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2019. № 6. С. 133–137.
- Лыков И.Н., Кусачева С.А., Сафронова М.Е., Логинова А.Ю. Загрязнение окружающей среды фармацевтическими препаратами // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24, № 8. С. 51–55.
- Магасумова А.Т., Сафаров А.М., Хатмуллина Р.М., Фатьянова Е.В. Идентификация фенолов в сточных водах нефтехимических предприятий республики Башкортостан // Георесурсы. 2012. № 8 (50). С. 61–64.
- Мальник В.В., Штыкова Ю.Р., Сутурин А.Н., Тимошкин О.А. Влияние населённых пунктов на санитарно-микробиологическое состояние малых притоков и прибрежных вод на примере залива лиственничный (Южный Байкал) // География и природные ресурсы. 2009. № 4. С. 84–92.
- Макаренко Т.В., Никитин А.Н., Ерофеев М.А. Изучение содержания меди, кобальта и свинца в донных отложениях водоемов г. Гомеля // Эпоха науки. 2020. № 21. С. 300–304.

- Маргарян Л.А.** Воздействие горнодобывающих предприятий на качество воды рек // Химическая безопасность. 2017. Т. 1, № 1. С. 86–91.
- Марков М.Л., Потапова Т.М., Задонская О.В.** Региональные особенности эколого-геохимического состояния поверхностных водных объектов в таежной зоне Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 4. С. 7–15.
- Минаев А.В., Минаев В.В., Сутурин А.Н.** Выявление методом электротомографии зон субаквальной разгрузки подземных вод (акватория пос. Листвянка) // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 12 (66). С. 176–180.
- Минаев А.В., Минаев В.В., Сутурин А.Н.** Выявление методом электротомографии зон субаквальной разгрузки подземных вод (акватория пос. Шида) // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 1-1 (79). С. 85–89.
- Мингазова Н.М., Никитин А.В., Унковская Е.Н., Павлова Л.Р., Набеева Э.Г.** Антропогенное воздействие на озеро Средний Кабан г. Казань и предложения по оптимизации его состояния // Вода: химия и экология. 2011. № 9 (39). С. 3–8.
- Мискевич И.В.** Гидрологические аспекты сброса сточных вод в прибрежной зоне морей западного сектора российской Арктики // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 1. С. 50–55.
- Михайлов С.А.** Диффузное загрязнение водных экосистем. Методы оценки и математические модели // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. 2000. № 56. С. 1–130.
- Мышляева Л.В., Краснощёков В.В.** Аналитическая химия кремния (серия «Аналитическая химия элементов»). М.: Наука, 1972. 212 с.
- Насурдинов Р.С., Бахтиёр Р., Мирзоев А.С., Нарушева Д.О.** Влияние производственных и бытовых сточных вод на загрязнение открытого водоема в местах водопользования реки Варзоб // Медицинский вестник Национальной академии наук Таджикистана. 2022. Т. 12, № 2 (42). С. 23–29.
- Наумов В.А.** Математическое моделирование распространения взвешенных примесей от точечного источника и их осаждение в водотоке // Известия КГТУ. 2017. № 44. С. 46–58.
- Наумова М.Э., Бухарина И.Л.** Оценка качества воды малых рек Пдборенка и Пазелинка водосборной площади Ижевского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 4. С. 48–59.
- Наумова М.Э., Бухарина И.Л., Ведерников К.Е.** Разработка методики расчета нормативов допустимого поступления загрязняющих веществ с реки Подборенки в Ижевское водохранилище (на примере никеля, меди и цинка) // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 1 (77). С. 75–85.
- Наумова М.Э., Бухарина И.Л., Слесарев М.Ю.** Методика оценки воздействия хозяйственной деятельности на водные объекты (на примере Ижевского водохранилища) // Экономика строительства и природопользования. 2022. № 1–2 (82–83). С. 175–184.
- Никаноров А.М., Хоружая Т.А., Миронова Т.В.** Анализ влияния мегаполисов на качество воды поверхностных водных объектов по эколого-токсикологическим показателям // Водные ресурсы. 2011. Т. 38, № 5. С. 577–584.
- Никольская А.Н., Маркин А.И.** Экологическая оценка влияния предприятия пищевой отрасли промышленности на химическое загрязнение окружающей среды // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2016. № 1. С. 60–62.
- Ницкая С.Г., Антоненко И.В.** Микроэлементный состав донных отложений водных объектов в условиях городской застройки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия. 2023. Т. 15, № 1. С. 149–158.
- Новикова Ю.А., Маркова О.Л., Фридман К.Б.** Основные направления минимизации рисков здоровью населения, обусловленных загрязнением поверхностных источников питьевого водоснабжения лекарственными средствами // Гигиена и санитария. 2018. Т. 97, № 12. С. 1166–1170.
- Овчарова Е.П., Кадацкая О.В.** Геоэкологические критерии для целей реабилитации водных объектов на урбанизированных территориях // Природопользование. 2014. № 26. С. 25–30.
- Овчарова Е.П., Санец Е.В., Кадацкая О.В.** Состояние водных объектов урбанизированных территорий (на примере городов Минской области) // Природопользование. 2016. № 29. С. 65–75.
- Огородникова А.А., Щеглов В.В., Вейдеман Е.Л.** Модель «воздействие – состояние – отклик» в решении задач экологического мониторинга загрязнения прибрежных экосистем // Известия ТИНРО. 2004. Т. 137. С. 321–336.
- Опекунов А.Ю., Леонтьева Л.В., Куприна М.С.** Геохимические особенности современного осадкообразования в районе разработки Сибайского медноколчеданного месторождения (Южный Урал) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. География. География. 2010. № 2. С. 84–98.
- Орехова Н.А., Овсяный Е.И.** Метаморфизация донных отложений при неконтролируемом сбросе сточных вод в литоральную зону Гераклеяского полуострова (Крым) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 68–83.
- Панкратова Т.М., Себах Л.К., Панов Б.Н., Петренко О.А., Попова Т.В., Авдеева Т.М.** Мониторинг загрязнённости северо-западного шельфа Чёрного моря в зоне разработки перспективных газовых месторождений // Труды Южного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. 1993. Т. 39. С. 43–47.
- Панов А.В., Исамов Н.Н., Цыгвинцев П.Н., Кузнецов В.К., Гешель И.В.** Оценка радиационной обстановки в районе расположения АО «ГНЦ НИИАР» до начала эксплуатации ИЯУ МБИР. Часть 2. Водные экосистемы // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2022. Т. 31, № 4. С. 82–93.
- Панов В.В., Женихов К.Ю., Женихов Ю.Н.** О воздействии на торфяные болота промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод // Проблемы региональной экологии. 2018. № 3. С. 12–18.
- Пашенко А.В., Евлов Т.А., Верещагина Д.П.** Влияние предприятия ООО «Биостан» на реку Кубань на территории Усть-Лабинского района // Polish Journal of Science. 2021. № 35–1 (35). С. 3–5.
- Петрова М.И.** Оценка фосфорной нагрузки на экосистемы озёр-водоприемников сточных вод // Природопользование. 2008. № 14. С. 143–147.
- Платонов Т.А., Кузьмина Н.В., Бочкарев И.И., Ньюканов А.Н.** Коммунальное загрязнение р. Лена в окрестностях г. Якутска и его роль в распространении дифиллоботриоза // Наука и образование. 2015. № 3 (79). С. 115–118.

- Платонов Т.А., Кузьмина Н.В., Нюкканов А.Н.** Паразиты *Leuciscus leuciscus baicalensis* (d.) и *Esox lucius* (l.) среднего течения р. Лена и ее притока Виллой в экологических условиях антропопрессии // Наука и образование. 2014. № 4 (76). С. 76–79.
- Платонов Т.А., Кузьмина Н.В., Нюкканов А.Н.** Наиболее значимые санитарно-микробиологические показатели воды реки лена в окрестностях г. Якутска // Актуальные вопросы сельскохозяйственной биологии. 2019. № 4 (14). С. 162–168.
- Поиск** по данным Государственного водного реестра. URL: <https://textual.ru/gvr/index.php?card=208936> (дата обращения: 24.08.2023).
- Попов А.Н.** О неопределенности результатов применения величин ПДК при оценке состояния водного объекта // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 4. С. 103–126.
- 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).
- Приказ** Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 1118 от 29.19.2020 г. Об утверждении Методики разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей (с изменениями на 18 мая 2022 года). URL: <https://docs.cntd.ru/document/573275596#8P60LR> (дата обращения: 18.12.2023).
- Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И.** Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами. Цинк // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. 2014. № 102. С. 1–99.
- Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И.** Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами. Свинец // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. 2016. № 105. С. 1–123.
- Румянцева Э.А., Бобровицкая Н.Н.** Формирование изменчивости качества стока в верховьях реки Луги в межгодовом и краткосрочном масштабах времени. Часть 2. геохимические фоновые концентрации и вклад краткосрочных аномалий в загрязненность воды // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2021. Т. 3, № 2. С. 133–144.
- Рябинин А.И., Мальченко Ю.А., Салтыкова Л.В.** Поля концентраций микроэлементов в прибрежных водах Черного моря у западного и южного побережий Крыма в 1990–2002 годах // Морской гидрофизический журнал. 2008. № 6. С. 38–52.
- Рябцев Ю.Н., Вержевская Л.В., Рауэн Т.В., Цыганова М.В., Никишин В.В., Багаев А.В.** Поиск оптимального расположения проектируемых выпусков городской канализации в Севастопольской бухте с помощью численного моделирования и геоинформационного анализа // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 1. С. 111–128.
- Савичев О.Г., Гусева Н.В.** Методология управления геохимическим балансом водосборов на территории Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 5. С. 28–45.
- Савичев О.Г., Рудмин М.А., Мазуров А.К., Наливайко Н.Г., Сергиенко В.И., Семилетов И.П.** Минералого-геохимические особенности торфяной залежи эвтрофного Обского болота в условиях антропогенной нагрузки (Западная Сибирь) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 492, № 1. С. 39–42.
- Самойленко Н.Н., Ермакович И.А.** Влияние фармацевтических препаратов и их производных на окружающую среду // Вода и экология: проблемы и решения. 2014. № 2 (58). С. 78–87.
- Селезнев В.А.** Методика оценки и анализа антропогенной нагрузки на реки от точечных источников загрязнения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2021. Т. 23, № 5 (103). С. 135–143.
- Селезнева А.В., Беспалова К.В., Селезнев В.А.** Технология определения антропогенной нагрузки на реки от точечных и диффузных источников загрязнения // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения: сборник научных трудов. М.: Студия Ф1, 2019. С. 444–449.
- Серпуховитина Т.Ю., Лазарев Р.А., Логвинова А.Н., Цыцорин И.А.** Анализ антропогенных факторов воздействия на гидросферу и пути их снижения в горнодобывающих регионах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 2–1. С. 263–274.
- Соколов А.К.** Определение минимально допустимой степени очистки сточных вод перед их сбросом с учетом суммации действия вредных веществ // Теплоэнергетика. 2020. № 9. С. 99–106.
- Солдатова Е.А., Сидкина Е.С., Савичев О.Г.** Моделирование изменения геохимической обстановки под влиянием сброса коммунально-бытовых сточных вод на примере Обского болота (Западная Сибирь) // Геосферные исследования. 2022a. № 1. С. 126–136.
- Солдатова Е.А., Савичев О.Г., Чжоу Д., Иванова И.С., Ли Ц., Дон И., Сунь Ч.** Эколого-геохимическое состояние поверхностных и подземных вод и оценка антропогенного влияния на территории водосбора реки Ганыцзян // Водные ресурсы. 2022b. Т. 49, № 3. С. 341–350.
- 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.
- Титова Т.С., Ахтямов Р.Г., Насырова Э.С.** Оценка влияния жилищно-коммунального хозяйства на состояние водоемов в пределах урболандшафта // Известия петербургского университета путей сообщения. 2017. № 14. С. 175–182.
- Тоноева Н.Ч., Удадьцов Е.А., Ефремова Е.А.** Санитарно-паразитологическое состояние реки Лена в границах города Якутска // Ветеринарный врач. 2018. № 2. С. 12–19.
- Тунакова Ю.А., Новикова С.В., Валиев В.С., Байбакова Е.В.** Использование метода нейросетевой кластеризации для выделения значимых показателей, характеризующих состояние поверхностных водных объектов РТ // Вестник Технологического университета. 2023. Т. 26, № 3. С. 72–78.
- Угланов Н.А., Маркина Т.А., Тихомирова Е.И., Бобырев С.В.** Оценка экологического состояния маргинальных водных объектов на примере устья и нижних течений рек Малый Караман и Большой Караман Саратовской области // Фундаментальные исследования. 2013. № 6–5. С. 1168–1173.

- Усманов И.А., Магай М.П.** Донные отложения как источник загрязнения природных вод // Экологический Вестник Северного Кавказа. 2020. Т. 16, № 1. С. 73–76.
- Фашевская Т.Б., Мотовилов Ю.Г.** Моделирование загрязнения тяжелыми металлами водотоков в бассейне Нижнекамского водохранилища // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 5. С. 613–629.
- Халиков И.С., Лукьянова Н.Н.** Содержание полициклических ароматических углеводородов в донных отложениях озера Байкал по результатам мониторинга в 2017–2018 гг. // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 6-2 (96). С. 69–73.
- Ханаев И.В., Дзюба Е.В., Кравцова Л.С., Грачёв М.А.** Влияние массового развития зеленых нитчатых водорослей на воспроизводство желтокрылки *Cottomephorus grewinkii* (Dybowski, 1874) (Cottidae) в условиях экологического кризиса озера Байкал // Доклады РАН. 2016. Т. 467, № 1. С. 119–121.
- Харько П.А., Плохов А.С.** Оценка воздействия медно-колчеданных месторождений на формирование минерального состава донных отложений малых рек // Вестник евразийской науки. 2019. Т. 11, № 6. С. 93.
- Хатмуллина Р.М., Сафаров А.М., Сафарова В.И., Мухаматдинова А.Р.** Оценка антропогенного воздействия на р. Белую // Вода: химия и экология. 2017. № 3 (105). С. 89–93.
- Хатмуллина Р.М., Сафарова В.И., Латыпова В.З.** Достоверность оценки загрязненности вод нефтяными углеводородами и фенолами с помощью некоторых интегральных показателей // Журнал аналитической химии. 2018. Т. 73, № 7. С. 545–551.
- Холоднов В.А., Лебедева М.Ю.** Математическая модель водно-экологического процесса для исследования влияния выпуска сточных вод промышленного предприятия в реку // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2015. Т. 58, № 9. С. 76–79.
- Хомченко О.С.** Ртуть в донных отложениях малых рек г. Хабаровск // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2022. № 3. С. 51–56.
- Худяков В.И., Садчиков А.П., Плеханов С.Е., Мятлев В.Д.** Анализ площади воздействия сточных вод Байкальского целлюлозно-бумажного комбината по состоянию бактериопланктона // Биозащита и биобезопасность. 2014. Т. 6, № 2 (19). С. 42–47.
- Чебыкин Е.П., Сорокикова 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., Хахураев О.А., Сутурин А.Н.** Источники поступления химических элементов в снежный покров береговой зоны п. Листвянка (оз. Байкал) // География и природные ресурсы. 2018. № 3. С. 74–85.
- Чувьчкин А.Л., Яблонских Л.А., Девятова Т.А.** Качество поверхностных вод Воронежского водохранилища и его влияние на здоровье населения г. Воронежа // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2018. № 2. С. 270–277.
- Шабанов М.В.** Геохимия донных отложений рек Красноуральского промузла // Известия Уральского государственного горного университета. 2019. № 3 (55). С. 72–78.
- Шаликовский А.В., Курганович К.А.** Анализ подходов к распределению лимитов сброса загрязняющих веществ между источниками негативного воздействия на водные объекты // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29, № 1. С. 31–43.
- Штамм Е.В., Скурлатов Ю.И., Козлова Н.Б., Зайцева Н.И., Александрова Е.В.** Биотестирование в оценке эффективности технологий очистки сточных вод // Водные ресурсы. 2011. Т. 38, № 2. С. 232–238.
- Щетинина Е.В., Максимов В.В., Крайковская О.В., Максимова Э.А.** Оценка состояния водных масс Южного Байкала в районе влияния Байкальского ЦБК по многолетним микробиологическим показателям // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 6. С. 603–611.
- Янин Е.П.** Особенности техногенной поставки и распределения ртути в воде малой реки в зоне влияния промышленного города // Экологические системы и приборы. 2012. № 12. С. 24–29.
- 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 p.
- Kulikova N.N., Chebykin E.P., Sutorin A.N., Vashukevich N.V., Timoshkin O.A.** Impact of the coastal taiga fires onto chemical elemental composition of soils, grounds and near-shore waters of Bol'shoy Ushkaniy Island (Lake Baikal, Siberia) // Limnology and Freshwater Biology. 2020. No. 4. P. 671–672.
- Malnik V., Masumi Y., Tomberg I., Molozhnikova E., Bukin Y., Timoshkin O.** Lacustrine, wastewater, interstitial and fluvial water quality in the Southern Lake Baikal region // Journal of Water and Health. 2022. V. 20, No. 1. P. 23–40.
- Radnaeva L.D., Bazarzhapov T.Z., Shiretorova V.G., Zhigzhitzhapova S.V., Nikitina E.P., Dylanova E.P., Shirapova G.S., Budaeva O.D., Beshentsev, A.N., Garmaev E.Z., Wang P., Dong S., Li Z., Tulokhonov A.K.** Ecological State of Lake Gusinoe – A Cooling Pond of the Gusinozersk GRES // Water. 2022. V. 14 (1). Art. No. 4.
- R-ArcticNet** // A Regional, Electronic, Hydrographic Data Network for the Arctic Region. URL: <https://www.r-arctic-net.sr.unh.edu/v4.0/ViewPoint.pl?Point=6069> (дата обращения: 23.08.2023).
- Sutorin 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. V. 58. P. 277–288.
- Timoshkin O.A., Moore M.V., Kulikova N.N., Tomberg I.V., Malnik V.V., Shimaraev M.N., Troitskaya E.S., Shirokaya A.A., Sinyukovich V.N., Zaitseva E.P., Domysheva V.M., Yamamuro M., Poberezhnaya A.E., Timoshkina E.M.** Groundwater contamination by sewage causes benthic algal outbreaks in the littoral zone of Lake Baikal (East Siberia) // Journal of Great Lakes Research. 2018. V. 44, No. 2. P. 230–244.

References

- Abduvaliyev A.M., Khudaybergenova B.M. (2016) *Sezonnaya migratsiya zagryaznyayushchikh veshchestv v poverkhnostnykh vodakh v rezul'tate deyatel'nosti gornodobyvayushchey kompanii v Kyrgyzstane* [The seasonal migration of pollutants in surface waters as a result of the mining company's activities in Kyrgyzstan]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* – Theoretical and applied ecology. 1. pp. 27–32. In Russian
- Avtomatizirovannaya informacionnaya sistema gosudarstvennogo monitoring vodnykh ob'ektov [Automated information system of state monitoring of water objects]. [Electronic resource]: Surface water condition – Average daily water discharge of rivers, streams, channels by posts, cubic meters/s: Inf. syst. 2023. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=186> (Date of accessed: 23.08.2023). In Russian
- Akbarpour D., Lukyanov V.A. (2014) *Antropogennoe vliyanie spetsial'noy ekonomicheskoy energeticheskoy zony Parsa provintsii Busher na pribrezhnye vody i ekosistemu Persidskogo zaliva* [Anthropogenic effects of the Pars special economic energy zone on the coastal waters and the Persian gulf ecosystem]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya* – Vestnik of St. Petersburg State University. Series 7, Geology, Geography. 4. pp. 197–204. In Russian
- Alekseev S.V., Alekseeva L.P., Sholokhov P.A., Orgilyanov A.I., Kononov A.M. (2018) *Kachestvo podzemnykh i poverkhnostnykh vod v rayone pos. Listvyanka (yugo-zapadnoe poberezh'e oz. Baykal)* [The groundwater and surface water quality in the area of the settlement of Listvyanka]. *Geografiya i prirodnye resursy* – Geography and Natural Resources. 4. pp. 105–114. In Russian. doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-4(105-114)
- Alexeeva L.P., Alexeev S.V., Sholokhov P.A., Kononov A.M. (2023) *Monitoring kachestva podzemnykh vod v poselke Listvyanka (yugo-zapadnoe poberezh'e ozera Baykal)* [Monitoring of groundwater quality in Listvyanka settlement (Southwest coast of Lake Baikal)]. *Geodinamika i tektonofizika* – Geodynamics & Tectonophysics. 44 (2). Art. No. 0697. In Russian. doi: 10.5800/GT-2023-14-2-0697
- Anishchenko Yu.D., Anishchenko O.V., Zuev I.V., Ivanova E.A., Kolmakova A.A. (2023) *Otsenka antropogennogo vozdeystviya na ekosistemu r. Enisey v cherte g. Krasnoyarska na osnove elementnogo analiza makrofitov i vody* [Assessment of Anthropogenic Impact on the Yenisei River Anabranch within the City of Krasnoyarsk Based on Elemental Analysis of Macrophytes and Water]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Biologiya* – Journal of Siberian Federal University. Biology. 16(1) pp. 87–108. In Russian
- Belova E.A., Yukhnovich G.G., Loseva L.P. (2013) *Ekologicheskii monitoring poverkhnostnykh vod r. Neman vblizi vypuskov stochnykh vod* [Environmental monitoring of surface water R. Neman near wastewater discharge]. *Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Yanki Kupaly. Seriya 5. Ekonomika. Sotsiologiya. Biologiya* – Vestnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 5. Economics. Sociology. Biology. 3(161). pp. 131–137. In Russian
- Belyaeva P.G., Kadochnikova P.I., Galyamina V.V., Saralov A.I. (2017) *Vliyanie stochnykh vod na gidrokhimicheskie, mikrobiologicheskie i al'gologicheskie kharakteristiki maloy r. Yug (Permskiy kray)* [Influence of wastewater on hydrochemical, microbiological and algological characteristics of the small river lug (Perm territory)]. *Voda: khimiya i ekologiya* – Water: Chemistry and Ecology. 4(106). pp. 22–28. In Russian
- Blinova E.G., Chesnokova M.G. (2019) *Biotekhnologicheskie aspekty analiza donnykh osadkov i gidrokhimicheskiiy rezhim vodotoka* [Biotechnological aspects of analysis of bottom sediments and a hydrochemical mode of the water]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* – International Journal of Applied and Fundamental Research. 10. pp. 75–80. In Russian
- Brekhovskikh V.F., Ostrovskaya E.V., Volkova Z.V., Monakhov S.K., Perekal'skiy V.M., Abramov N.N., Nemirovskaya I.A., Savenko A.V., Pokrovskiy O.S., Agatova A.I., Lapina N.M., Torgunova N.I., Brezgunov V.S., Petrova N.V., Kurkina L.V., Kurapov A.A., Zubanov S.A., Nepomenko L.F. (2017) *Zagryaznyayushchie veshchestva v vodakh Volzhsko-Kaspiyskogo basseyna* [Pollutants in the waters of the Volga-Caspian basin]. Astrakhan': Publisher "Sorokin Roman Vasil'evich". 408 p. In Russian
- Brekhovskikh V.F., Brezgunov V.S., Volkova Z.V., Perekal'skiy V.M., Abramov N.N., Kremenetskaya E.R., Lomova D.V. (2019) *Protsessy massoperenosa v vodnykh ob'ektakh* [Mass transfer processes in water bodies]. Chernogolovka: Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences. 156 p. In Russian
- Buzoleva L.S., Kalitina E.G., Bezverbnaya I.P., Krivosheeva A.M. (2008) *Mikrobyne soobshchestva poverkhnostnykh pribrezhnykh vod bukhty Zolotoy rog v usloviyakh vysokogo antropogennogo zagryazneniya* [Microbial communities in the coastal surface waters of zolotoi rog bay under the conditions of strong anthropogenic pollution]. *Okeanologiya* – Oceanology. 48(6). pp. 819–825. doi: 10.1134/S0001437008060076
- Bulavina A.S. (2018) *Rayonirovanie vodosbora belogo morya po stepeni vozdeystviya materikovogo stoka na morskuyu vodnuyu sredu* [Zoning of the White Sea catchment area by the degree of continental runoff influence on the marine environment]. *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* – Bulletin of MSTU. Proceedings of the Murmansk State Technical University. 21(1). pp. 117–127. In Russian. doi: 10.21443/1560-9278-2018-21-1-117-127
- Volchek A.A., Chezlova O.E. (2015) *Otsenka vliyaniya mikrobiologicheskoy sostavlyayushchey zhivotnovodcheskikh stokov zemledel'cheskikh poley orosheniya na drenazhnye vody (na primere SGTs "Zapadnyy")* [Assessment of influence of the microbiological component of livestock waste of agricultural fields of irrigation on drainage water (for example with breeding complex "Western")]. *Prirodopol'zovanie* – Nature Management. 27 pp. 95–100. In Russian
- Voytsyskiy A.V. (2008) *Otsenka urovnya zagryazneniya donnykh otlozheniy Amurskogo zaliva* [Assessment of the level of pollution of bottom sediments of the Amur Bay]. *Nauchnye trudy Dal'rybvtuza* – Scientific works of Dalrybvvtuz. 20. pp. 3–12. In Russian
- Gagarina O.V., Kurteeva A.G. (2017) *Issledovanie razbavleniya stochnykh vod v gorodskikh rekakh, popadayushchikh pod vozdeystvie organizovannykh istochnikov zagryazneniya v usloviyakh povyshennogo gidrokhimicheskogo fona (na primere reki Karlutka v predelakh goroda Izhevsk)* [Investigation of wastewater dilution in urban rivers affected by organized sources of pollution under the conditions of higher hydrochemical background (on the example of the River Karlutka of the City of Izhevsk)]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle* – Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences. 27(4). pp. 427–436. In Russian
- Gagarinova O.V. (2016) *Vodno-ekologicheskie problemy tsentral'noy ekologicheskoy zony Baykal'skoy prirodnoy territorii* [Water-ecological problems of the Central Ecological Zone of the Baikal Natural Territory]. *Evrasiyskiy soyuz uchenykh* – Eurasian Union of Scientists. 30-5. pp. 7–11. In Russian

- Garitskaya M.Yu., Aleeva O.N. (2016) *Ekologicheskaya kharakteristika kachestva poverkhnostnykh prirodnkh vod, nakhodyashchikhsya v zone vliyaniya Ol'khovskogo mestorozhdeniya* [The ecological characteristics of surface quality of natural waters in the zone of influence of Olkhovskoye field]. *Voda: khimiya i ekologiya – Water: Chemistry and Ecology*. 8(98). pp. 26–31. In Russian
- Gertman L.N., Stankevich A.P. (2020) *Otsenka postupleniya osobo opasnykh zagryaznyayushchikh veshchestv v poverkhnostnye vodnye ob'ekty s predpriyatiy respublik Belarus'* [Estimation of hazardous pollutants admission to surface water bodies from enterprises of the Republic of Belarus]. *Prirodnye resursy – Natural Resources*. 2. pp. 41–48. In Russian
- Grachev M.A. *Chto grozit Baykalu?* (2015) [What threatens Baikal?]. *V mire nauki - In the World of Science*. 1. pp. 4–15. In Russian
- Danilovich D.A., Dovlatova E.V. (2014) *Sostoyanie sistemy normirovaniya sbrosov zagryaznyayushchikh veshchestv i sovershenstvovanie mekhanizmov zashchity vodnykh ob'ektov* [State of the system of regulating discharges of pollutants and improvement of water body protection mechanisms]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika – Water Supply and Sanitary Equipment*. 4. pp. 14–21. In Russian
- Dauval'ter V.A. (2020) *Geokhimiya ozer v zone vliyaniya arkticheskogo zhelezorudnogo predpriyatiya* [Geochemistry of lakes in the zone of influence of the arctic iron ore enterprise]. *Geokhimiya – Geochemistry International*. 65(8). pp. 797–810. In Russian. doi: 10.31857/S001675252008004X
- Dauval'ter V.A., Dauval'ter M.V., Saltan N.V., Semenov E.N. (2009) *Khimicheskii sostav poverkhnostnykh vod v zone vliyaniya kombinata "Severonikel"* [The chemical composition of surface water in the influence zone of the Severonikel Smelter]. *Geokhimiya – Geochemistry International*. 47(6). pp. 592–610. doi: 10.1134/S0016702909060056
- Dauval'ter V.A., Kashulin N.A. (2014) *Khimicheskii sostav donnykh otlozheniy sistemy reki Pasvik v usloviyakh global'nogo i lokal'nogo zagryazneniya* [Chemistry of bottom sediments from the system Inari Lake – Pasvik River under global and local pollution]. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN – Bulletin of the Kola Scientific Center of The Russian Academy of Sciences*. 2(17). pp. 106–120. In Russian
- Dauval'ter V.A., Kashulin N.A. (2015) *Vliyanie deyatel'nosti gorno-metallurgicheskikh predpriyatiy na khimicheskii sostav donnykh otlozheniy ozera Imandra, Murmanskaya oblast'* [The impact of mining-and-smelting industry on the chemical composition of bottom sediments of the Lake Imandra, (Murmansk Oblast, Russia)]. *Biosfera – Biosfera*. 7(3). pp. 295–314. In Russian
- Dvinskikh S.A., Larchenko O.V., Os'kina M.A. (2023) *Razrabotka sistemy ekologicheskikh indikatorov, otrazhayushchikh vodokhozyaystvennye aspekty predpriyatiya v svete ustoychivogo razvitiya* [Developing a system of environmental indicators reflecting the water management aspects of an enterprise in the light of sustainable development]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya – Theoretical and Applied Ecology*. 1. pp. 140–147. In Russian. doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-140-147
- Drovovozova T.I., Manzhina S.A. (2019) *Ekologicheskaya otsenka sostoyaniya malykh vodnykh ob'ektov v zone vliyaniya gidromeliorativnykh sistem* [Environmental assessment of minor water objects state in the zone of hydro reclamation systems influence]. *Ekologiya i vodnoe khozyaystvo – ecology and Water Management*. 3(3). pp. 14–26. In Russian. doi: 10.31774/2658-7890-2019-3-14-26
- Dubrovskaya O.G., Andrunyak I.V. (2015) *Dekontaminatsiya stochnykh vod meditsinskikh kompleksov kak osnova ekologicheskoy bezopasnosti vodopol'zovaniya* [Decontamination wastewater medical center as the basis of environmental safety of water]. *V mire nauchnykh otkrytiy – In the World of Scientific Discoveries, Series B*. 11-3(71). pp. 1279–1288. In Russian
- Ezhegodniki o zagryaznenii okruzhayushchey sredy* [Yearbooks on environmental pollution] [Electronic resource]: Hydrochemical Institute of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/ezhegodniki/> (Date of accessed: 07.08.2023). In Russian
- Zatsarinaya E.A., Kruglova A.P., Efremova E.S., Kalchugina V.D., Trunyakova A.S. (2017) *Izmenchivost' antibiotikorezistentnosti obshchikh koliformnykh bakteriy, vydelennykh iz reki-priemnika ochishchennykh stochnykh vod* [Variability of antibiotic resistance of total coliform bacteria isolated from the river that is a receiver of treated wastewater]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya – Theoretical and Applied Ecology*. 2. pp. 59–64. In Russian
- Zvereva V.P., Krupskaya L.T. (2012) *Otsenka vliyaniya zolotovalov teploelektrostantsiy na ob'ekty okruzhayushchey sredy (na yuge Dal'nego Vostoka)* [Estimation of Influence of Ash Dumps of Thermoelectric Plants on Environment Features (in South Far East)]. *Ekologicheskaya khimiya – Environmental Chemistry*. 21(4). pp. 225–233. In Russian
- Ivanov D.V., Shagidullin R.R., Ziganshin I.I., Paymikhina E.E., Marasov A.A., Malanin V.V., Khasanov R.R., Mustafina L.K. (2018) *Monitoring donnykh otlozheniy nizhnego techeniya reki Kazanka* [Sediments monitoring of the lower reaches of the river Kazanka]. *Rossiyskii zhurnal prikladnoy ekologii – Russian Journal of Applied Ecology*. 2(14). pp. 11–16. In Russian
- Ivanova I.B., Miropol'skaya N.Yu. (2008) *Gel'mintozy: statistika i real'nost'* [Helminthosis: statistics and reality]. *Dal'nevostochnyy zhurnal infektsionnoy patologii - Far Eastern Journal of Infectious Pathology*. 13(13). pp. 164–169. In Russian
- Ivanova I.S., Savichev O.G., Soldatova E.A., Nalivayko N.G., Korneev D.S., Guseva N.V., Smirnova N.A. (2020) *Usloviya transformatsii kommunal'no-bytovykh stochnykh vod v bolotnykh ekosistemakh (na primere Obskogo bolota, Zapadnaya Sibir')* [Conditions of transformation of municipal wastewater in bog ecosystems (on the example of Obskoe Bog, Western Siberia)]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 331(3). pp. 39–51. In Russian. doi: 10.18799/24131830/2020/3/2530
- Iskandarova Sh.T., Usmanov I.A., Khasanova M.I. (2019) *Vliyanie donnykh otlozheniy na kachestvo vody malykh rek* [The influence of the bottom sediments on water quality of small rivers]. *Ekologiya i stroitel'stvo – Ecology and Construction*. 1. pp. 19–24. In Russian. doi: 10.35688/2413-8452-2019-01-003
- 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
- Kadychagov P.B., Russkikh I.V., El'chaninova E.A., Strel'nikova E.B., Filatov D.A. (2016) *Opreделение khimicheskogo sostava organicheskikh zagryazniteley vod i donnykh otlozheniy basseyna r. Ob'* [Determination of the chemical composition of organic pollutants of waters and bottom sediments of the Ob River basin]. *Ekologicheskii vestnik Rossii – Ecological Bulletin of Russia*. 5. pp. 39–44. In Russian
- Kalinkina N.M., Korosov A.V., Tekanova E.V. (2019) *Ekologicheskaya informatsionnaya sistema "ONEGO"* [Ecological information system "ONEGA"]. *Printsipy ekologii – Principles of the Ecology*. (31). pp. 72–88. In Russian. doi: 10.15393/j1.art.2019.8222

- Kirilenko V.I., Tuchkov V.K. (2020) *Otsenka dopustimyykh sbrosov i perspektivnye tekhnologii zashchity vodoemov ot zagryazneniya neftesoderzhashchimi stochnymi vodami* [Assessment of permissible discharges and promising technologies for protecting reservoirs from oil-containing wastewater pollution]. *Aktual'nye problemy voenno-nauchnykh issledovaniy* – Actual Problems of Military Scientific Research. 7(8). pp. 161–170. In Russian.
- Kiseleva N.P. (2022) *Obzor sovremennogo sostoyaniya i napravleniy sovershenstvovaniya sistemy proizvodstvennogo ekologicheskogo kontrolya v chasti spetsifiki vodopol'zovaniya i okhrany vodnykh ob"ektov* [Review of the current state and directions of improving the system of industrial environmental control in terms of the specifics of water use and protection of water bodies]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika* – PNRPU Bulletin. Applied ecology. Urban development. 4(48). pp. 47–65. In Russian. doi: 10.15593/2409-5125/2022.4.04
- Kozlova M.A. (2020) *Lekarstvennoe zagryaznenie prirodnykh i stochnykh vod: metody ochistki i rezul'taty issledovaniya* [Pharmaceutical pollution of natural and waste waters: treatment methods and research results]. *Ekologicheskii Vestnik Severnogo Kavkaza* – The North Caucasus Ecological Herald. 16(1). pp. 77–80. In Russian
- Kokolova L.M., Safronov A.E., Gavril'eva L.Yu., Stepanova S.M., Dulova S.V., Verkhovtseva L.A. (2022) *Ekologicheskaya kharakteristika i zarazhennost' parazitami shchuki Esox lucius (Linnaeus, 1758) v srednem techenie reki Lena* [Ecological characteristics and their infestation with parasites of *esox lucius* (linnaeus, 1758) in the middle course of the Lena River]. *Ippologiya i veterinariya* – Hippology and Veterinary Medicine. 3(45). pp. 142–149. In Russian
- Konstantinova N.A. (2022) *Zagryaznenie vod kak faktor ekologicheskoy meditsiny* [Water pollution as a factor of environmental medicine]. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina* – Aerospace and Environmental Medicine. 56(6). pp. 16–22. In Russian. doi: 10.21687/0233-528X-2022-56-6-16-22
- Kopylov A.I., Kosolapov D.B., Romanenko A.V., Kosolapova N.G., Myl'nikova Z.M., Mineeva N.M., Krylov A.V. *Geterotrofnyye mikroorganizmy v planktonnykh troficheskikh setyakh rechnykh ekosistem* [Heterotrophic microorganisms in planktonic trophic networks of river ecosystems]. *Uspekhi sovremennoy biologii* – Successes of Modern Biology. 126(3). pp. 273–284. In Russian
- Krasavtseva E.A., Sandimirov S.S. (2021) *Sostoyanie vodnykh ob"ektov v zone vliyaniya gorno-pererabatyvayushchikh predpriyatiy na primere OOO "Lovozerkiy GOK"* [State of water bodies in the area of influence of mining and processing enterprises (case study of Lovozerkiy Mining and Processing Plant)]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* – Water and Ecology: problems and solutions. 2(86). pp. 3–13. In Russian. doi: 10.23968/2305-3488.2021.26.2.3-13
- Крестников И.С., Крусири Г.В., Соколова И.Ф. (2013) *Индексная оценка экологической опасности винодельческих предприятий* [The index assessment of environmental hazard of wine making companies]. *Экологічна безпека* – Environmental Safety. 1(15). pp. 96–98. In Russian
- Kuzyakina T.I., Khurina O.V. (2007) *Uchastie mikroorganizmov v prevrashcheniyakh soedineniy azota v antropogennom vodoeme (oz. Kultuchnoye, Kamchatka)* [Participation of microorganisms in the transformations of nitrogen compounds in an anthropogenic reservoir (Lake Kultuchnoye, Kamchatka)]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* – Successes of Modern Natural Science. 9. pp. 93–94. In Russian
- Kulikova N.N., Chebykin E.P., Volkova E.A., Bondarenko N.A., Zhuchenko N.A., Timoshkin O.A., Sutin A.N. (2021) *Elementnyy sostav vodorosley roda Spirogyra kak indikator zagryazneniya pribrezhnoy zony Baykala khozyaystvenno-bytovymi stokami* [Elemental composition of algae of the genus *spirogyra* as the indicator of pollution of the Baikal near-shore zone with domestic sewage]. *Geografiya i prirodnye resursy* – Geography and Natural Resources. 2. pp. 79–91. In Russian. doi: 10.15372/GIPR20210209
- Lavrov S.A. (2018) *Matematicheskoe modelirovaniye protsessa rasprostraneniya stochnykh vod i zagryaznyayushchikh veshchestv pri ikh sbrose na bolota* [Mathematical simulating of the waste water and pollutants spreading after their discharge from a bog]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye* – Water sector of Russia: problems, technologies, management. 2. pp. 57–77. In Russian
- Levchenko D.A., Men'shikova E.A., Kurbatova E.M., Titova S.V., Arkhangel'skaya I.V., Rengach M.V. (2019) *Vliyaniye gidrokhimicheskikh pokazateley vody rek Don i Temernik na obnaruzheniye kholernykh vibriov* [The influence of hydrochemical indicators of the Don and Temernik rivers water for the detection of cholera vibrios]. *Vestnik biotekhnologii i fiziko-khimicheskoy biologii im. Yu.A. Ovchinnikova* – Bulletin of Biotechnology and Physico-Chemical Biology named after Yu.A. Ovchinnikov. 15(3). pp. 25–31. In Russian
- Leonova G.A., Bobrov V.A., Toropov A.V., Malikov Yu.I., Mel'gunov M.S., Sukhorukov F.V. (2005) *Zagryazneniye komponentov ekosistemy nizhney tomi tekhnogennymi radionuklidami* [Pollution of components of the ecosystem of the lower Tom River by technogenic radionuclides]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva* – Industrial Ecology. 3. pp. 15–22. In Russian
- Leonova G.A., Toropov A.V., Bobrov V.A., Malikov Yu.I., Mel'gunov M.S., Sukhorukov F.V. (2006) *Radioaktivnoye zagryazneniye biogidrosenoza reki Tom' v zone vliyaniya predpriyatiy yaderno-toplivnogo tsikla* [Radioactive contamination of the biogidrosenoza of the Tom River in the zone of influence of nuclear fuel cycle enterprises]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* – Environmental Geoscience. 3. pp. 225–234. In Russian
- Lozovik P.A., Galakhina N.E. (2019) *Otsenka zagryaznenosti vodnykh ob"ektov i normirovaniye dopustimoy antropogennoy nagruzki na nikh* [Evaluation of the degree of water bodies pollution and normalization of the permissible anthropogenic load on them]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: geografiya* – Lomonosov Geography Journal. 6. pp. 133–137. In Russian
- Lykov I.N., Kusacheva S.A., Safronova M.E., Loginova A.Yu. (2020) *Zagryazneniye okruzhayushchey sredy farmatsevticheskimi preparatami* [Environmental Pollution by Pharmaceuticals]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* – Ecology and Industry of Russia. 24(8). pp. 51–55. In Russian. doi: 10.18412/1816-0395-2020-8-51-55
- Magasumova A.T., Safarov A.M., Khatmullina R.M., Fat'yanova E.V. (2012) *Identifikatsiya fenolov v stochnykh vodakh neftekhimicheskikh predpriyatiy respubliki Bashkortostan* [Identification of phenols in waste waters of petrochemical enterprises in Bashkortostan (Russia)]. *Georesursy* – Georesources. 8(50). pp. 61–64. In Russian
- Mal'nik V.V., Shtykova Yu.R., Sutin A.N., Timoshkin O.A. (2009) *Vliyaniye naselennykh punktov na sanitarno-mikrobiologicheskoye sostoyaniye malyykh pritokov i pribrezhnykh vod na primere zaliva listvennichnyy (Yuzhnyy Baykal)* [Influence of settlements on sanitary-microbiological status of small tributaries and coastal waters as exemplified by Listvennichnyi Bay (South Baikal)]. *Geografiya i prirodnye resursy* – Geography and Natural Resources. 4. pp. 84–92. In Russian. doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-4(84-92)

- Makarenko T.V., Nikitin A.N., Erofeenko M.A. (2020) *Izuchenie sodержaniya medi, kobal'ta i svintsa v donnykh otlozheniyakh vodoemov g. Gomelya* [Study of the content of copper, cobalt and lead in the bottom sediments of ponds in Gomel City]. *Epokha nauki - Era of Science*. 21. pp. 300–304. In Russian. doi: 10.24411/2409-3203-2020-11061
- Margaryan L.A. (2017) *Vozdeystvie gornodobyvayushchikh predpriyatiy na kachestvo vody rek* [Impact of mining industry facilities on river water quality]. *Khimicheskaya bezopasnost' – Chemical Safety Science*. 1(1). pp. 86–91. In Russian. doi: 10.25514/CHS.2017.1.11435
- Markov M.L., Potapova T.M., Zadonskaya O.V. (2020) *Regional'nye osobennosti ekologo-geokhimicheskogo sostoyaniya poverkhnostnykh vodnykh ob'ektov v taеzhnoy zone zapadnoy sibir* [Regional features of ecological geochemical condition of surface water bodies in taiga zone of Western Siberia]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of The Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 331(4). pp. 7–15. In Russian. doi: 10.18799/24131830/2020/4/2589
- Minaev A.V., Minaev V.V., Sutin A.N. (2017) *Vyyavlenie metodom elektrotomografii zon subakval'noy razgruzki podzemnykh vod (akvatoriya pos. Listvyanka)* [Identification of subaquatic discharge zones of groundwater (water area of Listvyanka) by electro-tomography method]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal – International Research Journal*. 12(66). pp. 176–180. In Russian. doi: 10.23670/IRJ.2017.66.053
- Minaev A.V., Minaev V.V., Sutin A.N. (2019) *Vyyavlenie metodom elektrotomografii zon subakval'noy razgruzki podzemnykh vod (akvatoriya pos. Shida)* [Electrotomography method for detection of subaquatic groundwater discharge zones (water area of Shida village)]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal zhurnal - International Research Journal*. 1–1(79). pp. 85–89. In Russian. DOI: 10.23670/IRJ.2019.79.1.015
- Mingazova N.M., Nikitin A.V., Unkovskaya E.N., Pavlova L.R., Nabeeva E.G. (2011) *Antropogennoe vozdeystvie na ozero Sredniy Kaban g. Kazan' i predlozheniya po optimizatsii ego sostoyaniya* [In-lake management program for Sredniy Kaban Lake in Kazan]. *Voda: khimiya i ekologiya – Water: chemistry and ecology*. 9(39). pp. 3–8. In Russian
- Miskevich I.V. (2017) *Gidrologicheskie aspekty sbrosa stochnykh vod v pribrezhnoy zone morey zapadnogo sektora rossiyskoy Arktiki* [Hydrological aspects of discharge of waste waters in the coastal zone of the seas in the west sector of the Russian Arctic]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya - Theoretical and Applied Ecology*. 1. pp. 50–55. In Russian
- Mikhaylov S.A. (2000) *Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ekosistem. Metody otsenki i matematicheskie modeli* [Diffuse pollution of aquatic ecosystems. evaluation methods and mathematical models]. *Ekologiya. Seriya analiticheskikh obzorov mirovoy literatury – Ecology. A Series of Analytical Reviews of world Literature*. 56. pp. 1–130. In Russian
- Myshlyayeva L.V., Krasnoshchekov V.V. (1972) *Analiticheskaya khimiya kremniya (seriya "Analiticheskaya khimiya elementov")* [Analytical chemistry of silicon (series "Analytical chemistry of elements")]. Moscow: Publishing house "Nauka". 212 p. In Russian
- Nasurdinov R.S., Bakhtieri R., Mirzoev A.S., Narusheva D.O. (2022) *Vliyanie proizvodstvennykh i bytovykh stochnykh vod na zagryaznenie otkrytogo vodoema v mestakh vodopol'zovaniya reki Varzob* [Influence of industrial and household wastewater on pollution of open reservoir in water use areas of the Varzob River]. *Meditinskiy vestnik Natsional'noy akademii nauk Tadzhikistana – Medical Bulletin of the National Academy of Sciences of Tajikistan*. 12(2)(42). pp. 23–29. In Russian
- Naumov V.A. (2017) *Matematicheskoe modelirovanie rasprostraneniya vzveshennykh primesey ot tochechnogo istochnika i ikh osazhdeniya v vodotoke* [Mathematical modeling of distribution of suspended impurities from a point source and its deposition in the watercourse]. *Izvestiya KGTU – KSTU News*. 44. pp. 46–58. In Russian
- Naumova M.E., Bukharina I.L. (2017) *Otsenka kachestva vody malyykh rek Pdborenka i Pazelinka vodosbornoy ploshchadi Izhevskogo vodokhranilishcha* [Assessment of the Izhevsk Reservoir catchment Pdborenka and Pazelinka small water quality]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie – Water sector of Russia: problems, technologies, management*. 4. pp. 48–59. In Russian
- Naumova M.E., Bukharina I.L., Vedernikov K.E. (2019) *Razrabotka metodiki rascheta normativov dopustimogo postupleniya zagryaznyayushchikh veshchestv s reki Pdborenki v Izhevskoe vodokhranilishche (na primere nikelya, medi i tsinka)* [Development of methods to determine the maximum input of pollutants from the Pdborenka River into the Izhevsk Reservoir (in terms of nickel, copper and zinc)]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya - Water and Ecology: problems and solutions*. 1(77). pp. 75–85. In Russian. doi: 10.23968/2305-3488.2019.24.1.75-85
- Naumova M.E., Bukharina I.L., Slesarev M.Yu. (2022) *Metodika otsenki vozdeystviya khozyaystvennoy deyatel'nosti na vodnye ob'ekty (na primere Izhevskogo vodokhranilishcha)* [Methodology for assessing the impact of economic activities on water bodies (on the example of the Izhevsk Reservoir)]. *Ekonomika stroitel'stva i prirodopol'zovaniya – Economics of Construction and Environmental Management*. № 1-2(82-83). pp. 175–184. In Russian
- Nikanorov A.M., Khoruzhaya T.A., Mironova T.V. (2011) *Analiz vliyaniya megapolisov na kachestvo vody poverkhnostnykh vodnykh ob'ektov po ekologo-toksikologicheskim pokazatelyam* [Analysis of the effect of megalopolises on water quality in surface water bodies by ecological-toxicological characteristics]. *Vodnye resursy – Water Resources*. 38(5). pp. 621–628.
- Nikol'skaya A.N., Markin A.I. (2016) *Ekologicheskaya otsenka vliyaniya predpriyatiya pishchevoy otrasli promyshlennosti na khimicheskoe zagryaznenie okruzhayushchey sredy* [Ecological estimation of the effect of food industry enterprises on chemical pollution of the environment]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 1. pp. 60–62. In Russian
- Nitskaya S.G., Antonenko I.V. (2023) *Mikroelementnyy sostav donnykh otlozheniy vodnykh ob'ektov v usloviyakh gorodskoy zastroyki* [Microelement composition of bottom sediments of water bodies in urban conditions]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya – Bulletin of the South Ural State University. Series "Chemistry"*. 15(1). pp. 149–158. In Russian. doi: 10.14529/chem230114
- Novikova Yu.A., Markova O.L., Fridman K.B. (2018) *Osnovnye napravleniya minimizatsii riskov zdorov'yu naseleniya, obuslovlennykh zagryazneniem poverkhnostnykh istochnikov pit'evogo vodosnabzheniya lekarstvennymi sredstvami* [Main aspects of minimization of population health risks caused by pharmaceutical pollution of surface sources of drinking water supply]. *Gigiena i sanitariya – Hygiene and Sanitation, Russian Journal*. 97(12). pp. 1166–1170. In Russian. doi: 10.18821/0016-9900-2018-97-12-1166-1170
- Ovcharova E.P., Kadatskaya O.V. (2014) *Geoekologicheskie kriterii dlya tseley reabilitatsii vodnykh ob'ektov na urbanizirovannykh territoriyakh* [Geoecology criteria for water bodies rehabilitation on urban areas]. *Prirodopol'zovanie – Nature Management*. 26. pp. 25–30. In Russian
- Ovcharova E.P., Sanets E.V., Kadatskaya O.V. (2016) *Sostoyanie vodnykh ob'ektov urbanizirovannykh territoriy (na primere gorodov Minskoy oblasti)* [An assessment of effects on water bodies of urban areas (on an example of Minsk area cities)]. *Prirodopol'zovanie – Nature Management*. 29. pp. 65–75. In Russian

- Ogorodnikova A.A., Shcheglov V.V., Veydeman E.L. (2004) *Model' "vozdeystvie – sostoyanie – otklik" v reshenii zadach ekologicheskogo monitoringa zagryazneniya pribrezhnykh ekosistem* [A model "pressure – state – response" solving problems of coastal ecosystems pollution monitoring]. *Izvestiya TINRO - Russian Journal of Marine Biology*. 137. pp. 321–336. In Russian
- Opekunov A.Yu., Leont'eva L.V., Kuprina M.S. (2010) *Geokhimicheskie osobennosti sovremennogo osadkoobrazovaniya v rayone razrabotki Sibaiyskogo mednokolchedannogo mestorozhdeniya (Yuzhnyy Ural)* [Geochemical features of modern sedimentation around exploitation of Sibai copper ore deposits (Southern Ural)]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya - Vestnik of St. Petersburg State University. Series 7. Geology. Geography*. 2. pp. 84–98. In Russian
- Orehkova N.A., Ovsyanyy E.I. (2021) *Metamorfizatsiya donnykh otlozheniy pri nekontroliruemom sbrose stochnykh vod v litoral'nyuyu zonu Gerakleyskogo poluostrova (Krym)* [Metamorphization of bottom sediments under uncontrolled discharge of waste waters into the litoral zone of the Herakleisky Peninsula (Crimea)]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon morya - Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*. 3. pp. 68–83. In Russian. doi: 10.22449/2413-5577-2021-3-68-83
- Pankratova T.M., Sebakh L.K., Panov B.N., Petrenko O.A., Popova T.V., Avdeeva T.M. (1993) *Monitoring zagryaznenosti severo-zapadnogo shel'fa Chernogo morya v zone razrabotki perspektivnykh gazovykh mestorozhdeniy* [Monitoring of contamination of the north-western shelf of the Black Sea in the zone of exploration of the promising gas deposits]. *Trudy Yuzhnogo nauchno-issledovatel'skogo instituta rybnogo khozyaystva i okeanografii – YugNIRO Proceedings*. 39. pp. 43–47. In Russian
- Panov A.V., Isamov N.N., Tsygvintsev P.N., Kuznetsov V.K., Geshel' I.V. (2022) *Otsenka radiatsionnoy obstanovki v rayone raspolozheniya AO "GNTs NIAR" do nachala ekspluatatsii IYaU MBIR. Chast' 2. Vodnye ekosistemy* [Radiation situation in the area of the State Scientific Centre "Research Institute of Atomic Reactors" before putting a multi-purpose fast neutron reactor into operation. Part 2. Freshwater ecosystems]. *Radiatsiya i risk (Byulleten' Natsional'nogo radiatsionno-epidemiologicheskogo registra) – Radiation and Risk*. 31(4). pp. 82–93. In Russian. doi: 10.21870/0131-3878-2022-31-4-82-93
- Panov V.V., Zhenikhov K.Yu., Zhenikhov Yu.N. (2018) *O vozdeystvii na torfyanne bolota promyshlennykh i khozyaystvenno-bytovykh stochnykh vod* [The impact on the peatlands of industrial and domestic waste waters]. *Problemy regional'noy ekologii – Problems of Regional Ecology*. 3. pp. 12–18. In Russian. doi: 10.24411/1728-323X-2018-13012
- Pashchenko A.V., Evloev T.A., Vereshchagina D.P. (2021) *Vliyaniye predpriyatiya OOO "Biostan" na reku Kuban' na territorii Ust'-Labinskogo rayona* [Merger of the company "Biostan" on the Kuban River on the territory of Ust-Labinsky district]. *Polish Journal of Science*. № 35-1(35). pp. 3–5. In Russian
- Petrova M.I. (2008) *Otsenka fosfornoy nagruzki na ekosistemy ozer-vodopriemnikov stochnykh vod* [The estimation of phosphorous loads on ecosystems of waste-water affecting lakes]. *Prirodopol'zovanie – Nature Management*. 14. pp. 143–147. In Russian
- Platonov T.A., Kuz'mina N.V., Bochkarev I.L., Nyukkanov A.N. (2015) *Kommunal'noye zagryazneniye r. Lena v okrestnostyakh g. Yakutsk i ego rol' v rasprostraneniye difillobotrioza* [Municipal pollution of the Lena River in the vicinity of Yakutsk and its role in the spread of difillobotriosis]. *Nauka i obrazovanie – Science and Education*. 3(79). pp. 115–118. In Russian
- Platonov T.A., Kuz'mina N.V., Nyukkanov A.N. (2014) *Parazity Leuciscus leuciscus baicalensis (d.) i Esox lucius (l.) srednego techeniya r. Lena i ee pritoka Vilyuy v ekologicheskikh usloviyakh antropopressii* [Parasites *Leuciscus leuciscus baicalensis* (d.) and *Esox lucius* (l.) of the middle course of the Lena River and its tributary Vilyu in ecological conditions of anthropopression]. *Nauka i obrazovanie – Science and Education*. 4(76). pp. 76–79. In Russian
- Platonov T.A., Kuz'mina N.V., Nyukkanov A.N. (2019) *Naibolee znachimye sanitarno-mikrobiologicheskie pokazateli vody reki lena v okrestnostyakh g. Yakutsk* [The most significant sanitary and microbiological indicators of the Lena River water in the vicinity of Yakutsk]. *Aktual'nye voprosy sel'skokhozyaystvennoy biologii – Topical Issues of Agricultural Biology*. 4(14). pp. 162–168.
- Poisk po dannym Gosudarstvennogo vodnogo reestra* [Search according to the State Water Register]. [Electronic resource]: URL: <https://textual.ru/gvr/index.php?card=208936> (Date of accessed: 24.08.2023). In Russian
- Popov A.N. (2022) *O neopredelennosti rezul'tatov primeneniya velichin PDK pri otsenke sostoyaniya vodnogo ob'ekta* [About uncertainty of results in case of application of MPC values for assessment of a water body status]. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye – Water sector of Russia: problems, technologies, management*. 4. pp. 103–126. In Russian. doi: 10.35567/19994508_2022_4_7
- Prikaz Ministerstva prirodnnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii № 83 ot 21.02.2020 g. Ob utverzhdenii normativov predel'no dopustimyykh vozdeystviy na unikal'nyuyu ekologicheskuyu sistemu ozera Baykal i perechnyya 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
- Prikaz Ministerstva prirodnnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii № 1118 ot 29.12.2020 g. Ob utverzhdenii Metodiki razrabotki normativov dopustimyykh sbrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v vodnye ob'ekty dlya vodopol'zovateley (s izmeneniyami na 18 maya 2022 goda)*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573275596#8P60LR>. (data obrashcheniya: 18.12.2023). [Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation No. 1118 dated 29.12.2020 On Approval of the Methodology for Developing Standards for Permissible Discharges of Pollutants into Water Bodies for Water Users (as amended on May 18, 2022)]. [Electronic resource]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/573275596#8P60LR>. (Date of accessed: 18.12.2023). In Russian
- Putilina V.S., Galitskaya I.V., Yuganova T.I. (2014) *Sorbtionnyye protsessy pri zagryaznenii podzemnykh vod tyazhelyimi metallami i radioaktivnymi elementami. Tsink* [Sorption when groundwater contaminating by heavy metals and radioactive elements. Zinc]. *Ekologiya. Seriya analiticheskikh obzorov mirovoy literatury – Ecology. A Series of Analytical Reviews of World Literature*. 102. pp. 1–99. In Russian
- Putilina V.S., Galitskaya I.V., Yuganova T.I. (2016) *Sorbtionnyye protsessy pri zagryaznenii podzemnykh vod tyazhelyimi metallami i radioaktivnymi elementami. Svinets* [Sorption when groundwater contaminating by heavy metals and radioactive elements. Plumbum]. *Ekologiya. Seriya analiticheskikh obzorov mirovoy literatury literatury – Ecology. A Series of Analytical Reviews of World Literature*. 105. pp. 1–123. In Russian
- Rumyantseva E.A., Bobrovitskaya N.N. (2021) *Formirovaniye izmenchivosti kachestva stoka v verkhov'yakh reki Lugi v mezhgodovom i kratkosrochnom masshtabakh vremeni. Chast' 2. geokhimicheskie fonovye kontsentratsii i vklad kratkosrochnykh anomalii v*

zagryaznennost' vody [Formation of variability of flow quality in the top of the Luga River in inter-annual and short-term time. Part 2. Geochemical background concentrations and the contribution of short-term anomalies to water pollution]. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya* – Hydrosphere. Hazard processes and phenomena. 3(2). pp. 133–144. In Russian. doi: 10.34753/HS.2021.3.2.133

Ryabinin A.I., Mal'chenko Yu.A., Saltykova L.V. (2008) *Polya kontsentratsiy mikroelementov v pribrezhnykh vodakh Chernogo morya u zapadnogo i yuzhnogo poberezh'ya Kryma v 1990 - 2002 godakh* [Fields of microelement concentrations in the waters near the western and southern Crimean coasts in 1990 - 2002]. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal* – Physical Oceanography. 6. pp. 38–52. In Russian

Ryabtsev Yu.N., Verzhetskaya L.V., Rauen T.V., Tsyganova M.V., Nikishin V.V., Bagaev A.V. (2021) *Poisk optimal'nogo raspolozheniya proektiruemyykh vypuskov gorodskoy kanalizatsii v Sevastopol'skoy bukhte s pomoshch'yu chislennogo modelirovaniya i geoinformatsionnogo analiza* [Search for an optimal configuration of projected municipal sewerage outfalls in the Sevastopol Bay using computational modelling and geoinformation analysis]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon morya* – Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea. 1. pp. 111–128. In Russian. doi: 10.22449/2413-5577-2021-1-111-128

Savichev O.G., Guseva N.V. (2020) *Metodologiya upravleniya geokhimicheskimi balansami vodosborov na territorii Zapadnoy Sibiri* [Methodology of management of river basins geochemical balance in Western Siberia]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov* – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 331(5). pp. 28–45. In Russian. doi: 10.18799/24131830/2020/5/2634

Savichev O.G., Rudmin M.A., Mazurov A.K., Nalivayko N.G., Sergienko V.I., Semiletoy I.P. (2020) *Mineralogo-geokhimicheskiye osobennosti torfyanoy zalezhi evtrofnogo Obskogo bolota v usloviyakh antropogennoy nagruzki (Zapadnaya Sibir')* [Mineralogical and geochemical features of a peat deposit in the eutrophic Obskoye fen under anthropogenic load (Western Siberia)]. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o Zemle* – Doklady Earth Sciences. 492(1). pp. 320–322. doi: 10.31857/S2686739720050217

Samoylenko N.N., Ermakov I.A. (2014) *Vliyaniye farmatsevticheskikh preparatov i ikh proizvodnykh na okruzhayushchuyu sredu* [The impact of pharmaceuticals and their derivatives on the environment]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* – Water and Ecology: problems and solutions. 2(58). pp. 78–87. In Russian

Seleznev V.A. (2021) *Metodika otsenki i analiza antropogennoy nagruzki na reki ot tochechnykh istochnikov zagryazneniya* [Method for assessment and analysis of anthropogenic load on rivers from point pollution sources]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* – Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 23(5)(103). pp. 135–143. In Russian. doi: 10.37313/1990-5378-2021-23-5-135-143

Selezneva A.V., Bepalova K.V., Seleznev V.A. (2019) *Tekhnologiya opredeleniya antropogennoy nagruzki na reki ot tochechnykh i diffuznykh istochnikov zagryazneniya* [Technology for determining anthropogenic load on rivers from spot and diffuse sources of pollution]. *Nauchnye problemy ozdorovleniya rossiyskikh rek i puti ikh resheniya: sbornik nauchnykh trudov* – Scientific problems of Russian rivers improving and ways to solve them. Moscow: Publishing house "F1 Studio". pp. 444–449. In Russian

Serpukhovitina T.Yu., Lazarev R.A., Logvinova A.N., Tsytsorin I.A. (2021) *Analiz antropogennykh faktorov vozdeystviya na gidrosferu i puti ikh snizheniya v gornodobyvayushchikh regionakh* [Analysis of anthropogenic factors of influence on the hydrosphere and ways to reduce them in mining regions]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). 2–1. pp. 263–274. In Russian. doi: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-263-274

Sokolov A.K. (2020) *Opredelenie minimal'no dopustimoy stepeni ochistki stochnykh vod pered ikh sbrosom s uchetom summatsii deystviya vrednykh veshchestv* [Determining the minimum allowable wastewater purification before discharging with allowance for the harmful effect summation]. *Teploenergetika* - Thermal Engineering. 67(9). pp. 673–679. doi: 10.1134/S0040363620090076

Soldatova E.A., Sidkina E.S., Savichev O.G. (2022a) *Modelirovaniye izmeneniya geokhimicheskoy obstanovki pod vliyaniem sbrosa kommunal'no-bytovykh stochnykh vod na primere Obskogo bolota (Zapadnaya Sibir')* [Modeling the changes of geochemical conditions under municipal sewage discharge on the example of Obskoye fen (Western Siberia)]. *Geosfernye issledovaniya* - Geosphere Research. 1. pp. 126–136. In Russian. doi: 10.17223/25421379/22/10

Soldatova E.A., Savichev O.G., Chzhou D., Ivanova I.S., Li Ts., Don I., Sun' Ch. (2022b) *Ekologo-geokhimicheskoye sostoyaniye poverkhnostnykh i podzemnykh vod i otsenka antropogennogo vliyaniya na territorii vodosbora reki Gan'ts'yan* [Ecological–geochemical conditions of surface water and groundwater and estimation of the anthropogenic effect in the basin of the Ganjiang River]. *Vodnye resursy* – Water Resources. 49(3). pp. 483–482. doi: 10.31857/S0321059622030142

Suturin A.N., Chebykin E.P., Mal'nik V.V., Khanaev I.V., Minaev A.V., Minaev V.V. (2016) *Rol' antropogennykh faktorov v razvitiye 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. 6. pp. 43–54. In Russian. doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(43-54)

Titova T.S., Akhtyamov R.G., Nasyrova E.S. (2017) *Otsenka vliyaniya zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva na sostoyaniye vodoemov v predelakh urbolandshafta* [The assessment of housing and communal services impact on reservoirs condition within the limits of urban landscape]. *Izvestiya peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* – Proceedings of Petersburg Transport University. 14. pp. 175–182. In Russian

Tonoeva N.Ch., Udaltsov E.A., Efremova E.A. (2018) *Sanitarno-parazitologicheskoye sostoyaniye reki Lena v granitsakh goroda Yakutsk* [Sanitary-parasitological condition within the boundaries of the Yakutsk City]. *Veterinarnyy vrach* – Veterinary Doctor. 2. pp. 12–19. In Russian

Tunakova Yu.A., Novikova S.V., Valiev V.S., Baybakova E.V. (2023) *Ispolzovaniye metoda neyrosetevoy klasterizatsii dlya vydeleniya znachimyykh pokazateley, kharakterizuyushchikh sostoyaniye poverkhnostnykh vodnykh ob'ektov RT* [Using the method of neural network clusterization for selecting significant indicators characterizing the state of surface water bodies of the Republic of Tatarstan]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* – Herald of Technological University. 26(3). pp. 72–78. In Russian. doi: 10.55421/1998-7072_2023_26_3_72

Uglanov N.A., Markina T.A., Tikhomirova E.I., Bobyrev S.V. (2013) *Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya marginal'nykh vodnykh ob'ektov na primere ust'ya i nizhnikh techeniy rek Malyy Karaman i Bol'shoy Karaman Saratovskoy oblasti* [The ecological status assessment of marginal water bodies: case study of estuaries and lower valleys of Malyy Karaman and Bolshoy Karaman rivers]. *Fundamental'nye issledovaniya* – Fundamental Research. 6–5. pp. 1168–1173. In Russian

Usmanov I.A., Magay M.P. (2020) *Donnye otlozheniya kak istochnik zagryazneniya prirodnnykh vod* [Bottom sediment as a natural water pollution source]. *Ekologicheskii Vestnik Severnogo Kavkaza* – The North Caucasus Ecological Herald. 16(1). pp. 73–76. In Russian

- Fashchevskaya T.B., Motovilov Yu.G. (2020) *Modelirovanie zagryazneniya tyazhelymi metallami vodotokov v bassejne Nizhnekamskogo vodokhranilishcha* [Simulation of heavy metal pollution of watercourses in the basin of the Nizhnekamskoe Reservoir]. *Vodnye resursy – Water Resources*. 47(5). pp. 794–809. doi: 10.31857/S0321059620050089
- Khalikov I.S., Luk'yanova N.N. (2020) *Soderzhanie politsiklicheskich aromaticeskikh uglevodorodov v donnykh otlozheniyakh ozera Baykal po rezul'tatam monitoringa v 2017-2018 gg.* [Polycyclic aromatic hydrocarbons content in bottom sediments of Baikal Lake according to results of monitoring in 2017-2018]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal – International Research Journal*. 6-2(96). pp. 69–73. In Russian. doi: 10.23670/IRJ.2020.96.6.050
- Khanaev I.V., Dzyuba E.V., Kravtsova L.S., Grachev M.A. (2016) *Vliyanie massovogo razvitiya zelenykh nitchatykh vodorosley na vosproizvodstvo 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*. 467(1). pp. 63–641. doi: 10.7868/S0869565216070306
- Khar'ko P.A., Plokhov A.S. (2019) *Otsenka vozdeystviya medno-kolchedannykh mestorozhdeniy na formirovanie mineral'nogo sostava donnykh otlozheniy malykh rek* [Evaluation of the impact of copper-sulphide deposits on the mineral composition of the bottom sediments of small rivers]. *Vestnik evraziyskoy nauki – The Eurasian Scientific Journal*. 11(6). pp. 93. In Russian
- Khatmullina R.M., Safarov A.M., Safarova V.I., Mukhamatdinova A.R. (2017) *Otsenka antropogennogo vozdeystviya na r. Beluyu* [Assessment of anthropogenic impact on the Belaya River]. *Voda: khimiya i ekologiya – Water: chemistry and ecology*. 3(105). pp. 89–93. In Russian
- Khatmullina R.M., Safarova V.I., Latypova V.Z. (2018) *Dostovernost' otsenki zagryaznennosti vod neftyanymi uglevodorodami i fenolami s pomoshch'yu nekotorykh integral'nykh pokazateley* [Reliability of the assessment of water pollution by petroleum hydrocarbons and phenols using some of total indices]. *Zhurnal analiticheskoy khimii – Journal of Analytical Chemistry*. 73(7). pp. 728–733. doi: 10.7868/S0044450218070095
- Kholodnov V.A., Lebedeva M.Yu. (2015) *Matematicheskaya model' vodno-ekologicheskogo protsessa dlya issledovaniya vliyaniya vypuska stochnykh vod promyshlennogo predpriyatiya v reku* [Mathematical model of the water-ecological process for the study of the effect of industrial wastewater discharge into the river]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya – ChemChemTrch*. 58(9). pp. 76–79. In Russian
- Khomchenko O.S. (2022) *Rtut' v donnykh otlozheniyakh malykh rek g. Khabarovsk* [Mercury in the bottom sediments of small rivers of Khabarovsk City]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya – Environmental Geoscience*. 3. pp. 51–56. In Russian. doi: 10.31857/S086978092203002X
- Khudiyakov V.I., Sadchikov A.P., Plekhanov S.E., Myatlev V.D. (2014) *Analiz ploshchadi vozdeystviya stochnykh vod Baykal'skogo tsellyulozno-bumazhnogo kombinata po sostoyaniyu bakterioplanktona* [The analysis of contacted area of waste water of Baikal Self-Contained Paper Mill by bacterioplankton state]. *Biozashchita i biobezopasnost' – Bioprotection and Biosecurity*. 6(2)(19). pp. 42–47. In Russian
- Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Vodneva E.N., Rasskazov S.V., Khodzher T.V., Grachev M.A. (2012) *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*. 20(5). pp. 613–631. In Russian
- Chebykin E.P., Dambinov Yu.A., Khakhuraev O.A., Suturin A.N. (2018) *Istochniki postupleniya khimicheskikh elementov v snezhnyy pokrov beregovoy zony p. Listvyanka (oz. Baykal)* [Sources of chemical elements in the snow cover in the shore zone of the settlement of Listvyanka (Lake Baikal)]. *Geografiya i prirodnye resursy – Geography and Natural Resources*. 3. pp. 74–85. In Russian. doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(74-85)
- Chuvyichkin A.L., Yablonskikh L.A., Devyatova T.A. (2018) *Kachestvo poverkhnostnykh vod Voronezhskogo vodokhranilishcha i ego vliyaniye na zdorov'e naseleniya g. Voronezha* [Quality of surface water of the Voronezh Reservoir and its impact on the health of the population of the City of Voronezh]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*. 2. pp. 270–277. In Russian
- Shabanov M.V. (2019) *Geokhimiya donnykh otlozheniy rek Krasnouralskogo promizla* [Geochemistry of rivers bed deposits of the Krasnouralsk Industrial Hub]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta – News of the Ural State Mining University*. 3(55). pp. 72–78. In Russian. doi: 10.21440/2307-2091-2019-3-72-78
- Shalikovskiy A.V., Kurganovich K.A. (2023) *Analiz podkhodov k raspredeleniyu limitov sbrosa zagryaznyayushchikh veshchestv mezhdu istochnikami negativnogo vozdeystviya na vodnye ob'ekty* [Analysis of approaches to the distribution of pollutant discharge limits between sources of negative impact on water bodies]. *Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta – Transbaikalian State University Journal*. 29(1). pp. 31–43. In Russian. doi: 10.21209/2227-9245-2023-29-1-31-43
- Shtamm E.V., Skurlatov Yu.I., Kozlova N.B., Zaytseva N.I., Aleksandrova E.V. (2011) *Biotestirovanie v otsenke effektivnosti tekhnologiy ochistki stochnykh vod* [Bioassaying in the assessment of wastewater treatment process efficiency]. *Vodnye resursy – Water Resources*. 38(2). pp. 237–243.
- Shchetinina E.V., Maksimov V.V., Kraykivskaya O.V., Maksimova E.A. (2013) *Otsenka sostoyaniya vodnykh mass Yuzhnogo Baykala v rayone vliyaniya Baykal'skogo TsBK po mnogoletnim mikrobiologicheskimi pokazatelyam* [Assessing the state of water masses of the Southern Baikal in the zone of influence of Baikal PPM by many-year microbiological characteristics]. *Vodnye resursy – Water Resources*. 40(6). pp. 649–656.
- Yanin E.P. (2012) *Osobennosti tekhnogennoy postavki i raspredeleniya rtuti v vode maloy reki v zone vliyaniya promyshlennogo goroda* [Especially technological transfer and distribution of mercury in the water of small river in the area of influence of industrial city]. *Ekologicheskie sistemy i pribory – Ecological Systems and Devices*. 12. pp. 24–29. In Russian
- Aries S., Valladon M., Polve M., Dupre B. (2000) A Routine Method for Oxide and Hydroxide Interference Corrections in ICP-MS Chemical Analysis of Environmental and Geological Samples. *Geostandards Newsletter*. 24 (1). pp. 19–31. doi: 10.1111/j.1751-908X.2000.tb00583.x
- Geyh M.A., Schleicher H. (1990) *Absolute Age Determination: Physical and Chemical Dating Methods and Their Application*. Heidelberg: Springer Berlin. 503 pp.

Kulikova N.N., Chebykin E.P., Suturin A.N., Vashukevich N.V., Timoshkin O.A. (2020) Impact of the coastal taiga fires onto chemical elemental composition of soils, grounds and near-shore waters of Bol'shoy Ushkaniy Island (Lake Baikal, Siberia). *Limnology and Freshwater Biology*. 4. pp. 671–672. doi: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-671

Malnik V., Masumi Y., Tomberg I., Molozhnikova E., Bukin Y., Timoshkin O. (2022) Lacustrine, wastewater, interstitial and fluvial water quality in the Southern Lake Baikal region. *Journal of Water and Health*. 20(1). pp. 23–40. doi: 10.2166/wh.2021.064

Radnaeva L.D., Bazarzhapov T.Z., Shiretorova V.G., Zhigzhitzhapova S.V., Nikitina E.P., Dylanova E.P., Shirapova G.S., Budaeva O.D., Beshentsev, A.N., Garmaev E.Z., Wang P., Dong S., Li Z., Tulokhonov A.K. (2022) Ecological State of Lake Gusinoe – A Cooling Pond of the Gusinozersk GRES. *Water*. 14(1). Art. No. 4. doi: 10.3390/w14010004

R-ArcticNet [Electronic resource]: A Regional, Electronic, Hydrographic Data Network For the Arctic Region. URL: <https://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/ViewPoint.pl?Point=6069> (Date of accessed: 23.08.2023).

Suturin A.N., Paradina L.F., Epov V.N., Semenov A.R., Lozhkin V.I., Petrov L.L. (2003) Preparation and assessment of a candidate reference sample of Lake Baikal deep water. *Spectrochimica Acta Part B*. 58. pp. 277–288. doi: 10.1016/S0584-8547(02)00157-X

Timoshkin O.A., Moore M.V., Kulikova N.N., Tomberg I.V., Malnik V.V., Shimaraev M.N., Troitskaya E.S., Shirokaya A.A., Sinyukovich V.N., Zaitseva E.P., Domysheva V.M., Yamamuro M., Poberezhnaya A.E., Timoshkina E.M. (2018) Groundwater contamination by sewage causes benthic algal outbreaks in the littoral zone of Lake Baikal (East Siberia). *Journal of Great Lakes Research*. 44(2). pp. 230–244. doi: 10.1016/j.jglr.2018.01.008

Информация об авторах:

Чебыкин Евгений Павлович, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Лаборатория биогеохимии, Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: epcheb@yandex.ru

Куликова Наталья Николаевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Лаборатория биогеохимии, Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: kulikova@lin.irk.ru

Лихошвай Елена Валентиновна, доктор биологических наук, профессор, заведующая Отделом ультраструктуры клетки, Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: likhoshway@mail.ru

Сутурин Александр Николаевич, 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 of SB RAS, Irkutsk, Russia.

E-mail: epcheb@yandex.ru

Kulikova N.N., Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Laboratory of biogeochemistry, Limnological Institute of 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 of SB RAS, Irkutsk, Russia.

E-mail: likhoshway@mail.ru

Suturin A.N., Cand. Sci. (Geol.-Miner), Head of Laboratory of biogeochemistry, Limnological Institute of 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; final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 12.09.2023; одобрена после рецензирования 26.01.2024; принята к публикации 27.11.2024

The article was submitted 12.09.2023; approved after reviewing 26.01.2024; accepted for publication 27.11.2024

Научная статья

УДК 556.561

doi: 10.17223/25421379/33/8

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ВОД СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО УЧАСТКА ВАСЮГАНСКОГО БОЛОТА



Юлия Александровна Харанжевская¹

¹ Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа –
филиал СФНЦА РАН, Томск, Россия, kharan@yandex.ru

Аннотация. Приведены результаты оценки пространственно-временных закономерностей изменения электропроводности (ЕС) вод осушенного участка Васюганского болота. Исследования показали, что ЕС находится в обратной корреляции с содержанием в водах Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , HCO_3^- и в прямой корреляции с концентрациями $\text{Fe}_{\text{общ}}$, NH_4^+ , SO_4^{2-} , $\text{C}_{\text{орг}}$, наблюдается рост ЕС при выпадении атмосферных осадков, а на юге исследуемого участка отмечается зона выклинивания грунтовых вод, где ЕС повышается до 359 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Ключевые слова: болотные воды, химический состав, электропроводность, коэффициент фильтрации, лесомелиорация, пирогенный фактор, Западная Сибирь

Источник финансирования: исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-27-00242.

Для цитирования: Харанжевская Ю.А. Оценка пространственно-временной динамики электропроводности вод северо-восточного участка Васюганского болота // Геосферные исследования. 2024. № 4. С. 137–147. doi: 10.17223/25421379/33/8

Original article

doi: 10.17223/25421379/33/8

ASSESSMENT OF SPATIO-TEMPORAL VARIATION IN WATER ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF NORTHEASTERN PART OF THE GREAT VASYUGAN MIRE

Yulia A. Kharanzhevskaya¹

¹ Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of RAS, Siberian Research Institute
of Agriculture and Peat, Tomsk, Russia, kharan@yandex.ru

Abstract. The paper analyzes the spatio-temporal patterns in water electrical conductivity (EC) of the drained area of the Great Vasyugan Mire. The research was carried out in the north-eastern part of the Great Vasyugan Mire, the largest mire system that affects the quality of river water in the Ob River basin.

Electrical conductivity is one of the important indicators of water chemistry and correlates well with the total dissolved solids, depends on the nature of geochemical processes in the peat deposit. The article analyzes the spatial variations of water chemistry and EC in the drained part of the Great Vasyugan Mire in comparison with the pristine area, and analyzes the daily and seasonal dynamics of water EC in order to identify the sources of water and bog water-mineral nutrition for the further development of a hydrological model of the area. The assessment of daily and seasonal dynamics of EC was carried out automatically with an interval of 1–4 hours using permanently installed sensors. The assessment of the spatial variation in EC in the peat deposit of the drained area of the Great Vasyugan Mire was carried out layer by layer through 50 cm to a depth of 2–2.5 m along 2 profiles in the direction from south to north and from west to east using a portable conductometer HANNA HI 8733. Simultaneously with the determination of EC, water samples were taken, a field description of vegetation and peat deposits was carried out, with the determination of peat types and the degree of decomposition, hydraulic conductivity and water table levels. Water samples were taken from a depth of 40–50 cm once a month from March to September 2023 in specially equipped wells 1 meter deep. Laboratory analysis was carried out by titrimetry, spectrophotometry, flame photometry at the Laboratory and Analytical Center of the Siberian Research Institute of Agriculture and Peat. Statistical analysis of the data made using the non-parametric Mann–Whitney test, cluster analysis. Studies have shown that EC is inversely correlated with the content of Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , HCO_3^- in waters and in direct correlation with the concentrations of Fe_{total} , NH_4^+ , SO_4^{2-} , DOC, and an increase in EC is observed during precipitation event, and in the south of the study area there is a zone of groundwater supply, where EC rises up to 359 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Research has shown that EC can be a good tracer for determining river recharge sources when developing a hydrological model of a river basin and predicting water flows under climate change. On the other hand, daily data on EC can become a good basis for obtaining information about water

chemistry in the time intervals between sampling, which is very important for discrete sampling in conditions of inaccessibility and large distribution of mires in Western Siberia.

Keywords: raised bog, waters, chemical composition, electrical conductivity, hydraulic conductivity, forest reclamation, pyrogenic factor, Western Siberia

Source of financing: The research was supported by the Russian Science Foundation, project no. 22-27-00242

For citation: Kharanzhevskaya Y.A. (2024) Assessment of spatio-temporal variation in water electrical conductivity of drained part of the Great Vasyugan Mire. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 137–147. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/33/8

Введение

Западно-Сибирская равнина – уникальный заболоченный регион, болота занимают здесь огромные пространства и играют большую роль в формировании качества вод и сезонной динамики химического состава речных вод [Savichev et al., 2016]. Химический состав болотных вод имеет региональные особенности в содержании элементов, зависит от климатических и гидрогеологических условий территории [Черняев и др., 1989; Здвижков, 2005; Bourbonniere, 2009; Шмаков, 2016; Калужный, 2018; Савичев, Мазуров, 2018; Потапова и др., 2020]. Современные тенденции изменения климата оказывают влияние на химический состав болотных вод [Olid et al., 2017; Lepistö et al., 2021]. Исследования [Eckstein et al., 2015; Griffiths et al., 2019] показали, что температурный режим оказывает значительное влияние на химический состав болотных вод, при этом повышение уровней воды после продолжительных засушливых периодов приводит к увеличению концентраций ряда химических веществ. В условиях пирогенного фактора в болотных водах отмечается рост концентраций химических веществ (Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , Cl^- , K^+ , Na^+ , $\text{C}_{\text{орг}}$) [Ackley et al., 2021], повышается их вынос с болотными и речными водами. Химический состав вод и условия его формирования различаются по территории болотного массива и зависят не только от вида болотного микроландшафта, но и от расположения пункта отбора проб относительно сетки линий стекания [Харанжевская, 2022; Kharanzhevskaya, 2022].

Одним из важных показателей химического состава вод является электропроводность (ЕС), которая, как правило, коррелирует с общей концентрацией растворенных химических веществ в водах и зависит от характера гидрогеохимических процессов в торфяной залежи. Электропроводность весьма часто используется в качестве трассера при гидрологических исследованиях, для расчета генетических составляющих речного стока [Hayashi et al., 2012; Benettin et al., 2017; Cano-Paoli et al., 2019]. Проведенные ранее исследования [Kharanzhevskaya et al., 2020] показали следующее: величина ЕС – весьма хороший индикатор для выявления источников водно-минерального питания болот и изменения химического состава болотных вод по глубине, что является весьма важной задачей при гидрологическом моделировании.

Анализ данных [Kharanzhevskaya, 2021] показал, что отмечается сезонная динамика в изменении электропроводности вод Васюганского болота и выделяется три максимума электропроводности вод. Формирование первого происходит в период снеготаяния в апреле с поступлением в раствор минеральных веществ, накопленных в снеге и в торфяной залежи за зимний период; второго – в мае после полного оттаивания торфяной залежи; третьего – в меженный период в конце июля в результате активизации биохимических процессов в торфяной залежи. Исследования показали устойчивость величины электропроводности вод в течение временных интервалов от 3–5 до 6–10 дней при изменении гидрометеорологических условий (уровни болотных вод, температура воздуха), что определяет буферность системы в изменении состава болотных вод под воздействием внешних условий среды.

В рамках данной работы планируется оценить изменения химического состава вод по площади осушенного участка Васюганского болота в сравнении с фоновым естественным участком, провести анализ суточной и сезонной динамики электропроводности вод и выявить источники водно-минерального питания болотного массива на основе анализа пространственно-временных закономерностей изменения электропроводности для разработки гидрологической модели участка.

Объекты и методы исследований

Исследования проводились в пределах модельного водосбора малой реки Гавриловка, левобережного притока р. Икса в бассейне Средней Оби. Бассейн р. Гавриловка (площадь 81 км²) располагается на территории северо-восточного осушенного участка Васюганского болота, дренажная сеть занимает 39 км². Осушение болота для лесоразведения проведено в 1980-х гг. сетью открытых каналов с расстоянием 160–180 м, в настоящее время отмечается зарастание осушительных каналов и восстановление скорости торфонакопления [Maloletko et al., 2018; Sinyutkina, 2021]. В 2016 г. на территории водосбора произошел пожар, выгорел участок площадью 5,54 км², мощность горелого слоя составила 5–15 см [Sinyutkina et al., 2020]. В качестве фоновой территории был использован аналогичный естественный участок Васюганского болота, расположенный в 8 км севернее, в границах водосбора малой р. Ключ (правобережный приток р. Бакчар).

Исследования проводились в пределах аналогичных сосново-кустарничково-сфагновых болотных микроландшафтов на осушенном (РГ), на естественном (ПЗ) и пирогенном участках Васюганского болота. Контроль электропроводности вод осуществлялся в даты отбора проб воды с помощью портативного кондуктометра HANNA HI 8733.

Отбор проб болотной воды осуществляли с глубины 40–50 см с периодичностью 1 раз в месяц с марта по сентябрь 2023 г. из специально оборудованных скважин глубиной 1 м. Химический анализ болотных вод выполняли с применением аттестованных методик в Лабораторно-аналитическом центре СибНИИСХиТ – филиале СФНЦА РАН. Концентрацию CO_2 , HCO_3^- , Cl^- в воде устанавливали титриметрическим методом, $\text{Fe}_{\text{общ}}$, NO_3^- , NH_4^+ , SO_4^{2-} – спектрофотометрическим методом (Specol-1300, Analytik Jena AG, Германия), концентрацию ионов K^+ , Na^+ – методом пламенной фотометрии (ПФА-378, Россия). Минерализацию вод ($\Sigma_{\text{и}}$) оценивали по сумме ионов. Содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ в болотных водах определяли в соответствии с СТП 0493925-008-93.

Оценка суточной динамики электропроводности болотных вод проводилась за интервал инструментальных наблюдений 01.04–19.09.2023. Измерение электропроводности проводилось в автоматическом режиме с интервалом 1–4 ч с использованием сенсора (разработка ИМКЭС СО РАН [Bazarov et al., 2018]),

установленного стационарно на глубину 50 см на естественном (ПЗ), осушенном (РГ) и пирогенном (ПГ2) участках Васюганского болота. Контроль электропроводности вод осуществлялся в даты отбора проб воды с помощью портативного кондуктометра HANNA HI 8733.

Оценка пространственной вариации электропроводности вод в торфяной залежи осушенного участка Васюганского болота проводилась по-слойно через 50 см до глубины 2–2,5 м по двум профилям в направлении с юга на север и с запада на восток с применением портативного кондуктометра HANNA HI 8733. Профиль, заложенный с запада на восток, пересекал, соответственно, сначала грядово-мочажинный комплекс (ЕС1), затем захватывал пирогенный участок (ЕС2) с сосново-кустарничково-сфагновым микроландшафтом, а затем проходил по участкам с березово-сосново-кустарничково-сфагновым микроландшафтами (ЕС3, ЕС4) на контакте с топью выклинивания и заканчивался сосново-кустарничково-сфагновым микроландшафтом (ЕС5). Точки ЕС6 и ЕС7 представляют собой березово-сосновый микроландшафт и березовый травяной заболоченный лес, которые не участвуют в анализе в связи с низким уровнем болотных вод и невозможностью определить ЕС. Всего было выполнено полевое описание 12 точек, расположенных на двух профилях общей протяженностью 7 391 м, из них 10 точек были использованы для построения профилей электропроводности (рис. 1, 2).



Рис. 1. Схема расположения пунктов отбора проб на естественном (ПЗ), осушенном (РГ) и пирогенном (ПГ2) участках Васюганского болота

Fig. 1. Sampling points location in pristine (P3), drained (RG) and fire-event area (PG2) in the Great Vasyugan Mire



Рис. 2. Схема расположения профилей электропроводности в пределах участка Васюганского болота

Fig. 2. Location of electrical conductivity profiles in the Great Vasyugan Mire

Для проведения полевого определения ЕС на заданную глубину устанавливались пластиковые трубы (ПВХ) с перфорацией 50 см. Одновременно с определением электропроводности проводилось полевое описание растительности и торфяной залежи с определением вида торфа и степени разложения, коэффициентов фильтрации и уровней болотных вод (УБВ). Коэффициент фильтрации определялся послойно (через 50 см) на глубину до 1 м путем фиксации времени наполнения пробоотборника заданного объема после откачки воды из скважины в трехкратной повторности. Для проведения опыта использовался пробоотборник Solinst 428 (фирмы Solinst Canada Ltd., Канада). Для полевого опыта была заложена серия труб диаметром 5 см и с перфорацией 50 см на заданную глубину. Расчет коэффициентов фильтрации производился по формуле Г.Д. Эркина:

$$K_{\phi} = \frac{3.5r^2}{(H+d)t} \lg(y_0/y),$$

где K_{ϕ} – коэффициент фильтрации, см/с; r – радиус скважины, см; d – диаметр скважины, см; H – мощность слоя фильтрации (50 см), см; y_0 – расстояние от начального уровня воды в скважине до конечного уровня откачки, см; y – расстояние от начального

уровня воды в скважине до переменного уровня в период его восстановления, см; t – промежуток времени от начала опыта до момента измерения уровня в скважине, сек [Наставления..., 1990].

Методика анализа данных включала кластерный анализ и оценку значимости различий в химическом составе вод естественного и осушенного участков Васюганского болота по непараметрическому критерию (Манна–Уитни). Кластерный анализ проводили с использованием иерархического метода Уорда с расчетом Евклидова расстояния.

Результаты

Анализ данных показал, что пробы, отобранные в 2023 г. в микроландшафтах осушенного участка Васюганского болота в бассейне р. Гавриловка, характеризуется повышенным в 1,4 раза содержанием практически всех компонентов (кроме HCO_3^-) в химическом составе вод в сравнении с естественным участком. Достоверные различия (тест Манна–Уитни) в химическом составе вод участка РГ в сравнении с фоновым отмечаются по содержанию $\text{C}_{\text{орг}}$ ($Z = 2,81$, $p < 0,05$), Cl^- ($Z = 2,56$, $p < 0,05$) В водах участка ПГ2

достоверные различия по критерию Манна–Уитни наблюдаются по содержанию K^+ ($Z = -2,36, p < 0,05$), Ca^{2+} ($Z = -2,17, p < 0,05$), Cl^- ($Z = -2,56, p < 0,05$), $C_{орг}$ ($Z = -3,07, p < 0,05$), минерализации ($Z = -2,30, p < 0,05$) (рис. 3).

Анализ ежедневных данных по электропроводности со стационарных датчиков показал, что в среднем за сезон величина ЕС вод на осушенном участке составила 67 $\mu S/cm$, а на естественном участке – 66 $\mu S/cm$ (рис. 4).



Рис. 3. Сезонная динамика химического состава болотных вод осушенного (РГ), пирогенного (ПГ2) и естественного (П3) участков Васюганского болота за март–сентябрь 2023 г.

Fig. 3. Seasonal dynamics of water chemistry in the drained (RG), fire-event (PG2) and pristine (P3) areas of the Great Vasyugan Mire for March–September 2023

В водах пирогенного участка величина ЕС выше и в среднем равна 111 $\mu S/cm$. В сезонной динамике отмечается снижение электропроводности вод в период снеготаяния в апреле, и с начала мая наблюдается закономерный рост ЕС. При этом на пирогенном (ПГ2) и естественном (П3) участках отмечается весьма тесная корреляция и заметный рост ЕС при выпадении атмосферных осадков, тогда как на участке РГ реакция ЕС более сглаженная. Максимальная величина ЕС вод на пирогенном участке составила 209 $\mu S/cm$ и отмечена 05.08.2023, тогда как на других участках наблюдалась немного ранее 22.08.2023 и составила: П3 – 111 $\mu S/cm$, РГ – 104 $\mu S/cm$. Анализ матрицы коэффициентов корреляции показал неожиданную тенденцию, что электропроводность болотных вод находится в обратной корреляционной зависимости с содержанием в водах

Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , HCO_3^- , величиной pH и в прямой корреляции с концентрациями $Fe_{общ}$, NH_4^+ , SO_4^{2-} , $C_{орг}$ (табл. 1).

Анализ пространственной вариации ЕС по территории осушенного участка Васюганского болота показал, что на профиле А, который был заложен с запада на восток, электропроводность варьировала от 46 до 100 $\mu S/cm$, а в среднем составила 78 $\mu S/cm$. В верхнем слое 0–50 см, как правило, отмечается рост ЕС, что связано с повышением концентрации растворенных органических веществ в болотных водах в условиях доступа кислорода. В слое 50–100 см ЕС немного снижается, а в придонных слоях электропроводность увеличивается. В целом следует отметить схожие тенденции изменения ЕС по глубине на точках ЕС3, ЕС5, немного отличные закономерности

зафиксированы для точки ЕС2, которая заложена на пирогенном участке.

В торфяной залежи этого участка отмечается повышение ЕС до 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ в слое 100–150 см, что, вероятно, определяется резкой сменой вида торфа и степени разложения. И наоборот, на участке грядово-мочажинного комплекса (ЕС1) в слое 100–150 см отме-

чается некоторое снижение ЕС, что определяется повышением коэффициентов фильтрации в этом слое. Точка ЕС4 с сосново-березовым кустарничково-сфагновым микроландшафтом характеризуется практически равномерным распределением ЕС в интервале 70–78 $\mu\text{S}/\text{cm}$ по глубине с некоторым снижением величин в слоях 50–100 и 100–150 см (рис. 5).

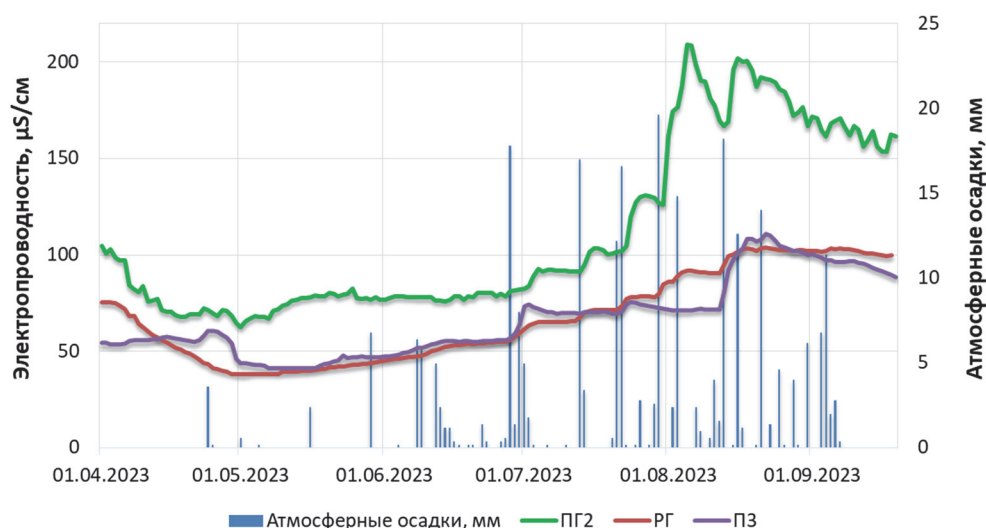


Рис. 4. Сезонная динамика электропроводности вод естественного (ПЗ), осушенного (РГ) и пирогенного (ПГ2) участков Васюганского болота

Fig. 4. Seasonal dynamics of water electrical conductivity in pristine (P3), drained (RG) and fire-event (PG2) areas of the Great Vasyugan Mire

Таблица 1

Матрица коэффициентов корреляции электропроводности и концентрации химических веществ в водах естественного (ПЗ), осушенного (РГ) и пирогенного (ПГ2) участков Васюганского болота за апрель–сентябрь 2023 г.

Table 1

Correlation matrix of electrical conductivity and concentration of chemical substances in waters of pristine (P3), drained (RG) and pyrogenic (PG2) areas of the Great Vasyugan Mire for April–September 2023

Пункт отбор проб	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	Fe _{общ}	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	C _{орг}	Σ _и
ПЗ	-0,14	-0,77	-0,60	-0,40	-0,52	0,13	0,16	-0,39	0,55	0,0	-0,29	0,26	-0,38
РГ	-0,22	0,02	0,09	-0,50	0,56	0,93	0,69	-0,27	-0,48	0,36	-0,73	0,85	0,10
ПГ2	-0,59	0,26	0,31	-0,59	0,04	-0,08	0,46	0,10	0,38	0,82	-0,33	0,50	0,12

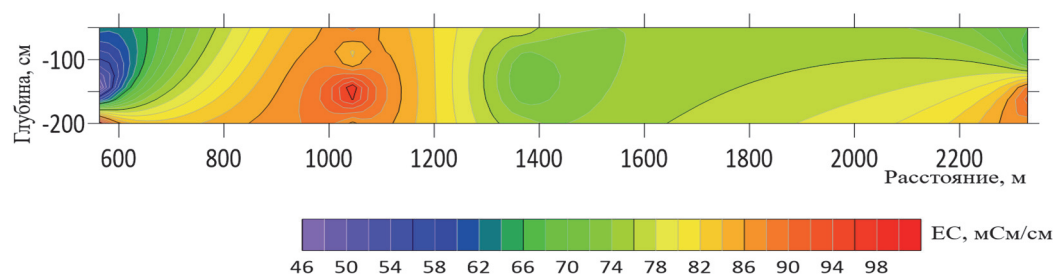


Рис. 5. Профиль А электропроводности в слое 0–200 см торфяной залежи Васюганского болота (запад–восток)

Fig. 5. Profile A of electrical conductivity in the 0–200 cm layer of peat deposit of the Great Vasyugan Mire (West–East)

Сопоставление данных с коэффициентами фильтрации (Кф) в верхних слоях показало, что при увеличении Кф электропроводность вод всегда снижается. В целом среди исследованных участков профиля А резкое снижение проницаемости ($K_f = 0,06$ м/сут) торфяной залежи отмечено на точках ЕС3 и ЕС4, которые представлены сосново-березовым кустарничково-сфагновым микроландшафтом. Для этих же участков характерно снижение уровней болотных вод до -40 см и -35 см соответственно, что определяется генетическими особенностями участка и особым строением торфяной залежи преобладанием травяного и травяно-сфагнового торфов. В целом точки ЕС3 и ЕС4 располагаются на контакте с топью выклинивания. Коэффициент фильтрации в верхних слоях 0–50 и 50–100 см в остальных точках профиля А варьирует от 0,15–0,49 м/сут в пределах сосново-кустарничково-сфагновых микроландшафтов и до 3,04 м/сут в грядово-мочажинном комплексе. В целом на профиле А, заложенном с запада на восток исследуемого бассейна р. Гавриловка отмечена только одна точка (ЕС2), где в торфяной залежи наблюдается

некоторое повышение ЕС (до $100 \mu\text{S}/\text{cm}$), в основном же электропроводность вод ниже, что свидетельствует об отсутствии выклинивания грунтовых вод.

Профиль Б заложен с севера на юг, и он пересекает три участка с сосново-кустарничково-сфагновыми микроландшафтами и два топьяных участка на юге. В центре он пересекается с профилем А в точке ЕС3 (рис. 6).

Анализ данных показал, что для профиля Б вариация ЕС более значима, а общие тенденции изменения по глубине повторяются только в пределах рямов. Так, в осоково-сфагновых микроландшафтах ЕС в среднем составляет $51 \mu\text{S}/\text{cm}$ и варьирует от 34–50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ в верхних слоях до 132 $\mu\text{S}/\text{cm}$ в придонном слое. На рямках (ЕС8 и ЕС9) электропроводность в среднем составила 73 $\mu\text{S}/\text{cm}$, в верхних 0–100 см слоях также отмечается повышение ЕС до 79–94 $\mu\text{S}/\text{cm}$, а в придонных слоях отмечается снижение величин до 52–56 $\mu\text{S}/\text{cm}$, что определяется уменьшением проницаемости торфяной залежи в соответствии с ее строением и увеличением степени разложения до 35–40 % (рис. 7).

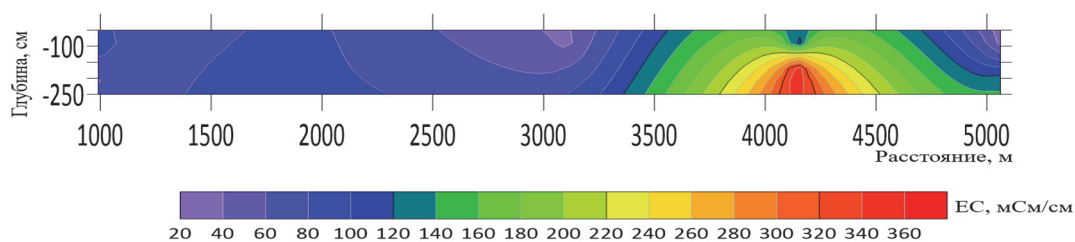


Рис. 6. Профиль Б электропроводности в слое 0–200 см торфяной залежи Васюганского болота (север–юг)

Fig. 6. Profile B of electrical conductivity in the 0–200 cm layer of peat deposit of the Great Vasyugan Mire (North–South)

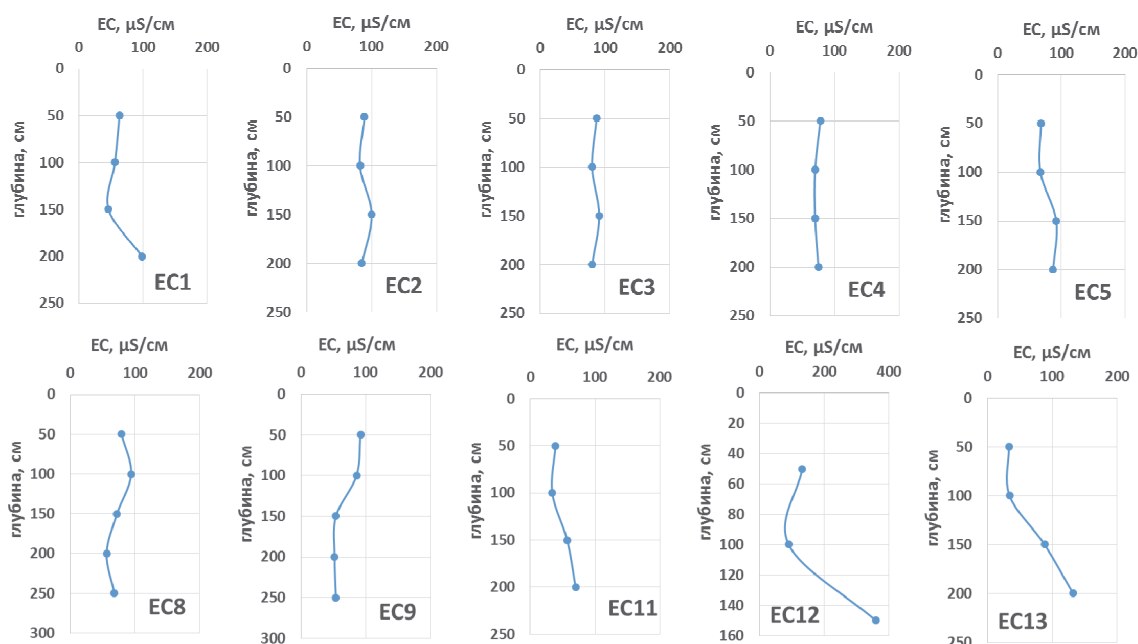


Рис. 7. Профили электропроводности вод в торфяной залежи Васюганского болота

Fig. 7. Water electrical conductivity profiles in a peat deposit of the Great Vasyugan Mire

И только одна точка (ЕС12) на профиле Б, заложенная в южной части бассейна в пределах сосново-кустарничково-сфагнового микроландшафта, показала резкий рост ЕС в водах. Так, в верхних слоях величина ЕС составила 132 $\mu\text{S}/\text{см}$, а в придонном слое отмечено увеличение до 359 $\mu\text{S}/\text{см}$, что служит явным индикатором присутствия грунтового питания. Данные о коэффициентах фильтрации показывают более высокую проницаемость торфяной залежи осоково-сфагновых топей (ЕС 11 и ЕС 13), где Кф изменяется в диапазоне от 14 до 52 м/сут на естественной и осушенной топи соответственно. На рямах коэффициенты фильтрации варьируют от 0,35 до 1,40 м/сут.

При этом важно отметить, что в точке с сосново-кустарничково-сфагновым микроландшафтом с высокой электропроводностью (ЕС 12) отмечены коэффициенты фильтрации (7,6 м/сут), которые значительно в 5–20 раз превышают данные по другим участкам с аналогичным микроландшафтом.

Анализируя корреляционные зависимости, можно отметить, что в целом в верхнем слое 0–50 см торфяной залежи наблюдается обратная корреляционная зависимость электропроводности вод со степенью разложения торфа ($r = -0,45$) (табл. 2). Корреляция с уровнем болотных вод также отрицательная и более значимая в слое 50–100 см ($r = -0,69$). Как показал анализ данных, коэффициент фильтрации также оказывает влияние на ЕС вод, электропроводность вод, как правило, снижается при увеличении проницаемости торфяной залежи. Кластерный анализ показал наличие двух кластеров, в первый кластер выделилась точка ЕС12, где отмечено наличие грунтового питания, а во второй кластер вошли все оставшиеся точки. Также можно отметить существование двух подкластеров во втором кластере. В первый подкластер вошли пробы, отобранные в пределах сосново-кустарничково-сфагновых микроландшафтов с более высокими значениями ЕС (в среднем 78 $\mu\text{S}/\text{см}$), а во второй подкластер – топяные участки и грядово-мочажинный комплекс, где средняя величина ЕС снижается до 64 $\mu\text{S}/\text{см}$ (рис. 8).

Таблица 2

Матрица коэффициентов корреляции электропроводности вод с уровнями болотных вод (УБВ), коэффициентом фильтрации и степенью разложения торфа

Table 2

Correlation matrix of water electrical conductivity with water table levels, hydraulic conductivity and degree of peat decomposition

ЕС	Степень разложения	УБВ	Коэффициент фильтрации
0–50	–0,45	–0,41	–0,53
50–100	–0,21	–0,69	–0,90
100–150	0,68	–0,002	Не определялся
150–200	–0,17	0,48	Не определялся

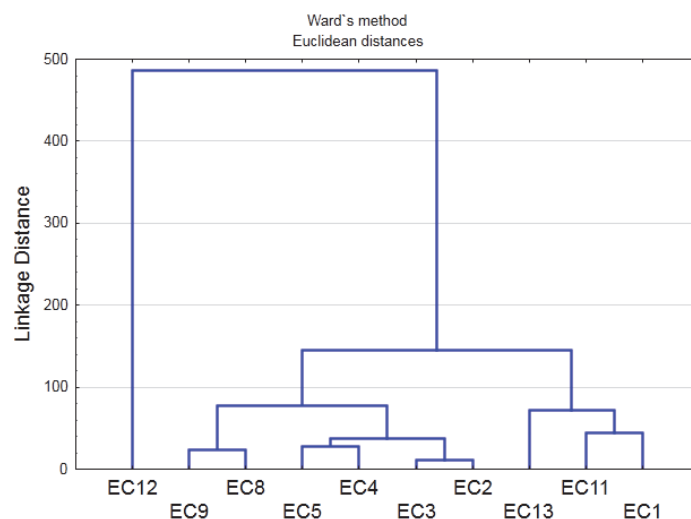


Рис. 8. Дендрограмма кластерного анализа участков полевого определения ЕС

Fig. 8. Cluster analysis dendrogram of the EC key sites

Заключение

Анализ данных показал, что осушенный участок Васюганского болота характеризуется повышенными концентрациями практически всех компонентов в химическом составе вод в сравнении с естественным участком, при этом достоверные различия отмечены только по содержанию в водах Cl^- , $\text{C}_{\text{орг}}$. Пирогенный участок характеризуется значимым повышением в болотных водах концентраций Ca^{2+} , K^+ , Cl^- , $\text{C}_{\text{орг}}$. Анализ ежедневных данных по электропроводности вод показал тесную корреляцию и заметный рост ЕС при выпадении атмосферных осадков, особенно на пирогенном участке, где отмечено повышение электропроводности до 209 $\mu\text{S}/\text{см}$. Корреляционный анализ показал, что электропроводность болотных вод находится в обратной корреляционной зависимости с содержанием в водах Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , HCO_3^- , величиной pH и в прямой корреляции с концентрациями $\text{Fe}_{\text{общ}}$, NH_4^+ , SO_4^{2-} , $\text{C}_{\text{орг}}$. Результаты оценки пространственной вариации ЕС показали, что исследуемый осушенный участок Васюганского болота в границах водосбора р. Гавриловка характеризуется наличием локального грунтового питания на юге. Индикатором грунтового питания является повышение электропроводности вод в нижних слоях торфяной

залежи до 132–359 $\mu\text{S}/\text{см}$. На пирогенном участке в верхних слоях величины ЕС сопоставимы, однако отмечается повышение электропроводности до 100 $\mu\text{S}/\text{см}$ в слое 100–150 см. Вне зоны грунтового питания в пределах сосново-кустарничково-сфагновых микроландшафтов в среднем величина ЕС составляет 78 $\mu\text{S}/\text{см}$, а в пределах топяных участков и грядово-мочажинного комплекса снижается до 64 $\mu\text{S}/\text{см}$. Электропроводность, как правило, находится в обратной корреляционной зависимости с уровнем болотных вод, степенью разложения и коэффициентами фильтрации, поэтому на участках с более высоким уровнем болотных вод и коэффициентами фильтрации ЕС снижается.

Таким образом, с одной стороны, электропроводность может быть хорошим трассером для определения источников питания реки при разработке гидрологической модели речного бассейна и прогнозах характерных расходов воды в условиях изменения климата. С другой стороны, суточные данные по электропроводности могут стать неплохой основой для получения информации о химическом составе природных вод в интервалы времени между отборами проб, что весьма важно при дискретном отборе проб в условиях недоступности и высокой заболоченности территории Западно-Сибирской равнины.

Список источников

- Здвижков М.А.** Гидрогеохимия Васюганского болота : автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Томск, 2005. 187 с.
- Калюжный И.Л.** Общие черты формирования гидрохимического режима основных типов болот России // Метеорология и гидрология. 2018. № 8. С. 72–81.
- Наставления** гидрометеорологическим станциям и постам. Л. : Гидрометеиздат, 1990. Вып. 8. 361 с.
- Потапова Т.М., Марков М.Л., Задонская О.В.** Установление гидрохимического фона верховых болот различных регионов России для обоснования нормативов допустимого воздействия на болота // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2020. Т. 65, № 3. С. 455–467. doi: 10.21638/spbu07.2020.303
- Савичев О.Г., Мазуров А.К.** Временные изменения химического состава вод в восточной части Васюганского болота (Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 2. С. 38–48.
- Харанжевская Ю.А.** Анализ сезонной и многолетней динамики химического состава вод осушенного участка Васюганского болота // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 8. (август). С. 215–225. doi: 10.18799/24131830/2022/8/3649
- Черняев А.М., Черняева Л.Е., Еремеева М.Н.** Гидрохимия болот. Л. : Гидрометеиздат, 1989. 429 с.
- Шмаков А.В.** Гидрогеохимический режим заболоченных территорий в подтаежной зоне Западной Сибири (на примере Тимирязевского болота у г. Томска) : дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 2016. 201 с.
- 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. Art. no. 146841. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146841
- Bazarov A.V., Badmaev N.B., Kurakov S.A. et al.** Mobile Measurement System for the Coupled Monitoring of Atmospheric and Soil Parameters // Russ. Meteorol. Hydrol. 2018. V. 43. P. 271–275. doi: 10.3103/S106837391804009X
- Benettin P., van Breukelen B.M.** Decomposing the bulk electrical conductivity of streamflow to recover individual solute concentrations at high frequency // Environmental Science & Technology Letters. 2017. V. 4 (12). P. 518–522. doi: 10.1021/acs.estlett.7b00472
- Bourbonniere R.A.** Review of Water Chemistry Research in Natural and Disturbed Peatlands // Canadian Water Resources Journal. 2009. V. 34 (4). P. 393–414. doi: 10.4296/cwrj3404393
- Cano-Paoli K., Chiogna G., Bellin A.** Convenient use of electrical conductivity measurements to investigate hydrological processes in Alpine headwaters // Science of The Total Environment. 2019. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.1
- Eckstein Y., Savichev O.G., Pasechnik E.Yu.** Two decades of trends in ground water chemical composition in The Great Vasyugan Mire, Western Siberia, Russia // Environmental Earth Sciences. 2015. V. 73 (11). P. 7329–7341. doi: 10.1007/s12665-014-3908-z
- Griffiths N.A., Sebestyen S.D., Oleheiser K.C.** Variation in peatland porewater chemistry over time and space along a bog to fen gradient // Science of The Total Environment. 2019. V. 697. Art. no. 134152. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134152

- Hayashi M., Vogt T., Mächler L., Schirmer M.** Diurnal fluctuations of electrical conductivity in a pre-alpine river: effects of photosynthesis and groundwater exchange // *J. Hydrol.* 2012. V. 450. P. 93–104. doi: 10.1130/abs/2017AM-306563
- Kharanzhevskaya Y., Maloletko A., Sinyutkina A., Gielczewski M., Kirschey T., Michalowski R., Grygoruk M.** Assessing mire-river interaction in a pristine Siberian bog-dominated watershed – case study of a part of the Great Vasyugan Mire, Russia // *Journal of Hydrology*. 2020. Art. no. 125315. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125315
- Kharanzhevskaya Yu.A.** Diurnal and seasonal dynamics of the electrical conductivity of water of the northeastern part of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia) // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021. V. 928. Art. no. 012005. doi: 10.1088/1755-1315/928/1/012005
- Kharanzhevskaya Yu.A.** Effect of Drainage on Spatio-Temporal Variation in Water Chemistry of the Great Vasyugan Mire // *Geography and Natural Resources*. 2022. V. 43. Suppl. 1. P. S36–S43. doi: 10.1134/S1875372822050110
- Lepistö A., Räike A., Sallantausta T., Finér L.** Increases in organic carbon and nitrogen concentrations in boreal forested catchments – Changes driven by climate and deposition // *Science of the Total Environment*. 2021. № 780. Art. no. 146627. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146627
- Maloletko A.A., Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Kharanzhevskaya Yu.A., Magur M.G., Voistinova E.S., Ivanova E.S., Chudinovskaya L.A., Khaustova A.A.** Effects of long-term drainage on vegetation, surface topography, hydrology and water chemistry of north-eastern part of Great Vasyugan Mire (Western Siberia) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. V. 211 (1). Art. no. 012033. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/211/1/012033>
- Olid C., Bindler R., Nilsson M.B., Eriksson T., Klaminder J.** Effects of warming and increased nitrogen and sulfur deposition on boreal mire geochemistry // *Applied Geochemistry*. 2017. V. 78. P. 149–157.
- Savichev O.G., Mazurov A.K., Pipko I.I., Sergienko V.I., Semiletova I.P.** Spatial patterns of the evolution of the chemical composition and discharge of river water in the Ob River basin // *Doklady Earth Sciences*. 2016. V. 466(1). P. 59–63. doi: 10.1134/S1028334X16010141
- 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 Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. V. 408. Art. no. 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. V. 205. Art. no. 105464. doi: 10.1016/j.catena.2021.105464

References

- Zdvizhkov M.A. *Gidrogeokhimiya Vasyuganskogo bolota* [Hydrogeochemistry of the Great Vasyugan Mire]: avtoref. diss. ... kand. geol.-miner. nauk. Tomsk, 2005. 187 p. In Russian
- Kalyuzhny I.L. General features of the formation of the hydrochemical regime of the main types of wetlands in Russia // *Meteorology and Hydrology*. 2018. No. 8. pp. 72–81. In Russian
- Nastavleniye gidrometeorologicheskimi stantsiyami i postami* [Instructions for hydrometeorological stations and posts]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. V. 8. 361 p. In Russian
- Potapova T.M., Markov M.L., Zadonskaya O.V. *Ustanovleniye gidrokhimicheskogo fona verkhovnykh bolot razlichnykh regionov Rossii dlya obosnovaniya normativov dopustimogo vozdeystviya na bolota* [Establishment of the hydrochemical background of raised bogs in various regions of Russia to substantiate the standards for permissible impact on bogs] // *Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences*. 2020, V. 65, No. 3, pp. 455–467. doi: 10.21638/spbu07.2020.303. In Russian
- Savichev O.G., Mazurov A.K. *Vremennyye izmeneniya khimicheskogo sostava vod v vostochnoy chasti Vasyuganskogo bolota (Zapadnaya Sibir')* [Temporary changes in the chemical composition of water in the eastern part of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia)] // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018. T. 329. No. 2. pp. 38–48. In Russian
- Kharanzhevskaya Yu.A. *Analiz sezonnoy i mnogoletney dinamiki khimicheskogo sostava vod osushennogo uchastka Vasyuganskogo bolota* [Analysis of seasonal and long-term dynamics of the chemical composition of waters in the drained area of the Great Vasyugan Mire] // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022. T. 333. No. 8. (August). pp. 215–225. doi: 10.18799/24131830/2022/8/3649. In Russian
- Chernyaev A.M., Chernyaeva L.E., Ereemeeva M.N. *Gidrokhimiya bolot* [Hydrochemistry of mires]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. 429 p. In Russian
- Shmakov A.V. *Gidrogeokhimicheskiy rezhim zabolochennykh territoriy v podtayezhnoy zone Zapadnoy Sibiri (na primere Timiryazevskogo bolota u g. Tomsk)* [Hydrogeochemical regime of peatlands in the subtaiga zone of Western Siberia (using the example of the Timiryazevsky bog near Tomsk)]: avtoref. diss. ... kand. geol.-miner. nauk. Tomsk, 2016. 201 p. 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
- Bazarov A.V., Badmaev N.B., Kurakov S.A. et al. Mobile Measurement System for the Coupled Monitoring of Atmospheric and Soil Parameters // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2018. 43. pp. 271–275. doi: 10.3103/S106837391804009X
- Benettin P., van Breukelen B.M. Decomposing the bulk electrical conductivity of streamflow to recover individual solute concentrations at high frequency // *Environmental Science & Technology Letters*. 2017. 4(12). pp. 518–522. doi: 10.1021/acs.estlett.7b00472
- Bourbonniere R.A. Review of Water Chemistry Research in Natural and Disturbed Peatlands. *Canadian Water Resources Journal*. 2009. 34(4). pp. 393–414. doi: 10.4296/cwrj3404393
- Cano-Paoli K., Chiogna G., Bellin A. Convenient use of electrical conductivity measurements to investigate hydrological processes in Alpine headwaters. *Science of the Total Environment*. 2019. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.1

- Eckstein Y., Savichev O.G., Pasechnik E.Yu. Two decades of trends in ground water chemical composition in The Great Vasyugan Mire, Western Siberia, Russia. *Environmental Earth Sciences*. 2015. 73(11). pp. 7329–7341. doi: 10.1007/s12665-014-3908-z
- Griffiths N.A.; Sebestyen S.D.; Oleheiser K.C. Variation in peatland porewater chemistry over time and space along a bog to fen gradient. *Science of The Total Environment*. 2019. 697. 134152. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134152
- Hayashi M., Vogt T., Mächler L., Schirmer M. Diurnal fluctuations of electrical conductivity in a pre-alpine river: effects of photosynthesis and groundwater exchange // *J. Hydrol.* 2012. 450. pp. 93–104. doi: 10.1130/abs/2017AM-306563
- Kharanzhevskaya Y., Maloletko A., Sinyutkina A., Gielczewski M., Kirschey T., Michałowski R., Grygoruk M. Assessing mire-river interaction in a pristine Siberian bog-dominated watershed – case study of a part of the Great Vasyugan Mire, Russia // *Journal of Hydrology*. 2020. 125315. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125315
- Kharanzhevskaya Yu.A. Diurnal and seasonal dynamics of the electrical conductivity of water of the northeastern part of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia) // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021. 928. 012005. doi: 10.1088/1755-1315/928/1/012005
- Kharanzhevskaya Yu. A. Effect of Drainage on Spatio-Temporal Variation in Water Chemistry of the Great Vasyugan Mire // *Geography and Natural Resources*. 2022. V. 43. Suppl. 1. pp. S36–S43. doi: 10.1134/S1875372822050110
- Lepistö A., Räike A., Sallantausta T., Finér L. Increases in organic carbon and nitrogen concentrations in boreal forested catchments – Changes driven by climate and deposition // *Science of the Total Environment*. 2021. № 780. 146627. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146627
- Maloletko A.A., Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Kharanzhevskaya Yu.A., Magur M.G., Voistinova E.S., Ivanova E.S., Chudinovskaya L.A., Khaustova A.A. Effects of long-term drainage on vegetation, surface topography, hydrology and water chemistry of north-eastern part of Great Vasyugan Mire (Western Siberia) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. V. 211 (1). 012033. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/211/1/012033>
- Olid C., Bindler R., Nilsson M.B., Eriksson T., Klaminder J. Effects of warming and increased nitrogen and sulfur deposition on boreal mire geochemistry // *Applied Geochemistry*. 2017. V. 78. pp. 149–157.
- Savichev O.G., Mazurov A.K., Pipko I.I., Sergienko V.I., Semiletova I.P. Spatial patterns of the evolution of the chemical composition and discharge of river water in the Ob River basin // *Doklady Earth Sciences*. 2016. 466 (1). pp. 59–63. doi: 10.1134/S1028334X16010141.
- 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 Conference Series: Earth and Environmental Science*. 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

Информация об авторах:

Харанжевская Ю.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал СФНЦА РАН, Томск, Россия.
E-mail: kharan@yandex.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Kharanzhevskaya Y.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner), Research fellow, Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of RAS, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, Tomsk, Russia.
E-mail: kharan@yandex.ru

Author declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 31.10.2023; одобрена после рецензирования 06.12.2023; принята к публикации 27.11.2024

The article was submitted 31.10.2023; approved after reviewing 06.12.2023; accepted for publication 27.11.2024

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 911.6-911.7

doi: 10.17223/25421379/33/9

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВЫ В УСЛОВИЯХ РЕГИОНАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА СИБИРИ



Лев Михайлович Китаев¹, Татьяна Борисовна Титкова²

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

¹ lkitaev@mail.ru

² titkova@yandex.ru

Аннотация. Проведена оценка пространственной неоднородности сезонной и многолетней изменчивости температурного режима почвы в условиях современного климата Сибири. Региональным снижением к востоку толщины снега и, соответственно, усилением отклика динамики температуры почвы на изменчивость температуры воздуха определяется значительное увеличение вариабельности температур почвы и значительная разница зимних температур воздуха и почвы, существенно превышающая разницу летних температур. Значимые коэффициенты линейных трендов (с положительным знаком) характерны лишь для температур почвы Западной Сибири и юга Дальнего Востока – равно как и положительная значимая регрессионная зависимость хода температуры почвы от изменений толщины снега и летних и зимних температуры воздуха.

Ключевые слова: толщина снега, приземная температура воздуха, температура почвы, пространственное распределение, многолетний ход

Источник финансирования: работа выполнена в рамках темы FMGE-2024-0009 Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук.

Для цитирования: Китаев Л.М., Титкова Т.Б. Сезонная изменчивость температуры почвы в условиях региональной неоднородности метеорологического режима Сибири // Геосферные исследования. 2024. № 4. С. 148–159. doi: 10.17223/25421379/33/9

Original article

doi: 10.17223/25421379/33/9

SEASONAL VARIABILITY OF SOIL TEMPERATURE IN THE CONDITIONS OF REGIONAL HETEROGENEITY OF METEOROLOGICAL REGIME OF SIBERIA

Lev M. Kitaev¹, Tatiana B. Titkova²

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

¹ lkitaev@mail.ru

² titkova@yandex.ru

Abstract. Regional differences in the thermal regime of the soil are determined by the influx of atmospheric heat, and the peculiarities of hydrophysical properties, while exerting a significant impact on biota and water exchange processes; information about soil thermal regime is taken into account when solving many applied problems of land use. The response of soil temperature to the variability of the meteorological regime is not always unambiguous, especially with its significant seasonal fluctuations in the conditions of the north of Eurasia.

The analysis is based on materials from 240 meteorological stations for 1988–2017 – daily data of soil temperature at depths of 20, 40, 80 cm with mercury thermometers at exhaust units, air temperature, snow cover thickness. The observation period covers a significant time with specific climate changes of the late 20th – early 21st centuries; the distribution of meteorological stations over the territory is uneven and has insufficient density (especially in the north of Central Siberia), but, in many ways, its corresponding, nevertheless, to the regional diversity of landscapes.

A considerable increase in the ranges of winter soil temperatures to the east, from 0...–6 °C to 0...–19 °C, was revealed against the background of a decrease in the thickness of the snow cover and, accordingly, with an increase in the response of soil temperature dynamics to a significant decrease in air temperature. Substantial for Siberia, the thickness of the snow cover in the west determines here the low variability of winter soil temperatures, with the values of the standard deviation of the long-term variation

2–4 times less than the values of the summer period. The decrease in the thickness of the snow cover in the center and east of Siberia leads to a change in the seasonal ratio of the values of the standard deviation: the variability of winter soil temperatures becomes 1.5–3 times greater than in summer.

A considerable difference winter air and soil temperatures was revealed, they are higher in 5–10 times than the difference of summer temperatures. Significant coefficients of linear trends (with a positive sign) are typical only for summer soil temperatures in Western Siberia and the Far East. A positive significant regression relationship between variation of soil temperature, air temperature and snow thickness within Western Siberia and the south of the Far East were found with regression coefficients of 0.51–0.81.

At present time, we have not found similar research results for large regions; the identified patterns can be used in the analysis of the results of monitoring of land surface condition, in the development of remote sensing algorithms, and in the refinement of predictive scenarios for environmental changes.

Keywords: snow thickness, surface air temperature, soil temperature, spatial distribution, long-term course

Source of financing: the work was supported by the Program of Fundamental Scientific Research of the State Academies of Sciences FMGE-2024-0009.

For citation: Kitaev L.M., Titkova T.B. (2024) Seasonal variability of soil temperature in the conditions of regional heterogeneity of meteorological regime of Siberia. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 148–159. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/33/9

Введение

Особенности исследований воднофизических свойств почв для севера Евразии связаны с существенными региональными различиями метеорологического режима, растительности и рельефа, определяющими свойства почвенного покрова. Вместе с тем изменчивость температуры почвы, как один из ключевых факторов функционирования ландшафтов, влияет на состояние биоты, обмен тепла и влаги между поверхностью и атмосферой и требует учета в ходе хозяйственного использования земель. Зависимость температурного режима почв от совокупности поступления, переноса, аккумуляции и отдачи тепла описывается, в частности, уравнением энергетического баланса, предложенным В.Р. Волобуевым [1974]. В пределах России, соответственно региональным климатическим характеристикам и физическим свойствам, представлены все основные типы температурных режимов почвенного покрова [Димо, 1972]: мерзлотный, длительно-сезонно-промерзающий, сезонно-промерзающий, непромерзающий, постоянно теплый. Мониторинг температуры почвы проводится гидрометеорологической службой России с 30-х гг. прошлого века, и, в частности, Д.А. Гиличинским, по данным метеорологических станций, на период до 90-х гг. проведено обобщение региональных особенностей температурного режима почв [Гиличинский и др., 2000]. Соответствующие исследования проводятся также на стационарах, расположенных в большинстве случаев в зоне вечной мерзлоты – в отличие от метеорологических станций здесь рассматриваются различные типы почв, но при коротких рядах наблюдений [Оберман, 1998; Павлов, Москаленко, 2001; Мажитова 2008; Каверин и др., 2014], что позволяет детализировать локальные и региональные особенности теплового режима почв

вплоть до Арктического побережья Евразии [Васильев и др., 2011].

Результаты исследований показывают неоднозначность тенденций в изменениях температуры почвы на фоне потепления: наличие несоответствий значений и направленности сезонных и многолетних линейных трендов отдельных регионов, рядом расположенных пунктов наблюдений, соседствующих слоев почвы.

Неоднородная во времени и пространстве реакция температуры почвы на изменчивость климатических процессов и неоднородность метеорологического режима связаны в том числе и во многом с неопределенностью степени влияния снежного покрова на энергообмен поверхности суши и атмосферы ввиду того, что процесс снегонакопления на севере Евразии в течение значительной части года определяет тепловой баланс в цепочке грунт – поверхность – атмосфера, в связи с чем В.А. Кудрявцевым уже в 1954 году была предложена соответствующая система уравнений [Кудрявцев, 1954].

Подобные работы проводились как для зоны сезонного промерзания почвогрунтов, так и для территорий с вечной мерзлотой, в результате чего уточнялся механизм промерзания почвы в условиях потепления второй половины XX в. [Сократов и др., 2001; Мажитова 2008; Осокин, Сосновский, 2015; Китаев и др., 2017; Китаев 2021а, б].

Имеющиеся результаты базируются в основном на использовании данных коротких рядов наблюдений и ограниченном пространственном разрешении исследований. Таким образом, особенности отклика сезонного хода температуры почвы на изменение метеорологического режима представляются неоднозначными и оцененными недостаточно для проведения крупномасштабных пространственно-временных обобщений.

Задача данной работы состоит в уточнении региональной значимости сезонной и многолетней амплитуды температурного режима почвы в условиях современного климата Сибири – как продолжение проведенных нами аналогичных исследований для Восточно-Европейской равнины и Евразийской Субарктики.

Методические подходы и исходные материалы

В результате ранее проведенного анализа [Китаев и др., 2017; Китаев, 2021б], для Восточно-Европейской равнины нами выявлено существенное снижение вариабельности температуры почвы в период с устойчивым снежным покровом, с амплитудой 2,0–3,0 °C в коридоре околонулевых значений. Сам же коридор незначительно сдвигается с севера на юг в положительную область температур, что может быть признаком отклика температурного режима почв на зональные изменения температуры воздуха. Но в целом для региона диапазон пространственных различий среднемноголетних температур почвы невелик: от –1,5 до +1,5 °C на глубине до 40 см и от 0,5 до 2,0 °C на глубине 80 см. Выявлено существенное уменьшение величины стандартного отклонения температуры почвы в зимний период: формирование устойчивого снежного покрова, ввиду его теплоизолирующих свойств, определяет снижение вариабельности температуры почвы в 3–5 раз относительно вариабельности приземной температуры воздуха и в 1,3–1,5 раза относительно вариабельности температуры почвы в предзимний и весенний бесснежные периоды. Многолетние тенденции в изменениях температура почвы в период с устойчивым снежным покровом малозначимы при коэффициентах линейного тренда в 2,0–6,5 раз меньших относительно коэффициентов осени и весны и в 3–4 раза меньше коэффициентов приземной температуры воздуха.

Означенные выше результаты получены в результате сравнения сезонного и многолетнего хода исследуемых характеристик с использованием данных наблюдений локальной и региональной изменчивости температурного режима почв и метеорологических характеристик. В первом случае привлекались результаты синхронных трехлетних экспериментальных наблюдений (2016–2018 гг.) в пределах Центрально-Лесного и Приокско-Террасного заповедников (Тверская и Московская область) – на экспериментальных участках в лесных массивах с преобладанием хвойных и лиственных пород, а также на открытых пространствах. В течение холодного периода года (ноябрь–май включительно) здесь проводились режимные измерения толщины снега и площади покрытия снежным покровом, приземной температуры

воздуха по методикам Росгидромета, соответственно, раз в сутки и с трехчасовым интервалом [Наставление..., 1985], а также замеры температуры почвы на глубинах 10, 20 и 40 см также с интервалом в 3 ч – автоматическими датчиками TCR-G-U-21240; значения температур в ходе анализа усреднялись до среднесуточных. Исследование региональной изменчивости исследуемых характеристик на примере Восточно-Европейской равнины проведено на основе данных наблюдений метеорологических станций также для холодного периода года (ноябрь–май включительно, 1988–2017 гг.): использованы значения среднесуточных приземных температур воздуха, суточных значений толщины снежного покрова и площади покрытия снегом, суточных температур почвы на глубинах 20, 40 и 80 см, замеряемых стационарными вытяжными ртутными термометрами.

Как показал дальнейший анализ, на территории Евразийской Субарктики температура почвы на глубинах до 80 см снижается от +1...–1 °C в Европейском секторе до –15...–20 °C на севере Восточной Сибири как следствие уменьшения к востоку толщины снега и, соответственно, снижения его теплоизолирующих свойств при низких температурах воздуха [Китаев, 2021б]. Аналогично особенностям Восточно-Европейской равнины, с появлением устойчивого снежного покрова в 1,5–9,0 раз по сравнению с осенним и весенним периодами снижается вариабельность температуры почвы в Европейском, Западно-Сибирском и Центрально-Сибирском секторах Евразийской Субарктики. Аномально низкие зимние температуры воздуха при относительно небольшой толщине снега на севере Восточной Сибири определяют повышение вариабельности зимних температур почвы: значения их стандартного отклонения сезонных и многолетних изменений начинают здесь превышать значения стандартного отклонения бесснежных осеннего и весеннего периодов года в 1,2–3,8 раза, заметно повторяя динамику температуры воздуха (коэффициент корреляции 0,59).

Особенности пространственно-временных изменений температуры почвы Сибири рассматривались соответственно методическим подходам, использованным нами при исследовании Восточно-Европейской равнины и Евразийской Субарктики. Здесь в качестве исходной информации используются материалы 240 метеорологических станций за период 1988–2017 гг. – суточные данные наблюдений температуры почвы на глубинах 20, 40, 80 см ртутными термометрами на вытяжных установках, приземной температуры воздуха, характеристик снежного покрова [Наставления..., 1985].

Количественный сравнительный анализ сезонного и многолетнего хода характеристик проведен с использованием методов математической статистики; в частности, для оценки значимости регрессионных зависимостей и коэффициентов линейного тренда использован критерий Стьюдента при уровне 95 %. Период наблюдений охватывает значительный отрезок времени с характерными изменениями климата второй половины XX – начала XXI в.; распределение метеорологических станций по территории неравномерно и имеет недостаточную плотность (особенно на севере Центральной Сибири), но во многом соответствуя, тем не менее, региональному разнообразию ландшафтов.

Региональная изменчивость температуры почвы в холодный период года

Температурный режим почв в Сибири в целом связан с распространением здесь мерзлотного и длительно-сезонно-промерзающего температурных режимов почвы [Димо, 1972], с низкими в зимний период температурами воздуха и уменьшением к востоку толщины снежного покрова. Уточнения сезонных особенностей хода температуры почвы на фоне изменений характеристик метеорологического режима проведены, в том числе, с использованием данных наблюдений реперных метеорологических станций, выбранных, с учетом зональности в основных регионах Сибири (рис. 1):

Западная Сибирь – Игарка, 67,47° с.ш., 86,57° в.д.; Ларьяк 61,10° с.ш., 80,25° в.д.; Омск 55,02° с.ш., 73,38° в.д.;

Центральная Сибирь – Нюрба, 63,2° с.ш., 108,33° в.д.; Киренск, 57,77° с.ш., 108,07° в.д.; Бабушкин, 51,72° с.ш., 105,85° в.д.;

Восточная Сибирь – Оймякон, 63,25° с.ш., 143,15° в.д.; Благовещенск 50,25° с.ш., 127,50° в.д.; Сусуман 68,78° с.ш., 148,17° в.д.

Сезонная изменчивость температур почвы в Западной Сибири во многом близка их изменениям в условиях Восточно-Европейской равнины [Китаев, 2021б]. При среднемноголетних сезонных максимумах толщины снега с севера на юг 87, 63, 46 см и минимальных сезонных температурах воздуха –28, –21, –18 °С, после установления устойчивого снежного покрова разница температура почвы на глубинах до 80 см варьирует в диапазоне от 1,5 до 2,5 °С, с изменениями за период с устойчивым снежным покровом в диапазоне от 1,5 до –2,7 °С при положительных температурах на глубине 80 см (рис. 1).

В Центральной Сибири происходит снижение толщин снега и температур воздуха: с севера на юг сезонные среднемноголетние максимумы толщины снега составляют 43, 44 и 13 см, минимумы температуры воздуха –38, –30, –17 °С.

В этих условиях диапазон температур почвы на глубине до 80 см увеличивается до 2,5–3,0 °С, изменяясь в течение снежного периода в диапазоне уже от 0 до –6 °С. Горизонты на глубине 80 см, в отличие от Восточно-Европейской равнины, имеют уже отрицательные значения температур, оставаясь при этом наиболее теплыми (см. рис. 1).

В Восточной Сибири наблюдается дальнейшее убывание толщин снега и снижение температуры воздуха; с изменением с севера к югу сезонных максимумов снега до 31, 23, 22 см и минимумов температуры воздуха –32, –39, –30 °С. В этих условиях диапазон среднемноголетних температур почвы на глубинах до 80 см достигает 3,5–4,0 °С с наибольшими для Сибири изменениями в течение снежного периода: Оймякон 0...–19 °С, Сусуман 0...–17 °С, Благовещенск 0...–7 °С (см. рис. 1).

Аналогично особенностям Восточно-Европейской равнины, сезонная вариабельность температуры почвы Сибири в зимний период невелика, будучи более чем в три раза меньше вариабельности приземной температуры воздуха – при увеличении коэффициента вариации от 0,10–0,20 °С на западе до 0,69–0,91 °С на востоке, соответственно уменьшению толщины снежного покрова при снижении температуры воздуха.

Особенности многолетней изменчивости температур почвы на фоне изменений температуры воздуха и толщины снежного покрова

Как упоминалось выше, для периода с устойчивым снежным покровом на Восточно-Европейской равнине нами было выявлено существенное снижение вариабельности температур почвы – при узком диапазоне изменений и незначительных, околонулевых, изменениях по глубине – в сравнении с осенним и весенним бесснежными периодами [Китаев и др., 2017; Китаев, 2021б]. В качестве основной причины малой изменчивости температур принимается наличие теплоизолирующих свойств снега, существенно ослабляющих связь динамики температуры почвы и воздуха [Шерстюков, 2008; Осокин, Сосновский, 2015]. Приведенные выше данные показывают, что в условиях Сибири, на фоне существенного снижения сезонных значений температуры воздуха и толщины снежного покрова с запада на восток, происходит значительное снижение температур почвы с увеличением диапазона изменчивости (см. рис. 1). Аналогично ранее сделанным выводам для Евразийской Субарктики [Китаев, 2021а], в данном случае можно предположить, что в условиях регионального уменьшения толщины снега сезонная динамика температур почвы в большей степени повторяет сезонную динамику низких температур воздуха.

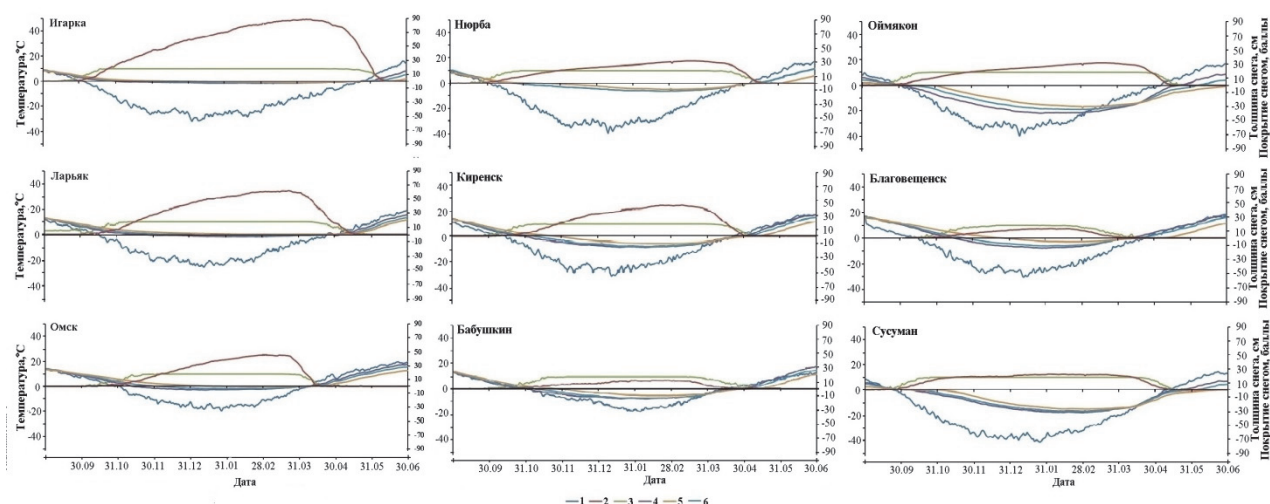


Рис. 1. Региональная изменчивость температур почвы на фоне изменений температуры воздуха и характеристик снежного покрова по данным метеорологических станций

Обозначения: 1 – приземная температура воздуха, °C; 2 – толщина снежного покрова, см; 3 – степень покрытия территории снегом, баллы; 4, 5, 6 – температура почвы на глубинах 20, 40 и 80 см, °C

Fig. 1. Regional variability of soil temperatures against the background of changes in air temperature and snow cover characteristics according to data from meteorological stations

Designations: 1 – surface air temperature, °C; 2 – thickness of snow cover, cm; 3 – degree of snow coverage of the territory, points; 4, 5, 6 – soil temperature at depths of 20, 40 and 80 cm, °C

Для уточнения особенностей изменчивости характеристик, для территории Сибири, наряду с внутрисезонным, рассмотрен многолетний ход характеристик снежного и бесснежного периодов по средним значениям за январь-февраль и июнь-июль-август. Такой выбор обусловлен заметными внутрисезонными спадами и подъемами температур в начале и конце летнего и зимнего периодов (сезонными трендами), что может вносить неопределенность в статистические оценки многолетнего хода средних величин, стандартного отклонения и коэффициентов линейных трендов. Кроме того, представляется интересной оценка изменчивости температурного режима воздуха и почвы в наиболее холодный и теплый периоды года (табл. 1, рис. 2).

По данным реперных станций, многолетние средние сезонные величины толщин снежного покрова убывают с севера к югу и с запада на восток в диапазоне 82–12 см; аналогичным образом изменяется стандартное отклонение многолетних рядов – от 14,5 до 5,1 см; коэффициенты линейного тренда повсеместно незначимы (табл. 1). Распределение толщин снега по территории показывает, прежде всего, их увеличение на Дальнем Востоке до 60–80 см с величинами стандартного отклонения выше 20 см и наличием значимых отрицательных трендов более чем на –1,01 см / 10 лет как реакции на активную циклоническую деятельность региона (рис. 2).

Температура воздуха повышается по секторам к югу и снижается к востоку в 1,5–2,0 раза зимой и на 4–6 °C летом. Разница зимних и летних температур для реперных станций составляет: Западная Сибирь – 40,7; 36,9; 34,1 °C; Центральная Сибирь – 47,4; 40,8; 30,2 °C; Восточная Сибирь – 57,3; 48,2; 40,5 °C; увеличение разницы происходит, прежде всего, за счет существенного снижения зимних температур воздуха (табл. 2). Стандартное отклонение многолетних рядов температуры воздуха зимнего периода повсеместно выше стандартного отклонения летнего периода, с максимальным соотношением 4,6 в Центральной Сибири и минимальным соотношением 1,8 на юге Восточной Сибири. Коэффициенты линейных трендов температуры воздуха в январе-феврале, несмотря на процесс общего потепления, незначимы (см. табл. 2).

Пространственное распределение характеристик зимних температур воздуха по территории (рис. 3) показывает наличие максимумов в Западной Сибири и на Дальнем Востоке (–15...–20 °C и –7...–12 °C), минимумов – в нижнем течении Лены (ниже –30 °C); высокие значения стандартного отклонения в Центральной Сибири (3–4 °C) и меньшие значения в Западной Сибири и на Дальнем Востоке (не более 3 °C); коэффициенты линейных трендов значимы только на севере Восточно-Европейской равнины – 0,12–0,18 °C / 10 лет.

Летом максимальные температуры воздуха (выше 16–18 °С) и минимальные значения стандартного отклонения (менее 0,18 °С) распространены на юге ре-

гиона; значимые положительные коэффициенты линейных трендов выше 0,05 °С / 10 лет – на юге Восточной Сибири (см. рис. 3).

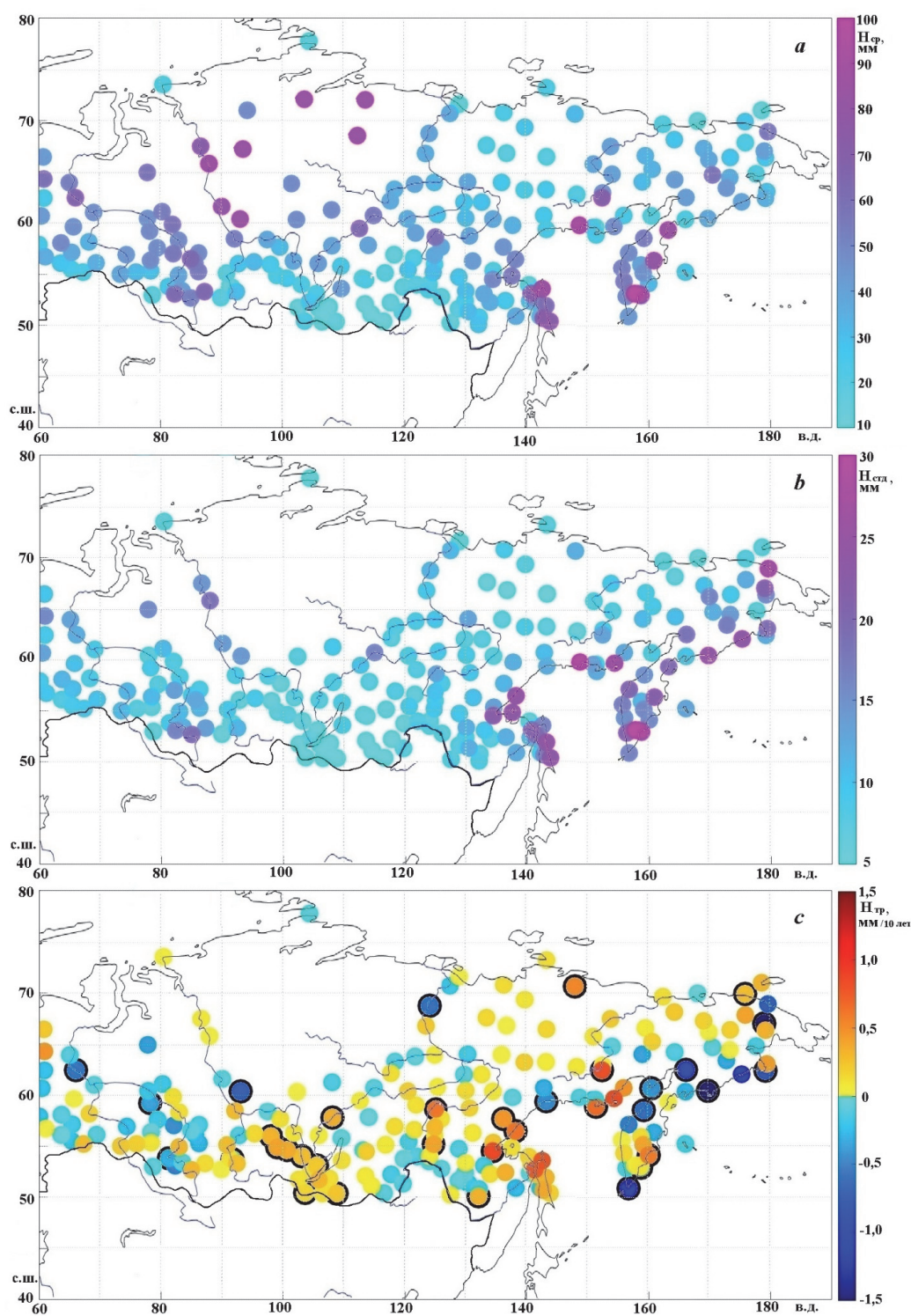


Рис. 2. Пространственная изменчивость многолетних характеристик снежного покрова (январь-февраль)
Обозначения: А – толщина снежного покрова, Б – стандартное отклонение, В – коэффициенты линейных трендов (в маркере – значимые при уровне 95 %)

Fig. 2. Spatial variability of long-term characteristics of snow cover (January-February)
Designations: A – snow cover thickness, B – standard deviation, C – coefficients of linear trends (significant at the level of 95 % in the marker)

Таблица 1

Многолетняя региональная изменчивость высоты снежного покрова (январь-февраль)

Table 1

Long-term regional variability of snow cover height (January-February)

Регион	Пункт	Характеристики		
		Среднее, см	Стандартное отклонение, см	Коэффициенты линейного тренда, см / 10 лет
Западная Сибирь	Игарка	82	14,50	0,75
	Ларьяк	54	11,25	-1,93
	Омск	39	11,12	2,34
Центральная Сибирь	Нюрба	71	14,34	-7,27
	Киренск	39	7,82	0,34
	Бабушкин	12	5,07	0,32
Восточная Сибирь	Оймякон	25	6,75	0,65
	Сусуман	20	5,73	0,86
	Благовещенск	12	7,25	0,79

Примечание. Здесь и в табл. 2, 3 курсивом выделены незначимые на уровне 95 % коэффициенты корреляции.

Note. Here and in the Table 2, 3 insignificant correlation coefficients (less than of 95%) are italicized.

Таблица 2

Многолетняя региональная изменчивость приземной температуры воздуха

Table 2

Long-term regional variability of air temperature

Регион	Пункт	Характеристики, январь-февраль / июнь-июль-август		
		Среднее, °C	Стандартное отклонение, °C	Коэффициенты линейного тренда, °C / 10 лет
Западная Сибирь	Игарка	-26,6 / 14,1	3,94 / 1,19	0,04 / -0,27
	Ларьяк	-20,5 / 16,4	3,97 / 1,41	-0,62 / -0,34
	Омск	-16,0 / 18,1	3,20 / 1,54	-0,89 / 0,15
Центральная Сибирь	Нюрба	-34,3 / 13,1	3,49 / 1,41	0,51 / 0,25
	Киренск	-23,9 / 16,9	4,16 / 0,91	0,28 / -0,07
	Бабушкин	-14,6 / 15,60	2,69 / 0,87	-0,18 / 0,15
Восточная Сибирь	Оймякон	-44,3 / 13,0	2,13 / 1,21	0,05 / 0,33
	Сусуман	-35,5 / 12,7	2,17 / 1,22	0,35 / 0,55
	Благовещенск	-19,1 / 21,4	2,02 / 0,66	-0,01 / 0,38

Почвенный горизонт на глубине 80 см повсеместно является наиболее теплым в зимний период и наиболее холодным летом. По данным реперных станций, повышение зимних средних многолетних температур почвы на 5–13 °C с севера на юг происходит в Центральной и Восточной Сибири при незначительных изменениях в Западной Сибири, соответственно региональным контрастам температуры воздуха. Летом температуры почвы повышаются к югу на 2–10 °C. В пределах Западной Сибири стандартное отклонение многолетних рядов температуры почвы зимой меньше стандартного отклонения температуры летом (0,29–0,82 °C и 0,77–1,72 °C), тогда как в центре и на востоке Сибири стандартное отклонение многолетних рядов зимних температур почвы превышает стандартное отклонение летних температур (1,05–3,49 °C и 0,49–1,79 °C) за счет уменьшения мощности снежного покрова и, как следствие, усиления здесь зависимости динамики температуры почвы от изменений приземной температуры воздуха с коэффициентами корреляции 0,5–0,6 (табл. 1–3).

Пространственное распределение температур почвы отличается плавным снижением их зимних и летних значений к востоку (от -4...-2 °C и 5–12 °C до -10...-14 °C и 4–12 °C), соответственно снижению температуры воздуха (от -15...-27 °C и -25...-35 °C до 16–20 °C и 10–19 °C); стандартное отклонение увеличивается к востоку (от 1,0–1,5 до 1,3–1,8 °C), при максимальных значениях стандартного отклонения температуры воздуха на западе и в центре Сибири (2,1–3,2 °C зимой и 1,2–2,3 °C летом); значимые положительные коэффициенты линейных трендов температур как почвы (0,05–0,08 °C / 10 лет), так и воздуха (0,08–0,12 °C / 10 лет) отмечены лишь на юге Восточной Сибири для (см. рис. 3, 4).

По данным реперных метеорологических станций, разница температур воздуха и температур почвы летнего периода в 5–10 раз превышает разницу температур зимнего периода; при этом разница температур уменьшается к югу (рис. 5). Регрессионный анализ зависимости многолетнего хода зимних температур почвы от

хода температуры воздуха и толщины снега показывает значимую связь для многоснежных регионов – Западной Сибири и юга Дальнего Востока, с множественными коэффициентами регрессии 0,509–0,708 и 0,768–0,814.

Систематического преобладающего вклада в ход температуры почвы мощности снежного покрова или температуры воздуха не наблюдается – при значимых

бета-коэффициентах, соответственно, 0,018–0,074 и 0,015–0,210 для Западной Сибири и 0,189–0,251 для Дальнего Востока.

Корреляция многолетних рядов летних температур почвы и воздуха значима в Западной и Центральной Сибири при коэффициентах 0,625–0,766 и 0,553–0,612.

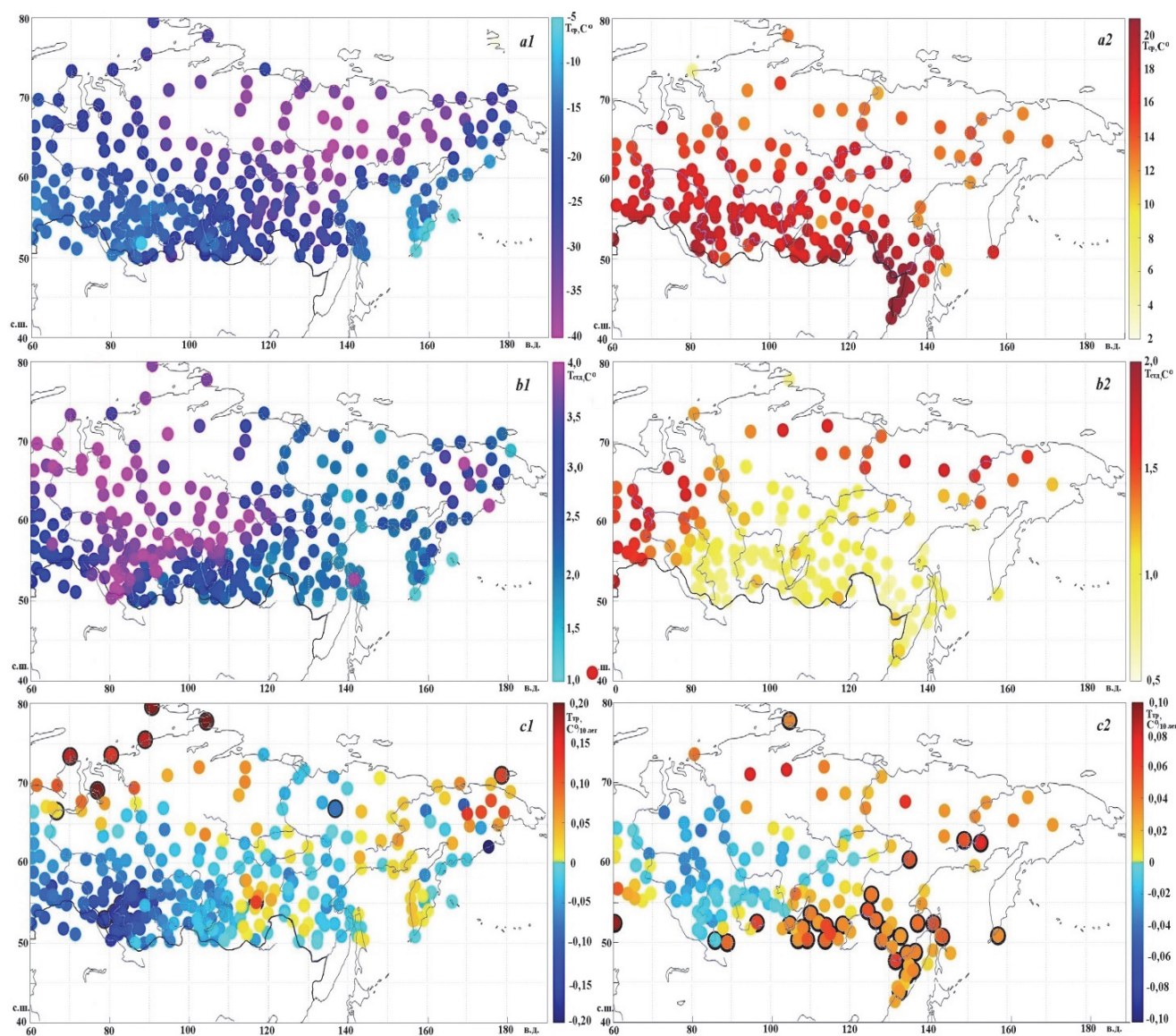


Рис. 3. Пространственная изменчивость многолетних характеристик приземной температуры воздуха

Обозначения: средняя, стандартное отклонение, коэффициенты линейного тренда (в маркере – значимые при уровне 95 %): A1, B1, B1 – январь-февраль, A2, B2, B2 – июнь-июль-август

Fig. 3. Spatial variability of long-term characteristics of surface air temperature

Designations: mean, standard deviation, linear trend coefficients (in the marker – significant at the level of 95 %): A1, B1, C1 – January-February, A2, B2, C2 – June-July-August

Таблица 3

Многолетняя региональная изменчивость температуры почвы

Table 3

Long-term regional variability of soil temperature

Регион	Пункт	Характеристики, глубины 20 / 40 / 80 см за январь-февраль и июнь-июль-август		
		Среднее, мм	Стандартное отклонение, мм	Коэффициенты линейного тренда, мм / 10 лет
Западная Сибирь	Игарка	-1,2 / -1,3 / -0,4 9,9 / 9,7 / 7,3	0,48 / 0,52 / 0,23 1,31 / 2,11 / 1,65	0,10 / 0,03 / 0,52 -0,66 / 1,08 / 0,51
	Ларьяк	-1,3 / -0,9 / 0,5 15,9 / 14,8 / 13,7	0,82 / 0,48 / 0,29 1,00 / 0,94 / 0,77	-0,21 / 0,19 / 0,56 -0,60 / -0,39 / -0,55
	Омск	-3,4 / -3,4 / -0,6 16,9 / 15,5 / 13,5	0,81 / 0,73 / 0,64 1,72 / 1,74 / 0,94	-0,06 / -0,01 / -0,25 -0,17 / 0,09 / 0,27
Центральная Сибирь	Нюрба	-6,4 / -5,9 / -3,3 15,7 / 13,7 / 9,3	2,25 / 2,05 / 1,46 0,65 / 1,03 / 0,86	0,10 / 0,17 / -0,01 0,08 / 0,61 / 0,28
	Киренск	-6,2 / -6,7 / -3,4 18,1 / 16,9 / 14,9	2,98 / 1,65 / 1,05 1,09 / 1,02 / 0,84	1,00 / 0,11 / -0,13 -0,38 / -0,46 / -0,48
	Бабушкин	-1,8 / -0,7 / 0,6 15,8 / 13,9 / 11,3	1,35 / 0,96 / 1,34/ 1,03 0,63 / 0,49	-0,19 / -0,27 / -0,24 -0,37 / -0,18 / -0,55
Восточная Сибирь	Оймякон	-20,0 / -18,9 / -14,5 9,1 / 6,9 / 0,22	3,49 / 3,11 / 2,04 1,79 / 2,44 / 0,49	1,18 / -0,01 / 0,38 -0,85 / 0,44 / 0,02
	Сусуман	-16,3 / -15,2 / -14,1 8,4 / 6,7 / 2,96	2,78 / 2,88 / 2,10 0,83 / 1,11 / 1,29	1,30 / 1,03 / 0,35 -0,13 / 0,21 / 0,02
	Благовещенск	-7,2 / -5,6 / -2,6 19,5 / 18,5 / 15,5	2,49 / 2,28 / 1,69 0,99 / 1,21 / 1,01	0,42 / 0,86 / 0,26 0,31 / 0,95 / 0,56

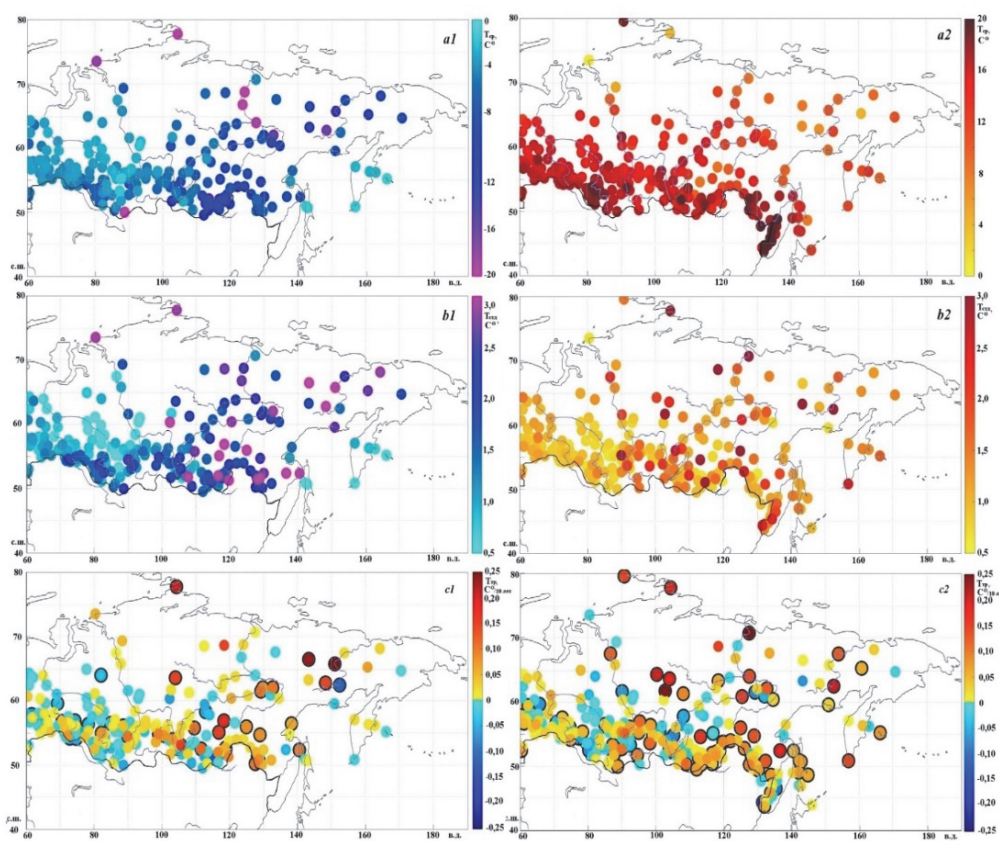


Рис. 4. Пространственная изменчивость многолетних характеристик температуры почвы на глубине 40 см

Обозначения: средняя, стандартное отклонение, коэффициенты линейного тренда (в маркере – значимые при уровне 95 %): A1, B1, B1 – январь-февраль, A2, B2, B2 – июнь-июль-август

Fig. 4. Spatial variability of long-term characteristics of soil temperature at a depth of 40 cm

Designations: mean, standard deviation, linear trend coefficients (in the marker – significant at the level of 95 %): A1, B1, C1 – January-February, A2, B2, C2 – June-July-August

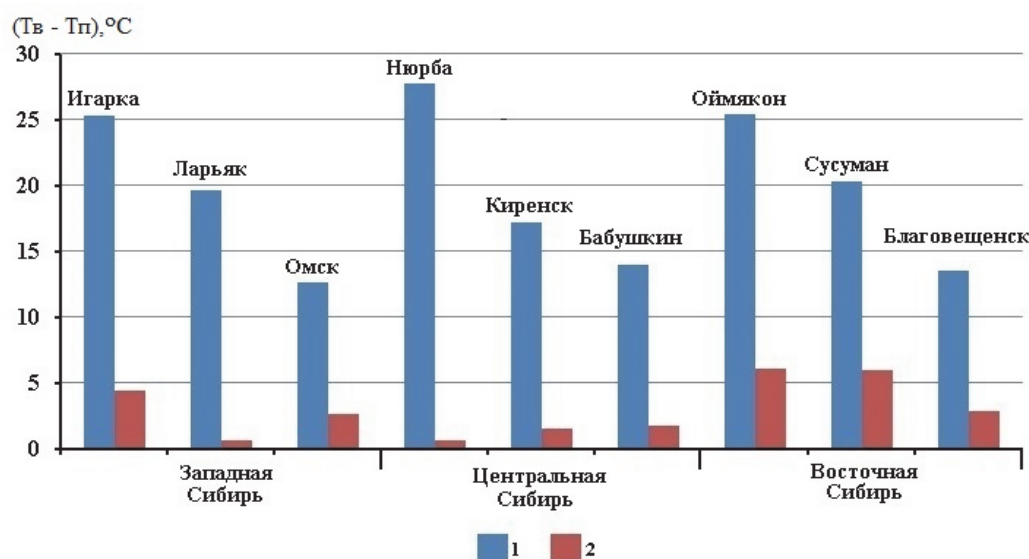


Рис. 5. Разница температур воздуха (T_v) и температур почвы (T_p) на глубине 40 см в зимний (1) и летний (2) периоды

Fig. 5. The difference in air (T_v) and soil (T_p) temperatures at a depth of 40 cm in winter (1) and summer (2) periods

Закключение

Как было выявлено ранее [Китаев и др., 2017, Китаев, 2021б], в условиях европейской части России, после установления устойчивого снежного покрова, наблюдается существенное снижение, в сравнении с бесснежными осенним и весенним периодами, вариативности температур почвы: температура колеблется в узком диапазоне ($-1,5$ до $+1,5$ °C) при снижении величин стандартного отклонения относительно вариативности температуры почвы в предзимний и весенний бесснежные периоды в 1,3–1,5 раза, как результат проявления теплозащитных свойств снежного покрова. Подобная сезонная изменчивость прослеживается в пределах Западной Сибири: после формирования здесь снежного покрова значительной мощности в 30–90 см, диапазон изменений температур почвы в течение зимы остается небольшим, при снижении в течение снежного периода от 1,5 до $-2,7$ °C, соответственно снижению региональной температуры воздуха. В Центральной и Восточной Сибири происходит дальнейшее понижение зимних температур почвы с диапазонами в течение зимы от 0 до -6 °C и от 0 до -19 °C: региональное уменьшение толщины снежного покрова до 20–70 см и, соответственно, снижение его теплоизолирующих свойств приводят к увеличению зависимости динамики температур почв от динамики низких температур воздуха. Относительно высокие температура почвы и низкая ее вариативность на Камчатке могут быть

связаны с интенсивным снегонакоплением на фоне циклонической активности.

В пределах Западной Сибири значения стандартного отклонения многолетних рядов летних температур почвы (июль-август) превышают значения стандартного отклонения хода зимних температур в 2,2–2,7 раза аналогично соотношению Восточно-Европейской равнины – в связи с достаточной для поддержания стабильного зимнего температурного режима толщиной снега. Для Центральной и Восточной Сибири характерна обратная ситуация – величина стандартного отклонения зимних температур почвы превышает величину стандартного отклонения летних температур в два раза за счет повышения вариативности, прежде всего, зимнего периода.

В этом случае региональное снижение к востоку мощности снежного покрова от 40–70 до 20–25 см приводит к увеличению вариативности температур почвы, на глубине 40 см в частности от 2 до 3 °C, при значительном региональном снижении зимних температур воздуха до $-30...-40$ °C. С аномально низкими зимними температурами воздуха связаны существенные различия зимних температур воздуха и почвы, в 5–10 раз превышающие различия температур в летний период.

Значимая регрессионная зависимость многолетнего хода зимних температур почвы от хода температур воздуха и толщины снега существует только в многоснежных регионах – Западной Сибири и юга

Дальнего Востока, с множественными коэффициентами регрессии 0,51–0,71 и 0,77–0,81; при этом явного преобладания вклада в ход температуры почвы изменений снежного покрова или температуры воздуха не наблюдается.

Корреляция многолетних рядов летних температур почвы и воздуха в Западной и Центральной Сибири составляет 0,52–0,74. Несмотря на процесс потепления, значимые коэффициенты линейных трендов температур почвы и воздуха как самых холодных, так и самых

теплых месяцев года (январь–февраль и июнь–август) отмечены лишь на юге Восточной Сибири и Дальнего Востока (0,08–0,12 °C / 10 лет).

В настоящее время аналогичных результатов исследований для крупных регионов севера Евразии нами не обнаружено; выявленные закономерности могут быть использованы в анализе результатов мониторинга состояния поверхности суши, в разработке алгоритмов дистанционного зондирования, при уточнении прогнозных сценариев изменений окружающей среды.

Список источников

- Димо В.Н. Тепловой режим почв СССР. М. : Колос, 1972. 360 с.
- Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Широков Р.С., Облогов Г.Е. Эволюция криолитозоны прибрежно-морской области западного Ямала при изменении климата // Криосфера Земли. 2011. Т. XV, № 2. С. 56–64.
- Волобуев В.Р. Введение в энергетику почвообразования. М. : Наука, 1974. 128 с.
- Гиличинский Д.А., Быховец С.С., Сороковников В.А., Федоров-Давыдов Д.Г., Барри Р.Г., Жанг Т., Гавртлова М.К., Алексеева О.И. Использование данных метеорологических станций для оценки тенденций многолетних изменений температур почв на территории сезонной и многолетней криолитозоны России // Криосфера Земли. 2000. Т. IV, № 3. С. 59–66.
- Каверин Д.А., Пастухов А.В., Мажитова Г.Г. Особенности температурного режима холодных мерзлотных почв на южном пределе криолитозоны (Европейский северо-восток России) // Бюллетень почвенного института им. В.В. Докучаева. 2014. Вып. 75. С. 48–61.
- Китаев Л.М., Аблеева В.А., Асанинова Ж.А., Желтухин А.С., Коробов Е.Д. Сезонная динамика температуры воздуха, снеготопливных и промерзания почвы в центральной части Восточно-Европейской равнины // Лед и Снег. 2017. Т. 57, № 4. С. 518–526.
- Китаев Л.М. Оценка изменчивости температуры почвы зимнего периода в современных климатических условиях Евразийской субарктики // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. 2021а. № 1. С. 13–22.
- Китаев Л.М. Сопряженность изменений температур воздуха, толщины снежного покрова и температуры почвы Восточно-Европейской равнины // Криосфера Земли. 2021б. Т. 25, № 3. С. 43–49.
- Кудрявцев В.А. Температура верхних горизонтов вечномерзлой толщи в пределах СССР. М. : Изд-во АН СССР, 1954. С. 43–49.
- Мажитова Г.Г. Температурные режимы почв в зоне несплошной многолетней мерзлоты Европейского северо-востока России // Почвоведение. 2008. № 1. С. 54–67.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, ч. 1. Л. : Гидрометеиздат, 1985. 300 с.
- Оберман Н.Г. Мерзлые породы и криогенные процессы в Восточно-Европейской субарктике // Почвоведение. 1998. № 5. С. 540–550.
- Осокин Н.И., Сосновский А.В. Влияние динамики температуры воздуха и высоты снежного покрова на промерзание грунта // Криосфера Земли. 2015. № 1. С. 99–105.
- Павлов А.В., Москаленко Н.Г. Термический режим почвы на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. 2001. Т. V, № 2. С. 11–19.
- Сократов С.А., Голубев В.Н., Барри Р.Г. Влияние климатических колебаний на теплоизолирующую роль снежного покрова и термический режим грунтов // Криосфера Земли. 2001. Т. V, № 2. С. 83–91.
- Шерстюков А.Б. Корреляция температур почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России // Криосфера Земли. 2008. № 1. С. 79–87.

References

- Dimo V.N. *Teplovoj rezhim pochv SSSR*. [Thermal regime of soils in the USSR]. Moscow: Kolos Publ., 1972. 360 p. In Russian
- Vasil'ev A.A., Streleckaya I.D., Shirokov R.S., Oblogov G.E. *Evoluciya kriolitozony pribrezhno-morskoy oblasti zapadnogo Yamala pri izmenenii klimata* [Evolution of the permafrost zone of the coastal-marine region of western Yamal under climate change] // Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]. 2011. V. 13, no 2. pp. 56–64. In Russian
- Volobuev V.R. *Vvedenie v energetiku pochvoobrazovaniya* [Introduction to Soil Formation Energetics]. Moscow: Nauka Publ., 1974, p.128. In Russian
- Gilichinskiy D.A., Byhovec S.S., Sorokovnikov V.A., Fedorov-Davydov D.G., Barri R.G. Zhang T., Gavrtlova M.K., Alekseeva O.I. *Ispol'zovanie dannykh meteorologicheskikh stanciy dlya ocenki tendenciy mnogoletnih izmeneniy temperatury pochv na territorii sezonnoy i mnogoletney kriolitozony Rossii* [Using data from meteorological stations to assess trends in long-term changes in soil temperature in the seasonal and long-term permafrost zone of Russia] // Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]. 2000. V. 4, No. 3. pp. 59–66. In Russian
- Kaverin D.A., Pastuhov A.V., Mazhitova G.G. *Osobennosti temperaturnogo rezhima holodnykh merzlotnykh pochv na juzhnom predele kriolitozony (Evropejskij severo-vostok Rossii)* [Features of the temperature regime of cold permafrost soils at the southern border of the permafrost zone (European North-East of Russia)] // Byulleten' pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva. 2014. V. 75. pp. 48–61. In Russian
- Kitaev L.M., Ableeva V.A., Asainova Zh.A., Zheltuhin A.S., Korobov E.D. *Sezonnaya dinamika temperatury vozduha, snegozapasov i promerzaniya pochvy v central'noy chasti Vostochno-Evropeyskoy ravniny* [Seasonal dynamics of air temperature, snow storage and soil freezing in the central part of the East European Plain] // Led i Sneg [Ice and Snow]. 2017. V. 57, No. 4. pp. 518–526. In Russian

- Kitaev L.M. *Ocenka izmenchivosti temperatury pochvy zimnego perioda v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh Evraziyskoy subarktiki* [Estimation of Soil Temperature Variability in the Winter Period under the Current Climatic Conditions of the Eurasian Subarctic] // Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya. 2021a, No 1. pp. 13–22. In Russian
- Kitaev L.M. *Soprjazhennost' izmeneniy temperatury vozduha, tolshhiny snezhnogo pokrova i temperatury pochvy Vostochno-Evropeyskoy ravniny* [Relationship between changes in air temperature, snow cover thickness, and soil temperature in the East European Plain] // Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]. 2021b. V. 25, No. 3. pp. 43–49. In Russian
- Kudryavcev V.A. *Temperatura verkhnykh gorizontov vechnomerzloy tolshhi v predelakh SSSR* [The temperature of the upper horizons of the permafrost within the USSR]. Moscow; AN SSSR Publ. 1954. 182 p. In Russian
- Mazhitova G.G. *Temperaturnye rezhimy pochv v zone nesploshnoy mnogoletney merzloty Evropeyskogo severo-vostoka Rossii* [Temperature regimes of soils in the zone of discontinuous permafrost in the European North-East of Russia] // Pochvovedenie [Eurasian Soil Science]. 2008. No. 1. pp. 54–67. In Russian
- Nastavlenie gidrometeorologicheskim stancyam i postam* [Instructions for hydrometeorological stations and posts]. V. 3, ch. 1. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1985. 300 p. In Russian
- Oberman N.G. *Merzlye porody i kriogennyye processy v Vostochno-Evropeyskoy subarktike* [Frozen soils and cryogenic processes in the East European Subarctic]. // Pochvovedenie [Eurasian Soil Science]. 1998. No. 5. pp. 540–550. In Russian
- Osokin N.I., Sosnovskiy A.V. *Vliyaniye dinamiki temperatury vozduha i vysoty snezhnogo pokrova na promerzaniye grunta* [Influence of dynamics of air temperature and snow depth on soil freezing] // Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]. 2015. No. 1. pp. 99–105. In Russian
- Pavlov A.V., Moskalenko N.G. *Termicheskiy rezhim pochvy na severe Zapadnoy Sibiri* [Thermal regime of soil in the north of Western Siberia] // Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]. 2001. V. 5, No. 2. pp. 11–19. In Russian
- Sokratov S.A., Golubev V.N., Barri R.G. *Vliyaniye klimaticheskikh kolebaniy na teploizoliruyushchuyu rol' snezhnogo pokrova i termicheskiy rezhim gruntov* [Influence of climatic fluctuations on the heat-insulating role of snow cover and thermal regime of soils] // Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]. 2001. V. 5, No. 2. pp. 83–91. In Russian
- Sherstyukov A.B. *Korrelatsiya temperatury pochvogruntov s temperaturoy vozduha i vysotoy snezhnogo pokrova na territorii Rossii* [Correlation of soil temperature with air temperature and snow depth in Russia] // Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]. 2008. No. 1. pp. 79–87. In Russian

Информация об авторах:

Китаев Л.М., кандидат географических наук, старший научный сотрудник, лаборатория климатологии, Институт географии РАН, Москва, Россия.

E-mail: lkitaev@mail.ru

Титкова Т.Б., кандидат географических наук, старший научный сотрудник, лаборатория климатологии, Институт географии РАН, Москва, Россия.

E-mail: titkova@yandex.ru

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

Information about the authors:

Kitaev L.M., Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher, Laboratory of Climatology, Institute of Geography RAS, Moscow, Russia.

Email: lkitaev@mail.ru

Titkova T.B., Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher, Laboratory of Climatology, Institute of Geography RAS, Moscow, Russia.

Email: titkova@yandex.ru

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

Статья поступила в редакцию 31.03.2023; одобрена после рецензирования 19.10.2023; принята к публикации 27.11.2024

The article was submitted 31.03.2023; approved after reviewing 19.10.2023; accepted for publication 27.11.2024

Научная статья
УДК 502.313 (502.33)
doi: 10.17223/25421379/33/10

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОМПЛЕКСА КЛИМАТИЧЕСКИХ РИСКОВ В СФЕРЕ РАСТЕНИЕВОДСТВА ПОДЗОНЫ ЮЖНОЙ ТАЙГИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ



Мария Алексеевна Мельник¹, Елена Сергеевна Волкова², Ксения Алексеевна Семенова³

^{1, 2, 3} Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, Томск

¹ melnik-m-a@yandex.ru

² elevolko@yandex.ru

³ ksenia_ska@mail.ru

Аннотация. Проведен анализ климатических рисков теплого периода для растениеводства южной тайги Западной Сибири. Установлено, что основные риски инициированы заморозками, вероятность которых сохраняется до второй декады июня. Выявлен рост числа дней с низкой влажностью в мае и первой декаде июня. Экстремальные атмосферные осадки наибольшую опасность представляют в конце июля – начале августа. Риски, вызванные сильными ветрами, наиболее вероятны в мае, они значительно выше на западе исследуемой территории.

Ключевые слова: южная тайга, Западная Сибирь, риски, опасные и неблагоприятные явления, растениеводство, вегетационный период

Источник финансирования: исследование поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание ИМКЭС СО РАН, регистрационный номер проекта № 121031300226-5, FWRG-2021-0003).

Для цитирования: Мельник М.А., Волкова Е.С., Семенова К.А. Пространственно-временная характеристика комплекса климатических рисков в сфере растениеводства подзоны южной тайги Западной Сибири // Геосферные исследования. 2024. № 4. С. 160–176. doi: 10.17223/25421379/33/10

Original article
doi: 10.17223/25421379/33/10

THE SPATIAL AND TEMPORAL CHARACTERISTICS COMPLEX OF CLIMATIC RISKS IN THE CROP PRODUCTION FIELD IN THE WESTERN SIBERIA SOUTHERN TAIGA SUBZONE

Maria A. Mel'nik¹, Elena S. Volkova², Kseniya A. Semenova³

^{1, 2, 3} Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

¹ melnik-m-a@yandex.ru

² elevolko@yandex.ru

³ ksenia_ska@mail.ru

Abstract. The natural and climatic conditions of the Western Siberia South taiga zone and the adjacent territories are quite suitable for the crop production development, but in recent decades, there has been an increase in dangerous and adverse hydro-meteorological phenomena. They entail irreparable consequences, the results of which are the oppression or even plants death. The greatest increase in number of dangerous phenomena is observed during the growing season. The studied region is characterized by a wide series of these phenomena: late spring and early autumn frosts, heavy and (or) steady precipitation, low air humidity, high wind activity. The temporal dynamics and spatial distribution risk analysis of a natural and climatic phenomena identified for the study region is study purpose.

An meteorological data array on 30 weather stations from 2005 to 2021 for the period from May 1 to September 30 was analyzed. A detailed study of hazards complex occurrence probability was conducted on meteorological stations relatively evenly located from west to east: Yalutorovsk, Tobolsk, Kyshtovka, Pudino, Tomsk, Mariinsk. The risk analysis for crop production from the adverse factors influence is based on the probabilistic distribution function calculation of the number of days with the selected phenomenon.

The identified factors comprehensive analysis over the growing season decades allowed to assess the temporal dynamics and spatial distribution of natural and climatic phenomena. This analysis makes it possible to identify the intervals of the growing season that have the greatest risk for the crops cultivation. It has been established that the main risks are caused by frosts. The maximum probability of frost is occurred in May, varying from 89 % in the first decade of May to 49 % in the third decade of May.

The risk of frost persists until the second decade of June. An increase in the day's number with low humidity in May and the first decade of June was revealed for the entire study area. This trend is mostly observed for the Tobolsk station, where the dry days average number during the growing season has increased 3.5 times over the past 20 years. Spring frosts, combined with low air humidity indicators and strong winds, significantly increase the risks for crops at the initial stage of vegetation. High indicators of such risks are typical for the north-eastern regions.

Extreme precipitation is observed in the third decade of July and the first decade of August. For example, for the Tyumen region, the probability of their occurrence exceeds 83 %. In June and early July, heavy precipitation is often accompanied by hail, which greatly increases the risks of crop production. The risks caused by wind activity are most likely in May, they are much higher in the western part of the study area.

The results are shown that the existing risks to crop production in the Western Siberia southern taiga in general are not decreasing. Their spatial and temporal manifestation is heterogeneous.

Keywords: southern taiga, Western Siberia, risks, dangerous and unfavorable phenomena, crop production, growing season

Source of financing: The study was supported by budget theme № 121031300226-5, FWRG-2021-0003.

For citation: Mel'nik M.A., Volkova E.S., Semenova K.A. (2024) The spatial and temporal characteristics complex of climatic risks in the crop production field in the Western Siberia southern taiga subzone. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 160–176. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/33/10

Введение

Изменение климата на планете ведет к глобальным проблемам, при этом значительная доля отрицательных последствий приходится на сферу сельского хозяйства, нарушая тем самым продовольственную безопасность многих стран [Mendelsohn, 2009; Duchenne-Moutienetal et al., 2021]. Уже сейчас в некоторых регионах мира ученые отмечают увеличение рисков, обусловленных опасными и неблагоприятными природно-климатическими явлениями и влекущих за собой существенные потери для сельскохозяйственного сектора [Sauerborn, Ebi, 2012; Closset et al., 2015; Третий..., 2022]. В Доктрине продовольственной безопасности РФ от 21.01.2020 одним из непосредственных рисков ее успешной реализации рассматриваются неблагоприятные климатические и агроэкологические угрозы [Доктрина..., 2020]. Важно отметить, что последствия не будут одинаковыми для разных регионов, воздействие в большей степени зависит от особенностей природных условий и диапазона климатических изменений, а также специфики ведения сельского хозяйства на конкретных территориях.

Из всей таежной зоны Западной Сибири в ее южной части природно-климатические условия в значительной мере располагают к занятию растениеводством. Крупные агрохолдинги, многочисленные фермерские и личные подсобные хозяйства выращивают зерновые и зернобобовые культуры, овощи открытого и закрытого грунта, плодовые деревья и кустарники. В современных условиях изменения климата для местного растениеводства появилась возможность культивировать более теплолюбивые культуры, не произрастававшие здесь прежде. Кроме того, на фоне сдвига сроков устойчивых переходов среднесуточных температур через 0 °C, +5 °C и +10 °C, многие хозяйства начинают посевные работы в более ранние сроки. Подобная тенденция в сельском хозяйстве ведет, безусловно, к повышению рентабельности.

Однако при этом нельзя недооценивать те неблагоприятные и опасные природные явления (НОЯ), которые могут нивелировать положительный экономический эффект от расширения ассортимента выращиваемых видов сельхозкультур и ранних весенних сроков посадки. Такие явления влекут за собой порой непоправимые последствия, результатами которых являются угнетение или даже гибель растений. Например, зарубежные коллеги отмечают парадоксальный факт: потепление может увеличить риск повреждения растений весной и ранним летом. Они рассматривают большие колебания весенних температур как реальную угрозу структуре и функционированию наземных экосистем в условиях потепления климата. Это связано с тем, что раннее наступление теплой весны способно вызвать преждевременное развитие растений, и при последующих возможных заморозках растения резко снижают свою продуктивность [Gu et al., 2008].

Для исследуемой территории как раз наибольшую опасность для сферы растениеводства влекут поздние весенне-летние и ранние осенние заморозки. Кроме того, существенный негативный эффект несут такие явления, как низкая влажность воздуха, сильные и (или) продолжительные осадки, сильная жара, ураганный ветер и град. Все эти факторы на юге Западной Сибири почти повсеместно случаются из года в год на протяжении всего вегетационного периода и наносят региональным хозяйствам весомый экономический ущерб. Так, например, аномально жаркая и засушливая погода летом 2012 г. привела к снижению урожайности основных сельскохозяйственных культур в Томской области более чем на 50 % [Барашкова и др., 2013]. Сильные дожди на территории Западной Сибири фиксировались с 2006 по 2015 г. практически каждый год и повлекли за собой существенные экономические потери [Шарапова и др., 2017]. В 2022 г. ранние июньские заморозки, при которых минимальная температура воздуха понижалась до –1...–4 °C, а местами до –6...–7 °C [Обзор..., 2022], привели к

снижению урожайности многих сельхозкультур в Томской, Новосибирской и Кемеровской областях.

В научной литературе довольно много работ, посвященных анализу определенного вида природно-климатических опасностей на территории Западной Сибири [Барашкова и др., 2013; Шаропова и др., 2017; Харюткина и др., 2019]. Но вместе с тем круг исследований суммарных значений опасных природно-климатических факторов в сфере растениеводства и их воздействие на урожайность значительно уже. Именно последовательное влияние данных явлений, накладываясь друг на друга, усиливает отрицательный синергетический эффект. Примером подобной ситуации может выступать весенне-летний период 2022 г. По данным Росгидромета, в мае на юге Западной Сибири устанавливались многочисленные суточные максимумы температуры. Причем рекорды регистрировались в течение нескольких дней подряд. В то же время в мае и июне неоднократно отмечались возвраты холодов с заморозками до $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а среднемесячная температура фиксировалась ниже нормы на $0,5\text{--}1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Обзор..., 2022]. В дополнение к этому в июле и начале августа количество осадков более чем на 30 % превысило среднесезонную норму. В совокупности данные погодные условия привели к частичной потере урожая плодово-ягодных культур и снижению урожайности овощей в хозяйствах всех категорий Томской и Новосибирской областей [Посевные..., 2022].

Происходящие явления возникают на фоне увеличения продолжительности вегетационного периода, которое отмечается в последние десятилетия в Сибири. Устойчивый переход через $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 30-летний период фиксируется по всей исследуемой территории на 3–5 дней раньше предыдущего среднесезонного показателя [Гордов и др., 2011]. В этих условиях начинается более ранняя активная вегетация многих сельхозкультур, а случающиеся заморозки в совокупности с низкой влажностью воздуха приводят к повреждению и даже гибели некоторых видов культурных растений. Вместе с увеличением количества НОЯ растет и степень риска, связанного с ними.

С учетом того, что увеличивающееся количество опасных метеорологических явлений приходится на вегетационный период года [Харюткина и др., 2019] и имеет территориальную неоднородность, проблема снижения рисков на сферу растениеводства становится довольно актуальной задачей и требует детального пространственно-временного анализа. Очевидно, что знание об особенностях происходящих явлений и, как следствие, разработка мероприятий по снижению вероятных рисков предпочтительнее, чем

ликвидация негативных последствий от их проявления. Целью данного исследования выступает риск-анализ временной динамики и пространственного распределения ряда природно-климатических явлений, отрицательно воздействующих на эффективность работы сферы растениеводства в южной тайге Западной Сибири и на прилегающих территориях в теплый период года. Важность исследования заключается в потребности местных сельскохозяйственных предприятий и рядовых граждан, занимающихся растениеводством, в объективной информации по оценке вероятности, частоты и интенсивности наступления таких явлений. Это может помочь в выборе подходящего для региона сорта сельскохозяйственной культуры, сроков ее посадки и особенностей ухода в разные периоды вегетационного развития [Branimir et al., 2024].

Материалы и методы исследования

Проводимый анализ базировался на массиве метеоданных ООО «Расписание погоды» [Расписание...] за период с 2005 по 2021 гг. по 30 метеостанциям. Более длительные ряды данных, начиная с 1973 г., были взяты по метеостанциям, включенным в базу National Centers for Environmental Information [NOAA's...]. Детальное исследование вероятности возникновения комплекса НОЯ по декадам каждого месяца было проведено по метеостанциям, относительно равномерно расположенным с запада на восток по территории исследуемого региона: Ялуторовск, Тобольск, Кыштовка, Пудино, Томск, Мариинск. Выбор этих метеостанций позволил получить подробную информацию о пространственных закономерностях распределения опасных явлений, поскольку они имеют наиболее репрезентативные ряды данных по выделенным опасным факторам. Для анализа возникновения и интенсивности НОЯ, негативно влияющих на сферу растениеводства, был выбран период с 1 мая по 30 сентября. Эти сроки были определены с учетом данных о датах устойчивых переходов среднесуточной температуры через $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также с учетом средних сроков посадки и уборки сельхозкультур, произрастающих в регионе исследования.

Опираясь на Перечень и критерии опасных природных явлений, действующих на территории деятельности ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» [Перечень..., 2014], а также на предыдущий опыт определения критериев НОЯ для сферы аграрного природопользования [Мельник, Волкова, 2016], была сформирована база данных по пяти наиболее значимых для района исследования показателям: заморозки, низкая влажность воздуха, сильные и (или) продол-

жительные осадки, сильный ветер, град. В ходе аналитической обработки представленного комплекса показателей рассчитывались среднегодовые показатели НОЯ, а также степень рисков для растениеводства в пространственно-временном масштабе. Пространственный анализ осуществлялся на базе многофункционального программного пакета ArcGIS.

Общепринято, что под риском понимается вероятность наступления опасных явлений за определенный интервал времени в совокупности с объемом негативных последствий от их проявления [Акимов и др., 2004; Осипов, 2010; Истомин, Слесарева, 2010]. Исходя из этого, анализ риска для растениеводства от влияния НОЯ базируется, прежде всего, на расчете вероятностной функции распределения числа дней с выделенными явлениями и рассчитывается по формуле

$$p = \frac{N_k}{N} 100 \%,$$

где N_k – число лет, в которые опасное явление наблюдалось в заданный промежуток времени, N – общее число лет наблюдений. При этом, если явление наблюдается ежегодно в заданный период времени, то вероятность его возникновения составит 100 %, нулевое значение, если за весь период наблюдения оно не было зафиксировано.

Вторая составляющая риска – величина ущерба, зависящая от множества факторов (вида сельхозкультуры, площади посевных площадей, сроков посадки, сортовых особенностей, способов ведения хозяйства, себестоимости продукции и т.д.), для каждого конкретного хозяйства и вида культуры рассчитывается индивидуально. Существует несколько основных подходов к оценке экономического ущерба в растениеводстве от последствий природных опасностей. Часто величину ущерба рассчитывают по фактическим затратам на 1 га погибших сельскохозяйственных культур за последние 5 лет [Методические..., 2012]. Кроме того, оценка ущерба строится на основе концепции уязвимости растениеводства; с помощью данных, представленных динамическим рядом; по

недобору урожая сельскохозяйственных культур [Плющиков, Фатиев, 2012]. К тому же опасные явления влияют не только на урожайность, но также несут угрозу инфраструктуре предприятий, приводят к осложнению сельскохозяйственных работ, что влечет за собой дополнительные расходы на компенсацию от их последствий. Таким образом, разработка подходов к анализу ущерба от НОЯ представляет собой отдельную многоплановую задачу. В данном исследовании рассматривается одна сторона рисков – вероятность наступления опасного события, негативно воздействующего на растениеводство.

Результаты исследования

Анализ показал, что для территории исследования отмечается рост количества и интенсивности большинства представленных показателей НОЯ, в комплексе они повышают риски для устойчивого функционирования местной системы растениеводства. Рост основных показателей происходит на фоне изменений сроков устойчивого перехода среднесуточной температуры через +5 и +10 °С. При сравнении двух пятнадцатилетних периодов – 1992–2006 гг. и 2007–2021 гг., видно, что весной устойчивый переход среднесуточной температуры через +5 °С стал наступать на 9–10 дней раньше для восточных станций Томск и Мариинск (табл. 1). Для западных станций Кыштовка и Тобольск эти даты сдвинулись всего на 5–6 дней. Однако устойчивый переход через +10 °С весной показывает незначительное смещение на более ранние сроки. Увеличилась продолжительность периода от устойчивого перехода среднесуточной температуры через +5 °С до устойчивого перехода через +10 °С по всей территории южной тайги Западной Сибири. Выводы об изменении продолжительности вегетационного периода совпадают с выводами исследований по г. Новосибирску и г. Томску, в которых также отмечается общее увеличение дней вегетации [Ромашова и др., 2017; Фомин, Фомина, 2021].

Таблица 1
Весенние даты устойчивого перехода среднесуточных температур через 0 °С, +5 °С, +10 °С

Table 1
Steady transition spring dates of average daily temperatures through 0 °С, +5 °С, +10 °С

Станция	Устойчивый переход через 0 °С			Устойчивый переход через +5 °С			Устойчивый переход через +10 °С		
	1992–2006 гг.	2007–2021 гг.	Разница в днях	1992–2006 гг.	2007–2021 гг.	Разница в днях	1992–2006 гг.	2007–2021 гг.	Разница в днях
Тобольск	13.04	31.03	+13	24.04	19.04	+5	14.05	11.05	+3
Кыштовка	12.04	02.04	+10	25.04	19.04	+6	10.05	14.05	–4
Томск	09.04	01.04	+8	30.04	21.04	+9	12.05	16.05	–4
Мариинск	07.04	29.03	+9	28.04	16.04	+12	13.05	13.05	0

Для сферы растениеводства на юге Западной Сибири среди комплекса НОЯ заморозки представляют наибольшую опасность, хотя для большинства регионов России по величине ущерба на первом месте находятся засухи [Коршунов и др., 2000]. Существует ложное представление о том, что сдвиг вегетационного периода на более ранние сроки уменьшает вероятность заморозков. Но данные говорят о том, что даты последних весенне-летних заморозков воздуха могут приходиться на последнюю декаду мая для всех станций южно-таежных районов. Вероятность их возникновения в последней декаде мая варьирует от 18 до 58 %, а

среднее количество дней с заморозками составляет от 0,4 на ст. Мариинск до 1,9 на ст. Пудино (рис. 1). Заморозки в этот период, во время которого температура воздуха может опускаться ниже $-1,5$ и -2 °С, наносят большой урон овощным культурам, высаженным в открытый грунт, повреждают всходы яровых зерновых культур, кукурузы и картофеля, а также могут привести к полной или частичной потере урожая плодово-ягодных растений. Июньские заморозки могут отмечаться в первой декаде месяца в центральной и восточной части исследуемого региона – вероятность их появления составляет от 6 до 25 %.

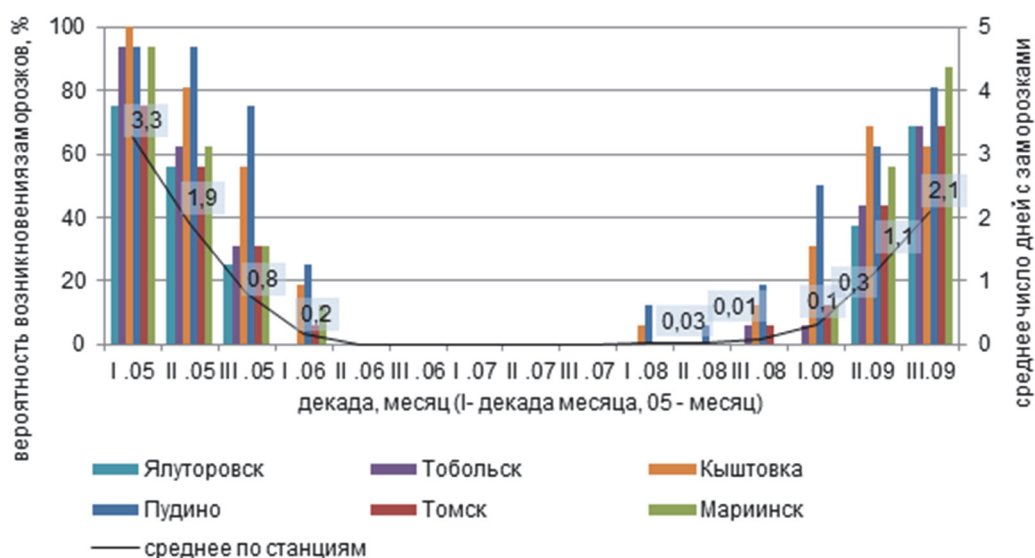


Рис. 1. Вероятность возникновения заморозков по декадам за период 2005–2021 гг. на метеостанциях, расположенных на территории подзоны южной тайги Западной Сибири

Fig. 1. The frost occurrence probability by decade for the period 2005–2021 at weather stations located in the Western Siberia southern taiga subzone

Из всех заморозков, пожалуй, наиболее опасными являются те, при которых температура воздуха опускается до -3 °С и ниже, особенно в третьей декаде мая и первой декаде июня. В этот период большинство хозяйств высаживают овощи в открытый грунт и появляются всходы зерновых и зернобобовых культур, картофеля. Вероятность таких заморозков в пространственно-временном масштабе колеблется от 0,4 до 10 %. Ранние летне-осенние заморозки проявляются уже в конце августа, но для большинства метеостанций, расположенных в западных и более южных частях исследуемого региона, в этот период заморозки являются исключением – вероятность их возникновения составляет 5 %.

Показатель максимально и минимально возможной продолжительности беззаморозкового периода также

изменяется по территории от 82 до 153 дней/год и имеет довольно неравномерное распределение. Наибольшие значения (153 дня) зарегистрированы в 2020 г. на ст. Ярково и ст. Томск, наименьшие в 2006 г. на ст. Колпашево (82 дня) [Волкова, Мельник, 2023].

Из представленного комплекса НОЯ для южной тайги Западной Сибири следующий по значимости показатель – сильные и продолжительные осадки. Сильные ливневые или продолжительные дожди наносят существенный ущерб сельскому хозяйству: сдерживают темпы посевных и посадочных работ, приводят к полеганию всходов и угнетению растений, способствуют развитию болезней сельскохозяйственных культур, приводят к вымыванию питательных веществ из верхних слоев почвы, создают тяжелые условия для уборки зерновых и технических

культур [Венцкевич, 1952; Грингоф, Клещенко, 2011]. Риск от выпадения сильных осадков усиливается в зависимости от рельефа местности, например, при посадке картофеля на склоне длиной 300–500 м и крутизной 3–8° объем смыва почвы достигает до 40–100 м³ на га [Евсеева и др., 2021]. По данным ежегодных отчетов ФГБУ «ВНИИГМИ МЦД» о стихийных гидрометеорологических явлениях на территории России [Чрезвычайные...], в августе 2009 г. в результате обильных осадков в Омской области была приостановлена уборка урожая. В конце мая и начале июля 2014 г. в г. Мариинске наблюдались очень сильные осадки, приведшие к размывам дорог, подтоплению сельскохозяйственных полей и садовых участков. Сильные ливни были зафиксированы в Кемеровской области 2–3 июня 2015 г., в течение двух суток в результате проливных дождей выпало 94–95 мм осадков. В с. Северное Новосибирской области 25 июля 2017 г. за 12 ч выпало 152 мм осадков в виде дождя.

Для выявления экстремальных явлений в режиме атмосферных осадков вводят ряд индексов, характеризующих как их интенсивность, так и продолжительность [Огурцов и др., 2016; Шарапова и др., 2017]. В данном исследовании были проанализированы такие показатели, как число дней с осадками ≥ 20 мм/сут; число дней с осадками ≥ 15 мм/сут; максимальная сумма осадков за сутки и максимальная продолжительность влажных периодов – максимальное число последовательных дней в году с осадками ≥ 1 мм/сут.

Дни с суммой осадков, превышающей 20 мм/сут, на метеостанциях южной тайги фиксируются не ежегодно и изменяются от 0 до 5 дней/год и чаще наблюдаются на северо-востоке. В среднем за исследуемый период по данному показателю наиболее неблагоприятными являются июль и август, именно на эти месяцы приходится более половины дней с осадками более 20 мм/сут. За период 2005–2021 гг. показатель максимальной суточной суммы осадков колеблется от 45 мм/сут на ст. Мариинск в 2005 г. до 59 мм/сут на ст. Тобольск в 2021 г.; среднееголетняя величина этого показателя изменяется от 26,7 мм/сут на ст. Кыштовка до 36,7 мм/сут на ст. Пудино. Максимальная продолжительность влажных периодов зафиксирована на ст. Мариинск с 21 мая по 1 июня 2014 г. и составила 12 последовательных дней с осадками ≥ 1 мм/сут, за этот период выпало 77 мм осадков. Также обращают на себя внимания данные на ст. Тобольск в 2016 г. с 26.06 по 03.07, где за восемь дней выпало 123 мм осадков.

Установлено [Огурцов и др., 2016], что сильные ливневые дожди более 20 мм/сут имеют относи-

тельно случайное пространственно-временное распределение, и анализ экстремальности режима осадков для территории Западной Сибири целесообразно проводить, используя показатель, характеризующий число дней с осадками ≥ 15 мм/сут. Распределение по декадам вегетационного периода вероятности возникновения таких дней для шести метеостанций представлено на рис. 2.

В среднем по всем станциям, включенным в анализ, такие дни наиболее вероятны в третьей декаде июля, при этом высокая вероятность сохраняется с конца июня до начала августа. Стоит отметить максимальное значение вероятности их возникновения на ст. Тобольск, она составляет 86 % и приходится на третью декаду июня, также на ст. Ялуторовск осадки возникают с вероятностью 83 % во второй декаде августа. Согласно данным о среднем декадном числе дней с суммой осадков ≥ 15 мм/сут за период 2005–2021 гг. наиболее благоприятной является ст. Мариинск, здесь среднегодовое значение этого показателя составляет 1,8 дней/год, максимальное декадное значение 0,47 дней приходится на вторую декаду июня. Самые высокие показатели зафиксированы на ст. Пудино, здесь среднегодовое значение составляет 4,7 дней, а максимальная декадная величина 0,76 дней наблюдается в первой декаде июля.

Такие факторы риска для растениеводства, как сильная жара (максимальная температура воздуха +35 °C и выше в течение 3 сут), аномально жаркая погода (в течение 5 сут и более значения среднесуточных температур воздуха выше +30 °C и более [Официальный...]), атмосферная засуха (при достаточном содержании влаги в почве растение все равно страдает от нехватки воды), почвенная засуха (потребность растения во влаге не соответствует ее содержанию в почве) на исследуемой территории наблюдаются крайне редко.

Наиболее показательным по этим факторам является 2012 г., когда с конца мая до начала августа на юге Западной Сибири установилась аномально жаркая и сухая погода, в июле были зафиксированы атмосферная и почвенная засухи [Чрезвычайные...]. Последствия комплекса опасных явлений сказались на различных отраслях хозяйства, значительные убытки понес агропромышленный комплекс [Барашкова и др., 2013]. Но в связи с тем, что величина показателей опасных явлений, характеризующих жаркую и сухую погоду, незначительна, то в качестве дополнительного используется показатель числа дней с влажностью воздуха менее 35 %. Для территории Западной Сибири установление погоды с продолжительным периодом низкой влажности воздуха ведет к истощению запасов почвенной влаги и нарушению водного баланса растений, что негативно влияет на вегетацию многих местных сельскохозяйственных культур.

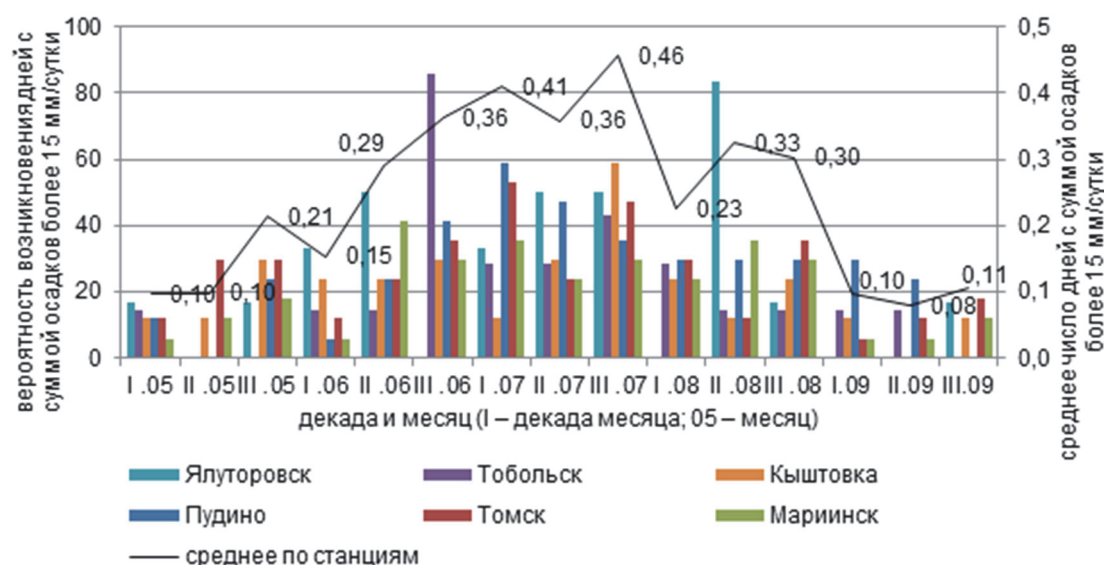


Рис. 2. Вероятность возникновения дней с суммой осадков более 15 мм/сут по декадам за период 2005–2021 гг. на метеостанциях, расположенных на территории подзоны южной тайги Западной Сибири

Fig. 2. The occurrence probability of days with a total precipitation of more than 15 mm/day by decade for the period 2005–2021 at weather stations located in the Western Siberia southern taiga subzone

Согласно расчетам среднегодового значения этого показателя по 30 метеостанциям, не было выявлено явных пространственных закономерностей. Значения показателя низкой влажности воздуха имеют мозаичное территориальное распределение и, главным образом, связаны с местным ландшафтом и близостью крупных водных объектов. Наиболее высокие значения среднегодового количества дней с относительной влажностью ниже 35 % в вегетационный период наблюдаются на ст. Викулово Тюменской области и ст. Мариинск Кемеровской области, составляя 28,5 и 26,9 дней/год соответственно. Периоды максимальной продолжительности последовательных дней с низкой влажностью воздуха, как правило, приходятся на вторую декаду мая. Самыми неблагоприятными в этом отношении были 2011, 2019 гг., когда на территории южно-таежной подзоны Омской и Тюменской областей этот показатель составил 20 дней. Средние годовые значения продолжительности сухих периодов изменяются от 4,8 дней на ст. Первомайское Томской области до 11,3 дней на ст. Тевриз Омской области.

За исследуемый период наблюдается тенденция к увеличению дней с низкой влажностью в мае и июне по всем станциям, а для отдельных станций, таких как Томск, Tobolsk, Kyshtovka, на протяжении всего вегетационного периода. Данная динамика наиболее

выражена с 2015 г., на рис. 3 отражены отличия среднего за декаду количества дней за два временных периода: с 2005 по 2014 г. и с 2015 по 2021 г. Так, для ст. Tobolsk риск возникновения данной опасности увеличился в 3,6 раза, для ст. Kyshtovka – в 1,9 раза, а для ст. Tomsk – в 1,8 раза.

Декадное распределение вероятности возникновения дней с низкой влажностью воздуха по шести метеостанциям показало, что пик этого показателя приходится на вторую декаду мая, высокие значения сохраняются в третьей декаде мая и первой декаде июня. Для ст. Мариинск вероятность возникновения данного вида опасности превышает 70 % почти до третьей декады июня. К началу июля для всей исследуемой территории риск данной опасности снижается и не имеет существенного значения (рис. 4).

Наибольшее количество дней с низкой влажностью воздуха приходится на май – период начала вегетации. В это время года дефицит влажности воздуха приводит к усиленной транспирации и интенсивному испарению, происходит иссушение растений, в листьях накапливаются лишние соли, что осложняет фотосинтез и приводит к угнетению растений. Низкая влажность воздуха также приводит к засолению верхних слоев почвы и, как следствие, к болезням растений [Венцкевич, 1952].

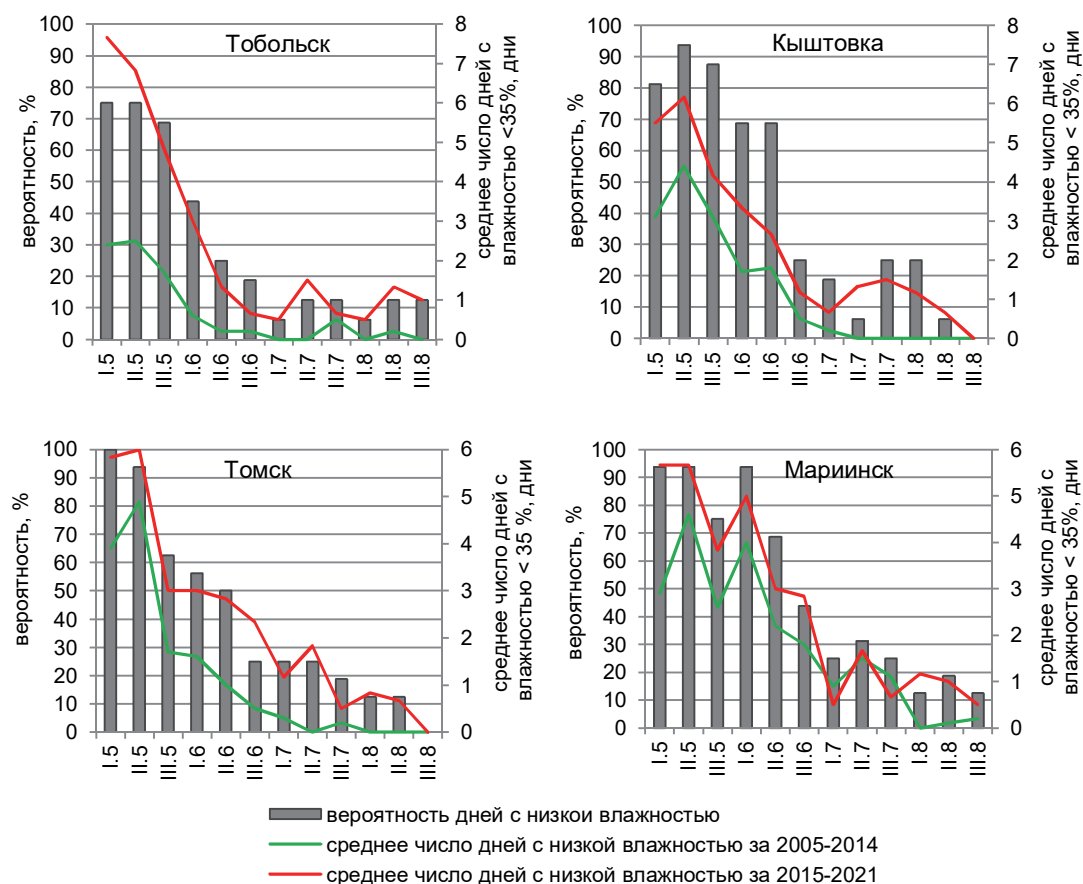


Рис. 3. Динамика количества дней с влажностью воздуха менее 35 % за 2005–2021 гг. на метеостанциях, расположенных на территории подзоны южной тайги Западной Сибири

Fig. 3. Dynamics of days with less than 35 % humidity in 2005–2021 at weather stations located in the Western Siberia southern taiga subzone

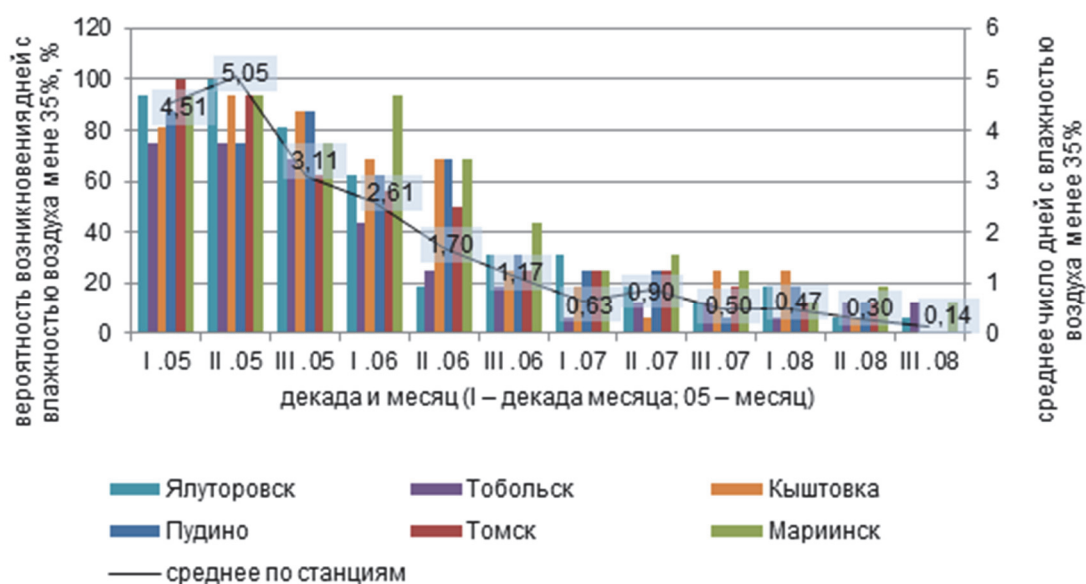


Рис. 4. Вероятность возникновения дней с влажностью воздуха менее 35 % по декадам за период 2005–2021 гг. на метеостанциях, расположенных на территории подзоны южной тайги Западной Сибири

Fig. 4. The occurrence probability of days with less than 35 % humidity by decade for the period 2005–2021 at weather stations located in the Western Siberia southern taiga subzone

Высокий рискоформирующий потенциал для региона исследования имеют сильные и очень сильные порывистые ветры. Ущерб для растениеводства от их воздействия заключается не только в повреждении и полегании посевов, интенсивном испарении с поверхности почвы и, как следствие, почвенной засухе, в механическом повреждении плодовых деревьев, но и в разрушении построек, теплиц, линий связи и электропередачи. Большое влияние сильный ветер оказывает на увеличение степени эрозии почв [Евсеева, Ромашова, 2011], в пожароопасный период ветровая активность является определяющим фактором при стихийном и катастрофичном распространении лесных пожаров.

В стандартный перечень опасных метеорологических явлений [Официальный...] для территории Западной Сибири включают очень сильный ветер (средняя скорость более 20 м/с), ураганный ветер (порывы ветра 30 м/с и более) и шквал (кратковременное усиление скорости ветра до 25 м/с). Данные опасные явления наблюдались 8, 9 мая 2017 г. на территории Томской, Новосибирской и Кемеровской областей; 7 мая 2019 г. в с. Маслянино Новосибирской области порывы ветра достигали 29–30 м/с; 7–10 мая 2022 г. на всей исследуемой территории наблюдался ветер со скоростью 15–29 м/с [Чрезвычайные...]. Поскольку очень сильные ветры случаются довольно редко, а для аграрного землепользования неблагоприятными считаются уже ветры со скоростью 15 м/с и более, то в данном исследовании внимание отдается сильным ветрам. Такие ветры ежегодно фиксируются на всех метеостанциях территории южной тайги Западной Сибири, иногда достигая 35 случаев в год (например, для ст. Ялуторовск в 2011 и 2012 гг.).

Анализ повторяемости сильных ветров по 30 метеостанциям южно-таежной зоны Западной Сибири за период с 2005 по 2015 г. показал сезонную выраженность и значительную неравномерность данного показателя по месяцам. В среднем наибольшая ветровая активность приходится на май, а для некоторых станций и на июнь, август и сентябрь. Среднее число дней с ветром более 15 м/с за вегетационный период изменяется от 0,91 на ст. Первомайское до 9,45 дней на ст. Ишим. Ветровая активность значительно выше в западной части исследуемой территории, наибольшие показатели по опасным и неблагоприятным ветровым явлениям имеют ст. Ишим, ст. Ялуторовск, ст. Викулово, ст. Большеречье и ст. Усть-Ишим. На северо-восточных станциях дней с сильным ветром несколько меньше, однако наблюдается резкая тенденция к росту этих опасностей.

Распределение вероятности возникновения среднего числа дней со скоростью ветра более 15 м/с по декадам вегетационного периода для шести станций

отражено на рис. 5. В первой декаде мая пик ветровой активности наблюдается на ст. Томск, ст. Мариинск и ст. Ялуторовск, а в третьей декаде мая на ст. Кыштовка, ст. Пудино и ст. Тобольск. Наиболее высокие значения вероятности возникновения сильных ветров приходится на май и, несколько снижаясь, сохраняются до середины июля по всем станциям. В третьей декаде августа и в сентябре вероятность сильных ветров составляет 20–30 %.

Значительный ущерб сельскому хозяйству региона в некоторые годы может наносить град [Негативное...]. Факторы, способствующие образованию града, прослеживаются на протяжении всех летних месяцев [Игнатьева, Кнауф, 2020]. Наибольшее количество случаев с крупным градом фиксируется во второй половине мая, июне. Как раз в это время появляются всходы многих культурных растений. Анализ средне-многолетних значений свидетельствует о том, что вероятность выпадения крупного града (диаметром 20 мм и более) невысокая – от 0,2 до 1 случая в год, но единовременный урон растениеводству может быть весьма значимым. Выпадение града носит довольно локальное проявление и не всегда фиксируется на ближайшей метеостанции, в связи с этим можно предположить, что вероятность града может быть значительно выше. Это опасное явление чаще всего наблюдается в южных районах Томской области, на юго-западе Тюменской и на северо-западе Омской областей. По данным В.П. Горбатенко и соавт. [2023], на юго-востоке Западной Сибири 24,4 % от всех случаев с градом приходится на июль, 22 % – на июнь, 21,3 % – на май и 16,5 % – на август, в другие месяцы вегетационного периода град также наблюдается, но в единичных случаях.

Проведенный анализ позволил выявить наличие временных закономерностей в совокупности проявления негативных природно-климатических факторов, а также дифференцировать их по степени влияния на растениеводство южной тайги Западной Сибири. На основании этих закономерностей весь вегетационный период был разбит на три интервала: весеннее-летний (01.05–10.06), летний (11.06–20.08) и осенний (21.08–30.09). Проявление и интенсивность НОЯ в эти временные интервалы имеют определенные общие особенности и характеристики.

Весенне-летний период имеет наибольшую степень вероятности показателей заморозков, низкой влажности воздуха и сильных ветров. В этот период повышаются риски для растениеводства, поскольку большинство сельскохозяйственных культур находятся на стадии появления всходов или вегетативного роста, а некоторые плодовые и ягодные культуры в стадии бутонизации и цветения.

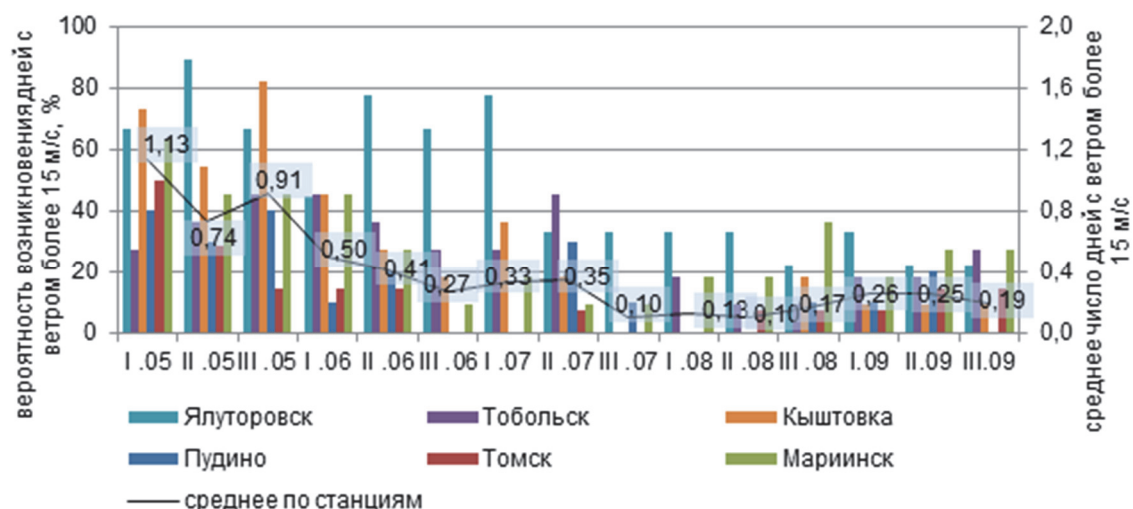


Рис. 5. Вероятность возникновения дней с ветром более 15 м/с по декадам за период 2005–2021 гг. на метеостанциях, расположенных на территории подзоны южной тайги Западной Сибири

Fig. 5. The occurrence probability of days with a wind of more than 15 m/s by decade for the period 2005–2021 at weather stations located in the Western Siberia southern taiga subzone

Высокая вероятность рисков от совокупного проявления заморозков и низкой влажности воздуха в мае и первой декаде июня отмечается на всех метеостанциях. На рис. 6 с помощью инструментов платформы ArcGis на основе данных по 30 метеостанциям показано про-

странственное распределение количества дней с заморозками, дней с низкой влажностью воздуха и дней с ветром более 15 м/с в мае и первой декаде июня. Данные по количеству дней с сильными осадками за этот же срок представлены по шести метеостанциям.

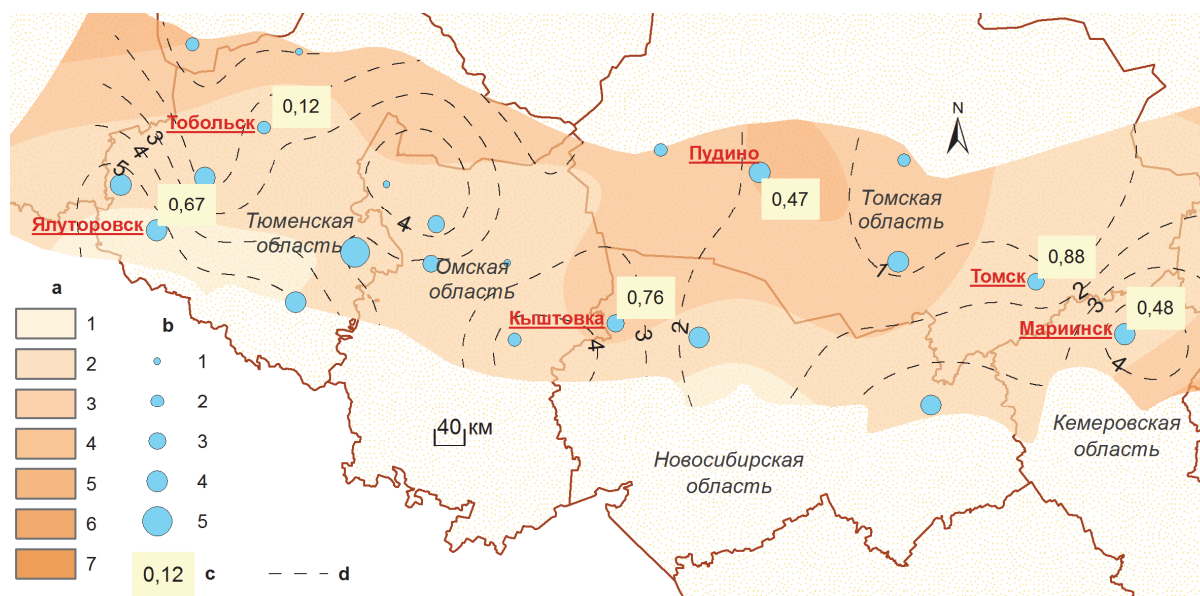


Рис. 6. Пространственное отображение опасных и неблагоприятных климатических явлений в мае и первой декаде июня на территории южной тайги Западной Сибири и прилегающих территориях за период 2005–2021 гг.

a: дней с заморозками: 1 – 0–2; 2 – 2–4; 3 – 4–6; 4 – 6–8; 5 – 8–11; 6 – 11–13; 7 – 13–15; b: дней с низкой влажностью воздуха: 1 – 2–2,5; 2 – 2,5–3,2; 3 – 3,2–3,8; 4 – 3,8–4,4; 5 – 4,4–4,9; c: дней с сильными осадками по шести станциям; d: дней с ветром более 15 м/с

Fig. 6. Spatial representation of days with frosts and low humidity totality in May and the first decade of June on the southern taiga of Western Siberia territory and the adjacent territories for the period 2005–2021

a: days with frosts: 1 – 0–2; 2 – 2–4; 3 – 4–6; 4 – 6–8; 5 – 8–11; 6 – 11–13; 7 – 13–15; b: days with low humidity: 1 – 2–2,5; 2 – 2,5–3,2; 3 – 3,2–3,8; 4 – 3,8–4,4; 5 – 4,4–4,9; c: days with heavy precipitation at six stations; d: days with wind more than 15 m/s

Поздние заморозки в этот период могут привести к гибели урожая овощных культур открытого грунта, а дополненные таким явлением, как низкая влажность воздуха, – к значительному повреждению и угнетению роста большинства сельхозкультур. Наибольшая доля этих показателей в общей структуре НОЯ характерна для станций Томской и северо-запада Новосибирской областей. Тогда как для станций Тюменской области значительная доля рисков связана с ветровой активностью и низкой влажностью воздуха. Стоит отметить, что для ст. Ялуторовск зафиксирована высокая вероятность возникновения сильных осадков в первой декаде мая, тогда как для ст. Томск и ст. Кыштовка высокие значения этого показателя приходятся на вторую и третью декаду мая.

Следующий летний период со второй декады июля по третью декаду августа характеризуется некоторым снижением опасностей, обусловленных низкой влажностью воздуха, увеличением вероятности наступле-

ния дней с сильными или продолжительными осадками, отмечается высокая вероятность проявления сильного ветра и града. Однако структура комплекса опасных явлений территориально не однородна (рис. 7). На западе исследуемой территории (ст. Ялуторовск, ст. Тобольск) процентное соотношение среднего количества дней с низкой влажностью воздуха, интенсивными осадками и сильными ветрами схожее и составляет около 40, 35 и 20 % соответственно.

Для южных станций (ст. Кыштовка, ст. Мариинск) более 60 % опасностей приходится на дни с низкой влажностью воздуха, тогда как риски, связанные с осадками, составляют всего 10–15 %. Северные районы в этот период более подвержены сильным и продолжительным осадкам – для ст. Пудино на такие опасности приходится более 50 % от общего числа НОЯ.

Заключительный осенний этап с третьей декады августа по конец сентября характеризуется небольшим количеством дней с опасными для растениеводства явлениями.

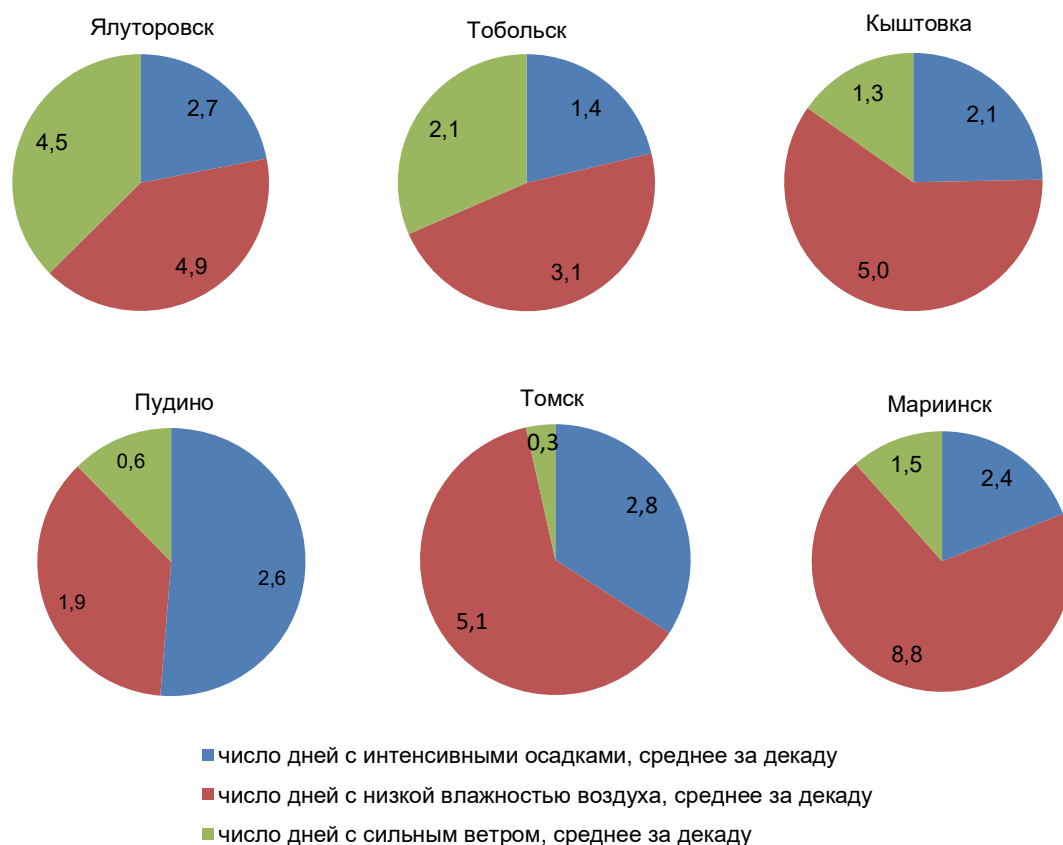


Рис. 7. Структура опасных и неблагоприятных климатических явлений за период со второй декады июня по третью декаду августа по метеостанциям южной тайги Западной Сибири

Fig. 7. Dangerous and unfavorable climatic phenomena structure for the period from the June second decade to the August third decade according to meteorological stations in the Western Siberia southern taiga subzone

Из числа НОЯ основная доля приходится на осенние заморозки, вероятность возникновения которых изменяется от 15 % в третьей декаде августа до 80 %

в третьей декаде сентября. Вероятность сильных осадков и сильных ветров снижается, дней с низкой влажностью воздуха в этот период не наблюдается.

Однако необходимо отметить, что в отдельные годы затяжные дожди приводят к нарушению условий уборочных работ. В свою очередь это может привести к значительным ущербам для сельхозпредприятий.

Обсуждение

Представленный подход к анализу НОЯ позволяет не только выявить территориальные и временные особенности их проявления, но и использовать полученную информацию для предупреждения последствий от воздействия этих факторов для различных сельскохозяйственных культур. Подекадный анализ среднегодовых показателей и вероятности наступления неблагоприятного события позволяет определить, на какую фенологическую фазу конкретной культуры приходится данная опасность и какие последствия оно может оказать на развитие растения в

этот период. Для обсуждения, в качестве примера использования полученной информации о распределении НОЯ и их последствий в таблице 2 представлены данные, которые могут быть приняты во внимание при оценке рисков выращивания картофеля на территории юга Томской (ст. Томск) и северо-востока Кемеровской областей (ст. Мариинск).

Анализ продуктивности картофеля по фазам развития позволяет выделить критические периоды, когда неблагоприятные климатические факторы приводят к снижению урожайности, иногда в 2–3 раза ниже нормы [Красников, 2008]. В развитии картофеля условно выделяют шесть основных фаз, наиболее уязвимой из которых является фаза появления всходов, а самой продуктивной – фаза созревания или максимального прироста клубней, когда происходит формирование 65–75 % конечного урожая.

Таблица 2

Вероятность возникновения комплекса НОЯ и об их последствиях для выращивания картофеля на юге Томской и северо-востоке Кемеровской областей

Table 2

The occurrence probability of unfavorable climatic phenomena complex and their possible consequences for potato cultivation in the south Tomsk and north-east Kemerovo regions

Фазы развития картофеля	Период	НОЯ	Декада, месяц – вероятность возникновения НОЯ		Последствия
			ст. Томск	ст. Мариинск	
Прорастание	21.05–10.06	Заморозки	III.05 – 31 %	III.05 – 31 %	Останавливается процесс прорастания семян
			I.06 – 6 %	I.06 – 13 %	
		Сильные осадки	III.05 – 29 %	III.05 – 29 %	Уязвимость к грибковым и бактериальным болезням; загнивание клубней
			I.06 – 12 %	I.06 – 6 %	
Появление всходов	1.06–20.06	Заморозки	I.06 – 6 %	I.06 – 13 %	Частичное или полное повреждение листовой поверхности; прекращение ассимиляции, как следствие, снижение урожая
			II.06 – 0 %	II.06 – 0 %	
		Сильные осадки	I.06 – 12 %	I.06 – 6 %	Уязвимость к грибковым заболеваниям (фомоз, черная ножка, фитофтороз, фузариоз, ризоктониоз)
			II.06 – 24 %	II.06 – 41 %	
		Низкая влажность воздуха	I.06 – 56 %	I.06 – 94 %	Сужение листовых пластинок; нарушение ассимиляции; подверженность вирусным заболеваниям
			II.06 – 50 %	II.06 – 69 %	
Бутонизация (появление столонов)	21.06–10.07	Сильные осадки	III.06 – 35 %	III.06 – 29 %	Ухудшаются условия роста и развития столонов; значительно сокращается клубнеобразование
			I.07 – 53 %	I.07 – 35 %	
		Низкая влажность воздуха	III.06 – 25 %	III.06 – 44 %	Удлиняются стебли и боковые побеги; сужаются листовые пластинки; уменьшается содержание хлорофилла; сокращается вегетационный период
			I.07 – 25 %	I.07 – 25 %	
Начало цветения	01.07–20.07	Сильные осадки	I.07 – 53 %	I.07 – 35 %	Замедляется процесс клубнеобразования
			II.07 – 24 %	II.07 – 24 %	
			I.07 – 25 %	I.07 – 25 %	

Фазы развития картофеля	Период	НОЯ	Декада, месяц – вероятность возникновения НОЯ		Последствия
			ст. Томск	ст. Мариинск	
		Низкая влажность воздуха	II.07 – 25 %	II.07 – 31 %	Ассимиляция совсем прекращается; удлиняются стебли и боковые побеги, как следствие, резкое снижение урожайности
Созревание (максимальный прирост массы клубней)	21.07–31.08	Сильные осадки	III.07 – 47 %	III.07 – 29 %	Уменьшается содержание сухого вещества и крахмала в клубнях; возрастает поражение их бактериальными и грибковыми болезнями
			I.08 – 29 %	I.08 – 24 %	
			II.08 – 12 %	II.08 – 35 %	
			III.08 – 35 %	III.08 – 29 %	
		Низкая влажность воздуха	III.07 – 19 %	III.07 – 25 %	Прирост клубней резко уменьшается; клубни удлиняются, что ведет к температурному вырождению клубней
			I.08 – 13 %	I.08 – 13 %	
			II.08 – 13 %	II.08 – 19 %	
			III.08 – 0 %	III.08 – 13 %	
		Заморозки	III.08 – 6 %	III.08 – 0 %	Резко снижается продуктивность
Отмирание ботвы	01.09–10.09	Сильные осадки	I.09 – 6 %	I.09 – 6 %	Уязвимость к грибковым и бактериальным болезням; загнивание клубней
		Заморозки	I.09 – 13 %	I.09 – 13 %	

Для обеих метеостанций в третьей декаде мая сохраняется 30-процентная вероятность возникновения заморозка. На стадии прорастания картофеля эта опасность не является критической, если заморозок не превышает -3°C , однако приводит к приостановке процесса прорастания. В этот период вероятность сильных осадков также немалая и составляет 29 %, что может привести к загниванию семян и неустойчивости к грибковым болезням. Фаза появления всходов характеризуется высокой вероятностью низкой влажности воздуха в первой и второй декадах июня, для ст. Томск эта опасность составляет 50–60 %, а для ст. Мариинск – 70–90 %, что приводит к нарушению ассимиляции и ослаблению культуры. В период фазы максимального прироста массы клубней наибольшую опасность для картофеля представляют сильные и продолжительные осадки. Для ст. Томск вероятность в среднем составляет 30–50 %, а для ст. Мариинск она несколько ниже – 25–35 %. Такие погодные условия могут привести к уменьшению содержания сухого вещества и крахмала в клубнях, вследствие чего возрастает поражение бактериальными и грибковыми болезнями, что влечет за собой снижение сроков хранения урожая.

Необходимо отметить, что данные в табл. 2 представлены в некотором приближении и требуют определенной детализации. Например, для различных фаз развития картофеля указаны средние календарные сроки, однако эти значения могут варьироваться в зависимости от погодных условий конкретного года, использования сортов картофеля, различных сроков созревания, а также от агротехнических особенно-

стей выращивания культуры, используемых на сельскохозяйственных предприятиях. Тем не менее, декадный анализ вероятности возникновения НОЯ позволяет прогнозировать возможные риски уже с учетом особенностей выращивания картофеля в каждом конкретном хозяйстве, а также может служить основой для выбора сортов, наиболее устойчивых к выделенным неблагоприятным явлениям.

Заключение

Результаты исследования в полной мере согласуются с выводами ученых о том, что во многих регионах мира наблюдается увеличение проявления большинства опасных и неблагоприятных природных явлений для разных секторов экономики [Mendelsohn, 2009; Воронина, Сергеев, 2015; Шарапова и др., 2017; Соколов, 2018; Харюткина и др., 2019]. Причины этого видятся в изменении частоты и интенсивности экстремальных явлений, как следствие общего роста температуры воздуха [Соколов, 2018]. На этом фоне регистрируется определенная корреляция между урожайностью основных сельхозкультур и проявлением природных опасностей. За последнее десятилетие снижение урожайности основных сельхозкультур по миру, главным образом, связано с опасностями, обусловленными аномальными повышениями температуры воздуха в совокупности с недостаточным количеством осадков [Mendelsohn, 2009]. Вместе с тем специфика региональных особенностей обуславливает индивидуальный набор НОЯ, что предполагает детальное исследование подобных факторов для каждой конкретной территории.

Комплексный анализ выделенных НОЯ для территории южной тайги Западной Сибири, проведенный по декадам вегетационного периода, позволил оценить временную динамику и пространственное распределение природно-климатических явлений, отрицательно воздействующих на эффективность работы сферы растениеводства, и выделить интервалы вегетационного периода, имеющие наибольшие риски для роста сельскохозяйств. В целом результаты показывают, что основные опасности для растениеводства на территории южной тайги Западной Сибири и прилегающих территориях за последние 15 лет в большинстве случаев инициированы заморозками. Определено, что на фоне более ранних сроков начала вегетационного периода весенне-летние заморозки наносят наибольший урон основным сельскохозяйственным культурам региона. В мае возможность заморозков на многих станциях максимальная, при этом риск возникновения данной опасности сохраняется до середины июня. В начале лета возможны заморозки с вероятностью 6–25 %, в июле такая вероятность отсутствует. В конце августа она вновь возрастает до 37,5 %. Выявлен рост числа дней с низкой влажностью воздуха в мае и первой декаде июня на всех станциях исследуемой территории. Например, на ст. Тобольск за последние 20 лет средний показатель засушливых дней в вегетационный период увеличился в 3,5 раза. Весенние заморозки в совокупности

с показателями низкой влажности воздуха и сильными ветрами в начале вегетационного периода, характерные для северо-восточных районов, влекут за собой наибольшие риски для развития сельскохозяйств.

Экстремальные атмосферные осадки наибольшую опасность представляют в третьей декаде июля и первой половине августа, так для станции Ялуторовск Тюменской области вероятность их возникновения в этот период превышает 83 %. Стоит отметить, что в июне и начале июля сильные осадки часто сопровождаются градом, что многократно усиливает риски для растениеводства. Риски, вызванные ветровой активностью, наиболее вероятны в мае, они значительно выше для западной части исследуемой территории, наибольшие показатели по опасным и неблагоприятным ветровым явлениям имеют ст. Ишим, ст. Ялуторовск, ст. Викулово, ст. Большеречье и ст. Усть-Ишим. На северо-востоке дней с сильным ветром несколько меньше, однако наблюдается резкая тенденция к росту этих опасностей.

Распределение вероятности возникновения каждого фактора по месяцам и декадам вегетационного периода дает возможность не только извлечь информацию о его вероятном неблагоприятном воздействии на выращиваемые культуры, но и оценить риск для каждой фенологической фазы формирования растения, что позволит вовремя провести ряд предупредительных мер с целью сокращения ущерба.

Список источников

- Акимов В.А., Лесных В.В., Радаев Н.Н. Риски в природе, техносфере, обществе и экономике. М. : Деловой экспресс, 2004. 352 с.
- Барашкова Н.К., Кузевская И.В., Поляков Д.В. Экстремальный режим погоды летом 2012 г. на территории Томской области как отражение современных глобальных климатических тенденций // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 372. С. 173–179.
- Венцкевич Г.З. Сельскохозяйственная метеорология. Л. : Гидрометеиздат, 1952. 324 с.
- Волкова Е.С., Мельник М.А. Заморозки в южной тайге Западной Сибири как фактор риска для сферы растениеводства // География и природные ресурсы. 2023. Т. 44, № 1. С. 67–75.
- Воронина Л.В., Сергеев А.А. Климат и экономика на современном этапе развития мирового хозяйства // Вестник СГУГиТ. 2015. Вып. 3 (31). С. 137–145.
- Горбатенко В.П., Ананова Л.Г., Апостолиди Х.Т., Карпова А.А. Аэросиноптические условия образования града над юго-востоком Западной Сибири // Проблемы гидрометеорологических прогнозов, экологии, климата Сибири. 2023. Вып. 108. С. 17–28. doi: 10.55235/0320359X_2023_108_17
- Гордов Е.П., Богомолов В.Ю., Генина Е.Ю., Шутьгина Т.М. Анализ региональных климатических процессов Сибири: подход, данные и некоторые результаты // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2011. Т. 9, № 1. С. 56–66.
- Грингоф И.Г., Клещенко А.Д. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Т. I: Потребность сельскохозяйственных культур в агрометеорологических условиях и опасные для сельскохозяйственного производства погодные условия. Обнинск : ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2011. 808 с.
- Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации. 2020. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102660479> (дата обращения: 03.11.2023).
- Евсеева Н.С., Квасникова З.Н., Кузевская И.В. Ливни как природный риск и их экологические аспекты (на примере южной части Томской области) // Геосферные исследования. 2021. № 4. С. 73–84. doi: 10.17223/25421379/21/6
- Евсеева Н.С., Ромашова Т.В. Опасные метеорологические явления как составная часть природного риска (на примере юга Томской области) // Вестник Томского государственного университета. 2011. № 353. С. 199–204.
- Игнатьева А.В., Кнауб Р.В. Природные условия развития чрезвычайных ситуаций на территории Сибирского федерального округа // Геосферные исследования. 2020. № 1. С. 66–77. doi: 10.17223/25421379/14/5
- Истомин Е.П., Слесарева Л.С. Оценка риска экстремальных гидрометеорологических явлений // Гидрология. 2010. № 16. С. 14–21.

- Коршунов А.А., Хандожко Л.А., Шаймарданов М.З.** Проблемы экономической полезности использования гидрометеорологической информационной продукции. СПб. : Гидрометеоиздат, 2000. Вып. 169, № 2. 132 с.
- Красников С.Н.** Технология возделывания картофеля в условиях Томской области : методические рекомендации / Рос. акад. с.-х. наук, Сиб. отд.-ние, Сиб. науч.-исслед. ин-т сел. хоз-ва и торфа. Томск, 2008. 27 с.
- Мельник М.А., Волкова Е.С.** Специфика критериев опасных и неблагоприятных природно-климатических явлений для сферы аграрного природопользования южной тайги Западной Сибири // Проблемы региональной экологии. 2016. № 5. С. 64–70.
- Методические** рекомендации по оформлению документов для экспертной оценки ущерба в отраслях агропромышленного комплекса, пострадавших от чрезвычайных ситуаций природного характера : инструк. метод. издание. М. : Минсельхоз России, 2012. 92 с.
- Негативное** воздействие града на растения. URL: <https://agroplus.livejournal.com/7379.html> (дата обращения: 12.09.2023).
- Обзор** текущих гидрометеорологических условий на территории России. Гидрометцентр России, 2022. URL: <https://meteoinfo.ru/agro-review> (дата обращения: 12.11.2022).
- Огурцов Л.А., Череды Н.Н., Волкова М.А., Журавлев Г.Г.** Динамика показателей экстремальности климата на территории Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 8. С. 633–639.
- Осипов В.И.** Управление природными рисками // Вестник Российской Академии наук. 2010. Т. 80, № 4. С. 291–297.
- Официальный** сайт ФГБУ Гидрометцентр России. Типовой перечень и критерии опасных метеорологических явлений. URL: <https://meteoinfo.ru/hazards-definitions> (дата обращения: 25.04.2023).
- Перечень** и критерии опасных природных явлений, действующие на территории деятельности ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС». 2014. URL: <http://www.meteo-nso.ru/pages/115> (дата обращения: 11.12.2022).
- Плющиков В.Г., Фатиев М.М.** Статистические методы оценки и прогнозирования экономического ущерба от природных чрезвычайных ситуаций // Вестник РУДН. Серия Агрономия и животноводство. 2012. № 2. С. 5–15.
- Посевные** площади, валовые сборы и урожайность сельскохозяйственных культур РФ 2022 г. Федеральная служба государственной статистики. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/29_cx_predv_2022.xlsx (дата обращения: 02.02.2024).
- Расписание** погоды rp5.ru. URL: http://rp5.ru/Архив_погоды (дата обращения: 28.03.2023).
- 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. doi: 10.17223/25421379/4/3
- Соколов Ю.И.** Риски экстремальных погодных явлений // Проблемы анализа риска. 2018. Т. 15, № 3. С. 6–21.
- Третий** оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб. : Научное издание, 2022. 124 с.
- Фомин Э.С., Фомина Т.И.** Изменение фенологии многолетних растений в Западной Сибири на фоне глобального потепления климата // Сибирский экологический журнал. 2021. Т. 28, № 5. С. 543–556. doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.15372/SEJ20210504>
- Харюткина Е.В., Логинов С.В., Усова Е.И., Мартынова Ю.В., Пустовалов К.Н.** Тенденции изменения экстремальности климата Западной Сибири в конце XX – начале XXI веков // Фундаментальная и прикладная климатология. 2019. № 2. С. 45–65. doi: 10.21513/2410-8758-2019-2-45-65
- Чрезвычайные** ситуации в России, обусловленные погодными условиями. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации. Мировой центр данных. URL: <http://meteo.ru/climate/150-chs-v-rosii> (дата обращения: 02.02.2024).
- Шарапова А.А., Кузевская И.В., Каштанова К.А., Поляков Д.В.** Характеристики экстремальных осадков на территории Западной Сибири // Географический Вестник. 2017. № 3 (42). С. 88–98.
- Branimir Omazić, Mislav Anić, Maja Telišman Prtenjak, Marko Kvakić, Lucija Blašković.** Analysis of different existing measurement-based methods and a new approach for frost probability detection // Agricultural and Forest Meteorology. 2024. V. 347. P. 109898. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.109898>
- Closset M., Dhehibi B. B., Aw-Hassan A.** Measuring the economic impact of climate change on agriculture: a Ricardian analysis of farmlands in Tajikistan // Climate and Development. 2015. V. 7 (5). P. 454–468. doi: 10.1080/17565529.2014.989189
- Duchenne-Moutien RA, Neetoo H.** Climate Change and Emerging Food Safety Issues: A Review // J. Food Prot. 2021. V. 84 (11). P. 1884–1897. doi: 10.4315/JFP-21-141. PMID: 34185849
- Gu L., Hanson P.J., MacPost W., Kaiser D.P., Yang B., Nemani R., Pallardy G.S., Meyers T.** The 2007 Eastern US Spring Freeze: Increased Cold Damage in a Warming World // BioScience. 2008. V. 58 (3). P. 253–262.
- Mendelsohn R.** The Impact of Climate Change on Agriculture in Developing Countries // Journal of Natural Resources Policy Research. 2009. Vol. 1, No. 1. P. 5–19. doi: 10.1080/19390450802495882
- NOAA's National Centers for Environmental information (NCEI).** URL: <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/gso/> (дата обращения: 12.09.2022)
- Sauerborn R., Ebi K.** Climate change and natural disasters – integrating science and practice to protect health // Global Health Action. 2012. V. 5 (1). P. 1–7. doi: 10.3402/gha.v5i0.19295

References

- Akimov Vy.A., Lesnykh V.V., Radaev N.N. *Riski v prirode, tekhnosfere, obshchestve i ekonomike* [Risks in nature, technosphere, society and economy]. 2009. Moscow: Delovoy ekspress. No. 352. In Russian
- Barashkova N.K., Kujevskaya I.V., Polyakov D.V. *Ekstremal'nyi rejim pogody letom 2012 g. na territorii Tomskoi oblasti kak otrazhenie sovremennykh global'nykh klimaticheskikh tendentsii* [Extreme weather conditions in the 2012 summer on the Tomsk region territory as a reflection of modern global climate trends] // Bulletin of the Tomsk State University. 2013. No. 372. pp. 173–179. In Russian
- Venckevich G.Z. *Sel'skhozhozyaistvennaya meteorologiya* [Agricultural meteorology]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1952. 324 p. In Russian
- Volkova E.S., Mel'nik M.A. *Zamorozki v yujnoi taige Zapadnoi Sibiri kak faktor riska dlya sfery rastenievodstva* [Frosts in the Western Siberia southern taiga as a risk factor for crop production] // Geography and Natural Resources. 2023. V. 44, No 1. pp. 67–75. In Russian

- Voronina L.V., Sergeev A.A. *Klimat i ekonomika na sovremennom etape razvitiya mirovogo hozyaystva* [Climate and economy at the present stage of the world economy development] // Vestnik SGUGiU. 2015. V. 3(31). pp. 137–145. In Russian
- Gorbatenko V.P., Ananova L.G., Apostolidi Kh.T., Karpova A.A. *Aerosinopticheskie usloviya obrazovaniya grada nad yugovostokom Zapadnoy Sibiri* [Aerosynoptic conditions of hail formation over the south-east of Western Siberia] // Problems of hydrometeorological forecasts, ecology, climate of Siberia. 2023. V. 108. pp. 17–28. doi: 10.55235/0320359X_2023_108_17. In Russian
- Gordov E.P., Bogomolov V.Yu., Genina E.Yu., Shul'gina T.M. *Analiz regional'nykh klimaticheskikh protsessov Sibiri: podkhod, dannye i nekotorye rezul'taty* [Analysis of regional climatic processes in Siberia: approach, data and some results] Bulletin of Novosibirsk State University. Series: Information Technology. 2011. V. 9. No. 1. pp. 56–66. In Russian
- Gringof I.G., Kleschenko A.D. *Osnovy sel'skohozyaystvennoy meteorologii. Potrebnost' sel'skohozyaystvennykh kul'tur v agrometeorologicheskikh usloviyakh i opasnye dlya sel'skohozyaystvennogo proizvodstva pogodnye usloviya* [Agricultural meteorology fundamentals. The agricultural crops need in agrometeorological conditions and dangerous weather conditions for agricultural production]. Obninsk: FGBU «VNIIGMI-MCD», 2011. Tom I. 808 p. In Russian
- Doktrina prodovol'stvennoi bezopasnosti Rossiiskoi Federatsii* [The Food Security Doctrine of the Russian Federation]. 2020. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102660479> (Date of accessed: 03.11.2023). In Russian
- Evseeva N.S., Kvasnikova Z.N., Kuzhevskaya I.V. *Livni kak prirodnyy risk i ikh ekologicheskie aspekty (na primere yuzhnoy chasti Tomskoy oblasti)* [Heavy rains as a natural risk and their environmental aspects (on the example of the southern part of the Tomsk region)] // Geosphere research. 2021. No 4. pp. 73–84. doi: 10.17223/25421379/21/6 In Russian
- Evseeva N.S., Romashova T.V. *Opasnye meteorologicheskie yavleniya kak sostavnaya chast' prirodnogo riska (na primere yuga Tomskoy oblasti)* [Dangerous meteorological phenomena as an integral part of natural risk (on the example of the south of the Tomsk region)] // Bulletin of the Tomsk State University. 2011. No. 353. pp. 199–204. In Russian
- Ignat'eva A.V., Knaub R.V. *Prirodnye usloviya razvitiya chrezvychaynykh situatsiy na territorii Sibirskogo Federal'nogo okruga* [Natural conditions of development of emergency situations in the territory of the Siberian Federal District] // Geosphere Research. 2020. No. 1. pp. 66–77. DOI: 10.17223/25421379/14/5. In Russian
- Istomin E.P., Slesareva L.S. *Ocenka riska ekstremal'nykh gidrometeorologicheskikh yavlenii* [Extreme hydrometeorological events risk assessment] // Hydrology. 2010. No 16. pp. 14–21. In Russian
- Korshunov A.A., Handoyko L.A., Shaimardanov M.Z. *Problemy ekonomicheskoi poleznosti ispol'zovaniya gidrometeorologicheskoi informatsionnoi produktsii* [Economic usefulness problems of the hydrometeorological information products use]. St.Petersburg: Gidrometeoizdat, 2000. V. 169, No. 2. 132 p. In Russian
- Krasnikov S.N. *Tekhnologiya vozdel'yvaniya kartofelya v usloviyakh Tomskoy oblasti: metodicheskie rekomendatsii* [Potato cultivation technology in the Tomsk region: methodological recommendations] / Russian Academy of Agricultural Sciences, Siberian Branch, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat. Tomsk. 2008. 27 p.
- Mel'nik M.A., Volkova E.S. *Specifika kriteriev opasnykh i neblagopriyatnykh prirodno-klimaticheskikh yavlenii dlya sfery agrarnogo prirodopol'zovaniya yujnoi taiga Zapadnoi Sibiri* [Specificity of dangerous and unfavorable natural and climatic phenomena criteria for the sphere of agricultural nature management Western Siberia Southern taiga] // Problems of regional ecology. 2016. No. 5. pp. 64–70. In Russian
- Metodicheskie rekomendatsii po oformleniyu dokumentov dlya ekspertnoi ocenki uscherba v otraslyakh agropromyshlennogo kompleksa, postradavshikh ot chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo haraktera: instruk. metod. Izdanie* [Methodological recommendations on the documents preparation for damage expert assessment in the branches of the agro-industrial complex affected by natural emergencies]. Moscow: Agriculture Ministry of the Russian Federation, 2012. 92 p. In Russian
- Negativnoe vozdeystvie grada na rasteniya* [Negative impact of hail on plants]. URL: <https://agroplus.livejournal.com/7379.html> (Date of accessed: 12.09.2023). In Russian..
- Obzor tekuschikh gidrometeorologicheskikh uslovii na territorii Rosii* [Current hydrometeorological conditions overview in the territory] Hydrometeorological center of Russia. 2022. URL: <https://meteoinfo.ru/agro-review> (Date of accessed: 12.11.2022). In Russian.
- Ogurcov L.A., Chered'ko N.N., Volkova M.A., Juravlev G.G. *Dinamika pokazatelei ekstremal'nosti klimata na territorii Zapadnoi Sibiri* [Climate extremes dynamics on the territory of Western Siberia] // Atmospheric and Oceanic Optics. 2016. V. 29, No. 8. P. 633–639. In Russian
- Osipov V.I. *Upravlenie prirodnymi riskami* [Natural risk management] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2010. V. 80, No. 4. pp. 291–297. In Russian
- Official site of the Hydrometeorological Research Center of Russian Federation. *Tipovoi perechen' i kriterii opasnykh meteorologicheskikh yavlenii* [Dangerous meteorological phenomena standard list and criteria] URL: <https://meteoinfo.ru/hazards-definitions> (Date of accessed: 25.04.2023). In Russian
- Perechen' i kriterii opasnykh prirodnikh yavleniy, deystvuyushchie na territorii deyatel'nosti FGBU «Zapadno-Sibirskoe UGMS»* [The list and criteria of natural hazards phenomena on the West-Siberian territory UGMS]. URL: <http://www.meteo-nso.ru/pages/115> (Date of accessed: 11.12.2022). In Russian
- Plyuschnikov V.G., Fatiev M.M. *Statisticheskie metody ocenki i prognozirovaniya ekonomicheskogo uscherba ot prirodnikh chrezvychaynykh situatsiy* [Statistical methods for assessing and predicting the economic impact of natural disasters] // Bulletin of the RUDN, Agronomy and Animal Husbandry. 2012. No. 2. pp. 5–15. In Russian
- Posevnye ploshchadi, valovye sbory i urozhaynost' sel'skokhozyaystvennykh kul'tur RF 2022 y.* [Acreage, gross yields and crop yields of the Russian Federation 2022] URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/29_cx_predv_2022.xlsx (Date of accessed: 02.02.2024). In Russian
- Raspisanie pogody rp5.ru.* [Weather schedule] URL: http://rp5.ru/Arhiv_pogody (Date of accessed: 28.03.2023). In Russian
- Romashova T.V., Filandysheva L.B., Yurkova K.D. *Analiz dinamiki vremennykh kharakteristik sezonov goda v podtayge Zapadno-Sibirskoy ravniny za period s 1936 po 2015 g.* [Analysis of the dynamics of time characteristics of the seasons of the year in the sub-boreal forest (sub-taiga) of the West Siberian plain in the period from 1936 to 2015] // Geosphere Research. 2017. No 3. pp. 16–25. doi: 10.17223/25421379/4/3. In Russian
- Sokolov Yu.I. *Riski ekstremal'nykh pogodnykh yavlenii* [Risks of extreme weather phenomena] // Risk analysis problems. 2018. V. 15, No. 3. pp. 6–21. In Russian

Tretii ocenochnyi doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossiiskoi Federatsii [The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation]. St. Petersburg: High-tech technologies, 2022. 124 p. In Russian

Fomin E.S., Fomina T.I. *Izmenenie fenologii mnogoletnih rastenii v Zapadnoi Sibiri na fone global'nogo potepleniya klimata* [Changes in the perennial plants phenology in Western Siberia against the background of global climate warming] // Siberian Ecological Journal. 2021. V. 28, No. 5. pp. 543–556. doi: 10.15372/SEJ20210504. In Russian

Haryutkina E.V., Loginov S.V., Usova E.I., Martynova YU.V., Pustovalov K.N. *Tendencii izmeneniya ekstremal'nosti klimata Zapadnoi Sibiri v konce XX – na chale XXI vekov* [Trends in the Western Siberia extreme climate in the late XX – early XXI centuries] // Fundamental and applied climatology. 2019. No. 2. pp. 45–65. doi: 10.21513/2410-8758-2019-2-45- 65. In Russian

Chrezvychaynye situatsii v Rossii, obuslovennye pogodnymi usloviyami. Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut gidrometeorologicheskoy informatsii [Emergencies in Russia caused by weather conditions. All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information] World Data Center. URL: <http://meteo.ru/climate/150-chs-v-rosii> (Date of accessed: 02.02.2024). In Russian

Sharapova A.A., Kuzhevskaya I.V., Kashtanova K.A., Polyakov D.V. *Harakteristiki ekstremal'nykh osadkov na territorii Zapadnoi Sibiri* [Extreme precipitation Characteristics in Western Siberia] // Geographical Bulletin. 2017. No. 3(42). pp. 88–98. In Russian

Branimir Omazić, Mislav Anić, Maja Telišman Prtenjak, Marko Kvakić, Lucija Blašković. Analysis of different existing measurement-based methods and a new approach for frost probability detection // Agricultural and Forest Meteorology. 2024. V. 347. pp. 109898. doi: 10.1016/j.agrformet.2024.109898

Closset M., Dhehibi B. B., Aw-Hassan A. Measuring the economic impact of climate change on agriculture: a Ricardian analysis of farmlands in Tajikistan // Climate and Development. 2015. V. 7 (5). pp. 454–468. doi: 10.1080/17565529.2014.989189

Duchenne-Moutien RA, Neetoo H. Climate Change and Emerging Food Safety Issues: A Review // J. Food Prot. 2021. 84(11). pp. 1884–1897. doi: 10.4315/JFP-21-141. PMID: 34185849

Gu L., Hanson P.J., MacPost W., Kaiser D.P., Yang B., Nemani R., Pallardy G.S., Meyers T. The 2007 Eastern US Spring Freeze: Increased Cold Damage in a Warming World // BioScience. 2008. V. 58 (3). pp. 253–262.

Mendelsohn R. The Impact of Climate Change on Agriculture in Developing Countries // Journal of Natural Resources Policy Research. 2009. V. 1. No. 1. pp. 5–19. doi: 10.1080/19390450802495882

NOAA's National Centers for Environmental information (NCEI). URL: <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/gsod/> (Date of accessed: 12.09.2022).

Sauerborn R., Ebi K. Climate change and natural disasters – integrating science and practice to protect health // Global Health Action. 2012. V. 5 (1). pp. 1–7. doi: 10.3402/gha.v5i0.19295

Информация об авторах:

Мельник М.А., кандидат географических наук, научный сотрудник, лаборатория самоорганизации геосистем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: melnik-m-a@yandex.ru

Волкова Е.С., кандидат географических наук, старший научный сотрудник, лаборатория самоорганизации геосистем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: elevolko@yandex.ru

Семенова К.А., кандидат географических наук, младший научный сотрудник, лаборатория самоорганизации геосистем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: ksenia_ska@mail.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Melnik M.A., Cand. Sci. (Geography), Researcher, Laboratory of Self-organizing Geosystems, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: melnik-m-a@yandex.ru

Volkova E.S., Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher, Laboratory of Self-organizing Geosystems, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: elevolko@yandex.ru

Semenova K.A., Cand. Sci. (Geography), Researcher, Laboratory of Self-organizing Geosystems, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: ksenia_ska@mail.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.02.2024; одобрена после рецензирования 18.10.2024; принята к публикации 27.11.2024

The article was submitted 20.02.2024; approved after reviewing 18.10.2024; accepted for publication 27.11.2024

Научная статья

УДК [551.524.3+551.553+614.712]: 551.586(470.22)

doi: 10.17223/25421379/33/11

ДИНАМИКА ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА, ВЕТРОВОГО РЕЖИМА И СМЕРТНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПЕТРОЗАВОДСКА



Дмитрий Сергеевич Рыбаков

Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук»,
Петрозаводск, Россия, rybakovd@krc.karelia.ru

Аннотация. Анализ временных рядов позволил изучить связь показателей смертности городского населения с некоторыми параметрами погоды. Отклонения от многолетних трендов показателей смертности связываются с повторяемостью восточного, северо-восточного, южного (отрицательная корреляция) и северо-западного (положительная корреляция) направлений ветра. В сезонной динамике влияние температуры воздуха на общую смертность маскируется положительной корреляцией последней с параметром безветренной погоды. При этом для зимнего сезона установлена зависимость от температурного и штилевого факторов (холодная и безветренная погода), тогда как в осеннее время зависимость от температуры не выражена, а влияние штилей дополняется зависимостью от северного направления ветра.

Ключевые слова: приземная температура воздуха, повторяемость штилей и направлений ветра, коэффициенты смертности, временные ряды, линейная корреляция

Источник финансирования: финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт геологии КарНЦ РАН).

Для цитирования: Рыбаков Д.С. Динамика приземной температуры воздуха, ветрового режима и смертности населения на примере Петрозаводска // Геосферные исследования. 2024. № 4. С. 177–195. doi: 10.17223/25421379/33/11

Original article

doi: 10.17223/25421379/33/11

DYNAMICS OF SURFACE AIR TEMPERATURE, WIND REGIME AND POPULATION MORTALITY RATE ON THE EXAMPLE OF PETROZAVODSK

Dmitriy S. Rybakov

Federal Research Center "Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences",
Petrozavodsk, Russia, rybakovd@krc.karelia.ru

Abstract. The influence of the long-term, seasonal and intra-seasonal dynamics of the average monthly values of surface air temperature and wind regime (repeatability of wind directions and calm) on the mortality rates of the population of Petrozavodsk (Republic of Karelia) was studied using a set of statistical methods, including regression, harmonic, first-order difference and correlation analyses. Nonstationary and stationary time series was determined and analyzed. A comparison of the two periods 2000–2009 and 2010–2019 showed a statistically insignificant ($p_{\text{exp}} = 0.344$) increase in the average long-term air temperature in the study area by 8.2% and a statistically significant ($p_{\text{exp}} < 0.001$) decrease in the recurrence of calm by 52.5 %, total mortality by 17% and mortality from diseases of the circulatory system by 21.3%. It is shown that a statistically justified indicators of favorable conditions affecting the level of total mortality in long-term dynamics are the frequencies of the east, north-east (both from the Onega Lake water area) and south (from the side of suburban forests) wind directions. The causes of these fluctuations may be multi-scale processes, including favorable ones both for improving meteorological conditions in general and for reducing urban air pollution. A negative impact on mortality rates is possible with an increase in the transfer of harmful substances from the main stationary sources of pollution to large residential areas by the wind of the north-west direction. At the same time, this circumstance requires confirmation, since the influence of another "third factor" is assumed, namely the circulation of the atmosphere, depending on the level of solar activity. When considering the seasonal dynamics for the period 2013–2017, characterized according to previously obtained data by minimal amounts of emissions of harmful substances from stationary sources, it was found that the influence of the temperature (seasonal) factor on overall mortality can be obscured by a statistically significant positive correlation of the latter one with the off-season parameter of windless weather ($p = 0.007$ – 0.032). Herewith a dependence the mortality on factors of temperature and calm (cold and windless weather) has been established for winter time, and this one turns out to be especially strong when excluded from calculations average monthly data characterizing the actual absence of calm (we get $p = 0.007$ for temperature and $p = 0.020$ for calm), whereas in autumn the dependence on temperature is not expressed ($p = 0.347$), and the influence of calm ($p = 0.018$) is supplemented by dependence on the north wind direction ($p = 0.006$). The studied intra-seasonal weather factors do not affect the overall mortality rate in the spring and summer periods during the five-year period. The results obtained are compared both with the results of the results of our own previous work and with the publications of other authors. The results of the research can be used

in the planning of geoecological and medico-ecological studies of urbanized territories, as well as taken into account in urban planning activities.

Keywords: surface air temperature, calm, wind directions, mortality rates, time series analysis, linear correlation

Source of financing: Financial support for the research was provided from the federal budget for the implementation of the state assignment of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (Institute of Geology of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences).

For citation: Rybakov D.S. (2024) Dynamics of surface air temperature, wind regime and population mortality rate on the example of Petrozavodsk. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 177–195. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/33/11

Введение

Здоровье человека зависит от множества факторов, как внутренних, так и внешних. К первым, в частности, относят наследственные свойства организма, ко вторым – метеорологические, геофизические, химические, биологические и социально-экономические факторы. Без специальных исследований трудно говорить о том, какие из факторов преобладают в той или иной местности, в то или иное время.

Весьма распространенным и легко доступным измеряемым показателем, используемым исследователями для оценки здоровья населения стран, отдельных областей и населенных пунктов, является общий коэффициент смертности (ОКС), характеризующий уровень смертности от всех причин смерти. Соответствующие временные ряды содержат как трендовую, так и сезонную составляющие, что важно учитывать не только для целей демографического прогнозирования [Родионова, Копнова, 2019], но и для выявления факторов, влияющих на динамику смертности [Андреева, Горбунов, 2019].

Значительный интерес в связи с большим удельным весом в структуре общей смертности (около 50 %) также вызывает смертность от болезней системы кровообращения (БСК) [Бойцов и др., 2021]. В мире (оценка по 204 странам) распространение случаев общей сердечно-сосудистой заболеваемости с 1990 по 2019 г. выросло с 271 до 523 млн, а число смертей по этой причине – с 12,1 до 18,6 млн случаев. Основными движущими силами сердечно-сосудистых заболеваний являются кардиометаболические, поведенческие, экологические и социальные факторы [Roth et al., 2020].

Разными авторами исследуются зависимости ухудшения здоровья и риска смерти от БСК под влиянием неблагоприятных метеорологических факторов, при этом соответствующая связь устанавливается для разных географических условий [Хаснулин и др., 2015; Baaghiddeh, Maayvaneh, 2017; Азизов и др., 2018; Салтыкова и др., 2018; Яковлев и др., 2019; Рыбаков, Белашев, 2020]. Пик смертности из-за БСК приходится на январь в Северном полушарии и июль в Южном полушарии [Kaufman, Fitzmaurice, 2021]. Вместе с тем модели на основе функционального ана-

лиза данных по Монреалю [Massetot et al., 2018] показывают, что температуры ниже среднего вызывают большую избыточную сердечно-сосудистую смертность в переходные весенний (с конца апреля по начало июня) и осенний (с сентября по ноябрь) сезоны, при этом «январская смертность» смещается и проявляется в феврале–марте.

Отмечается, что при потеплении климата можно прогнозировать увеличение будущей смертности от высоких температур с сохранением неопределенности, связанной с адаптацией к высоким температурам, изменением численности и старением населения, а также неопределенностью климатических прогнозов [Sanderson et al., 2017].

Несмотря на проведенные исследования, все еще требует уточнения, в том числе в части корректировки используемых статистических данных, вклад системы здравоохранения в наблюдаемое в городах сокращение смертности и летальности от отдельных причин, включая различные БСК [Бойцов и др., 2021]. Определенные результаты по снижению госпитализации и смертности в связи с БСК, судя по всему, дает антитабачное законодательство [Концевая и др., 2019].

К числу метеофакторов, влияющих на биосферные процессы и формирующих условия среды обитания человека, относится ветровой режим [Говорушко, 2012; Зенченко, Бреус, 2020; Maryanaji, Namidi, 2020]. Ветер оказывает влияние на здоровье человека как непосредственно, так и косвенно, в том числе перераспределяя загрязняющие вещества, попадающие в атмосферный воздух городов из различных техногенных источников. Скорость ветра, наряду с температурой и влажностью воздуха, входит в состав формул для расчетов биометеорологических индексов [Емелина, 2019]. В зависимости от направления и скорости ветра возможно распространение инфекционных заболеваний [Говорушко, 2012; Ellwanger, Chies, 2018]. Штили исключают фактор проветривания застроенных территорий и формируют дополнительный риск увеличения концентрации загрязняющих веществ в городском воздухе [Ляпкало и др., 2013, 2015]. Ветровые условия в конкретных точках могут меняться в зависимости от типа городской застройки [Mikhailuta et al., 2017].

Различия в содержании загрязняющих веществ в воздухе при разных направлениях ветра не позволяют однозначно устанавливать влияние химического загрязнения на здоровье из-за приоритетного действия других погодных факторов [Евстафьева и др., 2019]. Вместе с тем исследование здоровья детей до трех лет показывает, что самым неблагоприятным является направление ветра со стороны основных источников загрязнения воздушной среды, при этом прямой статистической зависимости между повторяемостью такого направления и заболеваемостью не наблюдается для городского района с высоким развитием транспортной инфраструктуры и пониженным рельефом. В целом в структуре причин роста заболеваемости органов дыхания у детей приоритетное место занимает общее загрязнение атмосферного воздуха различными химическими соединениями, второе – направление ветра со стороны основных источников загрязнения, третье – показатели относительной влажности воздуха, четвертое – показатели температуры воздуха и пятое – показатели скорости ветра [Чеснокова, 2008].

Настоящее исследование исходит из предположения о наличии в каждой местности (населенном пункте) направлений ветра, наиболее и наименее благоприятных для здоровья всего населения (естественные факторы погоды) или локальных групп населения (фактор распространения промышленного загрязнения). При гипотетически неизменном объеме выбросов от известных источников в течение определенного периода, постоянных геоморфологических условиях и типе застройки, неблагоприятные направления могут совпадать с потоками загрязняющих веществ, влияющих на показатели здоровья и смертности. Определение таких направлений, а также повторяемости штилей (особенно при значительном загрязнении) – важнейшая задача для климатологов, метеорологов, медиков, жителей населенных пунктов.

Цель данной работы – определить, имеется ли статистическая связь между приземной температурой воздуха и параметрами ветрового режима (повторяемость направлений ветра и штилей), с одной стороны, и показателями смертности населения – с другой.

Объекты и методы исследования

Исследования проведены на примере Петрозаводска, самого крупного (280 тыс. жителей) города Республики Карелия, расположенного на западном побережье Онежского озера (Петрозаводская губа). Данный район характеризуется сезонными колебаниями приземной температуры воздуха, перепадов давления атмосферы, скорости ветра и сумм атмосферных осадков [Рыбаков, Белашев, 2021].

В границах территории Петрозаводска размещены две основные промышленные зоны и отдельные предприятия. Наиболее экономически активным является район «Северная промышленная зона» (северо-западная часть города), в котором расположены литейный завод «Петрозаводскмаш» и котельная Филиала АО «АЭМ-технологии» «Петрозаводскмаш», работающая на природном газе. По соседству функционируют Петрозаводская ТЭЦ (основное топливо – природный газ, вспомогательное – мазут) и стационарные объекты РАО «РЖД», несколько севернее находится ДОК «Калевала», генерирующий выбросы загрязняющих веществ при производстве OSB-плит. В районе «Южная промышленная зона» (юго-восточная часть города) размещены предприятия по обработке камня, загрязняющие воздушную среду главным образом в пределах производственных площадок. В этой же части города находятся практически не функционирующая вторая площадка Онежского тракторного завода ООО «Амкор-Онега» и бывший судостроительный завод «Авангард», на территории которого эксплуатируется котельная на газовом топливе. До 2008 г. в центральной части Петрозаводска располагалась ныне ликвидированная первая площадка Онежского тракторного завода.

Значительный вклад в загрязнение атмосферного воздуха Петрозаводска внес автомобильный транспорт, передвигающийся по всей городской территории. Количество выбросов от автотранспорта в пределах города в 2017 г. составило 27 тыс. т [Обобщенные данные..., 2019], в то время как от стационарных источников – 2,83 тыс. т [Государственный доклад..., 2018].

В ходе исследований обработано 58 440 восьми-срочных измерений направлений ветра, полученных на метеостанции «Петрозаводск» в 2000–2019 гг. Все данные доступны на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных [Специализированные массивы...]. Повторяемость направлений ветра, в зависимости от дискретности измерений для разных лет и месяцев, рассчитана по 30- и 40-градусным секторам: С (345–15°), СВ (25–65°), В (75–105°), ЮВ (115–155°), Ю (165–195°), ЮЗ (205–245°), З (255–285°), СЗ (295–335°). Выделенные направления исследовались по отдельности, абсолютные значения их повторяемости применительно к каждому конкретному году между собой не сравнивались. Кроме того, рассчитаны годовые и месячные значения повторяемости штилей.

Изменения приземной температуры воздуха проанализированы с помощью среднегодовых и среднемесячных значений за период 2000–2019 гг., вычисленных по данным измерений, представленных на

сайте ВНИИГМИ – МЦД [Специализированные массивы...].

В качестве биомаркеров использовались среднегодовые и среднемесячные значения общего коэффициента смертности и среднегодовые значения коэффициента смертности от болезней системы кровообращения населения Петрозаводска.

Среднегодовые коэффициенты смертности представляют собой число случаев смерти на 1 000 человек населения за календарный год. Данные по количеству случаев смерти получены в Территориальном органе Федеральной службы государственной статистики по Республике Карелия (<http://krl.gks.ru/>).

Месячные значения коэффициентов смертности рассчитывались по имеющимся данным того же источника за 2013–2017 гг. с учетом коэффициента годового выражения и среднегодовой численности населения. За коэффициент годового выражения принималось отношение количества дней в году к количеству дней в исследуемом периоде (месяце). Согласно данным Росстата (http://www.gks.ru/scripts/db_inet2/passport/munr.aspx?base=munst86), среднегодовая численность населения Петрозаводского городского округа составила (человек): 270 524 (2013 г.), 273 724 (2014 г.), 276 229 (2015 г.), 277 831 (2016 г.) и 278 871 (2017 г.).

Для статистической обработки использовался пакет «Анализ данных» программного продукта Microsoft Excel. Нормальность распределения данных проверялась с помощью показателей эксцесса (K_E) и асимметрии (K_A) [Плохинский, 1970] и критерия Граббса (U) [Verma et al., 2008]. Распределение считалось близким к нормальному при выполнении условий $|K_A| \leq 3$ и $|K_E| \leq 3$, отсутствие или наличие квази- и статистических выбросов контролировалось путем сравнения $U_{расч}$ с табличными значениями двустороннего критерия Граббса при уровнях значимости 0,05 ($U_{0,05}$) и 0,01 ($U_{0,01}$) соответственно [Р 502.050–2005]. Гипотезы о значимости различий выборочных дисперсий и средних нормально распределенных значений проверялись по двусторонним критериям Фишера (F) и Стьюдента (t) соответственно. Для нестационарных временных рядов проводился линейный регрессионный анализ, при расчете уравнений регрессии независимая переменная (годы) кодировалась от 1 до n . Автокорреляционный анализ выполнялся с учетом принятой достаточности обеспечения статистической достоверности коэффициентов автокорреляции при максимальном лаге между уровнями временных рядов или регрессионными остатками $n/4$. Остатки проверялись на стационарность: нормальность, однородность, случайность, равенство нулю среднего, независимость распределения.

Для оценки статистических связей между показателями погоды и смертности рассчитывались коэффициенты линейной корреляции Пирсона. Все полученные значения признавались статистически значимыми на уровне $p < 0,05$.

Уточнение корреляционных связей, в том числе путем уменьшения и возможного исключения влияния автокорреляции на их тесноту, и поиск скрытых периодичностей осуществлялись с помощью разложения функций в тригонометрический ряд Фурье:

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^m \left(a_k \cos \frac{k2\pi t}{T} + b_k \sin \frac{k2\pi t}{T} \right), \quad (1)$$

где $f(t)$ – расчетная функция; $a_0 = \sum y_i / T$ – нулевая гармоника; k – номер гармоники; m – число доминирующих (статистически значимых) гармоник; T – период периодической функции; t – момент времени;

$$a_k = \sum_{t=1}^T y_t \cos \frac{k2\pi t}{T}, \quad b_k = \sum_{t=1}^T y_t \sin \frac{k2\pi t}{T}.$$

Кроме того, для сопоставления скоростей рядов метеопараметров и показателей смертности оценивалась теснота связи по первым разностям.

Результаты

1. Многолетняя динамика приземной температуры воздуха, повторяемости штилей и направлений ветра. В табл. 1 приведены значения среднегодовой приземной температуры воздуха, годовой повторяемости штилей (гПШ) и направлений ветра по выбранным секторам для Петрозаводска за 20-летний период. Проверка временных рядов на стационарность по 10-летним периодам выявила статистически значимое увеличение повторяемости западного направления ветра (З) и статистически значимое снижение – юго-западного (ЮЗ). Эти направления являются преобладающими в розе ветров на изученной территории [Альтшуллер и др., 1990]. Кроме того, в городе очень сильно сократилось количество штилей (гПШ). Изменение ветрового режима произошло на фоне статистически незначимого повышения среднемноголетней температуры воздуха (Т). Также проверка показала статистические различия выборочных дисперсий повторяемости северо-восточного (СВ) и южного (Ю) направлений ветра, при этом средние значения этих ветровых характеристик различались статистически незначимо.

Как следует из табл. 1, за исследованный период выявлено статистически значимое снижение смертности населения общей (ОКС) и от болезней системы кровообращения (КС_{БСК}). При этом установлена сильная линейная корреляция между значениями гПШ и ОКС ($r = 0,688$; $p = 0,001$), а также гПШ и КС_{БСК} ($r = 0,739$; $p < 0,001$).

Таблица 1

Среднегодовые значения приземной температуры атмосферного воздуха (°C), годовая повторяемость штилей и направлений ветра (%), общий коэффициент смертности (‰) и коэффициент смертности от болезней системы кровообращения (‰)

Table 1

The average annual values of ambient air temperature (°C), annual frequency of calm and wind directions (%), total mortality rate (‰) and mortality rate from circulatory system diseases (‰)

Годы	T	гПШ	C	CB	B	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	ОКС	КС _{БСК}
2000	+4,6	6,01	4,85	3,52	8,88	8,67	5,02	24,2	12,0	5,81	14,37	7,92
2001	+3,0	6,71	6,10	3,84	10,3	7,12	4,79	24,3	11,5	6,47	14,69	7,97
2002	+3,2	5,55	4,25	7,67	5,86	4,83	6,95	29,3	8,87	8,49	15,34	7,98
2003	+3,5	3,97	5,62	6,44	5,96	5,96	5,58	21,9	15,4	9,73	16,55	8,90
2004	+3,4	5,70	4,17	3,93	8,23	10,3	5,91	16,7	16,7	8,85	14,76	7,91
2005	+4,3	4,25	5,21	5,51	9,42	8,66	6,78	24,9	9,79	6,27	13,85	7,57
2006	+3,4	8,05	4,14	5,34	10,9	5,07	3,70	22,9	15,2	7,16	13,95	7,87
2007	+4,2	5,27	4,38	3,94	7,74	6,99	6,82	24,3	14,4	7,43	12,68	6,96
2008	+4,4	3,65	3,59	7,82	8,57	6,35	8,81	23,5	11,4	6,76	13,39	7,44
2009	+3,3	6,03	3,42	5,86	10,5	6,99	5,07	19,9	13,1	7,84	13,41	7,35
2010	+2,6	4,45	3,39	4,25	13,4	8,60	4,35	15,4	14,2	8,97	12,63	7,06
2011	+4,3	2,84	5,31	5,14	9,76	7,81	5,62	17,6	13,2	8,84	11,87	6,38
2012	+2,8	4,06	3,52	3,96	10,8	11,4	5,70	16,8	12,5	7,48	12,47	6,72
2013	+4,5	2,12	4,01	4,86	11,9	7,02	4,25	20,3	15,7	8,01	11,81	6,71
2014	+4,7	2,29	5,24	5,31	9,18	4,38	5,41	24,0	14,0	7,88	11,77	6,47
2015	+5,1	1,75	4,79	2,64	6,44	7,40	4,79	22,7	17,3	7,67	12,30	6,34
2016	+4,1	2,08	3,69	4,87	9,89	7,07	6,22	20,6	14,1	8,16	11,46	5,40
2017	+3,6	1,75	4,13	4,23	8,29	8,44	5,14	21,8	15,4	8,56	11,55	5,64
2018	+4,2	2,67	4,01	4,74	9,55	8,78	5,68	19,3	15,9	6,76	11,55	5,21
2019	+4,3	2,19	4,64	4,50	8,29	6,42	5,09	22,2	15,8	7,21	11,27	5,35
Проверка нормальности распределения												
2000–2009	K _E	1,01	0,063	0,363	0,780	0,493	0,108	0,367	1,05	0,705	0,388	1,30
	K _A	0,521	0,446	0,647	0,506	0,605	0,686	0,685	0,352	0,066	0,653	0,901
2010–2019	K _E	0,022	0,337	0,809	2,02	0,289	1,23	0,422	0,541	0,343	0,454	1,06
	K _A	1,09	1,63	0,473	1,99	0,373	0,360	0,319	0,497	0,051	0,131	0,281
Средние арифметические значения ($\bar{Y}$) и дисперсии (S^2)												
2000–2009	$\bar{Y}_1$	+3,71	5,52	4,57	5,39	8,64	7,10	5,94	23,2	12,8	7,48	14,30
	S_1^2	0,341	1,77	0,741	2,51	3,10	2,94	2,09	10,9	6,55	1,55	1,24
2010–2019	$\bar{Y}_2$	+4,02	2,62	4,27	4,45	9,75	7,74	5,22	20,1	14,8	7,95	11,87
	S_2^2	0,631	0,872	0,475	0,584	3,83	3,35	0,394	7,69	2,11	0,502	0,444
Изменение $\bar{Y}$, %		8,16	–52,5	–6,56	–17,4	12,9	9,03	–12,1	–13,4	15,3	6,34	–21,3
Проверка различий дисперсий и средних значений по выборкам 2000–2009 и 2010–2019 гг.												
pF_3		0,374	0,307	0,517	0,041	0,758	0,849	0,021	0,611	0,106	0,108	0,014
pt_3		0,344	< 0,001	0,401	0,116	0,198	0,429	0,167	0,035	0,048	0,309	< 0,001

Примечание. pF_3 и pt_3 – уровни статистической значимости различий дисперсий и средних соответственно.

Note. pF_e and pt_e – levels of statistical significance of differences in variances and means, respectively.

Исходя из этих изменений, можно было предположить, что при загрязнении воздушной среды уменьшение количества штилей способствовало лучшему проветриванию города и, таким образом, более интенсивному выносу загрязняющих веществ за его пределы. В связи с этим могли появиться условия для

улучшения здоровья и снижения смертности населения. Тем не менее принятие гипотезы о причинно-следственной связи между параметром погоды (гПШ) и показателями смертности на данном этапе признано преждевременным из-за выявленной нестационарности соответствующих временных рядов.

Гетероскедастичность для СВ и Ю направлений ветра устранена путем логарифмирования представленных в табл. 1 исходных значений ($pF_3 = 0,265$; $pt_3 = 0,153$ и $pF_3 = 0,053$; $pt_3 = 0,224$ соответственно). Однородность данных для ЮЗ и З направлений ветра при логарифмировании не достигнута ($pF_3 = 0,912$; $pt_3 = 0,041$ и $pF_3 = 0,039$; $pt_3 = 0,049$ соответственно).

2. *Исследование нестационарных моделей.* Исходные данные позволили построить временные ряды за 20-летний период, в течение которого произошло

снижение смертности населения Петрозаводска (рис. 1). Величина общего коэффициента смертности была максимальной в 2003 г. и минимальной в 2019 г., а ее распределение не противоречило нормальному закону ($|K_E| = 0,255$; $|K_A| = 1,31$; $U_{\text{расч}} = 2,318$ при $U_{0,05} = 2,708$). Наибольший вклад в общую смертность внесли болезни системы кровообращения – от 56,8 % (2013 г.) до 45,1 % (2018 г.). Как и в случае ОКС, показатель КС_{БСК} последовательно снижался, а его распределение соответствовало нормальному закону ($|K_E| = 0,641$; $|K_A| = 0,367$; $U_{\text{расч}} = 1,886$).

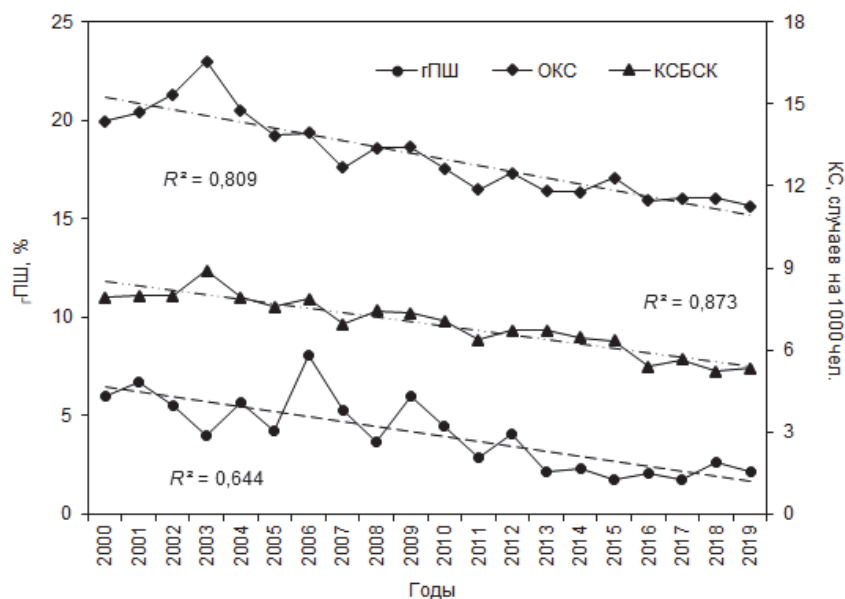


Рис. 1. Динамика годовой повторяемости штилей и коэффициента смертности населения Петрозаводска в период 2000–2019 гг.

Пунктирные линии – линейные модели, R^2 – коэффициенты детерминации

Fig. 1. The dynamics of the annual frequency of calm and the population mortality rate in Petrozavodsk in the period 2000-2019

Dotted lines – linear models, R^2 – coefficients of determination

Временной ряд нормально распределенных значений $r_{\text{ПШ}}$ ($|K_E| = 0,705$; $|K_A| = 0,801$; $U_{\text{расч}} = 1,927$) также визуальнo имел нисходящий тренд (см. рис. 1), что привело к статистически значимой корреляции с показателями смертности (см. выше).

Анализ временных рядов дополнен расчетом коэффициентов автокорреляции (табл. 2). Статистически значимые коэффициенты автокорреляции первого порядка подтвердили наличие линейных трендов. В связи с этим были построены и оценены линейные регрессионные модели с дальнейшим исключением тенденций из временных рядов методом отклонения от тренда.

Для временных рядов (период времени кодирован от 1 до 20) получены статистически значимые

($p_F < 0,001$) уравнения регрессии, в которых также подтверждена статистическая значимость коэффициентов регрессии ($p_t < 0,001$ и $p_F < 0,001$):

$$r_{\text{ПШ}}: y = -0,252x + 6,72 \quad (R^2 = 0,644). \quad (2)$$

$$\text{ОКС}: y = -0,228x + 15,47 \quad (R^2 = 0,809). \quad (3)$$

$$\text{КС}_{\text{БСК}}: y = -0,163x + 8,67 \quad (R^2 = 0,873). \quad (4)$$

3. *Анализ остатков.* На рис. 2 показаны графики регрессионных остатков, полученные путем исключения трендов из исходных временных рядов. Случайность остатков может быть подтверждена методом поворотных точек при выполнении условия [Воскобойников, 2008]:

$$n_p > \text{ent}[(0,667 \times (n - 2) - 1,96 \times ((16n - 29)/90)^{0,5})], \quad (5)$$

где $\text{ent}[\]$ – целая часть.

Для всех выборок

$$\text{ent}[0,667 \times (20 - 2) - 1,96 \times ((16 \times 20 - 29)/90)^{0,5}] = \\ = \text{ent}[8,476] = 8.$$

При этом, исходя из рис. 2, получено: для $\text{гПШ}_{\text{ост}}$ $n_p = 15$, для $\text{ОКС}_{\text{ост}}$ $n_p = 11$ и для $\text{КС}_{\text{БСКост}}$ $n_p = 12$. Та-

ким образом, все три ряда остатков считались случайными, из чего должно следовать, что построенные модели (2–4) не содержат систематических ошибок и адекватны соответствующим временным рядам.

Таблица 2

Коэффициенты автокорреляции уровней временных рядов и остатков регрессионных моделей

Table 2

Autocorrelation coefficients of time series levels and residuals of regression models

Коэффициенты автокорреляции	Временные ряды и ряды регрессионных остатков								$r_{0,95}$	n
	гПШ	lgгПШ	ОКС	lgОКС*	КС _{БСК}	lgгПШ _{ост}	lgОКС* _{ост}	КС _{БСКост}		
r_1	0,588	0,699	0,867	0,902	0,874	0,035	0,177	0,026	0,450	19
r_2	0,594	0,733	0,768	0,855	0,849	0,176	–0,127	–0,133	0,462	18
r_3	0,638	0,689	0,732	0,844	0,822	0,132	–0,075	–0,239	0,475	17
r_4	0,443	0,539	0,712	0,799	0,808	–0,286	–0,253	–0,235	0,490	16
r_5	0,495	0,500	0,776	0,804	0,852	–0,243	–0,260	0,161	0,506	15
$k(r^2; p)$	тренд	тренд	тренд	тренд	тренд	нет	$\begin{matrix} 3_{(0,214; 0,040)} \\ 6_{(0,219; 0,038)} \end{matrix}$	$4_{(0,224; 0,035)}$	–	–

Примечание. 1. r_1, r_2 и т.д. – коэффициенты автокорреляции первого, второго и т.д. порядков. 2. Обозначения с индексом «ост» соответствуют регрессионным остаткам. 3. * – для измененного ряда с устранением выброса (см. текст). 4. $r_{0,95} = |\pm 1,96/n^{0,5}|$ – модуль границ доверительного интервала, рассчитанный на основе критерия стандартной ошибки для проверки статистической значимости коэффициентов автокорреляции. 5. Полужирным выделены статистически значимые коэффициенты автокорреляции. 6. $k(r^2; p)$ – номера статистически значимых ($p < 0,05$) гармоник с указанием их вклада в дисперсию ряда.

Note. 1. r_1, r_2 , etc. – first, second, etc. order autocorrelation coefficients. 2. The designations with the index "ost" correspond to the regression residuals. 3. * – for modified series with outlier elimination (see text). 4. $r_{0,95} = |\pm 1,96/n^{0,5}|$ – the modulus of the boundaries of the confidence interval calculated on the basis of the standard error criterion to check the statistical significance of the autocorrelation coefficients. 5. Statistically significant autocorrelation coefficients are highlighted in bold. 6. $k(r^2; p)$ – numbers of statistically significant ($p < 0,05$) harmonics with an indication of contribution of the latter to the series variance.

Распределение значений $\text{гПШ}_{\text{ост}}$ не противоречило нормальному закону по коэффициентам эксцесса и асимметрии ($|K_E| = 1,838$; $|K_A| = 2,120$), но при этом имелся квазивыброс по критерию Граббса ($U_{\text{расч}} = 2,786$ при $U_{0,05} = 2,708$ и $U_{0,01} = 3,001$). Данное отклонение сглажено путем логарифмирования исходной модели ($|K_E| = 0,471$; $|K_A| = 1,001$; $U_{\text{расч}} = 2,083$):

$$\text{lgгПШ: } y = -0,030x + 0,875 \quad (R^2 = 0,702). \quad (6)$$

Для $\text{ОКС}_{\text{ост}}$ отмечено отклонение от нормального распределения из-за присутствия статистического выброса ($|K_E| = 3,292$; $|K_A| = 2,247$; $U_{\text{расч}} = 3,045$), для устранения которого значение ОКС за 2003 г. (см. табл. 1) заменено на величину, рассчитанную с помощью уравнения аппроксимирующего полинома шестого порядка:

$$\text{ОКС: } y = -3,5\text{E-}06x^6 + \\ + 0,00027x^5 - 0,0083x^4 + 0,129x^3 - 1,030x^2 + \\ + 3,476x + 11,55 \quad (R^2 = 0,907). \quad (7)$$

В результате расчета получено значение $Y_{2003}^* = 15,36 \%$ (вместо $16,55 \%$). Это преобразование устранило гетероскедастичность временного ряда ($pF_9 = 0,062$). В итоге для $\text{ОКС}^*_{\text{ост}}$ получили:

$|K_E| = 0,389$; $|K_A| = 0,206$; $U_{\text{расч}} = 1,897$, а уравнение регрессии приобрело вид

$$\text{ОКС}^*: y = -0,216x + 15,29 \quad (R^2 = 0,870). \quad (8)$$

Как показали расчеты, распределение значений $\text{КС}_{\text{БСКост}}$ не противоречило нормальному закону ($|K_E| = 0,104$; $|K_A| = 0,689$; $U_{\text{расч}} = 2,410$).

Оценка по критерию Дарбина–Уотсона показала отсутствие автокорреляции первого порядка для $\text{lgгПШ}_{\text{ост}}$ и $\text{КС}_{\text{БСКост}}$ ($D_{\text{расч}} = 1,935$ и $1,814$ соответственно при $D_U = 1,411$ и $4 - D_U = 2,589$), а для $\text{ОКС}^*_{\text{ост}}$ значение попало в зону неопределенности ($D_{\text{расч}} = 1,387$ при $D_L = 1,201$ и $D_U = 1,411$). Улучшение модели путем логарифмирования позволило исключить данную неопределенность (для $\text{lgОКС}^*_{\text{ост}}$ $D_{\text{расч}} = 1,547$). Коэффициенты автокорреляции остатков от первого до пятого порядка для всех представленных в табл. 2 показателей оказались статистически незначимыми.

4. Корреляционный анализ и скрытая периодичность. В табл. 3 прослежена статистическая связь между отклонениями от трендов показателей смертности и нормально распределенными ($|K_E| = 0,006$ – $0,782$; $|K_A| = 0,031$ – $1,138$; $U_{\text{расч}} = 1,805$ – $2,418$) погодно-кли-

матическими параметрами, не содержащими линейных тенденций в моделях (в том числе логарифмированных) рядов фактических величин (температура воздуха, повторяемость направлений ветра) или регрессионных остатков (повторяемость штилей).

С помощью формулы (1) для большинства временных рядов значений повторяемостей направлений ветра выявлены скрытые периодичности, выраженные статистически значимыми гармониками разных порядков (см. табл. 3).

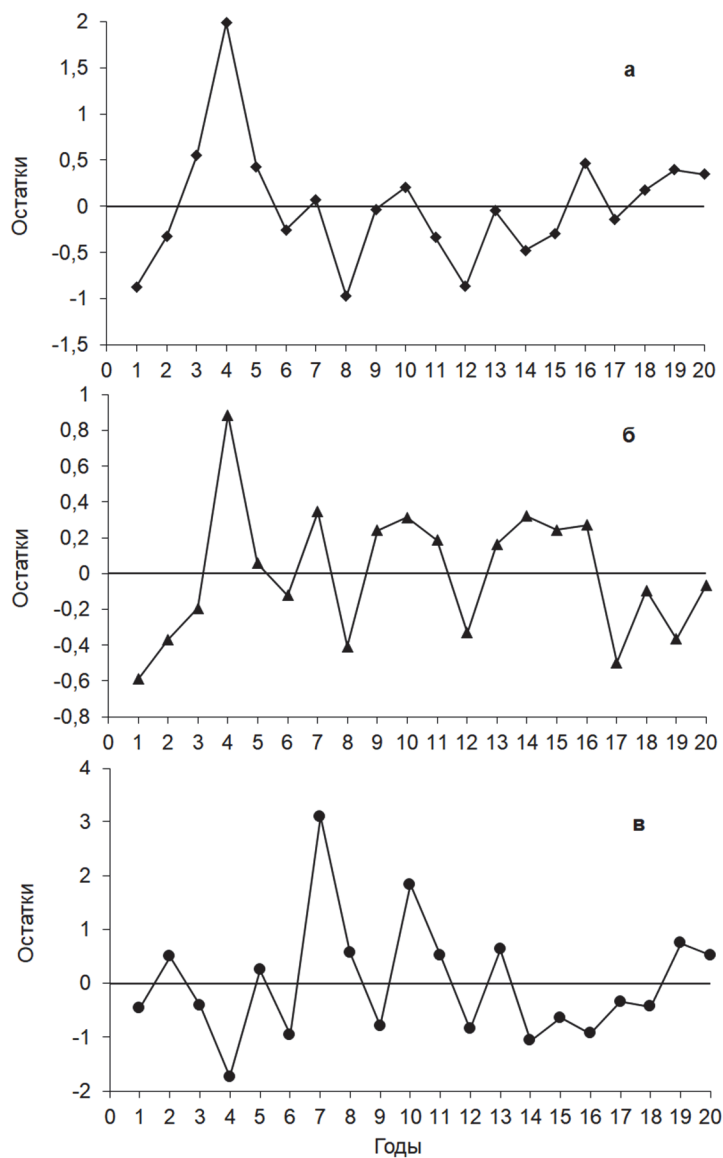


Рис. 2. Остатки значений коэффициентов смертности общей (а), от болезней системы кровообращения (б) и годовой повторяемости штилей (с)

Fig. 2. The residuals of the values of total mortality (a), mortality from circulatory system diseases (b) coefficients and annual recurrence of calms (c)

Согласно табл. 3, установлена умеренная ($0,3 < |r| < 0,5$ по шкале Чеддока) статистически значимая отрицательная корреляционная связь между значениями повторяемости восточного направления ветра (В) и $\lg \text{ОКС}^*_{\text{ост}}$, а также умеренная статистически значимая положительная корреляционная связь между повторяемостью СЗ направления ветра и $\text{КС}_{\text{БСКост}}$. При исключении из рядов значимых гармоник

корреляция для пары $\text{В}_{(1,5)} - \lg \text{ОКС}^*_{\text{ост}(3,6)}$ становится статистически незначимой, а для пары $\text{СЗ}_{(3)} - \text{КС}_{\text{БСКост}(4)}$ — сохраняется (см. табл. 3). В двадцатилетних рядах при устранении систематических колебаний путем взятия первых разностей корреляционная связь между изменениями параметров погоды и показателей смертности во всех случаях, кроме пары $\Delta \text{Ю}^1 - \Delta \text{КС}_{\text{БСК}}^1$, определена как статистически незначимая (см. табл. 3).

Дополнительный раздельный регрессионный анализ десятилетних стационарных ($pF_3 = 0,077-0,834$; $pt_3 = 0,229-0,559$) рядов показал различия в корреляционных соотношениях между парами СЗ – ОК_{Сост} для периодов 2000–2009 гг. и 2010–2019 гг. ($r = 0,839$; $p = 0,002$ и $r = -0,303$; $p = 0,395$ соответственно). Для периода 2010–2019 гг. ($pF_3 = 0,206-0,980$; $pt_3 = 0,229-0,679$) для пары СЗ – КС_{БСКост} статистически значимой корреляционной связи также не зафиксировано ($r = -0,229$; $p = 0,524$), однако выявлены статистически значимые отрицательные корреляции для пар Ю – КС_{БСКост} ($r = -0,683$; $p = 0,029$) и lgCB – ОК_{Сост} ($r = -0,847$; $p = 0,002$). Для периода 2000–2009 гг. ряд значений КС_{БСК}, не являясь стационарным ($pF_3 = 0,640$; $pt_3 = 0,021$), тем не менее не обнаружил

наличие трендовой составляющей (для уравнения регрессии $pF = 0,058$).

5. Среднемесячная температура воздуха, месячная повторяемость штилей, направлений ветра и общий коэффициент смертности. Возможное влияние температуры воздуха и ветровых условий на показатели смертности населения по месячным данным изучено за период 2013–2017 гг. Данное пятилетие характеризовалось повышенной относительно предыдущих лет среднегодовой температурой воздуха и самыми низкими значениями повторяемости штилей (см. табл. 1, рис. 1). На рис. 3 представлены усредненные за пять лет значения и разбросы среднемесячной температуры воздуха, месячной повторяемости штилей (МПШ) и направлений ветра в Петрозаводске.

Таблица 3

Оценка однородности выборок и коэффициенты линейной корреляции для среднегодовых значений температуры атмосферного воздуха, повторяемости штилей и направлений ветра и показателей смертности за период 2000–2019 гг.

Table 3

Testing of sample uniformity and linear correlation coefficients for the average annual values of ambient air temperature, frequency of calm and wind directions and the mortality rates for the period 2000–2019

Показатель	T	lgPШ _{ост}	C	lgCB	B	ЮВ	lgЮ	lgЮЗ	З	СЗ
Проверка различий дисперсий и средних значений по выборкам 2000–2009 и 2010–2019 гг.										
pF_3	0,374	0,645	0,517	0,265	0,758	0,849	0,053	0,912	0,106	0,108
pt_3	0,344	0,485	0,401	0,153	0,198	0,429	0,224	0,041	0,048	0,309
Коэффициенты автокорреляции										
r_1	0,066	0,035	–0,001	–0,085	0,262	0,061	–0,170	0,379	0,043	0,342
r_2	0,053	0,176	0,253	–0,218	–0,036	–0,468	–0,372	0,025	–0,035	–0,495
r_3	–0,050	0,132	0,007	0,289	0,001	–0,210	0,213	–0,167	0,470	–0,479
r_4	–0,156	–0,286	0,284	–0,181	0,160	–0,197	0,089	–0,339	0,097	–0,246
r_5	–0,132	–0,243	–0,322	0,117	–0,163	0,229	–0,087	–0,074	–0,111	–0,105
Статистически значимые гармоники										
$k(R^2; p)$	нет	нет	10(0,335; 0,008)	7(0,322; 0,009)	1(0,277; 0,017) 5(0,222; 0,036)	3(0,353; 0,006) 5(0,275; 0,018)	6(0,228; 0,033)	1(0,245; 0,026) 3(0,403; 0,003)	нет	3(0,468; 0,001)
Коэффициенты линейной корреляции (r) и их уровни значимости (p)										
lgОК _{Сост} *	r	–0,269	0,039	–0,109	0,240	–0,446	–0,099	0,040	0,051	0,293
	p	0,252	0,869	0,647	0,307	0,049	0,677	0,866	0,831	0,210
lgОК _{Сост} * (3,6)	r	–0,133	0,024	0,214(10)	0,233(7)	–0,217(1,5)	–0,060(3,5)	–0,155(6)	0,308(1,3)	0,376
	p	0,577	0,920	0,365	0,323	0,359	0,801	0,513	0,187	0,103
КС _{БСКост}	r	–0,160	–0,049	–0,077	0,278	–0,033	–0,237	–0,231	–0,160	0,306
	p	0,501	0,837	0,746	0,235	0,890	0,313	0,326	0,499	0,189
КС _{БСКост} (4)	r	–0,290	–0,024	–0,107(10)	0,251(7)	–0,145(1,5)	–0,157(3,5)	–0,272(6)	0,033(1,3)	0,192
	p	0,216	0,919	0,652	0,287	0,541	0,508	0,246	0,891	0,418
Оценка тесноты корреляционной связи по первым разностям										
Показатели	ΔT^1	$\Delta \text{lgPШ}^1$	ΔC^1	ΔlgCB^1	ΔB^1	$\Delta \text{ЮВ}^1$	$\Delta \text{Ю}^1$	$\Delta \text{ЮЗ}^1$	ΔZ^1	$\Delta \text{СЗ}^1$
$\Delta \text{ОК}^1$	r	–0,246	0,082	–0,054	0,182	–0,195	–0,098	–0,228	–0,146	0,277
	p	0,310	0,740	0,827	0,456	0,423	0,689	0,348	0,550	0,251
$\Delta \text{КС}^1$	r	–0,204	0,045	0,057	0,088	–0,019	–0,209	–0,444	–0,121	0,398
	p	0,388	0,850	0,811	0,711	0,935	0,378	0,050	0,612	0,082

Примечание. 1. Критические значения коэффициентов автокорреляции $r_{0,95}$ приведены в табл. 2. 2. Для полученных моделей первых разностей: $pF_3 = 0,051-0,990$; $pt_3 = 0,340-0,979$; $n = 19$.

Note. 1. The critical values of the autocorrelation coefficients $r_{0,95}$ are given in Table 2. 2. For the resulting first-differences models: $pF_3 = 0,051-0,990$; $pt_3 = 0,340-0,979$; $n = 19$.

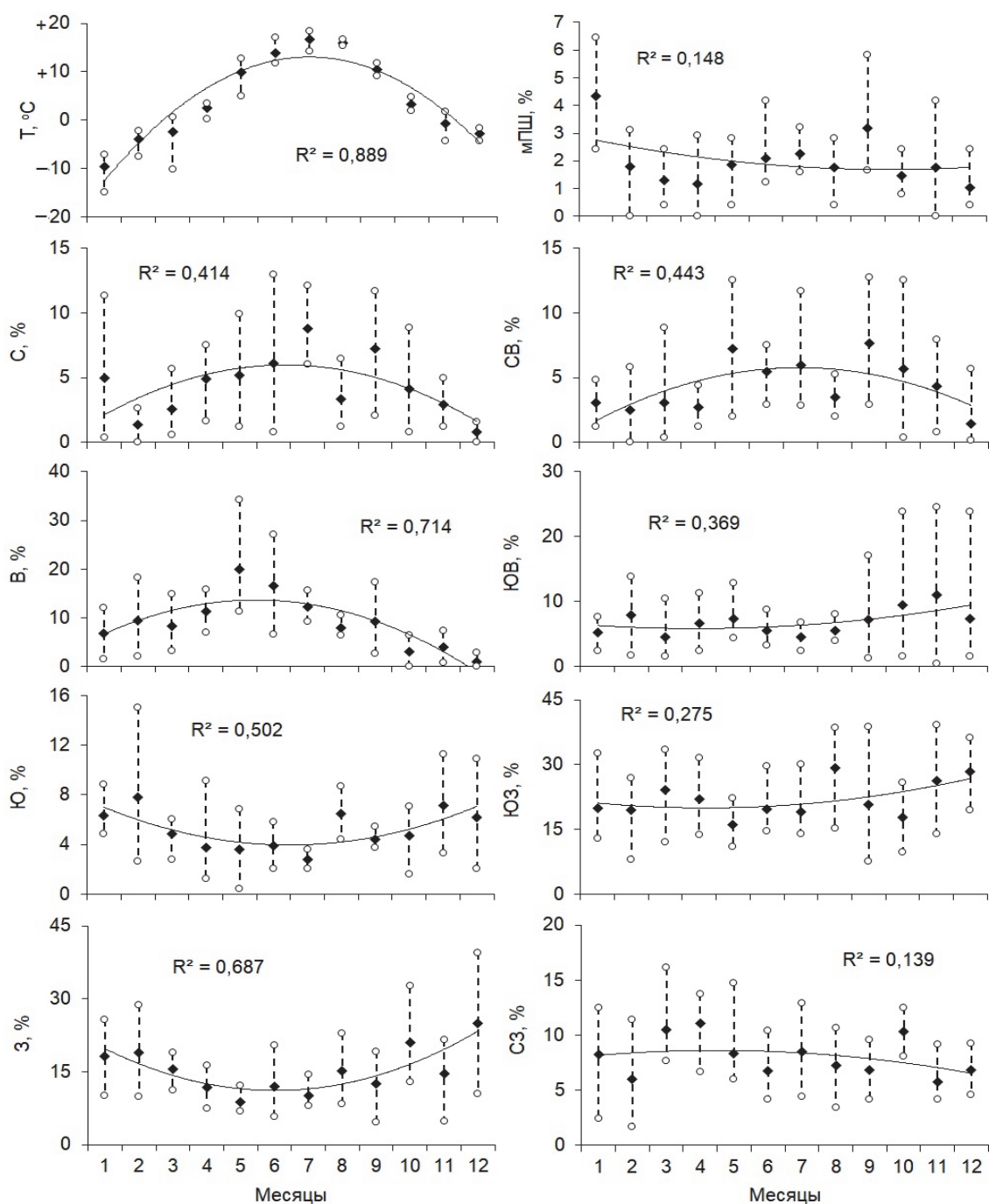


Рис. 3. Средние арифметические значения (черные значки) и диапазоны изменений (светлые значки) температуры воздуха, повторяемости штилей и направлений ветра за 2013–2017 гг.

Линии на графиках – полиномы второй степени

Fig. 3. Arithmetic averages (black rhombuses) and ranges of variation (light circles) of air temperature, the frequency of calm and wind directions for 2013–2017

The lines on the graphs – second degree polynomials

Изменение температуры в целом соответствовало сезонным колебаниям, значительное отклонение отмечалось в 2013 г. (самый холодный март со средне-месячной температурой $-10,2^{\circ}\text{C}$ из-за влияния мощных блокирующих антициклонов – гренландского и

арктического). Безветренная погода чаще, чем в другие месяцы, наблюдалась в январе 2016 г. (6,45 %), сентябре 2013 г. (5,83 %) и январе 2014 г. (5,24 %). В среднем за пятилетие больше всего штилей зафиксировано в январе ($\bar{Y}=4,35\%$; $S=1,546$) и сентябре

($\bar{Y}=3,17\%$; $S=1,630$), меньше всего – в декабре ($\bar{Y}=1,05\%$; $S=0,928$).

Ветры С, СВ и В направлений чаще всего отмечались в теплое время (с мая по сентябрь, исключая август, в котором увеличивалась повторяемость ветров ЮЗ и Ю направлений), Ю и З – в наиболее холодные месяцы (см. рис. 3). Повторяемость ЮВ ветра значительно возрастала в сентябре 2013 г. (17,1 %), октябре 2017 г. (23,8 %), ноябре 2015 г. (24,6 %) и декабре 2017 г. (23,8 %), относительное увеличение также отмечалось в феврале (до 13,8 % в 2016 г.) и мае (до 12,9 % в 2013 г.). Преобладающий в районе исследований ветер ЮЗ направления чаще отмечался в марте–апреле, августе и ноябре–декабре, СЗ – в марте–апреле и октябре.

Наибольшей среднепятилетней смертностью отличался январь с максимумами в 2016 и 2017 гг., наименьшей – июнь и июль (табл. 4). Вместе с тем более низкие значения зафиксированы в декабре и с февраля по май 2016 г., а также в июле и с октября по декабрь 2017 г., что повлияло на снижение общей смертности в 2016–2017 гг.

Сезонный анализ усредненных (сглаженных) за пять лет помесечных значений показал наличие как явной, так и скрытой периодичности изученных временных рядов (табл. 5). Так, очевидными сезонными изменениями характеризовалась не только температура воздуха, но и повторяемость восточного направления ветра. Для обоих параметров это подтверждено как наиболее адекватной среди представленных на рис. 4 моделей полиномиальной аппроксимацией, так и высокими значениями коэффициента автокорреляции первого порядка и значительным вкладом первой гармоники в общую дисперсию рядов Фурье (см. табл. 5). Статистически значимые первые гармоники, но с меньшим вкладом в общую дисперсию, также определены в рядах Фурье для повторяемостей северного и северо-восточного (на рис. 4 выпуклые графики), южного и западного (вогнутые графики) направлений ветра.

Исходя из данных табл. 5, для юго-восточного направления статистически значимыми оказались первая и вторая гармоники, для юго-западного –

только третья, для северо-западного – четвертая, для штилей и общего коэффициента смертности – шестая. Полученные соотношения дали основание для проверки наличия соответствующих корреляционных зависимостей.

В результате проведения линейного корреляционного анализа между температурой (основной сезонный фактор) и повторяемостями направлений ветра, имевшими статистически значимые первые гармоники в соответствующих рядах Фурье, установлена статистически значимая положительная (северное и северо-восточное направления) и отрицательная (южное и западное) корреляционная связь. Коэффициент корреляции между температурой и повторяемостью восточного направления ветра оказался относительно пониженным (статистически незначимым) из-за смещения пиковых значений друг относительно друга на период, равный двум месяцам (см. рис. 3). Наибольшее отклонение от «сезонности» (незначимая статистическая связь с температурой воздуха) отмечено для штилей, повторяемости северо-западного, юго-западного и юго-восточного направлений ветра.

Колебания общей смертности на изученной территории и за изученный пятилетний период положительно статистически значимо коррелировали с колебаниями повторяемости безветренной погоды. В то же время корреляционная связь между значениями температуры и ОКСгв оказалась статистически незначимой (см. табл. 5). Последнее обстоятельство объясняется незначимостью первой гармоники в ряду показателя смертности ($R^2 = 0,194$; $p = 0,152$). Удаление (вычитание) первой гармоники из данного временного ряда привело к более сильной корреляции между показателями безветренной погоды и оставшимися после вычитания значениями показателя смертности (80,6 % дисперсии исходного ряда). Тем не менее из отдельных гармоник, слагающих ряд Фурье для показателя общей смертности, с повторяемостью штилей (1gmIII) статистически значимо не коррелировала ни одна, при этом максимальные значения коэффициентов корреляции определены для третьей и шестой гармоник ($r = 0,486$; $p = 0,125$ и $r = 0,518$; $p = 0,084$ соответственно).

Таблица 4

Общая смертность населения Петрозаводска за период 2013–2017 гг.

Table 4

Total mortality of the population of Petrozavodsk for the period 2013–2017

Месяц	ОКСгв, случаев на 1 000 человек населения					Среднее значение
	2013	2014	2015	2016	2017	
Январь	12,63	12,22	12,24	13,51	13,44	12,81
Февраль	12,15	11,20	12,84	10,90	11,94	11,81
Март	12,06	10,93	13,26	11,01	12,64	11,98
Апрель	11,97	11,78	12,12	11,11	11,06	11,61
Май	11,85	12,05	13,22	10,62	11,76	11,90

Месяц	ОКС _{ГВ} , случаев на 1 000 человек населения					
	2013	2014	2015	2016	2017	Среднее значение
Июнь	12,11	11,12	10,75	10,80	11,71	11,30
Июль	11,11	11,96	11,38	11,60	10,49	11,31
Август	10,50	12,00	11,90	11,98	11,76	11,63
Сентябрь	12,96	11,69	12,47	12,25	11,67	12,21
Октябрь	11,58	11,88	12,36	11,43	10,57	11,57
Ноябрь	10,62	11,65	12,82	12,12	11,06	11,65
Декабрь	12,24	12,65	12,28	10,20	10,53	11,58
Год	11,81	11,76	12,30	11,46	11,55	11,78

Примечание. ОКС_{ГВ} – общий коэффициент смертности с учетом коэффициента годового выражения.

Note. TMRat – total mortality rate, taking into account the coefficient of annual terms.

Таблица 5

Результаты статистического анализа временных рядов для усредненных месячных значений приземной температуры атмосферного воздуха (T , °C), повторяемости штилей и направлений ветра (%), общего коэффициента смертности в годовом выражении (ОКС_{ГВ}, %) за период 2013–2017 гг.

Table 5

The results of statistical analysis of the time series for the monthly averaged values of ambient air temperature (T_{air} , °C), frequency of calm and wind directions (%), total mortality rate in annual terms (TMRat, %) over the period 2013–2017

Показатель	T	МПШ	lgМПШ	C	CB	B	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	ОКС _{ГВ}	lg ОКС _{ГВ}
$\bar{Y}$	+4,40	2,00	0,265	4,36	4,37	9,16	6,87	5,17	21,86	15,30	8,04	11,78	1,071
S	8,745	0,933	0,176	2,334	1,991	5,440	1,967	1,585	4,259	4,766	1,800	0,416	0,015
$ K_E $	0,927	2,208	0,458	0,175	0,745	0,114	0,263	0,825	0,483	0,049	0,673	1,859	1,648
$ K_A $	0,092	2,418	1,100	0,436	0,455	0,749	1,171	0,322	0,940	0,949	0,781	2,010	1,875
$U_{расч}$	1,612	2,527	2,124	1,899	1,654	1,978	2,118	1,667	1,750	2,035	1,714	2,475	2,435
pF_3	0,910	0,335	0,650	0,303	0,785	0,698	0,203	0,914	0,199	0,487	0,641	0,263	0,284
pt_3	0,306	0,755	0,848	0,812	0,548	0,058	0,262	0,809	0,167	0,456	0,403	0,337	0,339
r_1	0,837	–0,005	0,080	0,186	0,182	0,678	0,368	0,271	0,038	0,233	–0,072	0,112	0,117
r_2	0,391	–0,110	–0,063	0,154	0,049	0,338	0,073	–0,087	–0,466	0,536	–0,367	0,154	0,145
r_3	–0,264	–0,589	–0,695	–0,249	–0,439	–0,152	–0,287	–0,059	0,051	–0,500	0,168	–0,290	–0,293
$k(r^2; p)$	1(0,970; < 0,001)	6(0,402; 0,027)	6(0,421; 0,022)	1(0,439; 0,019)	1(0,414; 0,024)	1(0,782; < 0,001)	1(0,347; 0,044) 2(0,359; 0,039)	1(0,534; 0,007)	3(0,550; 0,006)	1(0,556; 0,005)	4(0,430; 0,021)	6(0,395; 0,029)	6(0,395; 0,029)
T	r	1	–0,094	0,068	0,633	0,634	0,535	–0,265	–0,592	–0,101	–0,631	–0,069	–0,558
	p	–	0,771	0,833	0,027	0,027	0,073	0,406	0,043	0,754	0,028	0,831	0,059
ОКС _{ГВ}	r	–0,558	0,729	0,617	–0,039	–0,048	–0,120	–0,116	0,296	–0,134	0,126	0,027	1
	p	0,060	0,007	0,032	0,904	0,883	0,711	0,719	0,350	0,677	0,696	0,933	–
ОКС _{ГВ1}	r	–0,984	0,028	–0,126	–0,715	–0,680	–0,589	0,303	0,673	0,193	0,699	–0,050	0,492
	p	< 0,001	0,931	0,696	0,009	0,015	0,044	0,338	0,016	0,548	0,011	0,879	0,105
ОКС _{ГВ(1)}	r	–0,085	0,821	0,780	0,359	0,329	0,196	–0,305	–0,040	–0,263	–0,250	0,059	0,871
	p	0,794	0,001	0,003	0,252	0,296	0,543	0,335	0,901	0,408	0,433	0,855	< 0,001

Примечание. 1. $U_{расч}$ – критерий Граббса ($U_{0,05} = 2,412$ при $n = 12$ и $p = 0,05$; $U_{0,01} = 2,636$ при $n = 12$ и $p = 0,10$). 2. Критические значения коэффициентов автокорреляции находятся в пределах от 0,591 (r_1) до 0,653 (r_3) при $p = 0,05$. 3. Коэффициенты корреляции: ОКС_{ГВ1} – для первой гармоники ряда Фурье, ОКС_{ГВ(1)} – после вычитания первой гармоники из исходного временного ряда.

Note. 1. U_{calc} – Grubbs criterion ($U_{0,05} = 2.412$ at $n = 12$ and $p = 0.05$; $U_{0,01} = 2.636$ at $n = 12$ and $p = 0.10$). 2. The critical values of the autocorrelation coefficients are in the range from 0.591 (r_1) to 0.653 (r_3) at $p = 0.05$. 3. The correlation coefficients: TMRat₁ – for the first harmonic of the Fourier series, TMRat₍₁₎ – after removing the first harmonic from the original time series.

Таким образом, на основе проанализированных данных можно заключить, что в помесечном пятилетнем ходе на общую смертность населения Петрозаводска влияние в разной степени оказывали преимущественно два фактора – сезонный (температурный), в той или иной степени включающий повторяемости направлений ветра, преобладавшие в разные периоды года (С, СВ, В – в теплый, Ю и З – в холодный), и фактор безветренной погоды, который не зависел от сезонности.

6. *Посезонный анализ.* С целью нивелирования влияния сезонного фактора при проведении линейного корреляционного анализа среднемесячные значения изучаемых показателей объединялись в выборки по временам года (четыре выборки по 15 значений за 2013–2017 гг.). Для всех выборок принята гипотеза о нормальном распределении данных ($|K_E| = 0,017\text{--}2,421$; $|K_A| = 0,240\text{--}2,385$) за исключением выборок повторяемостей северного ($|K_E| = 4,306$; $|K_A| = 3,332$; $U_{\text{расч}} = 2,999$ при $U_{0,01} = 2,806$) и юго-восточного ($|K_E| = 3,467$; $|K_A| = 3,111$; $U_{\text{расч}} = 2,891$) направлений ветра в зимний период. В последних случаях распределение приведено к нормальному путем логарифмирования ($|K_E| = 0,152$; $|K_A| = 1,055$; $U_{\text{расч}} = 1,988$ при $U_{0,05} = 2,549$ и $|K_E| = 0,185$; $|K_A| = 0,478$; $U_{\text{расч}} = 2,011$ соответственно).

Анализ показал, что в случае зимнего времени для ОКСгв имеется статистически значимая отрицательная корреляционная связь с температурой воздуха ($r = -0,547$; $p = 0,035$), однако эта зависимость определялась значениями только одного самого холодного за пятилетие месяца ($-14,9^\circ\text{C}$), в котором смертность, как уже показано выше (см. табл. 4), была максимальной (январь 2016 г.). Между температурой воздуха и повторяемостью штилей выявлена сильная отрицательная корреляционная связь ($r = -0,851$; $p < 0,001$) при незначимой корреляции между этим же ветровым параметром и ОКСгв ($r = 0,425$; $p = 0,114$). Последняя зависимость оказалась статистически значимой после исключения из расчетов данных по месяцам с фактическим отсутствием безветренной погоды (повторяемость штилей $\leq 0,40\%$) ($r = 0,683$; $p = 0,020$; $n = 11$), при этом отрицательная связь в паре температура – мПШ осталась на высоком уровне значимости ($r = -0,907$; $p < 0,001$), а в паре температура – ОКСгв она заметно усилилась ($r = -0,753$; $p = 0,007$).

Осенний период характеризовался положительной корреляцией между ОКСгв и повторяемостью северного направления ветра ($r = 0,678$; $p = 0,006$), а также повторяемостью штилей ($r = 0,598$; $p = 0,018$). Суммарные значения этих двух ветровых параметров коррелировали с показателем смертности сильнее

($r = 0,743$; $p = 0,001$). Исключение из расчетов данных за 2015 г. (следующий год за максимумом 24-го солнечного цикла) с повышенной, в том числе осенней, смертностью (см. табл. 4) позволило получить более тесные корреляционные связи ($r = 0,838$; $p = 0,001$; $r = 0,826$; $p = 0,001$; $r = 0,909$; $p < 0,001$ соответственно). Статистически значимого влияния осенней температуры на смертность населения не обнаружено ($r = 0,261$; $p = 0,347$; без данных 2015 г.: $r = 0,334$; $p = 0,289$).

Для весеннего и летнего периодов статистически значимых корреляционных зависимостей между ОКСгв и параметрами погоды не отмечено ($p = 0,138\text{--}0,938$ и $p = 0,240\text{--}0,935$ соответственно).

Обсуждение

Комплекс математико-статистических методов позволяет на основе данных за определенный период времени выявлять приоритетные погодные факторы, которые влияют или могут влиять на здоровье и смертность городского населения. В случае наличия периодических колебаний и, соответственно, сомнений при принятии гипотез о причинно-следственных связях из-за вероятного влияния неизвестного периодического «третьего фактора», параметры погоды, в том числе повторяемость направлений ветра, могут, тем не менее, рассматриваться в числе индикаторов благоприятных или неблагоприятных условий для здоровья.

Корреляционная зависимость между нестационарными временными рядами не служит доказательством причинно-следственных связей между ними, если только уровни одного ряда не являются частью сопоставимых по времени уровней другого ряда. В нашем случае это временные ряды коэффициента смертности от болезней системы кровообращения и общего коэффициента смертности соответственно. Тем не менее, как показали исследования, корреляционные отношения названных показателей с погодными факторами различаются, что обусловлено наличием в структуре смертности других причин смерти.

В многолетнем ходе 2000–2019 гг. без учета линейных трендов снижение общей смертности городского населения Петрозаводска статистически связывается с увеличением повторяемости восточного направления ветра, а ее повышение от болезней системы кровообращения – с ростом повторяемости северо-западного направления. Данные соотношения в полном изученном периоде проявлены достаточно слабо (умеренная теснота связи по шкале Чеддока), поскольку не являются постоянными на всем его протяжении. Так, имеются различия в соотношениях повторяемости северо-западного направления ветра и

общей смертности для десятилетних интервалов полного периода: 2000–2009 гг. ($r = 0,839$; $p = 0,002$) и 2010–2019 гг. ($r = -0,303$; $p = 0,395$). В последнем десятилетии колебания смертности от болезней системы кровообращения в определенной степени связаны с ветром южного направления (со стороны лесных массивов), а от всех причин – северо-восточного (со стороны Петрозаводской губы Онежского озера).

Северо-западное направление ветра характеризуется как неблагоприятное для большей части населения Петрозаводска в связи с нахождением в северо-западной части урбанизированной территории ряда более мощных, чем в других районах города, источников загрязнения (литейный завод, производство металлических изделий и ядерных установок, Петрозаводская ТЭЦ, стационарные объекты РАО «РЖД», крупное производство OSB-плит). Отметим, что влияние загрязнения на городскую среду и жителей города от стационарных источников уменьшилось в связи с сокращением общей массы выбросов до 2,6–3,5 тыс. т вредных веществ в 2013–2017 гг., или с 2000 г. в среднем в 3,7 раза [Государственный доклад..., 2018; Рыбаков, Белашев, 2020].

В соответствии с характеристикой климата по сезонам года [Атлас..., 1989], ветер северо-западного направления наиболее характерен для холодных и малоснежных зим, повторяющихся, по данным начиная с 1962–1963 гг., каждые 6 лет. В связи с этим выявленную статистическую связь со смертностью от болезней системы кровообращения можно было бы связать с температурным фактором. Между тем для среднегодовых значений относительно короткого временного ряда такой зависимости не установлено, что не исключает необходимости более тщательного анализа вклада многолетней цикличности в динамику заболеваемости и смертности на фоне трендовых изменений и случайных отклонений.

Совместные многолетние колебания повторяемости направлений ветра и показателей смертности на отдельных отрезках времени объясняются изменчивостью влияющей на регион циклонической деятельности. В свою очередь, изменчивость состояния нижней атмосферы связывается с влиянием на нее солнечной активности [Артамонова, Веретененко, 2015; Веретененко, 2017].

С некоторыми максимумами солнечной активности может связываться повышение уровней смертности. Так, в изученном двадцатилетнем периоде максимальная смертность приходится на 2003 г., а на 2000–2002 гг., как следует из сравнения характеристик 23-го и 24-го солнечных циклов [Базилевская и др., 2021], выпадает наибольшая солнечная активность. Таким образом, глобальные последствия изменений на Солнце могут выступать как «третий фактор», влияющий как на ветровой режим, так и на

смертность населения в исследуемой местности. Эти соотношения необходимо рассматривать с использованием более длинных временных рядов.

Известно, что безветренная погода способствует накоплению в воздухе выброшенных как стационарными, так и передвижными источниками вредных веществ, которые создают серьезные проблемы для здоровья людей и приводят к дополнительным случаям смерти [Wichmann et al., 1989; Bell et al., 2004; Ревич, 2007; Сокольская, 2012; Томских, 2021; Dąbrowiecki et al., 2022]. Для изученного двадцатилетнего периода статистическая зависимость между рядами регрессионных остатков среднегодовых значений повторяемости штилей и показателей смертности населения отсутствует, а ее наличие между исходными временными рядами объясняется нестационарностью последних. Однако для помесечно усредненных за пятилетие рядов внутригодовой динамики такая связь статистически значимо выражена, при этом она не имеет строгого сезонного характера.

Значимость влияния сезонного (температурного) фактора на общую смертность городского населения в усредненном годовом ходе снижается из-за маскировки другими причинами, не связанными с сезонностью. При этом «волн жары», которые могли бы приводить к дополнительной смертности в теплый сезон, на данном этапе не выявлено. Следует отметить, что исследования по влиянию погодных факторов на частоту вызовов скорой медицинской помощи к пациентам с сердечно-сосудистыми заболеваниями в Петрозаводске показали, что к сезонным не относятся обострения таких опасных заболеваний, как острый инфаркт миокарда и инсульт, статистически значимо ($p < 0,05$) связанные с повторяемостью северо-западного направления ветра [Рыбаков, Белашев, 2020]. Вместе с тем изучение сезонной заболеваемости и смертности требует своего продолжения, в том числе для отдельных заболеваний (сердечно-сосудистых, органов дыхания и т. д.) с учетом решения проблемы загрязненного воздуха [Смирнова и др., 2012].

Изучение взаимоотношений между показателем общей смертности и погодными факторами по временам года (нивелирование фактора сезонности) также может дать полезную информацию. Так, для зимнего периода смертность повышается при более частой холодной безветренной погоде, формирующейся под влиянием антициклонов. Это согласуется с влиянием на погоду (понижение температурного фона) особенностей циклонической деятельности в Северном полушарии [Бережная и др., 2016].

Для осеннего времени индикаторами неблагоприятных условий являются северное направление ветра и безветренная погода, при увеличении повторяемости которых уровень общей смертности также увеличивается.

В то же время статистической зависимости последнего показателя от температуры воздуха не наблюдается. Это связано, вероятно, с сочетанием разной в разные годы и месяцы антициклонической активности (с проникновением в регион холодного арктического воздуха) и наличием более теплого, чем над сушей, воздуха над акваторией Онежского озера (бризовая и муссонная циркуляции). При этом в случае образования инверсионного слоя возрастает потенциал загрязнения атмосферы. Особенности названных физически наблюдаемых в данной местности процессов и их влияние на здоровье населения требуют дополнительного изучения.

Заключение

Анализ временных рядов среднемесячных данных за 2000–2019 гг. выявил нисходящие тренды коэффициентов смертности городского населения Петрозаводска (общей и от болезней системы кровообращения). Снижение смертности совпало с трендовым уменьшением повторяемости безветренной погоды и не зависело от температуры приземного воздуха и повторяемости различных направлений ветра.

Устранение линейных тенденций из временных рядов методом отклонения от тренда показало отсутствие зависимости между регрессионными остатками линейных моделей показателей смертности и повторяемости безветренной погоды. При этом выявленные умеренные по тесноте корреляционные связи повторяемостей восточного и северо-западного направлений ветра и остатков регрессионных моделей показателей смертности не дают полной картины отношений «причина–следствие» из-за действия других («третьих») факторов. В частности, перспективными является исследование более длинных, по сравнению с изученными, временных рядов в связи с влиянием на показатели смертности солнечной активности, а также влияния на эти показатели загрязнения атмосферного воздуха. При исследовании второй половины двадцатилетнего периода (2010–2019 гг.) в годовом ходе обнаружена отрицательная корреляция между стационарными рядами отклонений от тренда показателя смертности от болезней системы кровообращения и повторяемостью южного направления ветра ($p = 0,029$), а от всех причин смерти – северо-

восточного направления ($p = 0,002$). Отличием первой половины полного периода (2000–2009 гг.) является положительная корреляция между стационарными рядами отклонений от тренда показателя общей смертности и повторяемостью северо-западного направления ветра ($p = 0,002$). Таким образом, к благоприятным относятся северо-восточное и восточное (со стороны Онежского озера) и южное (со стороны пригородных лесов) направления ветра, к неблагоприятным для большинства городского населения – северо-западное. Однако за наблюдаемый двадцатилетний период опасность негативного воздействия загрязнения на городскую среду, в том числе по данному направлению, снизилась в результате значительного сокращения выбросов от стационарных источников.

В усредненном за 2013–2017 гг. годовом ходе среднемесячных значений выявлена статистически значимая зависимость уровней общей смертности городского населения от не относящейся к сезонным факторам повторяемости безветренной погоды.

В зимнее время при фактическом отсутствии штиля, а именно при его регистрации не более одного срочного наблюдения, отмечается широкий разброс показателя смертности ОКСгв (10,20–12,84 случаев на 1 000 человек), в то время как при исключении из расчетов таких данных наблюдается очевидная связь последнего с фактором холодной ($p = 0,007$) и безветренной ($p = 0,020$) погоды.

В осенний период температурный фактор не проявляет себя из-за сложного характера взаимодействия циклонической деятельности и накопившего за летний период и отдающего тепло Онежского озера, на берегу которого располагается Петрозаводск. В этот сезон штилевой фактор по отношению к общей смертности выражен в большей степени ($p = 0,018$), чем зимой, при этом в значительной мере его дополняет повторяемость северного направления ветра ($p = 0,006$).

Весной и летом изученные внутрисезонные факторы погоды на колебания показателя смертности в пятилетнем ходе не оказывают.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при планировании геоэкологических и медико-экологических исследований, а также учтены в градостроительной деятельности.

Список источников

- Азизов В.А., Хатамзаде Э.М., Рагимова А.С., Алекперова А.К., Садыгова Т.А., Мамедзаде А.Я. Зависимость риска смертности вследствие болезней системы кровообращения от метеорологических факторов в городе Баку и городе Губа // Евразийский кардиологический журнал. 2018. № 2. С. 16–21.
- Альтшуллер Н.В., Гершензон Т.Е., Басов М.Н. и др. Медико-географический справочник Карельской АССР / под ред. А.А. Келлера. Петрозаводск, 1990. 196 с.
- Андреева Г.Ф., Горбунов В.М. Основные закономерности общей сезонной смертности и факторы, оказывающие воздействие на нее // Профилактическая медицина. 2019. Т. 22, № 5. С. 143–152. doi: 10.17116/profmed201922051143

Артамонова И.В., Веретененко С.В. Влияние форбуш-понижений галактических космических лучей на развитие антициклонической активности в умеренных широтах // Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79, № 5. С. 747–749. doi: 10.7868/S0367676515050075

Атлас Карельской АССР. М., 1989. 40 с.

Базилевская Г.А., Дайбог Е.И., Логачёв Ю.И., Власова Н.А., Гинзбург Е.А., Ишков В.Н., Лазутин Л.Л., Нгуен М.Д., Сурова Г.М., Яковчук О.С. Характерные особенности солнечных космических лучей в 21–24-м циклах солнечной активности по данным каталогов солнечных протонных событий // Геомагнетизм и аэрономия. 2021. Т. 61, № 1. С. 8–15. doi: 10.31857/S0016794021010028

Бережная Т.В., Голубев А.Д., Паршина Л.Н. Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в январе 2016 года // Метеорология и гидрология. 2016. № 4. С. 117–124.

Бойцов С.А., Голухова Е.З., Драпкина О.М., Зайратьянц О.В., Самородская И.В., Семёнов В.Ю. Смертность населения от различных болезней системы кровообращения в Москве и Санкт-Петербурге в 2015 и 2018 годах // Российский кардиологический журнал. 2021. Т. 26, № 1. С. 73–78. doi: 10.15829/1560-4071-2021-4048

Веретененко С.В. Особенности пространственно-временной структуры эффектов солнечной активности и вариация космических лучей в циркуляции нижней атмосферы : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. СПб., 2017. 327 с.

Воскобойников Ю.Е. Эконометрика в Excel : учеб. пособие. Ч. 2: Анализ временных рядов. Новосибирск, 2008. 152 с.

Говорушко С.М. Влияние погодных-климатических условий на биосферные процессы // Геофизические процессы и биосфера. 2012. Т. 11, № 1. С. 5–24.

Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2017 году / Министерство природных ресурсов и экологии Республики Карелия. Петрозаводск, 2018. 292 с.

Евстафьева Е.В., Лапченко В.А., Макарова А.С., Бурухина Т.Ф., Абибулаева Н.К., Евстафьева И.А. Оценка динамики концентрации приземного озона и метеорологических параметров как факторов риска возникновения неотложных состояний здоровья населения // Химическая физика. 2019. Т. 38, № 11. С. 42–51. doi: 10.1134/S0207401X19110037

Емелина С.В. Прогноз погодных условий, неблагоприятных для населения с сердечно-сосудистыми и аллергическими заболеваниями : дис. ... канд. геогр. наук. М., 2019. 122 с.

Зенченко Т.А., Бреус Т.К. Влияние климата и погоды на самочувствие и здоровье людей. Современные представления // Географические исследования. 2020. № 3. С. 80–96. doi: 10.17223/25421379/16/7

Концевая А.В., Агишина Т.А., Гамбарян М.Г., Драпкина О.М., Салагай О.О. Анализ прерванных временных рядов как способ оценки эффективности мер популяционной профилактики: методология и пример оценки влияния антитабачного законодательства на госпитализации с острым коронарным синдромом // Профилактическая медицина. 2019. Т. 22, № 6-1. С. 40–47. doi: 10.17116/profmed20192206140

Ляпкало А.А., Дементьев А.А., Цурган А.М. Влияние скорости и направления ветра на уровень загрязнения атмосферного воздуха города продуктами сгорания топлива // Фундаментальные исследования. 2013. № 7-1. С. 125–129.

Ляпкало А.А., Дементьев А.А., Цурган А.М. Влияние направления ветра на качество атмосферного воздуха в историческом центре г. Рязани в теплое время года // Наука молодых (Eruditio Juvenium). 2015. № 1. С. 35–42.

Обобщенные данные о выбросах загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников (автотранспорта и железнодорожного транспорта) в разрезе городов, субъектов, федеральных округов Российской Федерации за 2017 год. URL: <http://10.rpn.gov.ru/opendata/7703381225-transport> (дата обращения: 11.04.2019).

Плохинский Н.А. Биометрия. М. : Изд-во МГУ, 1970. 364 с.

Р 502.050–2005 Государственная система обеспечения единства измерений. Средства поверки одинакового уровня точности. Проверка качества поверочных и калибровочных работ посредством межлабораторных сличений. Алгоритмы обработки результатов измерений. URL: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293836/4293836077.htm> (дата обращения: 02.09.2022).

Ревич Б.А. «Горячие точки» химического загрязнения окружающей среды и здоровье населения России / под ред. В.М. Захарова. М., 2007. 192 с.

Родионова Л.А., Копнова Е.Д. Статистические подходы к анализу и моделированию сезонности в демографических данных // Демографическое обозрение. 2019. Т. 6, № 2. С. 104–141. doi: 10.17323/demreview.v6i2.9874

Рыбаков Д.С., Белашев Б.З. Погодно-климатические условия, загрязнение атмосферного воздуха, вызовы скорой медицинской помощи и смертность населения в Петрозаводске // Экология человека. 2020. № 5. С. 21–30. doi: 10.33396/1728-0869-2020-5-21-30

Рыбаков Д.С., Белашев Б.З. Погодные факторы и вызовы скорой медицинской помощи по поводу болезней органов дыхания в городе Петрозаводске // Экология человека. 2021. № 6. С. 36–48. doi: 10.33396/1728-0869-2021-6-36-48

Салтыкова М.М., Бобровницкий И.П., Яковлев М.Ю., Банченко А.Д. Влияние погоды на пациентов с болезнями системы кровообращения: главные направления исследований и основные проблемы // Экология человека. 2018. № 6. С. 43–51. doi: 10.33396/1728-0869-2018-6-43-51

Смирнова М.И., Горбунов В.М., Андреева Г.Ф., Молчанова О.В., Федорова Е.Ю., Калинина А.М., Лукьянов М.М., Бойцов С.А. Влияние сезонных метеорологических факторов на заболеваемость и смертность населения от сердечно-сосудистых и бронхолегочных заболеваний // Профилактическая медицина. 2012. Т. 15, № 6. С. 76–86.

Сокольская О.Н. Формирование городских застроек с учетом экологических факторов атмосферы среды в жарких маловетренных и штилевых климатических условиях (на примере гг. Душанбе и Бишкек) : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 20 с.

Специализированные массивы для климатических исследований. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения: 31.01.2022).

Томских Э.С. Зависимость смертности трудоспособного населения от краткосрочного загрязнения атмосферного воздуха // Современные проблемы экологии и здоровья населения : материалы Всерос. конф. с междунар. участием, посвященной 60-летию образования Восточно-Сибирского института медико-экологических исследований и IV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. Иркутск, 2021. С. 97–100.

Хаснулин В.И., Гафаров В.В., Воевода М.И., Артамонова М.В. Показатели смертности от болезней органов кровообращения в зависимости от среднегодовой температуры воздуха и географической широты проживания в РФ // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 6-2. С. 255–259.

Чеснокова Е.А. Влияние сопряженного действия загрязненного атмосферного воздуха и погодных условий на респираторную заболеваемость у детей в городе Липецке // Экологический Вестник Северного Кавказа. 2008. Т. 4, № 1. С. 96–100.

Яковлев М.Ю., Фесюн А.Д., Датий А.В. Анализ основных проявлений метеопатических реакций больных // Вестник восстановительной медицины. 2019. № 1. С. 93–94. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38591436> (дата обращения: 18.11.2021).

Baaghdeh M., Mayvaneh F. Climate Change and Simulation of Cardiovascular Disease Mortality: A Case Study of Mashhad, Iran // Iranian Journal Public Health. 2017. V. 46. No. 3. P. 396–407.

Bell M.L., Davis D.L., Fletcher T. A retrospective assessment of mortality from the London smog episode of 1952: the role of influenza and pollution // Environmental Health Perspectives. 2004. V. 112. No. 1. P. 6–8. doi: 10.1289/ehp.6539

Dąbrowiecki P., Badyda A., Chciałowski A., Czechowski P.O., Wrotek A. Influence of Selected Air Pollutants on Mortality and Pneumonia Burden in Three Polish Cities over the Years 2011–2018 // Journal of Clinical Medicine. 2022. V. 11, No. 11. Art. 3084. doi: 10.3390/jcm11113084

Ellwanger J.H., Chies J.A.B. Wind: a neglected factor in the spread of infectious diseases // Lancet Planet Health. 2018. V. 2, No. 11. e475. doi: 10.1016/S2542-5196(18)30238-9

Kaufman M.J., Fitzmaurice G.M. Temporal patterns of suicide and circulatory system disease-related mortality are inversely correlated in several countries // BMC Psychiatry. 2021. V. 21. Art No. 153. doi: 10.1186/s12888-021-03159-5

Maryanaji Z., Hamidi O. Investigating climatic changes of the wind regime over Western Iran // BMC Research Notes. 2020. V. 13. Art. 434. doi: 10.1186/s13104-020-05275-z

Masselot P., Chebana F., Ouada T.B.M.J., Bélanger D., St-Hilaire A., Gosselin P. A new look at weather-related health impacts through functional regression // Scientific Reports. 2018. V. 8. Art. 15241. doi: 10.1038/s41598-018-33626-1

Mikhailuta S.V., Taseiko O.V., Lezhenin A.A., Pitt A. Urban wind fields: phenomena in transformation // Urban Climate. 2017. V. 19. P. 122–140. doi: 10.1016/j.uclim.2016.12.005

Roth G.A., Mensah G.A., Johnson C.O. et al. Global Burden of Cardiovascular Diseases and Risk Factors, 1990–2019: Update From the GBD 2019 Study // Journal of the American College of Cardiology. 2020. V. 76. No. 25. P. 2982–3021. doi: 10.1016/j.jacc.2020.11.010

Sanderson M., Arbuthnott K., Kovats S., Hajat S., Falloon P. The use of climate information to estimate future mortality from high ambient temperature: A systematic literature review // PLoS One. 2017. V. 12. No. 7. e0180369. doi: 10.1371/journal.pone.0180369

Verma S.P., Quiroz-Ruiz A., Díaz-González L. Critical values for 33 discordancy test variants for outliers in normal samples up to sizes 1000, and applications in quality control in Earth Sciences // Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 2008. V. 25. No. 1. P. 82–96, with 209 pages of electronic supplement. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1037.5686&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 08.08.2022).

Wichmann H.E., Mueller W., Allhoff P., Beckmann M., Bocter N., Csicsaky M.J., Jung M., Molik B., Schoeneberg G. Health effects during a smog episode in West Germany in 1985 // Environmental Health Perspectives. 1989. V. 79. P. 89–99. doi: 10.1289/ehp.897989

References

Azizov V.A., Khatamzade E.M., Ragimova A.S., Alekperova A.K., Sadygova T.A., Mamedzade A.Ya. *Zavisimost' riska smertnosti vsledstvie bolezney sistemy krovoobrashcheniya ot meteorologicheskikh faktorov v gorode Baku i gorode Guba* [Dependence of mortality from cardiovascular system diseases on meteorological factors among population of Baku and Guba] // Evraziyskiy kardiologicheskii zhurnal. 2018. No. 2. pp. 16–21. In Russian

Altshuller N.V., Gershenzon T.E., Basov M.N., etc. *Mediko-geograficheskiy spravochnik Karel'skoy ASSR* [Medico-Geographical Directory of the Karelian ASSR]. Edited by A.A. Keller. Petrozavodsk, 1990. 196 p. In Russian

Andreeva G.F., Gorbunov V.M. *Osnovnye zakonomernosti obshchey sezonnoy smertnosti i faktory, okazyvayushchie vozdeystvie na nee* [The main patterns of overall seasonal mortality and the factors influencing the latter] // Profilakticheskaya meditsina. 2019. V. 22. No 5. pp. 143–152. doi: 10.17116/profmed201922051143 In Russian

Artamonova I.V., Veretenenko S.V. *Vliyaniye forbushe-ponizheniy galakticheskikh kosmicheskikh luchey na razvitie antitsiklonicheskoy aktivnosti v umerennykh shirotakh* [Effects of forbushe decreases of galactic cosmic rays on anticyclone activity at middle latitudes] // Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya [News of the Russian Academy of Sciences. Physical Series]. 2015. V. 79. No. 5. pp. 747–749. doi: 10.7868/S0367676515050075 In Russian

Atlas Karel'skoy ASSR [Atlas of the Karelian ASSR]. Moscow, 1989. 40 p. In Russian

Bazilevskaya G.A., Daibog E.I., Logachev Y.I., Vlasova N.A., Lazutin L.L., Nguyen M.D., Surova G.M., Yakovchouk O.S., Ginzburg E.A., Ishkov V.N., Lazutin L.L., Nguyen M.D., Surova G.M., Yakovchuk O.S. *Kharakternye osobennosti solnechnykh kosmicheskikh luchey v 21–24-m tsiklakh solnechnoy aktivnosti po dannym katalogov solnechnykh protonnykh sobytiy* [Characteristic features of solar cosmic rays in the 21st–24th solar-activity cycles according to data from catalogs of solar proton events] // Geomagnetizm i aeronomiya [Geomagnetism and Aeronomy]. 2021. V. 61. No. 1. pp. 6–13. In Russian

Berezhnaya T.V., Golubev A.D., Parshina L.N. *Anomal'nye gidrometeorologicheskie yavleniya na territorii Rossiyskoy Federatsii v yanvare 2016 goda* [Anomalous hydrometeorological phenomena on the Russian Federation territory in January 2016] // Meteorologiya i gidrologiya. 2016. No. 4. pp. 117–124. In Russian

Boytsov S.A., Golukhova E.Z., Drapkina O.M., Zayrat'yants O.V., Samorodskaya I.V., Semenov V.Yu. *Smertnost' naseleniya ot razlichnykh bolezney sistemy krovoobrashcheniya v Moskve i Sankt-Peterburge v 2015 i 2018 godakh* [Cardiovascular mortality rate in Moscow and St. Petersburg in 2015 and 2018] // Rossiyskiy kardiologicheskii zhurnal [Russian journal of cardiology]. 2021. V. 26. No. 1. pp. 73–78. doi: 10.15829/1560-4071-2021-4048 In Russian

- Veretenenko S.V. *Osobennosti prostranstvenno-vremennoy struktury effektiv solnechnoy aktivnosti i variatsiya kosmicheskikh luchey v tsirkulyatsii nizhney atmosfery* [Features of the spatial and temporal structure of the effects of solar activity and cosmic ray variations on the lower atmosphere circulation] : Dis. ... dokt. fiz.-mat. nauk. Saint-Petersburg, 2017. 327 p. In Russian
- Voskoboinikov Yu.E. *Ekonometrika v Excel : Uchebnoe posobie. Ch. 2. Analiz vremennykh ryadov* [Econometrics in Excel : Textbook. Part 2. Time series analysis]. Novosibirsk, 2008. 152 p. In Russian
- Govorushko S.M. Influence of weather-climatic conditions on biospheric processes // *Izvestiya – Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012. V. 48. pp. 771–784. doi: 10.1134/S0001433812080051
- Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii okruzhayushchey sredy Respubliki Kareliya v 2017 godu* [State Report on the Status of the Environment in the Republic of Karelia in 2017] / Ministerstvo prirodnkh resursov i ekologii Respubliki Kareliya. Petrozavodsk, 2018. 292 p. In Russian
- Evstafeva E.V., Lapchenko V.A., Makarova A.S., Burukhina T.F., Abibulaeva N.K., Evstafeva I.A. Assessment of Patterns of the Lower Atmosphere Ozone Concentrations and Meteorological Factors as the Risk Factors for Medical Emergencies in the Population // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2019. V. 38. No. 11. pp. 42–51. DOI: 10.1134/S0207401X19110037. In Russian
- Emelina S.V. *Prognoz pogodnykh usloviy, neblagopriyatnykh dlya naseleniya s serdechno-sosudistymi i allergicheskimi zabolevaniyami* [Forecast of weather conditions unfavorable for the population with cardiovascular and allergic diseases]: dis. ... kand. geogr. nauk. Moscow, 2019. 122 p. In Russian
- Zenchenko T.A., Breus T.K. *Vliyanie klimata i pogody na samochuvstvie i zdorov'e lyudey. Sovremennye predstavleniya* [The influence of climate and weather on the well-being and health of people. Contemporary views] // *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2020. No. 3. pp. 80–96. doi: 10.17223/25421379/16/7. In Russian
- Kontsevaya A.V., Agishina T.A., Gambaryan M.G., Drapkina O.M., Salagay O.O. *Analiz prervannykh vremennykh ryadov kak sposob otsenki effektivnosti mer populyatsionnoy profilaktiki: metodologiya i primer otsenki vliyaniya antitabachnogo zakonodatel'stva na gositalizatsii s ostrym koronarnym sindromom* [Interrupted time series analysis as a way to evaluate the effectiveness of population-based preventive measures: a methodology for and an example of evaluation of the impact of tobacco control legislation on hospitalizations for acute coronary syndrome] // *Profilakticheskaya meditsina* [Preventive medicine]. 2019. V. 22. No. 6–1. pp. 40–47. doi: 10.17116/profmed20192206140. In Russian
- Lyapkalo A.A., Dement'ev A.A., Tsurgan A.M. *Vliyanie napravleniya vetra na kachestvo atmosfernogo vozdukha v istoricheskom tsentre g. Ryazani v teploe vremya goda* [The influence of wind direction on quality atmospheric air in the historic center Ryazan in the warmer months] // *Nauka molodykh* (Eruditio Juvenium). 2015. No. 1. pp. 35–42. In Russian
- Lyapkalo A.A., Dement'ev A.A., Tsurgan A.M. *Vliyanie skorosti i napravleniya vetra na uroven' zagryazneniya atmosfernogo vozdukha goroda produktami sgoraniya topliva* [Influence of wind speed and direction on the city air pollution level by fuel combustion products] // *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research.]. 2013. No. 7–1. pp. 125–129. In Russian
- Obobshchennyye dannyye o vybrosakh zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosfernyy vozdukh ot peredvizhnykh istochnikov (avtotransporta i zheleznodorozhnogo transporta) v razreze gorodov, sub"ektov, federal'nykh okrugov Rossiyskoy Federatsii za 2017 god* [Generalized Data on the Pollutant Emission in to the Air from Mobile Sources (Vehicles and Railways) in the Context of Cities, Subjects, Federal Districts of the Russian Federation in 2017]. URL: <http://10.rpn.gov.ru/opendata/7703381225-transport> (date accessed 11.04.2019). In Russian
- Plokhinskiy N.A. *Biometriya* [Biometrics]. Moscow: MGU Publ., 1970. 364 p. In Russian
- Revich B.A. «*Goryachie tochki*» *khimicheskogo zagryazneniya okruzhayushchey sredy i zdorov'e naseleniya Rossii* «Hot spots» of chemical contamination of the environment and public health of Russia]. Edited by V.M. Zakharov. Moscow: Akropol' Publ., 2007. 192 p. In Russian
- R 502.050–2005 *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Sredstva poverki odinakovogo urovnya tochnosti. Proverka kachestva poverochnykh i kalibrovchnykh rabot posredstvom mezhlaboratornykh slicheniy. Algoritmy obrabotki rezul'tatov izmereniy* [State system for ensuring the uniformity of measurements. Means of verification of the same level of accuracy. Quality control of verification and calibration works by means of interlaboratory comparisons. Algorithms for processing measurement results]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293836/4293836077.htm> (date accessed 02.09.2022). In Russian
- Rodionova L.A., Kopniva E.D. *Statisticheskie podkhody k analizu i modelirovaniyu sezonnosti v demograficheskikh dannykh* [Statistical approaches to analysis and modeling of seasonality in demographic data] // *Demograficheskoe obozrenie* [Demographic Review]. 2019. V. 6. No. 2. pp. 104–141. doi: 10.17323/demreview.v6i2.9874. In Russian
- Rybakov D.S., Belashev B.Z. *Pogodno-klimaticheskie usloviya, zagryaznenie atmosfernogo vozdukha, vyzovy skoroy meditsinskoy pomoshchi i smertnost' naseleniya v Petrozavodske* [Weather conditions, air pollution, emergency calls and population mortality in Petrozavodsk] // *Ekologiya cheloveka* [Human ecology.]. 2020. No. 5. pp. 21–30. doi: 10.33396/1728-0869-2020-5-21-30. In Russian
- Rybakov D.S., Belashev B.Z. *Pogodnye faktory i vyzovy skoroy meditsinskoy pomoshchi po povodu bolezney organov dykhaniya v gorode Petrozavodske* [Weather Factors and Ambulance Calls for Respiratory Causes in the City of Petrozavodsk] // *Ekologiya cheloveka* [Human ecology.]. 2021. No. 6. pp. 36–48. doi: 10.33396/1728-0869-2021-6-36-48. In Russian
- Saltykova M.M., Bobrovnikskiy I.P., Yakovlev M.Yu., Banchenko A.D. *Vliyanie pogody na patsientov s boleznyami sistemy krovoobrashcheniya: glavnye napravleniya issledovaniy i osnovnye problemy* [Effect of weather conditions on patients with cardiovascular diseases: main directions of research and major issues] // *Ekologiya cheloveka* [Human ecology.]. 2018. No. 6. pp. 43–51. doi: 10.33396/1728-0869-2018-6-43-51. In Russian
- Smirnova M.I., Gorbunov V.M., Andreeva G.F., Molchanova O.V., Fedorova E.Yu., Kalinina A.M., Luk'ianov M.M., Boytsov S.A. *Vliyanie sezonnykh meteorologicheskikh faktorov na zabolevaemost' i smertnost' naseleniya ot serdechno-sosudistyykh i bronkhologichnykh zabolevaniy* [Influence of seasonal and weather factors on cardiovascular and bronchopulmonary morbidity and mortality] // *Profilakticheskaya meditsina* [Preventive medicine]. 2012. V. 15. No. 6. pp. 76–86. In Russian
- Sokolskaya O.N. *Formirovaniye gorodskikh zastroek s uchetom ekologicheskikh faktorov atmosferno sredy v zharkikh malovetrennykh i shilevykh klimaticheskikh usloviyakh (na primere gg. Dushanbe i Bishkek)* [Formation of urban developments taking into account environmental factors of the atmospheric environment in hot, low-wind and calm climatic conditions (on the example of Dushanbe and Bishkek)]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Moscow, 2012. 20 p. In Russian

Spetsializirovannyye massivy dlya klimaticheskikh issledovaniy [Specialized data for climatic research]. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (Date accessed 31.01.2022). In Russian

Tomskikh E.S. *Zavisimost' smernosti trudospobnogo naseleniya ot kratkosrochnogo zagryazneniya atmosfernogo vozdukha* [Dependence of the mortality of the working-age population on short-term air pollution] // *Sovremennyye problemy ekologii i zdorov'ya naseleniya. Materialy vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 60-letiyu obrazovaniya Vostochno-Sibirskogo instituta mediko-ekologicheskikh issledovaniy i IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh.* Irkutsk, 2021. pp. 97–100. In Russian

Khasnulin V.I., Gafarov V.V., Voevoda M.I., Artamonova M.V. *Pokazateli smernosti ot bolezney organov krovoobrashcheniya v zavisimosti ot srednegodovoy temperatury vozdukha i geograficheskoy shirotы prozhivaniya v RF* [Mortality from diseases of the cardiovascular system based on the average air temperature and residence geographical latitudes in Russia] // *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy.* 2015. No. 6–2. pp. 255–259. In Russian

Chesnokova E.A. *Vliyaniye sopryazhennogo deystviya zagryaznennogo atmosfernogo vozdukha i pogodnykh usloviy na respiratornyuyu zabolevaemost' u detey v gorode Lipetske* [Influence of connected action of polluted atmospheric air and weather conditions upon the respiratory diseases among children in Lipetsk-city] // *Ekologicheskyy Vestnik Severnogo Kavkaza* [Ecological Bulletin of the North Caucasus]. 2008. V. 4. No. 1. pp. 96–100. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20683327> (date accessed 27.11.2022). In Russian

Yakovlev M.Yu., Fesyun A.D., Dativ A.V. *Analiz osnovnykh proyavleniy meteopaticheskikh reaktsiy bol'nykh* [Analysis of the main manifestations of meteopathic reactions in persons] // *Vestnik vosstanovitel'noy meditsiny* [Bulletin of Restorative Medicine]. 2019. No. 1. pp. 93–94. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38591436> (date accessed 18.11.2021). In Russian

Baaghdeh M., Mayvaneh F. *Climate Change and Simulation of Cardiovascular Disease Mortality: A Case Study of Mashhad, Iran* // *Iranian Journal Public Health.* 2017. V. 46. No. 3. pp. 396–407. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5395536/> (date accessed 20.11.2021).

Bell M.L., Davis D.L., Fletcher T. *A retrospective assessment of mortality from the London smog episode of 1952: the role of influenza and pollution* // *Environmental Health Perspectives.* 2004. V. 112. No. 1. pp. 6–8. doi: 10.1289/ehp.6539

Dąbrowiecki P., Badyda A., Chciałowski A., Czechowski P.O., Wrotek A. *Influence of Selected Air Pollutants on Mortality and Pneumonia Burden in Three Polish Cities over the Years 2011–2018* // *Journal of Clinical Medicine.* 2022. V. 11. No. 11. Art. 3084. doi: 10.3390/jcm11113084

Ellwanger J.H., Chies J.A.B. *Wind: a neglected factor in the spread of infectious diseases* // *Lancet Planet Health.* 2018. V. 2. No. 11. e475. doi: 10.1016/S2542-5196(18)30238-9

Kaufman M.J., Fitzmaurice G.M. *Temporal patterns of suicide and circulatory system disease-related mortality are inversely correlated in several countries* // *BMC Psychiatry.* 2021. 21. Art. no. 153. doi: 10.1186/s12888-021-03159-5

Maryanaji Z., Hamidi O. *Investigating climatic changes of the wind regime over Western Iran* // *BMC Research Notes.* 2020. V. 13. Art. 434. doi: 10.1186/s13104-020-05275-z

Mikhailuta S.V., Taseiko O.V., Lezhenin A.A., Pitt A. *Urban wind fields: phenomena in transformation* // *Urban Climate.* 2017. V. 19. pp. 122–140. doi: 10.1016/j.uclim.2016.12.005

Masselot P., Chebana F., Ouara T.B.M.J., Bélanger D., St-Hilaire A., Gosselin P. *A new look at weather-related health impacts through functional regression* // *Scientific Reports.* 2018. V. 8. Art. 15241. doi: 10.1038/s41598-018-33626-1

Roth G.A., Mensah G.A., Johnson C.O., et al. *Global Burden of Cardiovascular Diseases and Risk Factors, 1990–2019: Update From the GBD 2019 Study* // *Journal of the American College of Cardiology.* 2020. V. 76. No. 25. pp. 2982–3021. doi: 10.1016/j.jacc.2020.11.010

Sanderson M., Arbuthnott K., Kovats S., Hajat S., Falloon P. *The use of climate information to estimate future mortality from high ambient temperature: A systematic literature review* // *PLoS One.* 2017. V. 12. No. 7. e0180369. doi: 10.1371/journal.pone.0180369

Verma S.P., Quiroz-Ruiz A., Díaz-González L. *Critical values for 33 discordancy test variants for outliers in normal samples up to sizes 1000, and applications in quality control in Earth Sciences* // *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas.* 2008. V. 25. No. 1. pp. 82–96, with 209 pages of electronic supplement. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1037.5686&rep=rep1&type=pdf> (Date accessed 08.08.2022).

Wichmann H.E., Mueller W., Allhoff P., Beckmann M., Bocter N., Csicsaky M.J., Jung M., Molik B., Schoeneberg G. *Health effects during a smog episode in West Germany in 1985* // *Environmental Health Perspectives.* 1989. V. 79. pp. 89–99. doi: 10.1289/ehp.897989

Информация об авторе:

Рыбаков Д.С., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория геохимии, четвертичной геологии и геоэкологии, Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», Петрозаводск, Россия.

E-mail: rybakovd@krc.karelia.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about the author:

Rybakov D.S., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Laboratory of Geochemistry, Quaternary Geology and Geoecology, Federal Research Center “Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences” (Institute of Geology), Petrozavodsk, Russia.

E-mail: rybakovd@krc.karelia.ru

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.12.2022; одобрена после рецензирования 16.01.2024; принята к публикации 27.11.2024

The article was submitted 15.12.2022; approved after reviewing 16.01.2024; accepted for publication 27.11.2024

Научный журнал

ГЕОСФЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

GEOSPHERE RESEARCH

2024. № 4

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 06.12.2024 г. Формат 60×84¹/₈.
Гарнитура Times. Печ. л. 15,2; усл. печ. л. 14,1.
Тираж 50 экз. Заказ № 6156. Цена свободная.

Дата выхода в свет 15.01.2025 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