

ГЕОСФЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

GEOSPHERE RESEARCH

Научный журнал

2025

№ 3

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

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



Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» 94288

Томский государственный университет
2025

Учредитель – Томский государственный университет

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

E-mail: shpansky@ggf.tsu.ru

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

E-mail: gsr_tsu@mail.ru

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Deputy Editor-in-Chief: **Andrey V. Shpansky**, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, 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: gss_tsu@mail.ru

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

David Banks, CGeol, 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, Hamburg University, Hamburg, Germany

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

EDITORIAL COUNCIL

Gertner I.F., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Gorbatenko V.P.**, Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Grinev O.M.**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; **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

ПАЛЕОНТОЛОГИЯ, СТРАТИГРАФИЯ

Гнибиденко З.Н., Маринов В.А., Левичева А.В., Семаков Н.Н. Магнитостратиграфические исследования меловых отложений на р. Северная Сосьва (Северный Урал)	6
Тельнова О.П., Дуб С.А., Мельничук О.Ю., Артюшкова О.В., Евдокимова И.О. Пограничные отложения среднего и верхнего девона в разрезе «Покровское» (восточный склон Среднего Урала). История изучения и новые результаты исследований	19
Самандросова А.С., Лещинский С.В., Бурканова Е.М., Бородин А.В., Косинцев П.А. Ассоциации грызунов Волчьей гривы: значение для стратиграфии и палеогеографии позднего неоплейстоцена – голоцена юга Западно-Сибирской равнины	41
Шпанский А.В., Укоков Н.А. Бобры (<i>Castor fiber</i> L.) позднего плейстоцена юго-востока Западной Сибири	65

ПЕТРОЛОГИЯ

Кармышева И.В., Зюков Е.Д., Яковлев В.А. Палеозойские деформации восточной части Каахемского магматического ареала (Восточная Тува)	86
Котляров А.В., Жимулев Ф.И., Хуурак А.А., Фидлер М.А., Бехтерев Н.А. Палеоостроводужная природа гипербазитов Аламбайской офиолитовой зоны Салаира (северо-запад Центрально-Азиатского складчатого пояса) по данным изучения состава хромшпинелей	104

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Рампилов М.О., Рампилова М.В., Ласточкин Е.И., Посохов В.Ф. Вольфрамовые месторождения южного складчатого обрамления Сибирской платформы: генезис, источники рудообразующих флюидов	120
--	-----

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ

Болелов Э.А., Васильев О.В., Бояренко Э.С., Галаева К.И. Анализ географической вариативности и временной изменчивости статистических характеристик отражаемости и турбулентности атмосферы для кучево-дождевой облачности на европейской территории России	139
Севастьянов В.В. Вековые изменения температуры воздуха на юго-востоке Западной Сибири на примере города Томска	153
Филандышева Л.Б., Ромашова Т.В., Евсеева Н.С. Климатически обусловленная изменчивость среднегодового прироста основных лесобразующих пород подтайги юго-востока Западной Сибири	170
Marimira C. A geospatial analysis of land surface temperature and surface urban heat island in Tomsk City: a study based on Landsat 8 satellite imagery	182

CONTENTS

PALEONTOLOGY, STRATIGRAPHY

Gnibidenko Z.N., Marinov V.A., Levicheva A.V., Semakov N.N. Magntostratigraphic studies of Cretaceous deposits on the Severnaya Sosva River (Northern Urals)	6
Telnova O.P., Dub S.A., Mel'nichuk O.Yu., Artyushkova O.V., Evdokimova I.O. Middle and Upper Devonian boundary units in «Pokrovskoe» section (Middle Urals Eastern Slope). History of study and new research results	19
Samandrosova A.S., Leshchinskiy S.V., Burkanova E.M., Borodin A.V., Kosintsev P.A. Volchia Griva rodent associations: stratigraphy and paleogeography significance for the Late Neo-Pleistocene – Holocene of southern West Siberian Plain	41
Shpansky A.V., Ukokov N.A. Beavers (<i>Castor fiber</i> L.) of the Late Pleistocene of the southeast of Western Siberia	65

PETROLOGY

Karmysheva I.V., Yakovlev V.A., Zyukov E.D. Paleozoic deformations of the Eastern Kaakhem magmatic area (East Tuva)	86
Kotlyarov A.V., Zhimulev F.I., Khuurak A.A., Fidler M.A., Bekhterev N.A. Palaeoisland-arc nature of hyperbasites from the Alambay ophiolite zone of Salair (northwest Central Asian orogenic belt) according to the study Cr-spinels composition	104

GEOLOGY OF DEPOSITS

Rampilov M.O., Rampilova M.V., Lastochkin E.I., Posokhov V.F. Tungsten deposits of the southern folded frame of the Siberian craton: genesis, sources of ore-forming fluids	120
--	-----

METEOROLOGY, CLIMATOLOGY

Bolelov E.A., Vasiliev O.V., Boyarenko E.S., Galaeva K.I. Analysis of geographical flexibility and temporal variability of statistical characteristics of atmospheric reflectivity and turbulence for cumulonimbus clouds in the European zone of Russia	139
Sevastyanov V.V. Age-old changes in air temperature in the southeast of Western Siberia on example of the city of Tomsk	153
Filandysheva L.B., Romashova T.V., Evseeva N.S. Climatically-driven variability in annual growth of diffuse-porous tree species in the subtaiga of southeast Western Siberia	170
Marimira C. A geospatial analysis of land surface temperature and surface urban heat island in Tomsk City: a study based on Landsat 8 satellite imagery	182

ПАЛЕОНТОЛОГИЯ, СТРАТИГРАФИЯ

Научная статья

УДК 551.763.1

doi: 10.17223/25421379/36/1

МАГНИТОСТРАТИГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА Р. СЕВЕРНАЯ СОСЬВА (СЕВЕРНЫЙ УРАЛ)

Зинаида Никитична Гнибиденко¹, Владимир Аркадьевич Маринов²,
Александра Викторовна Левичева³, Николай Николаевич Семаков⁴



^{1, 3, 4} Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

² Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия

¹ gnibidenkozn@ipgg.sbras.ru

² vamarinov@rosneft.ru

³ levichevaav@ipgg.sbras.ru

⁴ semakovnn@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Представлены результаты палеомагнитных и магнитостратиграфических исследований меловых отложений разреза Сосьва (бассейн реки Северная Сосьва, северо-запад Западной Сибири), изученных в стратотипическом естественном разрезе усть-маньинской свиты в шести километрах ниже по течению от пос. Усть-Манья. Исследованы отложения среднего-верхнего альба и нижнего-среднего кампана. По комплексным (био- и палеомагнитным) данным построен магнитостратиграфический разрез ханты-мансийской и усть-маньинской свит нижнего и верхнего мела. Разрез состоит из двух магнитозон – прямой $NK_{1a}l_2$ и обратной RK_{2cr1} полярности, идентифицируемых с хронами C33г и C34 мировой шкалы магнитной полярности. Полученный магнитостратиграфический разрез будет являться одним из фрагментов региональной шкалы магнитной полярности верхнего мела Западной Сибири. В прикладном отношении региональная шкала магнитной полярности верхнего мела Западной Сибири позволит проводить локальную, региональную, межрегиональную и глобальную корреляцию разрезов и геологических событий, а также их датирование.

Ключевые слова: магнитостратиграфия, геомагнитная полярность, магнитозона, мел, Усть-Манья, Северное Зауралье, Западная Сибирь

Благодарности: Авторы выражают искреннюю благодарность Татьяне и Евгению Барабошкиным за неоценимую помощь и сотрудничество при проведении отбора образцов для палеомагнитных исследований в полевых условиях.

Источник финансирования: Исследования выполнены в рамках проекта НИР – FWZZ-2022-0019.

Для цитирования: Гнибиденко З.Н., Маринов В.А., Левичева А.В., Семаков Н.Н. Магнитостратиграфические исследования меловых отложений на р. Северная Сосьва (Северный Урал) // Геосферные исследования. 2025. № 3. С. 6–18. doi: 10.17223/25421379/36/1

Original article

doi: 10.17223/25421379/36/1

MAGNETOSTRATIGRAPHIC STUDIES OF CRETACEOUS DEPOSITS ON THE SEVERNAYA SOSVA RIVER (NORTHERN URALS)

Zinaida N. Gnibidenko¹, Vladimir A. Marinov², Aleksandra V. Levicheva³, Nikolai N. Semakov⁴

^{1, 3, 4} Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

² Tyumen Oil Scientific Center, Tyumen, Russia

¹ gnibidenkozn@ipgg.sbras.ru

² vamarinov@rosneft.ru

³ levichevaav@ipgg.sbras.ru

⁴ semakovnn@ipgg.sbras.ru

Abstract. The article presents the results of paleomagnetic and magnetostratigraphic studies of Cretaceous sediments of the Sosva section (the basin of the Severnaya Sosva River, northwest of Western Siberia), studied in a stratotypic natural section of the Ust-Manya formation six km downstream from the village Ust-Manya. The sediments of the Middle-Upper Albian and Lower-Middle Campanian have been studied. Based on complex (bio- and paleomagnetic) data, a magnetostratigraphic section of the Khanty-Mansiysk and Ust-Manya formations of the Lower and Upper Cretaceous has been constructed. The section consists of

two magnetozones – normal NK_{1al_2} and reverse $RK_2 km_1$ polarity, identified with Chrones C33r and C34 of the world scale of magnetic polarity. The resulting magnetostratigraphic section will be one of the fragments of the regional scale of the magnetic polarity of the Upper Cretaceous of Western Siberia. In practical terms, the regional scale of the magnetic polarity of the Upper Cretaceous of Western Siberia will allow for local, regional, interregional and global correlation of sections and geological events, as well as their dating.

Keywords: *magnetostratigraphy, geomagnetic polarity, magnetozones, Cretaceous, Ust-Manya, Northern Trans-Urals, Western Siberia*

Acknowledgments: The authors express their sincere gratitude to Tatyana and Evgeny Baraboshkin for their invaluable assistance and cooperation in collecting samples for paleomagnetic studies in the field.

Source of financing: The research was carried out within the framework of the research project – FWZZ-2022-0019.

For citation: Gribidenko Z.N., Marinov V.A., Levicheva A.V., Semakov N.N. (2025) Magnetostratigraphic studies of Cretaceous deposits on the Severnaya Sosva River (Northern Urals). *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 6–18. doi: 10.17223/25421379/36/1

Введение

В последнее десятилетие нами составлены магнитостратиграфические разрезы верхнемеловых отложений на юге Западной Сибири – трех скважин (8, 10, 2) юга Омской впадины [Гнибиденко и др., 2014], двух скважин (С-114, С-124) Бакчарского железорудного бассейна [Гнибиденко и др., 2015] и двух скважин (23 и 19) юга Кулундинской впадины [Гнибиденко и др., 2017а]. Заключительным этапом данных исследований является региональный магнитостратиграфический разрез верхнемеловых и пограничных мел-палеогеновых отложений этой территории [Гнибиденко и др., 2020].

В настоящее время нами проводятся палеомагнитные исследования верхнего мела севера Западной Сибири, где геологический разрез меловых отложений является одним из наиболее полных в Северной Азии и представляет собой мощную толщу отложений, развитую более широко, чем триасовые и юрские. Так, на севере Красноярского края в левобережье нижнего течения р. Енисей была изучена нижняя часть разреза верхнего мела (долганская, дорожковская и насоновская свиты), вскрытого восемью скважинами (Хикиглинская 1, Сузунская 34, Восточно-Лодочная 1, Западно-Тагульская 1, Тагульская 21 и 25, Ванкорская 10 и 13) [Гнибиденко и др., 2017б]. Палеомагнитные разрезы этих свит в исследуемых скважинах характеризуются прямой полярностью геомагнитного поля с редкими субзонами обратной намагниченности. Новизна полученных результатов в том, что впервые для севера Западной Сибири в пределах Усть-Енисейского структурно-фациального района разработаны магнитостратиграфические разрезы нижней части верхнего мела. В каждом из восьми исследованных разрезов выделена магнитозона прямой полярности, соответствующая сеноману и турону, в которой зафиксированы субзоны обратной намагниченности.

Позднее проведены палеомагнитные исследования верхнего мела (временной диапазон – верхний се-

номан–маастрихт) на северо-востоке Западной Сибири (Пур-Тазовское междуречье), вскрытого девятью скважинами (шестью скважинами Харампурской группы – 1049, 109Н, 106П-Ю, 105Н, 2073Н, 106Н и тремя скважинами Часельской группы – 1П, 5П и 16П). По геолого-тектоническому районированию исследуемые скважины расположены на территории крупной отрицательной структуры – Среднепуровского наклонного мегажелоба. По комплексным (био- и палеомагнитным) данным построены магнитостратиграфические разрезы девяти скважин, на основе синтеза которых впервые разработан региональный магнитостратиграфический разрез верхнего мела севера Западной Сибири [Гнибиденко и др., 2018; Гнибиденко, Маринов, 2023]. Все вышеперечисленные исследования были выполнены на образцах керн, ориентированных «верх–низ».

Целью настоящей работы является построение магнитостратиграфического разреза меловых отложений в бассейне реки Северная Сосьва (северо-запад Западной Сибири) (рис. 1). Этот разрез будет являться первым палеомагнитным разрезом, изученным нами на северо-западе Западной Сибири, и первым естественным разрезом на всей территории Западной Сибири, где образцы, отобранные для палеомагнитных исследований, ориентированы не только «верх–низ», но и по странам света. Таким образом, мы получаем в измеренных образцах магнитное наклонение I° и магнитное склонение D° .

Материалы и методы исследования

Материалом для исследований послужила коллекция ориентированных образцов для палеомагнитных и петромагнитных исследований, отобранная из естественного разреза меловых отложений, являющегося стратотипическим для усть-маньинской свиты. Разрез был переизучен в 2022 г. [Барабошкин и др., 2022]. На дневной поверхности в бассейне реки Се-

верная Сосьва обнажаются отложения ханты-мансийской и усть-маньинской свит ($62^{\circ}10'34,9''$, $60^{\circ}25'09,6''$). Из этого разреза мощностью 27 метров было отобрано 50 ориентированных штуфов (138 образцов-кубиков).

Петромагнитные исследования включали измерения магнитной восприимчивости K и ее анизотропии

(АМВ); магнитной восприимчивости после прогрева пород до температуры 600°C – термокаппы K_t (прирост $dK = K_t - K$). Прирост dK отражает содержание тонкодисперсного пирита в образце вследствие фазового перехода немагнитного FeS_2 в сильномагнитный Fe_3O_4 при температуре выше 500°C .

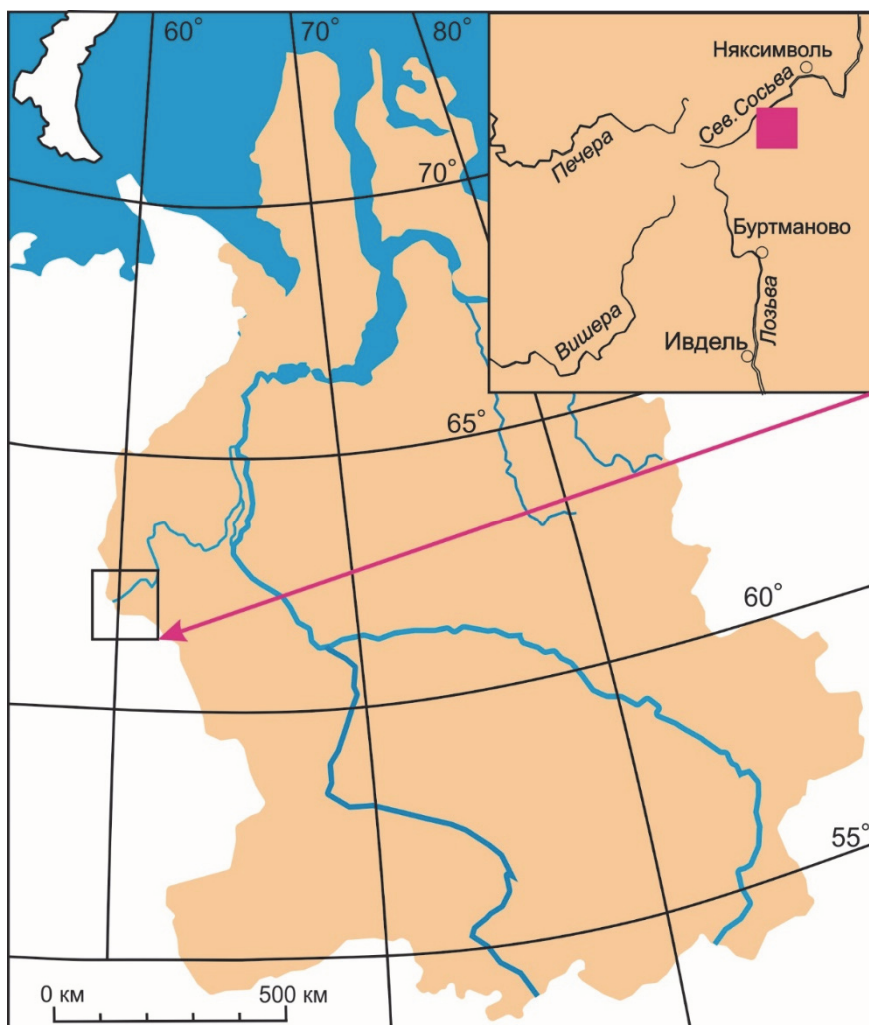


Рис. 1. Местоположение разреза Усть-Манья. Коричневым цветом закрашена территория распространения меловых отложений Западной Сибири [Барабоскин и др., 2022, с изменениями]

Fig. 1. Location of the Ust-Manya section. The area of the Cretaceous deposits of Western Siberia is shaded brown [Baraboshkin et al., 2022, with changes]

Палеомагнитные измерения и обработка полученных результатов проводились по стандартной методике [Палеомагнитология, 1982; Молостовский, Храмов, 1997]. Были измерены естественная остаточная намагниченность пород – NRM, J_n , остаточная намагниченность насыщения – J_{rs} , рассчитывался также фактор Кенигсбергера ($Q_n = J_n / (KH_T)$). Выполненные палеомагнитные исследования включали ступенчатую магнитную чистку образцов пород температурой и переменным магнитным полем, компонентный анализ NRM.

Для определения магнитных минералов использовался анализ зависимости магнитной восприимчивости от температуры.

Измерения величины магнитной восприимчивости и ее температурной зависимости велись на двухчастотном каппаметре Bartington MS-2 (Великобритания), величины и направления NRM – на спиннер-магнитометре JR-6A (Agico, Чехия) и криогенном магнитометре (2G Enterprises, США). Ступенчатая магнитная чистка переменным магнитным полем и температурой проводилась с помощью немагнитной

печи TD-48 (ASC Scientific, США) и размагничивающего устройства переменного магнитного поля, входящего в комплект криогенного магнитометра 2G Enterprises. Компонентный анализ палеомагнитных данных осуществлялся с помощью программы Remasoft 3.0 путем интерпретации ортогональных проекций Зийдervельда [Zijderveld, 1967], графиков размагничивания и стереографических проекций NRM. Анализ результатов измерения анизотропии магнитной восприимчивости проводился с помощью программы Anisoft 5.1.03 (agico.com).

Из разреза выполнен отбор 58 образцов для проведения микропалеонтологических исследований. Коллекция была обработана по стандартной методике отмучивания глинистых частиц [Фурсенко, 1978]. Были

обнаружены единичные раковины агглютинирующих фораминифер. Палеонтологические и биостратиграфические данные взяты из работ В.Ф. Лидера [1964] и Е.Ю. Барбошкина с соавторами [2022].

Местные стратиграфические подразделения и обоснование их возраста

Выход мела на р. Северная Сосьва известен с конца XIX в. В ходе экспедиций по Северному Уралу Е.С. Федоровым [Федоров, 1889] было выполнено описание отложений, собрана фауна, подтверждающая меловой возраст отложений. Более подробное изучение разреза выполнено позднее, в ходе разведки месторождений бурого угля Северососьвинского угольного бассейна в период с 1948 по 1954 гг.

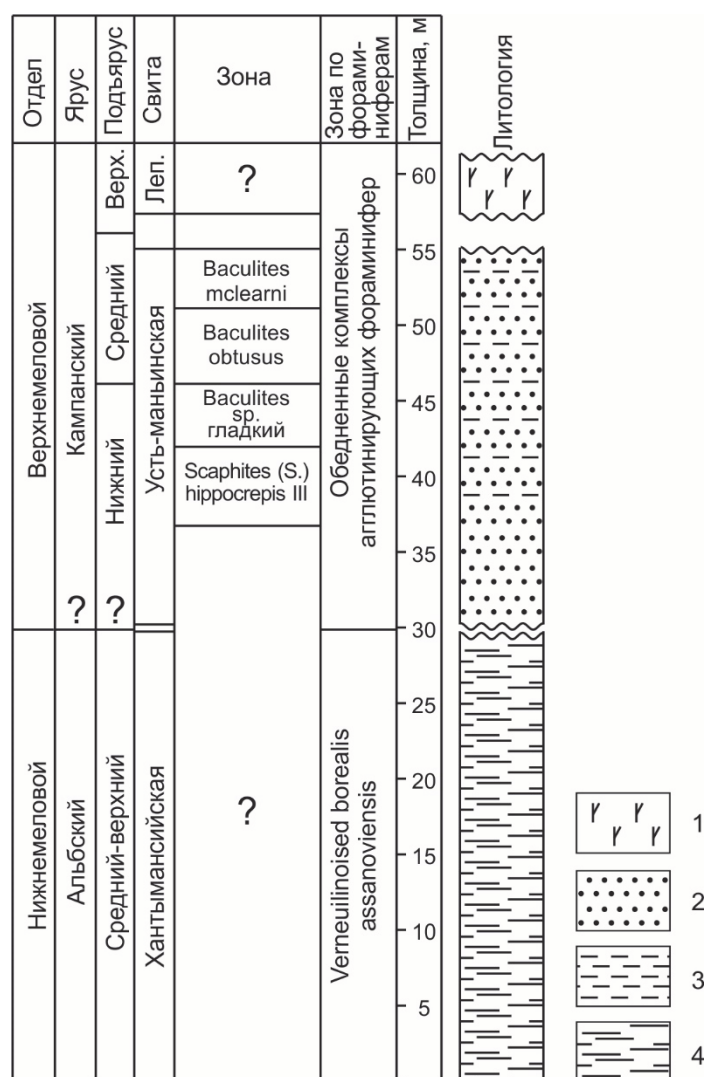


Рис. 2. Разрез меловых отложений на р. Северная Сосьва

Сокращения. Подъярус: верх. – верхний; свита: леп. – леплинская, п/с – подсвита, 1 – опоки; 2 – песчаники; 3 – алевролиты; 4 – черные кремнистые аргиллиты

Fig. 2. Cretaceous section on the Severnaya Sosva River

Abbreviations. Substage: верх. – Upper; suite: леп. – Leplinskaya, п/с – subsuite, 1 – floes; 2 – sandstones; 3 – siltstones; 4 – black siliceous mudstones

В непосредственной близости от разреза была пробурена скважина, по керну которой детально изучен литологический и минералогический состав отложений, уточнена его палеонтологическая характеристика. Разрез был разбит на пачки, которые прослеживаются в бассейне р. Северная Сосьва от р. Няйс до р. Лепля [Лидер, 1964]. В разрезе выделяются ханты-мансийская свита (верхняя подсвита), усть-маньинская и леплинская свиты (см. рис. 2). Графа «Зона по аммонитам» в этом рисунке приведена по данным Е.Ю. Барабошкина [Барабошкин и др., 2022].

Ханты-мансийская свита, верхняя подсвита, сложена плотными темно-серыми слабобразмокающими гидрослюдисто-монтмориллонитовыми аргиллитами с раковистым изломом. Содержание алевроитовой фракции, представленной зернами прозрачного кварца, полевых шпатов, единичных зерен глауконита, составляет 1–5 % в кровле свиты и 20–30 % в основании. В верхней части свиты наблюдаются стяжения и маломощные прослои фосфористых сидеритов [Лидер, 1964].

Палеонтологическая характеристика. Обнаружен комплекс фораминифер с *Verneulinoides borealis assanoviensis* [Лидер, 1964].

Мощность свиты на территории разреза по данным бурения составляет 30 м [Лидер, 1964].

Стратиграфическое положение. Толща глин отнесена к средне- и верхнеальбским подъярусам на основании стратиграфического распространения обнаруженного комплекса фораминифер *Verneulinoides borealis assanoviensis* [Захаров и др., 2000].

Усть-маньинская свита представлена относительно однородной пачкой глауконито-кварцевых песчаников с подчиненными прослоями светло-серых с зеленоватым оттенком аргиллитов монтмориллонитового состава, зеленовато-серых и желто-серых кремнисто-кварцевых гравелитов, кварцевых песчаников и конгломератов с кварцевым цементом [Лидер, 1964].

Палеонтологическая характеристика. В нижней части свиты (интервал 0–3,0 м) найдены раковины аммонитов *Scaphites* (*S.*) *hippocrepis* III (De Kay), *Baculites* sp. «гладкие» и *Baculites* sp. «со сглаженными ребрами» и пустоты от белемнитов «*Paractinacamax*» sp. ind. Выше. В интервале 5,3–9,2 м аммониты представлены видами *Baculites* sp. «гладкие», и *Baculites* sp. «со сглаженными ребрами», В интервале 9,8–10,2 м встречены раковины аммонитов *Baculites obtusus* Meek, *Scaphites* (*S.*) *hippocrepis* III (De Kay) и пустоты от ростров белемнитов «*Paractinacamax*» sp. ind. В верхней части свиты (интервал 14,8–17,0 м) обнаружены раковины аммонитов *Baculites mclearni* Landes, *Baculites* sp. «гладкими» (редко), *Scaphites* (*S.*) *hippocrepis* III (De Kay),

S. (*S.*) sp., ростры белемнитов (редко). В кремнистых аргиллитах кровельной части свиты фауна не обнаружена [Барабошкин и др., 2022]. Весь разрез свиты содержит редкие агглютинированные раковины фораминифер плохой сохранности, из которых удалось определить виды *Ammodiscus glabratus* Cushman et Jarvis, *Spiroplectammina* ex gr. *kelleri* Dain.

Стратиграфическое положение. Находки представителей ортостратиграфических групп фауны (аммонитов) позволили обосновать присутствие зон нижнего и среднего кампана Западного внутреннего бассейна Северной Америки [Cobban et al., 2006]. Интервал со *Scaphites* (*S.*) *hippocrepis* III сопоставляется с зоной *Scaphites hippocrepis* (нижний кампан), интервал с *Baculites* sp. (гладкий) – с зонами «*Baculites* sp. (smooth)» и «*Baculites* sp. (weak flank ribs)» верхней части нижнего кампана. Интервал с *Baculites obtusus* – с зоной *Baculites obtusus* (средний кампан), интервал с *Baculites mclearni* – с зоной *Baculites mclearni* (средний кампан) [Барабошкин и др., 2022].

Мощность свиты по данным бурения составляет 25 м [Лидер, 1964].

Нижняя часть свиты (около 3 м толщиной) условно сопоставлялась с сантонским ярусом, присутствие которого в бассейне Северной Сосьвы подтверждено находками иноцерамид [Папулов, 1974].

Леплинская свита представлена пачкой светло-серых, белесых однородных опок.

Палеонтологическая характеристика. Породы содержат богатые комплексы диатомовых водорослей, среди которых доминирующая роль принадлежит видам *Pyxilla cretacea* Jouse, *Gladius clavatus* Jouse и *Gl. hispidus* Jouse [Лидер, 1964]. Обнаружен обедненный комплекс агглютинирующих фораминифер, в котором присутствует вид *Spiroplectammina* ex gr. *kelleri* Dain.

Стратиграфическое положение. Ярусная принадлежность леплинской свиты в разрезе обоснована анализом состава комплекса диатомовых водорослей [Лидер, 1964], который имеет большое сходство с комплексами нижнего и среднего кампана и резко отличается от комплекса нижнего палеоцена, на основании чего свита может соответствовать верхнему кампану и маастрихту. Пачка изучена в изолированном блоке, в котором диатомиты согласно перекрывают черные кремнистые аргиллиты усть-маньинской свиты.

На дневной поверхности обнажаются отложения ханты-мансийской и усть-маньинской свит. Разрез, расположенный в 6 км ниже по течению от пос. Усть-Манья (62°10'34,9", 60°25'09,6"), являющийся стратотипическим для усть-маньинской свиты, был переизучен в 2022 г. [Барабошкин и др., 2022].

Стратиграфическое положение. Новые находки представителей ортостратиграфических групп фауны – головоногих моллюсков (бакулитов) позволили уточнить стратиграфическое положение и объем усть-маньинской свиты [Барабошкин и др., 2022] и обосновать присутствие зон нижнего и среднего кампана Западного внутреннего бассейна Северной Америки [Cobban et al., 2006]. Толща относится к нижнему и среднему кампану и сопоставляется с зонами аммонитовой шкалы Северной Америки: *Scaphites hippocrepis*, *Baculites* sp. (гладкий), *Baculites* sp. (со сглаженными ребрами) (нижний кампан), *Baculites obtusus*, *Baculites mclearnii* (средний кампан).

Одновременно со стратиграфо-палеонтологическим изучением этого разреза был выполнен отбор ориентированных образцов для палеомагнитных исследований.

По Е.Ю. Барабошкину исследуемый разрез меловых отложений представлен шестью пачками пород, снизу вверх:

1. Пачка слоистых черных глин (ханты-мансийская свита) с тонкими (1–2 см) прослоями мелкозернистого песка, иногда сцементированного пиритом (мощность 4,2 м). Из этой пачки было отобрано 12 ориентированных образцов для палеомагнитных исследований с размером грани 2 см. Пачки 2–6 отобраны из усть-маньинской свиты.

2. Пачка черных кремнистых алевролитов и аргиллитов мощностью 2,45 м, из которой отобрано пять ориентированных штуфов.

3. Пачка светло-серых, почти белых, рыхлых опок с многочисленными биотурбациями *Phycosiphon* и более редкими *Chondrites*. Мощность 3 м. Из этой пачки отобрано четыре ориентированных штуфа.

4. Пачка темно-серых, до черных, с поверхности – бурых глауконитовых массивных и толстоплитчатых (~1 м) кремнистых песчаников. Породы полностью биотурбированы. Предполагаемая мощность 5–8 м. Из этой пачки отобрано восемь ориентированных штуфов.

5. Пачка чередования темно-серых с поверхности – бурых глауконитовых плитчатых (~0,1–0,5 м) кремнистых песчаников, чередующихся с 5–10 см прослоями черных песчаных и алевритовых глин. Породы полностью биотурбированы. Мощность пачки 3,8 м. Из этой пачки отобрано девять ориентированных штуфов.

6. Пачка толстоплитчатых (0,5–1 м) кремнистых глауконитовых темно-серых, до черных песчаников, с поверхности – бурых. Мощность пачки 8,1 м. Из этой пачки отобрано 14 ориентированных штуфов.

Как упоминалось выше, из этого разреза мощностью 27 м отобрано 50 ориентированных штуфов, из которых изготовлено 138 образцов-кубиков.

Результаты исследований

По магнитным свойствам исследуемые отложения, представленные черными глинами, кремнистыми алевролитами, опоками, кремнистыми песчаниками массивными, толсто- и тонкослоистыми значительно различаются между собой по магнитным свойствам. По величине магнитной восприимчивости (K) наблюдается трехчленное деление исследуемого разреза. Самыми высокими значениями этого параметра характеризуются черные глины (пачка 1), где магнитная восприимчивость изменяется в пределах $7,9\text{--}14,5 \times 10^{-5}$ ед. СИ; самыми низкими значениями этого параметра характеризуются кремнистые алевролиты и опоки (пачки 2 и 3), величины которых составляют $1,0\text{--}4,2 \times 10^{-5}$ ед. СИ; кремнистые песчаники массивные, толсто- и тонкослоистые (пачки 4–6) имеют величины магнитной восприимчивости от $2,5$ до $9,2 \times 10^{-5}$ ед. СИ. Значения естественной остаточной намагниченности (NRM) варьируют от 0,05 до 8,40 мА/м. Самые высокие величины NRM наблюдаются в черных глинах (пачка 1) и в средней части пачки 6 (толстослоистые кремнистые песчаники).

Значения фактора Q_n ниже единицы (за исключением трёх образцов), что типично для детритной природы намагниченности.

По результатам изучения анизотропии установлено, что все породы шести пачек – черные глины, кремнистые алевролиты, опоки, кремнистые песчаники, массивные, толсто- и тонкослоистые – обладают низкой степенью анизотропии магнитной восприимчивости. Показатель магнитной анизотропии R изменяется в пределах (1–1,03), что свидетельствует об изометричной форме магнитных частиц. Значения параметра формы $AMB(T)$ на графике зависимости T от степени анизотропии указывают на преобладание плоскостного типа анизотропии в образцах, что также характерно для осадочных пород.

Магнитная текстура исследуемых отложений соответствуют первичной текстуре осадков – оси магнитных эллипсоидов: длинные ($K1$) и средние ($K2$) равномерно распределены вдоль экватора, а короткие их оси ($K3$) группируются в центре эллипсоидов, что свидетельствует о сохранности первичной намагниченности (рис. 3). По распределению проекций осей эллипсоидов MB определяется геодинамический режим среды осадконакопления. В терригенных отложениях, с которыми мы имеем дело, распределение проекций осей эллипсоидов магнитной восприимчивости является типичным для осадков, формировавшихся в относительно спокойной геодинамической обстановке. В нашем случае все исследованные образцы пород практически изотропны.

Во всех исследованных образцах характер зависимости магнитной восприимчивости от температуры одинаков (рис. 4). В начале процесса нагрева образцов, значения K находятся в нулевой или принудековой области, что свидетельствует об очень слабой магнитной восприимчивости исследуемых пород, а следовательно и низком содержании магнитных минералов. Почти во всех проведенных экспериментах гра-

фики нагрева и охлаждения идентичны. Так, в образцах – 3/2, –11/1, 20/2, 12/2 при нагревании наблюдаются широкие пики в области температур 380–400–430–520–550 °С. При охлаждении во всех этих образцах также наблюдаются идентичные преобразования – сглаженные кривые охлаждения в широкой области температур 550–500–400–100 °С с пиком в области 400–480–500–530 °С.

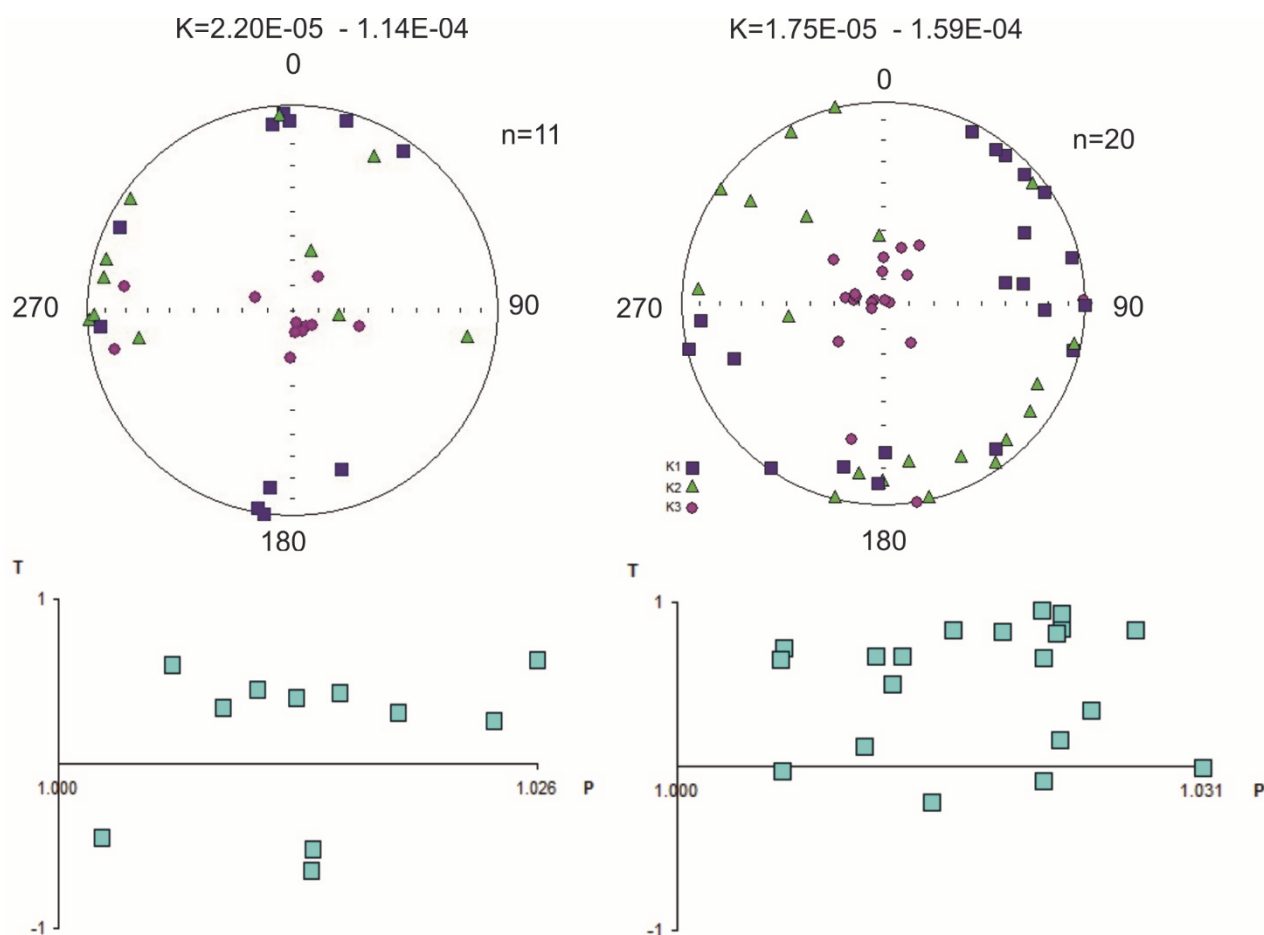


Рис. 3. Распределение осей эллипсоида анизотропии магнитной восприимчивости в породах разреза Усть-Манья

K1 – длинная ось эллипсоида магнитной восприимчивости (синие квадраты), K2 – средняя ось эллипсоида магнитной восприимчивости (зеленые треугольники), K3 – короткая ось эллипсоида магнитной восприимчивости (розовые кружки)

Fig. 3. Distribution of magnetic susceptibility anisotropy ellipsoid axes in Ust-Manya section rocks

K1 is the long axis of the magnetic susceptibility ellipsoid (blue squares), K2 is the middle axis of the magnetic susceptibility ellipsoid (green triangles, K3 is the short axis of the magnetic susceptibility ellipsoid (pink circles)

Проведенный анализ позволяет заключить, что в исследуемых породах содержится пирит и сидерит. При нагревании образуется сильномагнитный магнетит, возможно, маггемит, что приводит к полному исчезновению пирита и сидерита. Диссоциация пирита и сидерита начинается при температурах 450–500–520 °С, вслед за этим фиксируется значительный подъем магнитной восприимчивости, связанный с прохождением

температуры Кюри магнетитом [Буров, Ясонов, 1979; Третяк, 1983]. Пирит и сидерит, не являясь носителями намагниченности, служат поставщиком в состав осадочных пород магнитных образований (гётита, гидрогётита и др.). Подобная картина наблюдалась в исследованных нами верхнемеловых отложениях, вскрытых скважинами, на севере Западной Сибири [Гнибиденко, Маринов, 2023; Левичева и др., 2023].

Палеомагнитное изучение коллекции заключалось в магнитных чистках переменным магнитным полем и температурой. Результатом магнитных чисток является выделение характеристической компоненты намагниченности (ChRM), на основе которой строится палеомагнитный разрез исследуемых отложений. Магнитные чистки переменным магнитным полем проводились до 70–100 мТл с шагом 5–10 мТл (рис. 5). Качество диаграмм Зийдервельда вполне удовлетворительное. Анализ диаграмм позволил выделить двухкомпонентный состав естественной оста-

точной намагниченности – низкокоэрцитивную и высококоэрцитивную, принимаемую нами за характеристическую компоненту (ChRM).

Положительные направления высококоэрцитивной компоненты концентрируются в первой и четвертой четвертях стереограмм, что особенно характерно для пород пачки 1 (черные глины). Эта компонента выделяется в интервале 40–100 мТл. Обратные направления высококоэрцитивной компоненты выделяются на стереограммах в третьей и четвертой четвертях (пачка 5, тонкослоистые кремнистые песчаники).

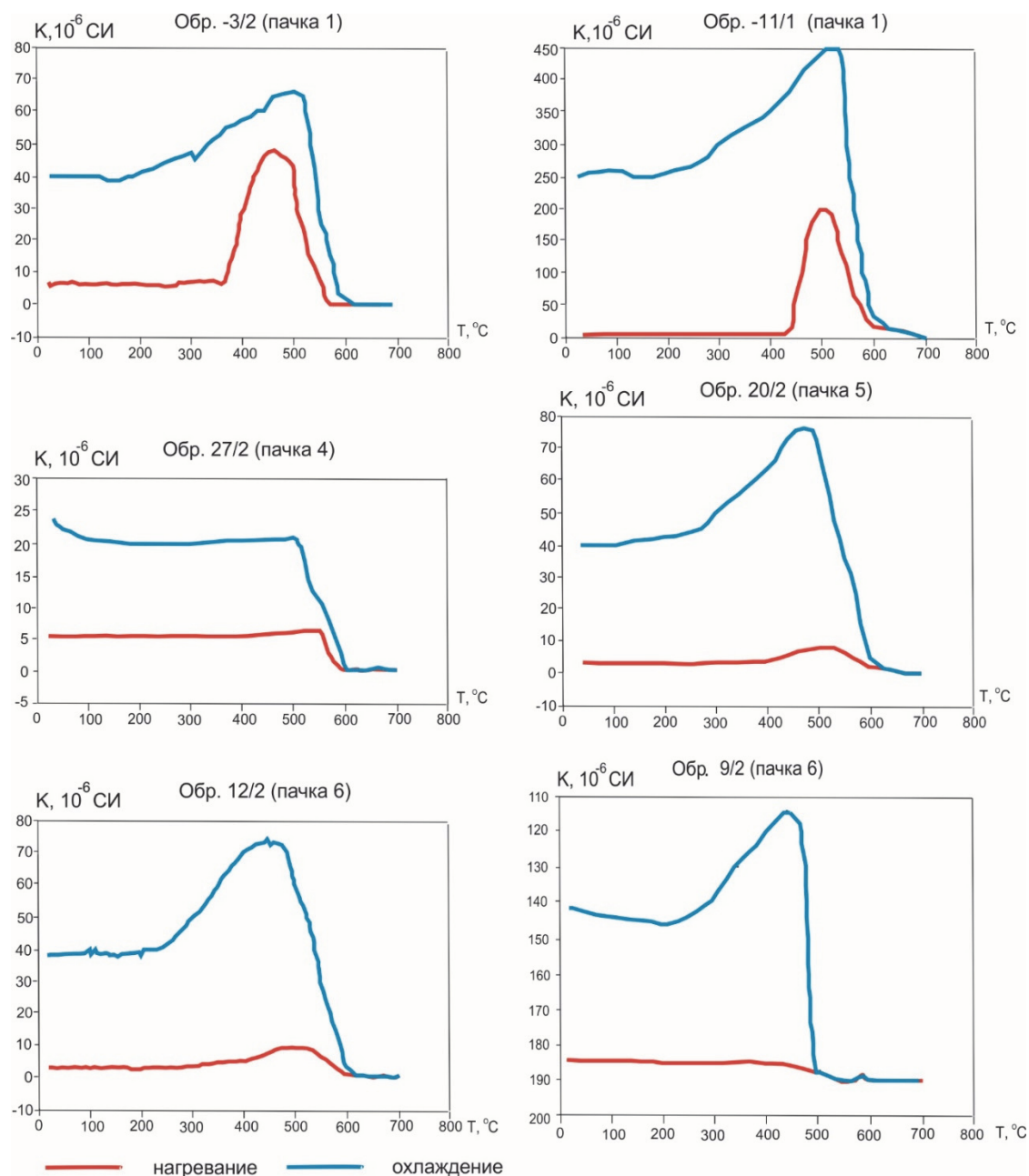


Рис. 4. Зависимость магнитной восприимчивости от температуры в верхнемеловых отложениях разреза Усть-Манья

Fig. 4. Dependence of magnetic susceptibility on temperature in Upper Cretaceous Ust-Manya section

На одном-двух образцах с одного стратиграфического уровня проводилось ступенчатое терморазмагничивание образцов пород с шагом 50–100 °С до 350–600 °С (рис. 5). Из анализа диаграмм Зийдervельда следует, что иногда наблюдается подмагничивание образцов. Отрезки диаграмм или отдельные точки, указывающие на подмагничивание, удалялись или же образцы полностью отбраковывались. Здесь также выделяются две компоненты естественной остаточ-

ной намагниченности – низкотемпературная и высокотемпературная, последняя стремится к началу координат и является характеристической (первичной) компонентой намагниченности. Высокотемпературная характеристическая компонента выделяется у большинства образцов в температурном интервале 300–350–600 °С. Направления этой компоненты группируются главным образом во второй и третьей четвертях стереограммы с умеренными отрицательными наклонениями.

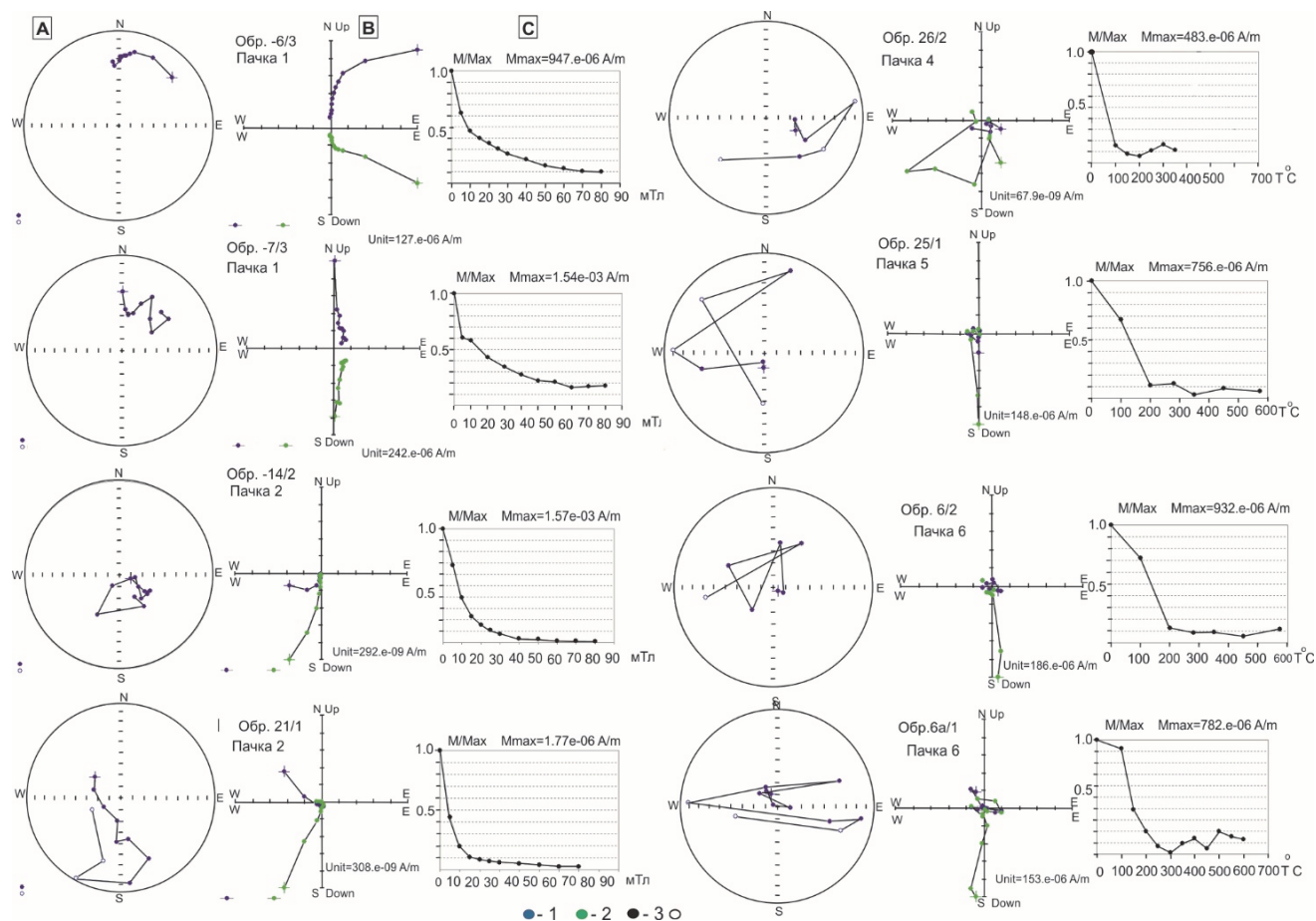


Рис. 5. Результаты компонентного анализа NRM (размагничивание переменным магнитным полем и температурой)

A – полярные стереопроекции, B – диаграммы Зийдervельда, V – кривые спада намагниченности (система tilt). Плоскости: 1 – горизонтальная, 2 – вертикальная; полусферы: 3 – нижняя, 4 – верхняя

Fig. 5. Results of component analysis NRM (demagnetization by alternating magnetic field and temperature)

A – polar stereo projections, B – Zijderveld diagrams, V – magnetization decay curves (tilt system). Planes: 1 – horizontal, 2 – vertical; hemispheres: 3 – lower, 4 – upper

По выделенной характеристической компоненте был построен палеомагнитный разрез меловых отложений (рис. 6). Кремнистые алевролиты, опоки, массивные, тонко- и толстослоистые кремнистые песчаники (пачки 2–6) имеют обратную полярность геомагнитного поля с двумя субзонами прямой намагниченности в пачках 5 и 6. Черные глины (пачка 1) характеризуются прямой полярностью. Таким образом,

в исследуемом разрезе ниже- и верхнемеловых отложений Усть-Манья, с учетом полученных палеонтологических данных о ранне-среднекампанском и позднеальбском возрасте отложений [Барабоскин др., 2022], выделяются две магнитозоны – прямой LK_{1a2} и обратной RK_{2cp1} полярности.

Полученные палеомагнитные данные соответствуют критерию внешней и внутренней сходимости,

т.е. согласуются с известными представлениями о магнитопольярной структуре верхнего альба и нижнего-среднего кампана [Ogg, 2020; Гнибиденко, Маринов, 2023].

Ранне-среднекампанский возраст пород пачек 2–6 и обратная полярность этих отложений, выделенных в магнитозону RK_2sr_1 , позволяют заключить, что эта

магнитозона обратной полярности может быть сопоставлена с хроном $S33g$ шкалы Дж. Огга [Ogg, 2020]. Подстилающие эту обратную магнитозону RK_2sr_1 прямо намагниченные черные глины (магнитозона NK_1al_2 – пачка 1), датируемые средним и поздним альбом, могут быть сопоставлены с хроном $S34$.

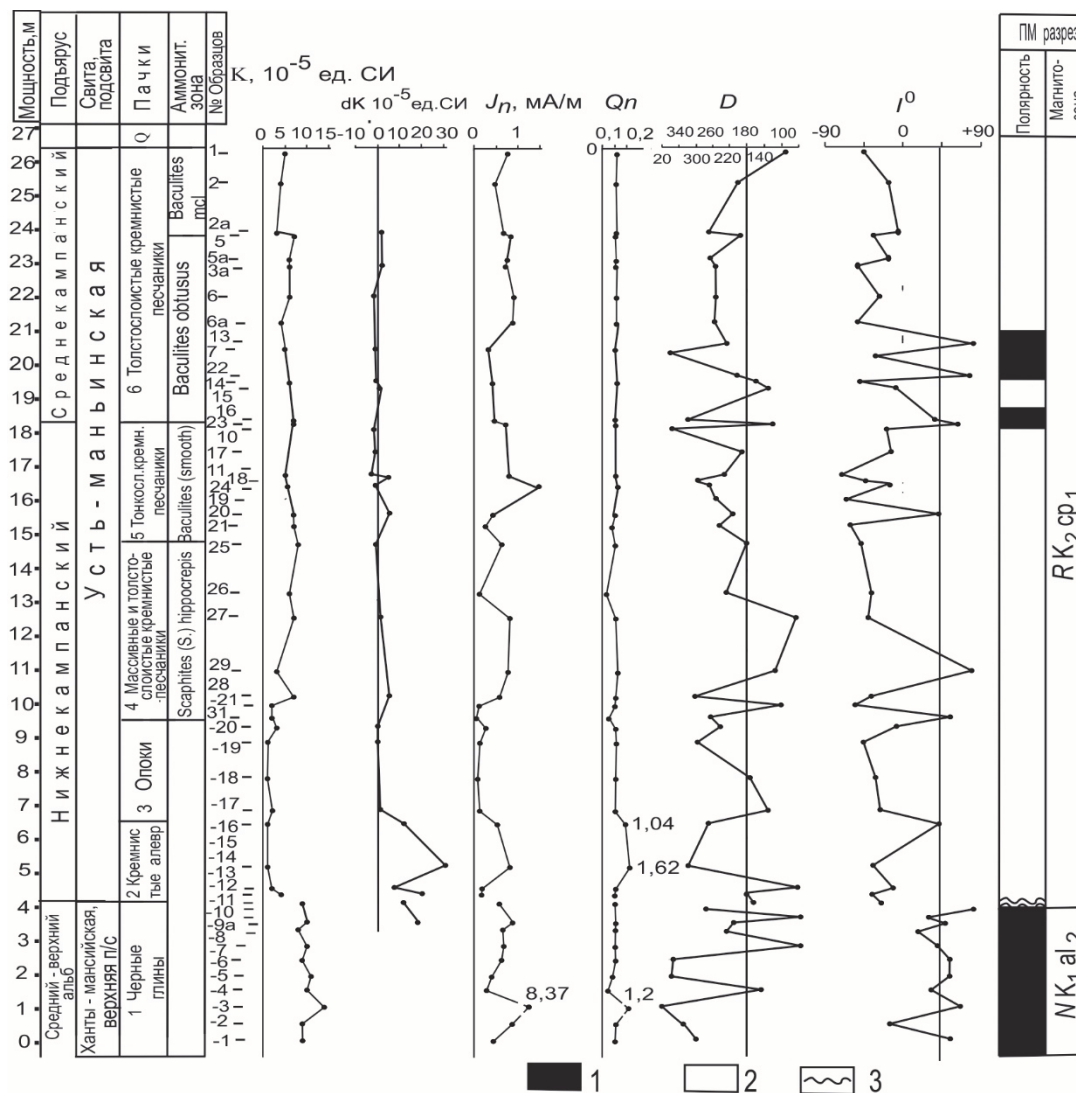


Рис. 6. Магнитостратиграфический разрез ниже- и верхнемеловых отложений разреза Усть-Манья (р. Северная Сосьва, Северный Урал)

Условные обозначения: К – магнитная восприимчивость ($\cdot 10^{-5}$ ед. СИ), dK – температурный прирост магнитной восприимчивости ($\cdot 10^{-5}$ ед. СИ), J_n – характеристическая компонента (ChRM) намагниченности в мА/м, Q_n – фактор Кенигсбергера, D° – магнитное склонение в градусах, I° – магнитное наклонение в градусах; полярности геомагнитного поля: 1 – прямая, 2 – обратная, 3 – перерыв

Fig. 6. Magnetostratigraphic section of the Lower and Upper Cretaceous deposits of the Ust-Manya section (Severnaya Sosva River, Severny Urals)

Legend: K – magnetic susceptibility ($\cdot 10^{-5}$ units. SI), dK – temperature increase of magnetic susceptibility ($\cdot 10^{-5}$ units. SI), J_n – characteristic component (ChRM) of magnetization in mA/m, Q_n – Koenigsberger factor, D° – magnetic declination in degrees, I° – magnetic inclination in degrees; polarity of the geomagnetic field: 1 – normal, 2 – inverse, 3 – hiatus

Заключение

Исследована палеомагнитная коллекция образцов из разреза меловых отложений, расположенного в

6 км от пос. Усть-Манья (бассейн реки Северная Сосьва, северо-запад Западной Сибири). Анализ результатов анизотропии магнитной восприимчивости,

а именно низкая степень АМВ, свидетельствует о первичной текстуре осадков, что говорит о сохранности первичной (характеристической) компоненты естественной остаточной намагниченности. Проанализирована зависимость магнитной восприимчивости от температуры. Установлено, что в исследованных породах содержится пирит и сидерит, которые, не являясь носителями намагниченности, служат поставщиком в состав осадочных пород магнитных образований типа гётита, гидрогётита и других подобных им.

Компонентный анализ, включающий ступенчатое терморазмагничивание, размагничивание переменным магнитным полем и выделение компонент

намагниченности, позволил выявить двухкомпонентный состав естественной остаточной намагниченности, Ступенчатым терморазмагничиванием выделены низкотемпературная и высокотемпературная компоненты; а размагничиванием переменным магнитным полем — низкокоэрцитивная и высококоэрцитивная компоненты намагниченности. На основе выделенной характеристической компоненты разработан палеомагнитный разрез меловых отложений, состоящий из двух магнитозон — прямой $NK_{1a}I_2$ и обратной RK_{2sr1} полярности, идентифицируемых с хронами мировой шкалы магнитной полярности C34 и C33r [Ogg, 2020].

Список источников

- Барабошкин Е.Ю., В.А. Маринов В.А., Семаков Н.Н., Мирзабаев Д.А., Барабошкина Т.А. Новые данные о кампанских отложениях реки Северная Сосьва (С. Урал). Предварительные результаты // Меловая система России и ближнего зарубежья: проблемы стратиграфии и палеогеографии : материалы XI Всерос. совещания, Томск, 19–24 сентября 2022 г. / ред. Е.Ю. Барабошкин. Томск : Изд-во Том. гос. ун-та, 2022. С. 45–49.
- Буров Б.В., Ясонов П.Г. Введение в дифференциальный термомагнитный анализ горных пород. Казань : Изд-во Казан. ун-та, 1979. 160 с.
- Гнибиденко З.Н., Маринов В.А. Региональный магнитостратиграфический разрез верхнего мела севера Западной Сибири // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2023. Т. 18, № 2. 28 с.
- Гнибиденко З.Н., Кузьмина О.Б., Левичева А.В. Региональный магнитостратиграфический разрез верхнего мела и пограничного палеогена юга Западной Сибири: к разработке шкалы геомагнитной полярности мела и пограничного палеогена Западной Сибири // Геология и геофизика. 2020. Т. 61, № 9. С. 1256–1265.
- Гнибиденко З.Н., Левичева А.В., Маринов В.А., Смолянинова Л.Г., Семаков Н.Н. Палеомагнитные исследования верхнемеловых отложений севера Западной Сибири // Материалы 12-ой международной школы-конференции «Проблемы Геокосмоса» Санкт-Петербург, Петергоф, 8–12 октября 2018 г. СПб., 2018. С. 58–63.
- Гнибиденко З.Н., Левичева А.В., Семаков Н.Н., Русанов Г.Г. Палеомагнетизм и магнитостратиграфия верхнемеловых и пограничных мел-палеогеновых отложений юга Кулундинской впадины (Западная Сибирь) // Геология и геофизика. 2017а. Т. 58, № 1. С. 105–117.
- Гнибиденко З.Н., Левичева А.В., Маринов В.А. Палеомагнетизм верхнемеловых отложений северо-востока Западной Сибири (по результатам изучения керна скважин) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 17–21 апреля 2017) : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов : В 4 т. Новосибирск, 2017б. Т. 4. С. 196–201.
- Гнибиденко З.Н., Лебедева Н.К., Левичева А.В. Магнитостратиграфия кампан-маастрихта Бакчарского бассейна (юг Западной Сибири) // Геология и геофизика. 2015. № 11. С. 1868–1882.
- Гнибиденко З.Н., Лебедева Н.К., Шурыгин Б.Н. Региональный магнитостратиграфический разрез верхнемеловых отложений юга Западной Сибири (Омская впадина) // Доклады Академии наук. 2014. Т. 458, № 1. С. 83–87.
- Захаров В.А., Маринов В.А., Агалаков С.Е. Альбский ярус Западной Сибири // Геология и геофизика. 2000. Т. 41, № 6. С. 769–791.
- Левичева А.В., Гнибиденко З.Н., Смолянинова Л.Г., Маринов В.А. Палеомагнетизм верхнего мела центральной части Западной Сибири // Геосферные исследования. 2023. № 3. С. 70–85. doi: 10.17223/25421379/28/6.
- Лидер В.Ф. Материалы по геологии и полезным ископаемым Урала. Геология Северососьвинского бурогоугольного бассейна / ред. К.В. Мокрушин, В.А. Перваго. М. : Недра, 1964. 149 с.
- Молостовский Э.А., Храмов А.Н. Магнитостратиграфия и ее значение в геологии. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1997. 179 с.
- Палеомагнитология. Л. : Недра. 1982. 312 с.
- Папулов Г.Н. Меловые отложения Урала. (Стратиграфия, палеогеография, палеотектоника). М. : Наука, 1974. 202 с.
- Третяк А.Н. Естественная остаточная намагниченность и проблема палеомагнитной стратификации осадочных толщ. Киев : Наукова думка, 1983. 256 с.
- Федоров Е.С. Новые данные по геологии Северного Урала. СПб. : Тип. А. Якобсона, 1889. 20 с.
- Фурсенко А.В. Введение в изучение фораминифер / отв. ред. В.И. Гудина. Новосибирск : Наука, 1978. 242 с.
- Cobban W.A., Walaszczuk I., Obradovich J.D., McKinney K.C. A USGS Zonal table for the Upper Cretaceous middle Cenomanian-Maastrichtian of the Western Interior of the United States based on ammonites, inoceramids, and radiometric ages, U.S. Geological Survey. 2006. Open-File Report 2006–1250. 46 p.
- Ogg J.G. Geomagnetic Polarity Time Scale // Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M.B., Ogg G.M. Geologic Time Scale 2020. V. 2. Amsterdam, Oxford, Cambridge : Elsevier, 2020. P. 159–192.
- Zijderveld J.D.A. A.C. demagnetization of rocks: analysis of results // Methods in paleomagnetism. Amsterdam, 1967. P. 254–286.

References

- Baraboshkin E.Yu., Marinov V.A., Semakov N.N., Mirzabaev D.A., Baraboshkina T.A. *Novyye dannyye o kampaniskikh otlozheniyakh reki Severnaya Sos'va (S. Ural). Predvaritel'nyye rezul'taty* [New data on the Campanian deposits of the Severnaya Sosva River (Northern Urals). Preliminary results] // The Cretaceous system of Russia and neighboring countries: problems of stratigraphy and paleogeography. Ed. Baraboshkin E. Yu. Proc. XI All-Russian Conference, Tomsk, September 19–24, 2022 Tomsk: Publishing House of Tomsk State University, 2022. pp. 45–49. In Russian
- Burov B.V., Yasonov P.G. *Vvedeniye v differentsial'nyy termomagnitnyy analiz gornyykh porod* [Introduction to differential thermomagnetic analysis of rocks]. Kazan: Kazan University Publishing House, 1979, 160 p. In Russian
- Gnibidenko Z.N., Marinov V.A. *Regional'nyy magnitostратиграфический разрез верхнего мела севера Западной Сибири* [Regional magnetostratigraphic section of the Upper Cretaceous in the north of Western Siberia] // *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika* [Oil and Gas Geology. Theory and Practice]. 2023. V. 18, No. 2. 28 p. In Russian
- Gnibidenko Z.N., Kuzmina O.B., Levicheva A.V. Regional magnetostratigraphic section of the Upper Cretaceous and boundary Paleogene of the south of Western Siberia: towards the development of a geomagnetic polarity scale for the Cretaceous and boundary Paleogene of Western Siberia // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2020. V. 61. No. 9. pp. 1256–1265. In Russian
- Gnibidenko Z.N., Levicheva A.V., Marinov V.A., Smolyaninova L.G., Semakov N.N. *Paleomagnitnyye issledovaniya verkhnemelovykh otlozheniy severa Zapadnoy Sibiri*. [Paleomagnetic studies of the Upper Cretaceous deposits of the north of Western Siberia] / Proceedings of the 12th International School-Conference "Problems of Geocosmos" St. Petersburg, Peterhof, October 8–12, 2018 St. Petersburg. 2018. pp. 58–63. In Russian
- Gnibidenko Z.N., Levicheva A.V., Semakov N.N., Rusanov G.G. Paleomagnetism and magnetostratigraphy of the Upper Cretaceous and boundary Cretaceous-Paleogene deposits of the south of the Kulunda Depression (Western Siberia) // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2017a. V. 58. No. 1. pp. 105–117. In Russian
- Gnibidenko Z.N., Levicheva A.V., Marinov V.A. *Paleomagnetizm verkhnemelovykh otlozheniy severo-vostoka Zapadnoy Sibiri (po rezul'tatam izucheniya kerna skvazhin)* [Paleomagnetism of Upper Cretaceous deposits in the northeast of Western Siberia (based on the results of borehole core study)] // Interexpo GEO-Siberia-2017. XIII Int. scientific congress (Novosibirsk, April 17–21, 2017): Int. scientific conf. "Subsoil use. Mining. Directions and technologies for prospecting, exploration and development of mineral deposits. Economy. Geoecology": Collection of materials in 4 vol. 2017b. V. 4. pp. 196–201. In Russian
- Gnibidenko Z.N., Lebedeva N.K., Levicheva A.V. Magnetostratigraphy of the Campanian-Maastrichtian Bakchar Basin (south of Western Siberia) // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2015. No. 11. pp. 1868–1882. In Russian
- Gnibidenko Z.N., Lebedeva N.K., Shurygin B.N. Regional magnetostratigraphic section of Upper Cretaceous deposits in the south of Western Siberia (Omsk Depression) // *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences]. 2014. V. 458. No. 1. pp. 83–87. In Russian
- Zakharov V.A., Marinov V.A., Agalakov S.E. Albion Stage of Western Siberia // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2000. 41. No. 6. pp. 769–791. In Russian
- Levicheva A.V., Gnibidenko Z.N., Smolyaninova L.G., Marinov V.A. Magnetostratigraphy of the Upper Cretaceous of the central part of Western Siberia // *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2023. 3. pp. 70–85. doi: 10.17223/25421379/28/6. In Russian
- Leader V.F. *Materialy po geologii i poleznym iskopayemym Urala. Geologiya Severosivinskogo burougol'nogo basseyna* [Materials on the geology and mineral resources of the Urals. Geology of the Severosivinsky brown coal basin]. Mokrushin K.V., Pervago V.A. (eds.). Moscow: Nedra. 1964. 149 p. In Russian
- Molostovsky E.A., Khramov A.N. *Magnitostратиграфия i ee znachenie v geologii. Saratov. Izd. Saratovskogo universiteta* [Magnetostratigraphy and its importance in geology]. Saratov: Publishing House of Saratov University, 1997. 179 p. In Russian
- Paleomagnitologiya* [Paleomagnetology]. Leningrad: Nedra, 1982. 312 p. In Russian
- Papulov G.N. *Melovyye otlozheniya Urala. (Stratigrafiya, paleogeografiya, paleotektonika)* [Cretaceous deposits of the Urals. (Stratigraphy, paleogeography, paleotectonics)]. Moscow: Nauka, 1974. 202 p. In Russian
- Tretyak A.N. *Estestvennaya ostatochnaya namagnichennost' i problema paleomagnitnoy stratifikatsii osadochnykh tolshch* [Natural residual magnetization and the problem of paleomagnetic stratification of sedimentary strata]. Kyiv: Naukova Dumka, 1983. 256 p. In Russian
- Fedorov E.S. *Novyye dannyye po geologii Severnogo Urala* [New data on the geology of the Northern Urals]. St. Petersburg: type. A. Yakobson, 1889. 20 p. In Russian
- Fursenko A.V. *Vvedeniye v izucheniye foraminifer* [Introduction to the study of foraminifera]. V.I. Gudina (ed.), Novosibirsk: Nauka, SB RAS USSR, 1978. 242 p. In Russian
- Cobban W.A., Walaszczyk I., Obradovich J.D., McKinney K.C. A USGS Zonal table for the Upper Cretaceous middle Cenomanian-Maastrichtian of the Western Interior of the United States based on ammonites, inoceramids, and radiometric ages, U.S. Geological Survey. 2006. Open-File Report 2006–1250. 46 p.
- Ogg J.G. Geomagnetic Polarity Time Scale // In: Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M.B., Ogg G. M. Geologic Time Scale 2020. V. 2. Amsterdam, Oxford, Cambridge: Elsevier. 2020. pp. 159–192.
- Zijderveld J.D.A. A.C. demagnetization of rocks: analysis of results // *Methods in paleomagnetism*. Amsterdam. 1967. pp. 254–286.

Информация об авторах:

Гнибиденко З.Н., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука, Новосибирск, Россия.

E-mail: gnibidenkozn@ipgg.sbras.ru

Маринов В.А., кандидат геолого-минералогических наук, эксперт, Тюменский государственный университет, старший научный сотрудник, Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия.

E-mail: vamarinov@tnnc.rosneft.ru

Левичева А.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука, Новосибирск, Россия.

E-mail: levichevaav@ipgg.sbras.ru

Семаков Н.Н., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука, Новосибирск, Россия.
E-mail: semakovnn@ipgg.sbras.ru

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

Information about the authors:

Gnibidenko Z.N., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia.
E-mail: gnibidenkozn@ipgg.sbras.ru.

Marinov V.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Expert, Tyumen State University, Senior Researcher, Tyumen Petroleum Scientific Center, Tyumen, Russia.
E-mail: vamarinov@tnnc.rosneft.ru.

Levicheva A.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia.
E-mail: levichevaav@ipgg.sbras.ru

Semakov N.N., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia.
E-mail: semakovnn@ipgg.sbras.ru

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

Статья поступила в редакцию 02.04.2024; одобрена после рецензирования 10.02.2025; принята к публикации 29.08.2025

The article was submitted 02.04.2024; approved after reviewing 10.02.2025; accepted for publication 29.08.2025

Научная статья

УДК 551.73; 470.51/.54

doi: 10.17223/25421379/36/2

ПОГРАНИЧНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ СРЕДНЕГО И ВЕРХНЕГО ДЕВОНА В РАЗРЕЗЕ «ПОКРОВСКОЕ» (ВОСТОЧНЫЙ СКЛОН СРЕДНЕГО УРАЛА). ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ И НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ



Ольга Павловна Тельнова¹, Семён Александрович Дуб², Олег Юрьевич Мельничук³,
Ольга Викторовна Артюшкова⁴, Ирина Олеговна Евдокимова⁵

¹ Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН им. Н.П. Юшкина, Сыктывкар, Россия

^{2,3} Институт геологии и геохимии УрО РАН им. А.Н. Заварицкого, Екатеринбург, Россия

⁴ Институт геологии УФИЦ РАН, Уфа, Россия

⁵ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

¹ telnova@geo.komisc.ru

² sapurin@igg.uran.ru

³ melnichuk@igg.uran.ru

⁴ stpal@ufaras.ru

⁵ Irina_Evdokimova@karpinskyinstitute.ru

Аннотация. Представлены результаты новых исследований пограничных средне-верхнедевонских отложений в разрезе «Покровское» в Артёмовском районе Свердловской области. Охарактеризовано современное состояние разреза, описаны литологические особенности карбонатных пород высотинского и бродовского горизонтов. Впервые из средне-верхнедевонских отложений восточного склона Среднего Урала выделены споры высших растений. Таксономический состав палиноспектров сходен с одновозрастным на Русской платформе, что свидетельствует о принадлежности растительных сообществ одной палеофлористической области. Разрез может претендовать на роль опорного для обоснования дискуссионной границы среднего и верхнего отделов девона (соответственно, живецкого и франского ярусов) на Урале и её корреляции с разрезами других регионов.

Ключевые слова: Восточно-Уральская мегазона, средний и верхний девон, пограничные отложения, палеонтология, биостратиграфия, литология

Благодарности: Авторы выражают благодарность А.Г. Сажиной (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар) за высококвалифицированную работу, которая позволила выделить споры на палинологический анализ из отложений, ранее считавшихся неперспективными.

Источник финансирования: Исследования выполнены в рамках Государственного задания (НИР) ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (№ 122040600008-5), ИГТ УрО РАН (№ 123011800013-6), ИГ УФИЦ РАН («Основные события фанерозоя: палеонтология, стратиграфия, корреляция», № НИОКТР FMRS-2022-0010) и Института Карпинского.

Для цитирования: Тельнова О.П., Дуб С.А., Мельничук О.Ю., Артюшкова О.В., Евдокимова И.О. Пограничные отложения среднего и верхнего девона в разрезе «Покровское» (восточный склон Среднего Урала). История изучения и новые результаты исследований // Геосферные исследования. 2025. № 3. С. 19–40. doi: 10.17223/25421379/36/2

Original article

doi: 10.17223/25421379/36/2

MIDDLE AND UPPER DEVONIAN BOUNDARY UNITS IN «POKROVSKOE» SECTION (MIDDLE URALS EASTERN SLOPE). HISTORY OF STUDY AND NEW RESEARCH RESULTS

Olga P. Tel'nova¹, Semyon A. Dub², Oleg Yu. Mel'nychuk³, Olga V. Artyushkova⁴, Irina O. Evdokimova⁵

¹ Institute of Geology Komi Scientific Centre, UB RAS, Syktyvkar, Russia

^{2,3} Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, Yekaterinburg, Russia

⁴ Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia

⁵ All-Russian Geological Research Institute of A.P. Karpinsky, Saint Petersburg, Russia

¹ telnova@geo.komisc.ru

² sapurin@igg.uran.ru

³ melnichuk@igg.uran.ru

⁴ stpal@ufaras.ru⁵ Irina_Evdokimova@karpinskyinstitute.ru

Abstract. The results of new studies of the Middle-Upper Devonian boundary deposits in the Pokrovskoye section (the Artyomovsky district, Sverdlovsk region) are presented. The section can claim to be a reference for substantiating the debatable boundary of the Middle and Upper Devonian (=Givetian and Frasnian stages) in the Urals and its correlation with sections of other regions. The first research results are encouraging: the Vysotinka and Brodovka regional substages are clearly identified, the presence of fauna and microflora with correlation potential is confirmed.

Current state of the section (outcrops location and composition) is characterized. Lithological features of Vysotinka and Brodovka regional substages carbonate rocks are described. Vysotinka Regional Substage deposits represented by platy coarse-granular grading bedding limestones with siliciclastic admixture, with abundant remains of pelagic fauna, as well as with brachiopods, amphipores, corals, tentaculites and ostracods at higher levels of the section. The Brodovka Regional Substage contains beds with carbonate breccia, bodies of organogenic stromatoporoid build-ups, and intervals of thick bedded fine-grained limestones with numerous brachiopods (shell banks) and scattered segments of crinoids.

Higher plant spores from the Middle-Upper Devonian boundary units of the Middle Urals eastern slope were extracted for the first time, which made it possible to determine the age of the host rocks with detail down to the regional substage. The taxonomic composition similarity of the palynocomplex (PC) from the «Pokrovskoe» section with the PC of the Russian Platform Mullino Regional Substage may indicate that the plant communities belonged to the same paleofloristic region. Therefore, these plants spores preserved under different sedimentary environments allow for interregional correlations. Rock samples are contaminated by Jurassic microfossils, which is due to the development of paleokarst deposits (terra rossa) in limestone voids.

Keywords: East-Uralian megazone, Middle and Upper Devonian, boundary deposits, paleontology, biostratigraphy, sedimentology

Acknowledgments: Authors appreciate highly skilled work of A.G. Sazhina (IG Komi SC UB RAS, Syktyvkar), which made it possible to extract spores from rocks previously considered unpromising for palynological analysis.

Source of financing: The study is done on state assignment of IG Komi SC UB RAS (№ 122040600008-5), IGG UB RAS (№ 123011800013-6), IG UFRS RAS («Key Phanerozoic events: paleontology, stratigraphy, correlation, RDTW № FMRS-2022-0010») and Karpinsky Russian Geological Research Institute.

For citation: Tel'nova O.P., Dub S.A., Mel'nichuk O.Yu., Artyushkova O.V., Evdokimova I.O. (2025) Middle and Upper Devonian boundary units in «Pokrovskoe» section (Middle Urals Eastern Slope). History of study and new research results. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 19–40. (In Russian) doi: 10.17223/25421379/36/2

Введение

Граница среднего и верхнего девона на территории Русской платформы и Урала – это наиболее спорный рубеж в девоне, требующий комплексного обоснования (палеонтологического, литологического, изотопно-геохимического и др.) и высокой детальности исследований с привлечением современного инструментария [Ziegler, Klapper, 1985; Sandberg et al., 1989; Решение..., 1990; Тельнова, 2007; Ovnatanova, Kononova, 2008; Постановления..., 2008; Соболев, Евдокимова, 2013; Фортунатова и др., 2013; Becker et al., 2020; Артюшкова и др., 2022; Евдокимова, 2023; Тельнова, Шумилов, 2023]. В качестве «полигона» для уточнения уровня этой границы мы предлагаем разрез «Покровское» в Артёмовском районе Свердловской области. Доступность, полная стратиграфическая последовательность отложений, высокое таксономическое разнообразие микро- и макрофоссилий различных групп организмов являются аргументами, позволяющими рассматривать данный разрез в качестве опорного для обоснования дискуссионной границы на Урале и её корреляции с разрезами Русской платформы и других регионов.

Современный восточный склон Урала соответствует океаническому сектору палеобассейна [Пучков, 2000; Иванов, Пучков, 2022], что принципиально отличает его от западного склона (край Русской платформы).

Верхнепалеозойские карбонатные последовательности восточного склона характеризуются отсутствием или непродолжительностью перерывов в седиментации и являются уникальными в мировом масштабе [Чувашов и др., 1984; Наседкина, Зенкова, 1999].

В мае 2023 г. авторами настоящей статьи проведены полевые рекогносцировочные работы на разрезе «Покровское». Следует отметить, что со времени изучения разреза в 1990–2010-х гг. [Наседкина и др., 1990а, 1990б; Бикбаев, Снитирева, 1998, 2016; Наседкина, Бороздина, 1999; Бикбаев и др., 2002, 2013, 2014] в окрестностях с. Покровское многое изменилось. Поэтому на данный момент заново проведено полевое описание доступных выходов пород средне-позднедевонского возраста, отобраны образцы для палеонтологических, литологических и геохимических исследований.

Приоритетными задачами наших исследований являются разработка высокоразрешающих зональных шкал по микрофоссилиям с целью установления современного уровня границы среднего и верхнего девона, выявление фациальной принадлежности комплексов органических остатков, а также увязка данных биостратиграфии с вариациями изотопного состава углерода в известняках. Итогом работ ожидается обновление стратиграфической схемы девона рассматриваемого интервала.

Геологическая позиция

Разрез «Покровское» находится на восточном склоне Среднего Урала. Геологически он приурочен

к юго-восточной периферии Режевской подзоны (рис. 1) Алапаевско-Теченской зоны (мегасинклиниория), являющейся важнейшей структурно-тектонической единицей Восточно-Уральской мегазоны.

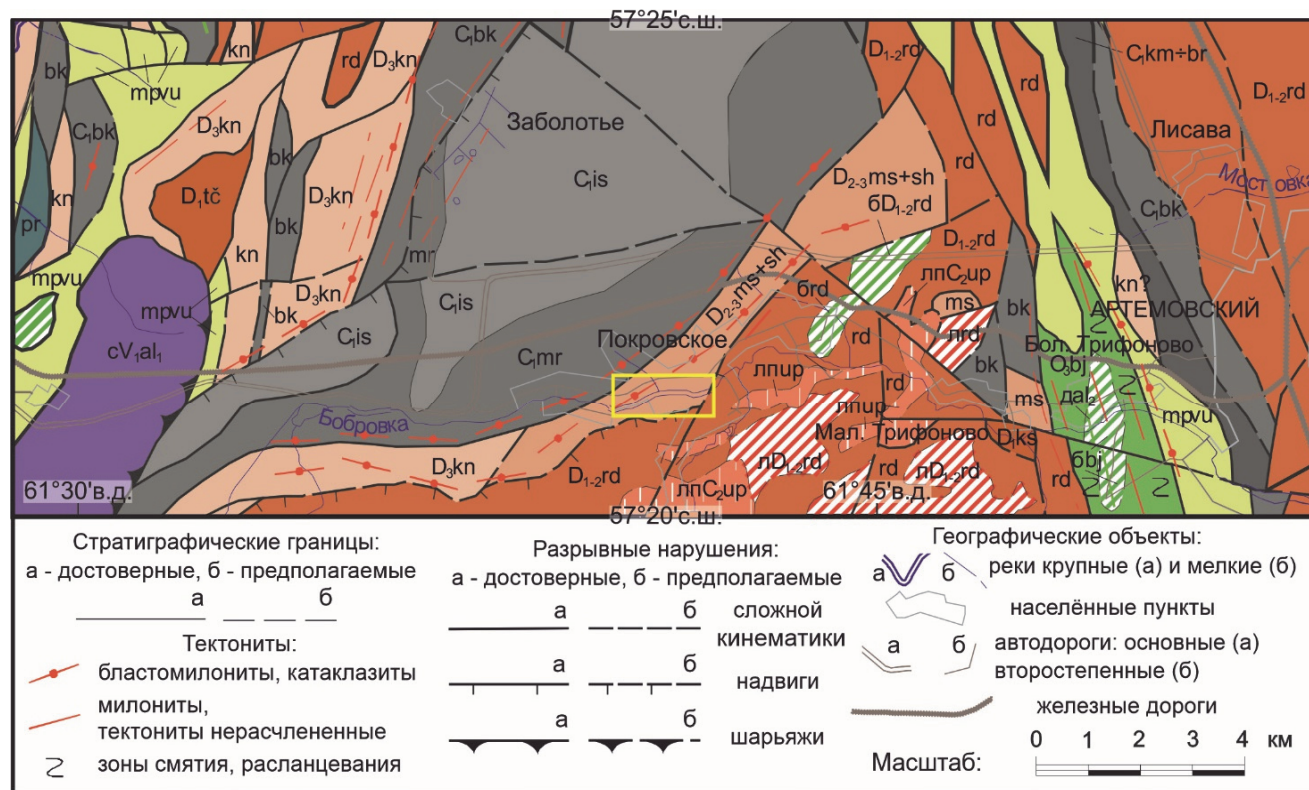


Рис. 1. Геологическая позиция разреза «Покровское»: юго-восток Режевской подзоны

Алапаевско-Теченской зоны восточного склона Урала. Фрагмент карты доюрских образований листа

О-41-XX по [Казаков и др., 2016], с изменениями [Субрегиональная..., 1993; Информационный..., 2002ф; Кучева, Степанова, 2004; Коровко, 2005; Мизенс и др., 2007, 2012; Степанова и др., 2008; Мельничук, 2022] Условные обозначения: D1tč – теченская толща (вулканиты и их туфы) нижнего девона; D1ks – кислянская толща (известняки) нижнего девона; dD1-2al – породы Алтынайского диорит-плагиигранитного комплекса нижнего-среднего девона; D1-2rd – рудьянская толща вулканических пород нижнего-среднего девона, эбD1-2rd, лD1-2rd, бD1-2rd, зпD1-2rd – субвулканические образования рудьянского базальт-андезит-риолитового вулканического комплекса; D2-3mm – маминская толща (базальты, андезитобазальты и их туфы, глинисто-кремнистые отложения) среднего-верхнего девона; D2-3ms – масленниковская толща (карбонатные и терригенно-карбонатные породы – известняки серые и красновато-серые зернистые плитчатые высотинского горизонта и неотчётливо-слоистые бродовского горизонта) среднего-верхнего девона; D3sh – сохарёвская толща (известняки) верхнего девона (губинский горизонт франского яруса и шамейский, чепчуговский и хвощёвский горизонты фаменского яруса); D3kn – кондихинская толща (конгломераты, гравелиты, песчаники, вулканогенно-обломочные породы, а также андезиты и базальты и их туфы) верхнего девона; расположение разреза показано жёлтым прямоугольником

Fig. 1. «Pskrovskoe» section geological position: southeast of the Rezh subzone (Alapaevsk-Techa zone) in the Urals eastern slope. Part of the pre-Jurassic units map, sheet O-41-XX after [Kazakov et al., 2016], modified with [Subregional'naya..., 1993; Informationsionnyj..., 2002f; Kucheva, Stepanova, 2004; Korovko, 2005; Mizens et al., 2007, 2012; Stepanova et al., 2008; Mel' nichuk, 2022]

Legend: D1tč – Lower Devonian Techa Fm (volcanic rocks and tuffs); D1ks – Lower Devonian Kislyanka Fm (limestones); dD1-2al – Lower–Middle Devonian rocks of the Altynaj greenstone-plagiogranite complex; D1-2rd – Lower–Middle Devonian Rudyanka Fm volcanic rocks, эбD1-2rd, лD1-2rd, бD1-2rd, зпD1-2rd – subvolcanic rocks of the Rudyanka basalt-andesite-rhyolite volcanic complex; D2-3mm – Middle–Upper Devonian Maminskoye Fm (basalts andesite-basalts and their tuffs, siliceous rocks); D2-3ms – Middle–Upper Maslennikovo Fm (carbonate and siliciclastic-carbonate rocks – Vysotinka Regional Substage grey and reddish-grey coarse-grained grading bedded limestones and Brodovka Regional Substage thick-bedded limestones); D3sh – Upper Devonian Sokharevo Fm (Frasnian Gubinsky Regional Substage and Famennian Shameika, Chepchugovo, Khovoshevka regional substages limestones); D3kn – Upper Devonian Kondikhino Fm (conglomerates, sandstones, volcanic-siliciclastic rocks, also andesites and basalts, and their tuffs); studying section position highlighted by yellow outline

Режевская подзона серий разломов разбита на блоки, вытянутые, как правило, в субмеридиональном направлении [Информационный..., 2002ф; Степанова и др., 2008; Казаков и др., 2016]. Карбонатные отложения верхов среднего и низов верхнего девона приурочены к Покровскому (Покровско-Мироновскому) блоку, с востока ограниченному Алапаевско-Челябинским сбросо-сдвигом. В пределах этого блока контакт с нижнекаменноугольными известняками тектонический, он проходит по так называемому Бобровскому надвигу (Бобровской дислокационной зоне) [Степанова и др., 2008; Казаков и др., 2016] (см. рис. 1).

На восточном склоне Среднего Урала и, в частности, в Режевской подзоне, распространены месторождения и рудопроявления бокситов и бурых железняков. Некоторые из них сформировались в позднем палеозое, но большая часть имеет мезозойский возраст (как правило, относятся к алапаевской толще и синарской свите нижнего мела) и приурочена к областям развития карбонатного карста [Гладковский, Шарова, 1951; Информационный..., 2002ф; Петров и др., 2011; Казаков, 2016]. По всей видимости, красноцветная окраска карбонатных толщ во многих случаях (особенно в живетской части рассматриваемого разреза) обусловлена процессами проявления палеокарста и неравномерного распределения нерастворимого остатка коры выветривания в полостях и трещинах карбонатных пород (*terra rossa*).

История геологического изучения девонских отложений разреза «Покровское»

Первое профессиональное описание известняков, обнажающихся в пределах с. Покровское на р. Бобровке (Егоршинской), и встречающейся в них фауны было составлено академиком А.П. Карпинским: «здесь найдены остатки трилобитов, цефалопод (гониятитов и ортоцератитов), птеропод (*Hyolites*, *Tentaculites* и *Styliola* [*Styliola*]), гастропод, брахиопод, бриозой, кораллов, а также ископаемых, положение которых в ряду организмов остается загадочным» [1949, с. 182]. При этом наиболее подробно были охарактеризованы фоссилии, которые в то время относились к птероподам [Karpinsky, 1884]. По-видимому, в цитируемой работе описана фауна известняков живетского яруса.

Изучение геологического строения территории в конце XIX в. было актуальным в связи с поиском месторождений каменных углей. Благодаря помощи геолога Ф.Н. Чернышёва и горного инженера Ф.Ю. Гебауэра, А.П. Карпинскому удалось выделить в этом районе две разновозрастные карбонатные толщи, разделенные тектоническим нарушением [Карпинский, 1884]: отложения в черте с. Покровское

были отнесены к девону, а известняки вблизи д. Сосновка (сейчас это западная часть с. Покровское [Брылин, Коверда, 1998]) – к карбону, что подтвердилось при дальнейшем изучении территории [Пронин, 1960; Постоялко, Черепанова, 1990; Степанова, Постоялко, 2012].

Первые исследователи совершенно справедливо обращали внимание на красноватую окраску известняков, присутствие среди них прослоев красноцветных глин и зернистую (песчаную) структуру пород в основании разреза [Карпинский, 1949, с. 181], но считали эти отложения нижнедевонскими [Чернышев, 1893]. При более поздних исследованиях, уже в советское время, было установлено, что нижняя часть разреза соответствует живетскому ярусу среднего девона [Гладковский, 1943; Пронин, 1950; Гладковский, Шарова, 1951].

Известным уральским геологом А.А. Прониным [1950] на основании литологии и состава органических остатков живетские отложения были подразделены на четыре «горизонта». Самый нижний «горизонт» мощностью до 1,5 м представлен вишнево-красными известняками с фауной, описанной А.П. Карпинским. Здесь также были обнаружены трилобиты и разнообразные гониятиты родов *Anarcestes*, *Agoniatites*, *Foordites* (определения А.К. Наливкиной). Ко второму «горизонту» отнесена изменчивая по литологическому составу толща мощностью 60–70 м, состоящая либо целиком из обломочных пород, либо, наоборот, преимущественно из карбонатных пород с многочисленными органическими остатками, главным образом кораллами и брахиоподами [Пронин, 1950, с. 28]. Третий «горизонт» мощностью около 100 м сложен белыми и розоватыми известняками с разнообразной фауной брахиопод. Четвёртый «горизонт» живетского яруса представлен тёмными плотными известняками с многочисленными амфипорами. Выше описана толща светлых, иногда розоватых слоистых и массивных известняков мощностью в несколько сотен метров [Пронин, 1950], отнесённая на основании определений фауны Б.П. Марковским и Е.Д. Сошниковой (с. 31) к нижнему франу¹. Перекрывающие отложения А.А. Пронин [1950, 1960] относил к турнейскому ярусу.

По результатам выяснения перспектив территории на бокситоносность, А.К. Гладковским и А.К. Шаровой было показано [1951], что красным цветом породы разреза обязаны высокому содержанию оксидов железа и алюминия, при этом наибольшей концентрации (22 %) последние достигают в гониятитовых слоях нижней части толщи. Упомянутыми авторами предполагается перерыв в осадкообразовании (с которым они связывали образование среднеуральских бокситов) между живетскими отложениями и известняками эйфеля, также встречающимися в этом районе. Отмечается, что в живетском интервале разреза широко распространены

брахиоподы *Leiorhynchus kelloggi* Hall (выделены «пиоринхусовые слои»).

Достаточно детальная геологическая карта окрестностей с. Покровского, с полями распространения как девонских, так и каменноугольных известняков, была составлена А.А. Прониным [1960, с. 35]. Построением палеогеографических карт раннего и среднего девона Урала занимались геологи В.П. Мухина и В.П. Шуйский [1965ф]. Литолого-палеогеографическое изучение средне- и верхнедевонских отложений проводили Б.А. Шнейдер и Д.И. Ширшова [1973ф]. Позже Г.А. Смирновым и соавт. [1974] охарактеризована палеогеография франского века Среднего и Южного Урала. Отложения этого времени в рассматриваемом разрезе расчленены ими на два подъяруса, при этом карбонатно-терригенные (?) отложения нижнего подъяруса (мощностью 8 м) сопоставлены с пашийской свитой западного склона Урала, а к верхнему подъярусу (более 80 м) отнесены как розоватые рифогенные известняки с инкрустациями и брахиоподами, так и тёмно-серые слоистые известняки с амфипорами, строматопорами и тентакулитами [Смирнов и др., 1974].

По результатам поисковых работ на бокситы и тематических исследований Палеонтолого-стратиграфической партии УГСЭ в 1970-х гг. вышла серия публикаций по среднему девону [Брейвель и др., 1972, 1985; Зенкова, 1985] и разработана схема стратиграфии ниже- и среднедевонских образований восточного склона Урала III поколения [Региональная..., 1980]. Впервые для Восточно-Уральского субрегиона были выделены региональные стратиграфические подразделения, в том числе высотинский горизонт в объёме верхней части живетского яруса (в более поздних схемах 1993 г. основание высотинского горизонта скоррелировано уже с подошвой живетского яруса). Интервал верхнего девона расчленен на горизонты не был [Региональная..., 1980].

В 1980-х гг. в рамках подготовки IV поколения стратиграфических схем Урала детальные литолого-стратиграфические исследования были сосредоточены на карбонатных разрезах восточного склона Среднего Урала. Удалось впервые расчленить франские отложения, в которых выделены бродовский [Брейвель и др., 1989] и губинский [Наседкина и др., 1990 а, б] горизонты, названные по притокам р. Бобровки – р. Бродовке и Губинскому логу соответственно. Для этих региональных подразделений разрез «Покровское» является стратотипическим. Бродовский горизонт установлен в объёме брахиоподовой лонь² *Hypothyridina semilukiana* [Брейвель и др., 1989]. Губинский горизонт охарактеризован большим комплексом органических остатков – фораминифер, брахиопод, конодонтов, табулят, строматопоридей, остракод и известковых водорослей/кальцимикробов [Наседкина и др., 1990б].

Под общим руководством В.А. Наседкиной (УГСЭ) была детально изучена геология района (полевые работы 1988–1990 гг. и 1997 г.), разрез расчленен на пачки, получена его комплексная биостратиграфическая характеристика, выделены конодонтовые зоны. Определением фораминифер занималась Л.Г. Петрова, водорослей – Д.И. Ширшова, строматопорат – А.Р. Глебов и О.В. Богоявленская, табулят – Ф.Е. Янет, ругоз – М.В. Шурыгина, брахиопод – И.А. Брейвель и Н.М. Брейвель, трилобитов – Н.Я. Анцыгин, остракод – Г.Г. Зенкова, криноидей – В.С. Милицина, конодонтов – В.А. Наседкина, Г.Н. Бороздина и Е.А. Таштимирова [Наседкина и др., 1990б; Наседкина, Бороздина, 1999]. Исходя из структурно-текстурных особенностей пород, разрез расчленен на 10 пачек. Пачки I–IX выделены в естественных выходах и расчистках, пачка X вскрыта скважиной № 18 [Шнейдер, Ширшова, 1973ф], пробуренной на правом берегу Губинского лога. Пачки I и II отнесены к высотинскому, пачки III, IV и V – к бродовскому, а пачки VI–X – к губинскому горизонтам. Успешному изучению разреза в то время способствовало наличие свежих придорожных канав. В частности, граница высотинского и бродовского горизонтов (пачек II и III) описана как раз по одной из них [Наседкина, Бороздина, 1999]. К сожалению, в настоящий момент почти все эти канавы уже засыпаны.

На рубеже веков (1998–2003 гг.) на Бобровской площади проходили поисковые работы на медное и полиметаллическое оруденение [Коровко, Бурнатная, 2003ф]. Биостратиграфические работы на территории села проводили А.З. Бикбаев, М.П. Снигирёва и М.А. Тупицына [Бикбаев, Снигирёва, 1998, 2016; Бикбаев и др., 2002, 2013, 2014]. Они расширили конодонтовую характеристику живетских и пограничных с ними франских отложений. Была установлена заметная тектоническая нарушенность карбонатной толщи и блоковое строение разреза. Особое внимание А.З. Бикбаевым и соавт. [2014] было уделено литолого-фациальному анализу верхнеживетских отложений: аргументирована их фациальная принадлежность к подножию склона карбонатной платформы.

В это же время изучением брахиопод разреза занимались А.Г. Мизенс и Л.И. Мизенс [Мизенс, 2011, 2012а, 2012б; Мизенс, Мизенс, 2012]. В высотинском горизонте ими установлены слои со *Stringocephalus burtini* Defr. и слои с *Rhysochonetes rugosus* (Ljash.), а в бродовском горизонте – слои с *Fitzroyella alata* Biern. *F. primula* Veev., *Uchtella praesemilukiana* (Ljash.), *U. semilukiana* (Nal.) [Мизенс, 2012а]. Из верхней (V) пачки бродовского горизонта выделено 19 видов брахиопод, относящихся к 16 родам и восьми отрядам [Мизенс, 2012б].

Строматопороидеи, широко распространенные во франской части разреза, были определены О.В. Богоявленской [Мизенс, 2011; 2012б; Наседкина и др., 1990б]. Однако систематическое описание остатков строматопороидей (в том числе амфипор) осталось не опубликованным.

Работы А.Л. Анфимова [2015, 2016] посвящены верхнедевонским известковым водорослям. В последнее время появилась информация и о распределении в рассматриваемом разрезе остатков ихтиофауны [Ivanov, 2022; Иванов, 2023], встреченных как в живетском, так и во франском интервалах разреза. Возросший интерес к разрезу «Покровское» вызван актуальностью проблемы границы высотинского и бродовского горизонтов и её корреляции с границей среднего и верхнего отделов девона. Проект схемы стратиграфии девона IV поколения был разработан коллективом авторов под руководством В.А. Наседкиной, в 1991 г. схема была утверждена МСК России. Согласно данной схеме, граница живета и франа на восточном склоне Урала находится внутри бродовского горизонта [Субрегиональная..., 1993]. В качестве зональной конодонтовой шкалы в схеме использована действующая на то время зональность, разработанная для мелководных фаций, обладающая рядом недостатков для межрегиональных корреляций. Переход после 1990 г. на стандартную конодонтовую зональность [Ziegler, Sandberg, 1990], базирующуюся на пелагических конодонтах, позволил В.А. Наседкиной и Г.Н. Бороздиной сделать допущение, что граница живета и франа «может быть определена близко к основанию бродовского горизонта» [1999, с. 50].

В настоящий момент мы обладаем палеонтологической характеристикой обоих горизонтов, в разрезе заметна смена литологии отложений, но каков характер границы и где она может наблюдаться на местности, не совсем ясно. Независимо от того, сможем ли мы обнаружить непосредственную границу известняков высотинского и бродовского горизонтов, первоочередная задача исследований – детализировать конодонтовую последовательность в пограничном живетско-франском интервале и дополнить её новыми данными по другим группам органических остатков.

С разрезом «Покровское» мы связываем перспективы корреляции морских и континентальных отложений в пограничном интервале среднего и верхнего девона. Кроме того, он может являться ключевым объектом при сопоставлении субрегиональной схемы девона восточного склона Урала со схемами смежных регионов – западного склона Урала и Русской платформы, а также с Общей и Международной стратиграфическими шкалами.

Материалы и методы исследования

При проведении полевых экспедиционных работ образцы отбирались одновременно на все виды исследований. Образцы для изготовления стандартных

петрографических шлифов отобраны из тех же точек, что и образцы для биостратиграфических исследований. Для палеонтологического изучения разреза «Покровское» были привлечены две группы фауны: конодонты (О.В. Артюшкова) и остракоды (И.О. Евдокимова), а также споры высших растений (О.П. Тельнова). Из некоторых прослоев собраны брахиоподы.

Вес проб для палинологического анализа составлял 150–200 г, образцы пород обрабатывались по авторской методике, подробно описанной ранее [Шумилов, Тельнова, 2013а, б]. Основным отличием предложенной методики является порядок проведения химической обработки образцов, специально подбираемый к конкретной партии образцов, в соответствии с фациальной и региональной спецификой осадконакопления. Палинологические препараты, приготовленные на синтетической среде «Витрогель», исследовались под биологическим микроскопом AXIO Lab.A1 (с цифровой камерой AXIOCam ICs 5) в проходящем свете $\times 400$, $\times 600$. Для таксономического определения дисперсных спор из девонских пород использовалась наиболее распространенная в настоящее время классификация [Potonie, Kremp, 1954, 1970; Ошуркова, 2003], основанная на морфологических признаках. Выделение палинокомплексов и обоснование их возраста проводились на основе общих принципов стратиграфических исследований. Из каждого образца выделен палиноспектр (ПС), отражающий таксономический состав спор с количественным учетом каждого таксона. В датировке вмещающих пород главную роль играли руководящие виды спор и второстепенную – их количественное содержание. Полученные палиноспектры сравнивались прежде всего с палинокомплексами (ПК), установленными в стратотипических разрезах Южного и Среднего Тимана, а также Центрального девонского поля. Эталонные препараты хранятся в лаборатории стратиграфии Института геологии Коми НЦ УрО РАН и в музее ИГ, коллекция № 134.

Результаты исследований

Современное состояние разреза. Разрез представляет собой ряд мелких разрозненных скальных выходов, а также небольших обнажений в дорожных колеях, канавах и в карьере (рис. 2), располагающихся на обоих берегах р. Бобровка в окрестностях плотины (рис. 3) и выше неё по течению (точки наблюдения По 1 – По 13). Опираясь на литолого-стратиграфическое расчленение разреза предшественниками [Наседкина и др., 1990б; Наседкина, Бороздина, 1999], серые, красновато-, коричневатые или зеленоватые-серые зернистые плитчатые терригенно-карбонатные породы (По 1 – По 4) мы отнесли к высотинскому горизонту (пачки I и II), а светло-серые, розоватые и красноватые неяснослоистые, иногда брекчиевидные известняки (По 5 – По 12) – к бродовскому горизонту (пачки III–V)³ (рис. 4).

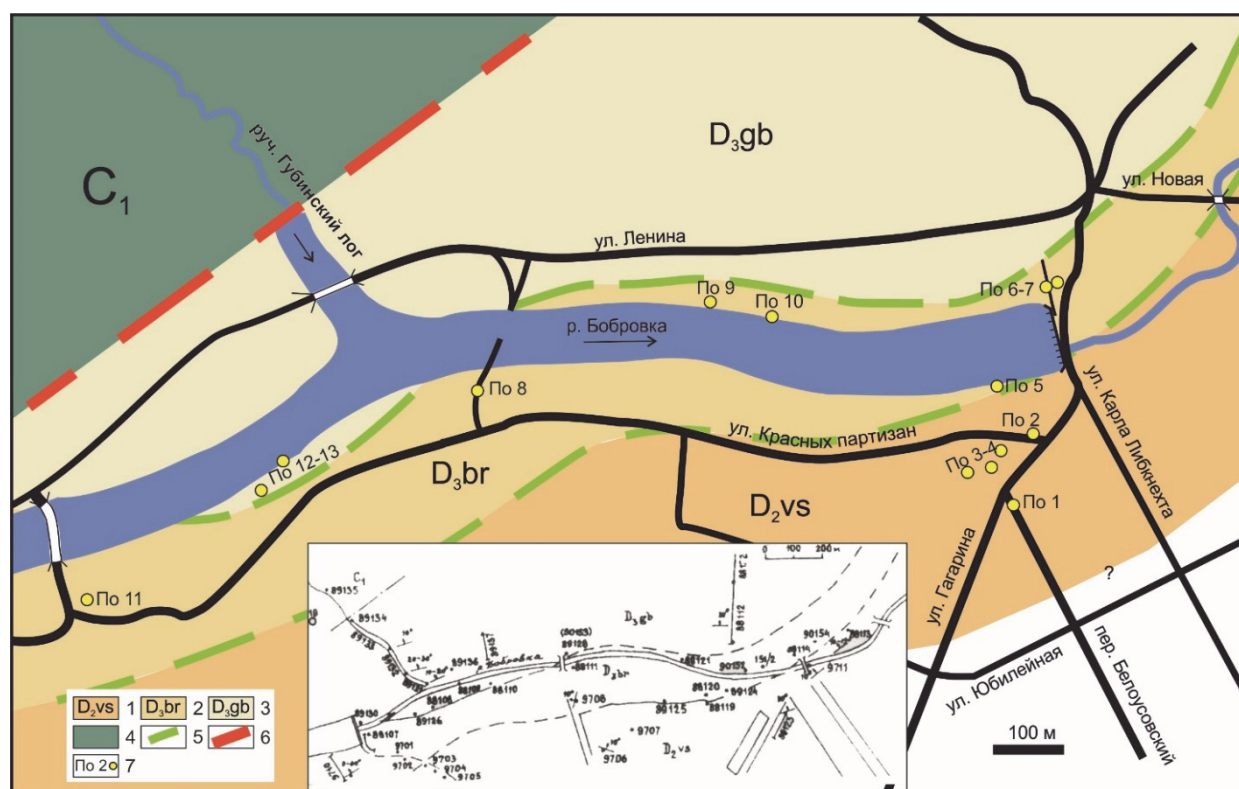


Рис. 2. Фрагмент карты с. Покровское с нанесенными на него в соответствии с [Наседкина, Бороздина, 1999] (см. врезку из оригинальной работы) толщами девонского и каменноугольного возраста, а также точками наблюдения, описанными в настоящей работе

1–4: стратона по [Наседкина, Бороздина, 1999]: 1–3 – горизонты девона: 1 – высотинский горизонт, 2 – бродовский горизонт, 3 – губинский горизонт, 4 – нижнекаменноугольные отложения; 5 – предполагаемые границы горизонтов; 6 – крупные тектонические нарушения; 7 – точки наблюдения

Fig. 2. Map fragment of Pokrovskoye settlement vicinity with Carboniferous and Devonian strata in accordance with [Nasedkina, Borozdina, 1999] (see sketch from original article) and outcrop points from this work

1–4: strata after [Nasedkina, Borozdina, 1999]: 1–3 – Devonian regional substages: 1 – Vysotinka, 2 – Brodovka, 3 – Gubinsky, 4 – Lower Carboniferous, 5 – hypothetical strata boundaries; 6 – significant tectonic disturbances; 7 – outcrops

Самая верхняя часть изученного разреза (По 13) представлена тёмно-серыми разностями губинского горизонта.

На нижних уровнях разреза (высотинский горизонт) фиксируется обилие терригенной (песчаной) примеси. В известняках бродовского горизонта встречаются инкрустации светлого яснокристаллического кальцита, известняки нередко перекристаллизованы и пронизаны многочисленными прожилками. Практически повсеместно на нижних поверхностях пластов развиты травертины, слагающие корки толщиной до нескольких сантиметров. Встречаются несцементированные красноцветные образования, являющиеся продуктами коры выветривания, на отдельных участках породы сильно выветрелые, рыхлые (особенно зернистые разности). Красноцветность пород мы считаем признаком, обусловленным наложенными процессами. Разная интенсивность преобразований обусловлена литологией: породы высотин-

ского горизонта имеют более ярко выраженную красную окраску по сравнению с известняками бродовского (в последнем преобладают плотные микрозернистые известняки – менее проницаемые по сравнению с нижележащими крупно- и грубозернистыми разностями).

В целом в пределах территории площадь коренных выходов не очень большая, тем не менее высокое таксономическое разнообразие органических остатков по материалам предшественников и первым результатам наших исследований позволяет говорить о том, что разрез достаточно перспективен для обновления стратиграфических схем девонских отложений и межрегиональных корреляций. Описание фрагментов разреза приводится с конкретной привязкой к местностям.

По 1. Придорожная канава в начале пер. Белоусовский (см. рис. 3). Розовато-серые, на отдельных уровнях серые со слабым зелёным оттенком тонкоплитча-

тые биокластовые песчанистые или песчаные известняки с раковинами цефалопод и тентакулитами, иногда обогащенные детритом трилобитов. Породы грубозернистые, до мелкозернистых, межзерновое и внутрискелетное пространство выполнено белым янукристаллическим кальцитом (рис. 5, а). Азимут падения 20° , угол падения изменяется с 20 на 40° после нарушения в средней части обнажения.

Видимая мощность составляет порядка 2,5 м. Точка наблюдения примерно соответствует верхней части обн. 88123 [Наседкина, Бороздина, 1999], близка к обн. ПК6 [Бикбаев и др., 2014], по составу органических остатков напоминает описанные А.П. Карпинским [1884, 1949] отложения живетского яруса. Породы, вероятно, принадлежат пачке Г⁴.

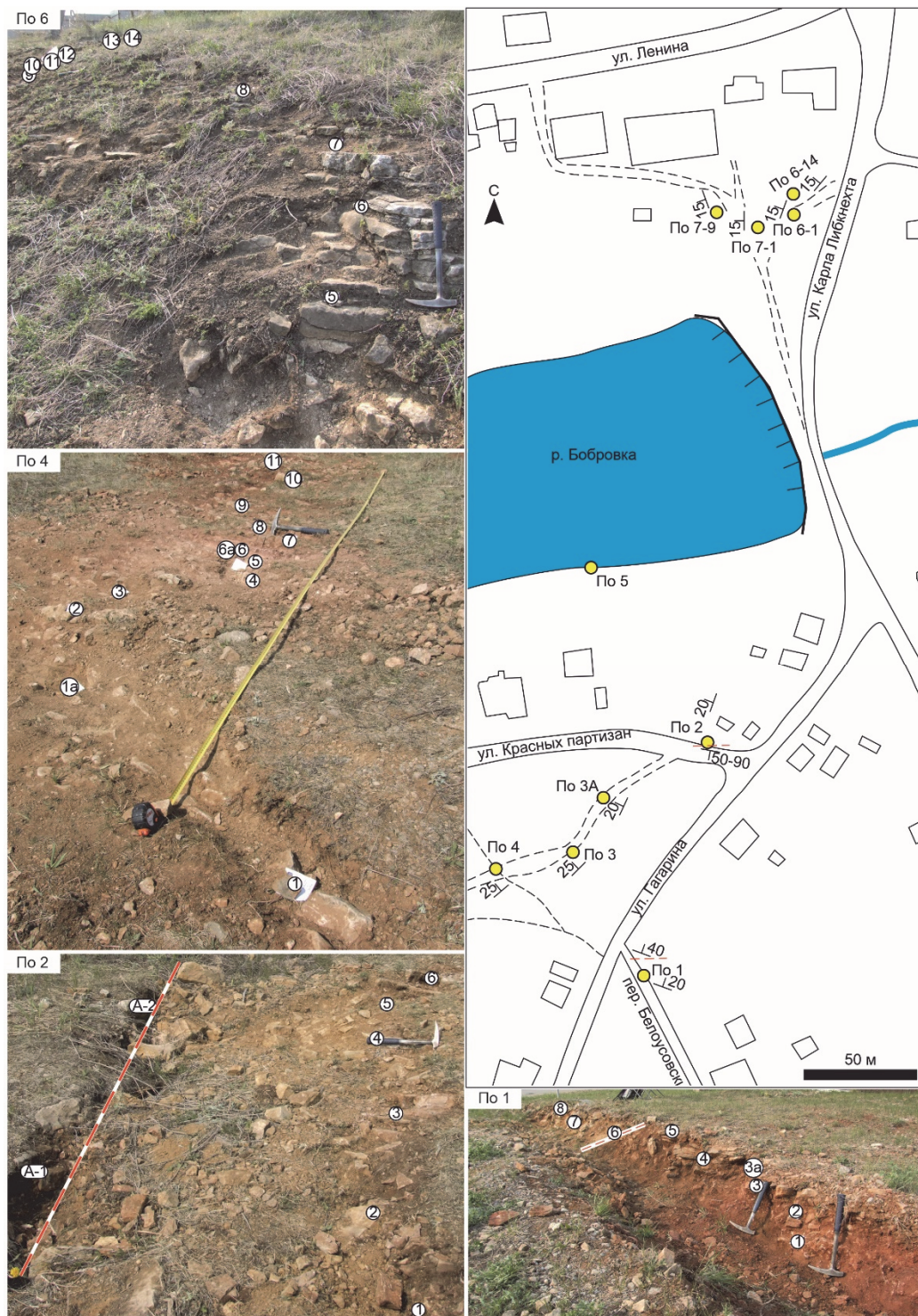


Рис. 3. Интервалы разреза По 1 – По 7 и точки отбора образцов

Fig. 3. По 1 – По 7 intervals of the section and sample points

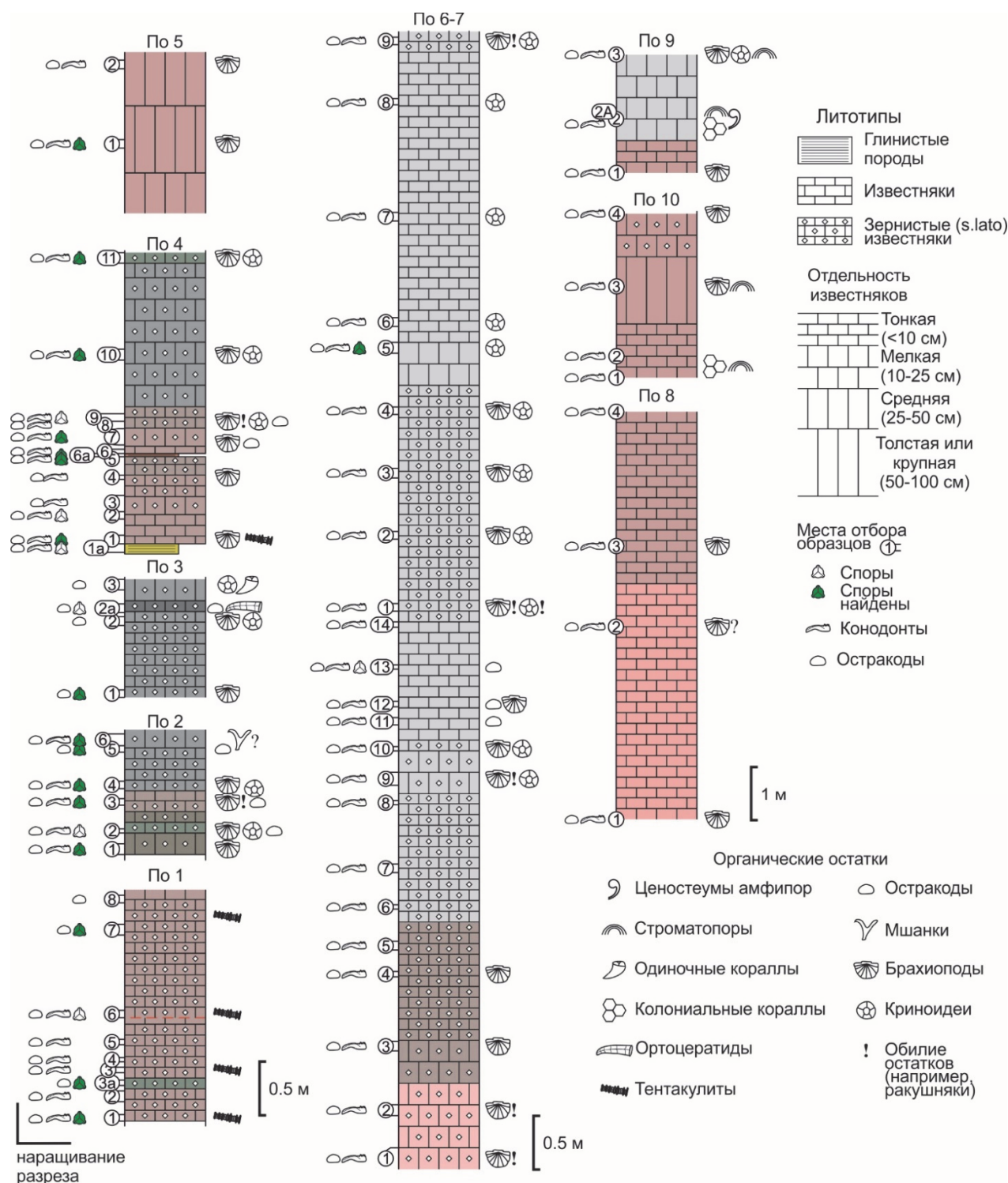


Рис. 4. Литологические колонки (точки наблюдения По 1 – По 10) и места отбора образцов

Условные обозначения: Цвет на колонках отражает оттенки цвета пород

Fig. 4. Lithology log with sample points for Po 1 – Po 10 outcrops

Legend: different color in the logs corresponds to rock color tints

По 2. Небольшая гривка и канава вблизи дома на пересечении ул. Красных партизан и ул. Гагарина. Известняки (1,2 м) в северной части обнажения имеют азимут падения от 290 до 315°, угол падения около 20°, смяты в складки. Породы серые со слабым

коричневым либо зеленым оттенком, тонко- и мелкоплитчатые разномзернистые – от тонко- до грубозернистых, слоистые (текстура подчёркивается изменением размерности и ориентировкой зёрен), также видна прямая градиционная сортировка материала в

отдельных слоях. Интервал имеет циклическое строение, мощность циклитов, как правило, не более 10 см (рис. 5, *b*). Породы вмещают раковины и детрит брахиопод, остатки криноидей, амфипор и остракод, редкие тентакулиты и ругозы. Предполагается, что вдоль канавы проходит тектоническое нарушение (см. рис. 3). Южнее породы интенсивно перекристаллизованные и выветрелые, падают практически на юг (190° , угол падения сменяется с 90° на 60°). Точка наблюдения, возможно, соответствует точке ПК8 в работе [Бикбаев и др., 2014].

По 3, По 3А. Обнажения на пустыре в колеях проселочной дороги, ведущей от пересечения улиц Красных партизан и Гагарина к спортплощадке (недействующему стадиону). По 3А – небольшой выход (до 0,5 м) серых тонкоплитчатых известняков (азимут падения 295° , угол 20°) с редкими желваками кремней длиной до 15 см (рис. 3, *c*), которые в этой части разреза описаны впервые. Обн. По 3 (азимут 315° , угол 25°) имеет ширину выхода около 2,5 м, что соответствует видимой мощности разреза примерно 1,1 м. Здесь хорошо видны пластовые поверхности. Отложения представляют собой серые и тёмно-серые с зеленоватым оттенком тонко- и мелкоплитчатые мелкозернистые песчаные известняки с редкими прослоями грубозернистых разностей, вмещающие фрагменты ругоз (нижняя часть интервала) либо остатки криноидей, брахиопод, ортоцератид (?) и остракод (средняя часть). В верхней части интервала известняки с градационной сортировкой материала содержат членики криноидей и одиночные кораллы, ориентированные по слоистости.

По 4. Обнажение возле пересечения дороги к стадиону и тропинки, ведущей от дома № 4 по ул. Красных Партизан к Белоусовскому переулку. Цвет пород снизу вверх по разрезу сменяется от серого с розовым оттенком до серого и серого с зеленоватым оттенком. Здесь представлены тонко- и мелкоплитчатые тонко-, мелко- и среднезернистые известняки с мелкобугристыми поверхностями напластования, с детритом и раковинами крупных брахиопод (рис. 5, *d*). Помимо брахиопод также встречены тентакулиты, амфипоры, криноидеи и остракоды, фрагменты трилобитов. Отмечается примесь песчаных зёрен (вулкано- и (или) пирокластическая). Породы слоистые с прямой градационной сортировкой материала. В обнажении встречаются прослои (до 10 см) рыхлых пород жёлтых с коричневым оттенком либо коричневых с красным оттенком⁵. Элементы залегания те же, что и в обн. По 3. Протяженность около 6,5 м, видимая мощность 2,8 м.

По положению на карте (см. рис. 3) и составу пород можно предполагать, что обнажения По 3 и По 4 соответствует точкам 012/1, 012/2 и ПК9 по [Бикбаев и др., 2014]. Отложения могут быть отнесены к пачке II (высотинский горизонт).

Таким образом, южнее плотины известняки тонко- и мелкоплитчатые от грубо- до тонкозернистых с неравномерно рассеянными створками и детритом брахиопод, с остатками криноидей, остракод, тентакулитов, одиночных кораллов и ортоцератид, амфипор. Встречаются отдельные уровни с многочисленными брахиоподами. Среди особенностей рассматриваемой части разреза следует отметить наличие (1) пластов с прямой градационной сортировкой материала, а также интервалов с циклическим строением, когда крупно- и грубозернистые известняки чередуются с тонко- и мелкозернистыми разностями; (2) неравномерно распределённых красноцветных продуктов коры выветривания; (3) многочисленных тектонических нарушений.

По 5. На правом берегу реки в ~100 м выше плотины, непосредственно вблизи уреза воды обнажаются красновато-серые интенсивно выветрелые толстослоистые микрокристаллические известняки (1,5 м) с брахиоподами и многочисленными кальцитовыми прожилками. Известняки представляют собой брекчию с хаотично ориентированными обломками (рис. 5 *e*). Залегание пород здесь неясное, скорее всего, они имеют падение на ССЗ. При детальном разборе предшественников пробы с рассматриваемого участка не отбирались. В целом породы заметно отличаются от нижележащих и условно отнесены к пачке III.

По 6, По 7. Севернее плотины на левом берегу реки карбонатные породы обнажаются на склоне между автомобильной (ул. Карла Либкнехта) и грунтовой (ведущей от плотины к зданию администрации) дорогами. Известняки от средне- до тонкоплитчатых, в нижних 2,3 м интервала с легким розовым оттенком, затем светло-серые до белых. Породы микро-, тонко- и мелкозернистые, реже от средне- до грубозернистых, биокластовые – с обломками и раковинами брахиопод (до ракушняков – рис. 5, *f*), остатками криноидей. Азимут падения вверх по разрезу постепенно изменяется с 310° до 260° , тогда как угол падения остаётся постоянным и составляет около 15° . Видимая мощность 10,5 м. Рассматриваемый интервал разреза ранее описан как обн. 88114 [Наседкина, Бороздина, 1999] и выделен как пограничный для пачек III и IV.

По 8. Западнее, на правом берегу возле разрушенного пешеходного моста на тропинке встречены пятнистые неравномерно перекристаллизованные и гематитизированные известняки с редкими брахиоподами и строматопорами.

Мощность интервала составляет 7,6 м. Он обнажён неудовлетворительно, элементы залегания выражены неотчётливо. Согласно первым нашим находкам конодонтов, отложения следует сопоставлять с нижней пачкой бродовского горизонта (пачкой III).

По 9, По 10. Невысокие скальные выходы в нижней части склона левого берега реки выше дома № 171 (ул. Ленина). Обнажаются тонко-, мелко- и толстоплитчатые крипто- и тонкозернистые (По 9) и разнообломочные массивные (По 10) известняки с обломками кораллов, брахиопод и более крупными

остатками колониальных кораллов, ценостеумами амфиоп, строматопорами (рис. 6, а). В обоих случаях элементы залегания не ясны. Комплекс фауны, текстурные особенности и вторичные преобразования позволяют говорить о наличии здесь органогенных построек.

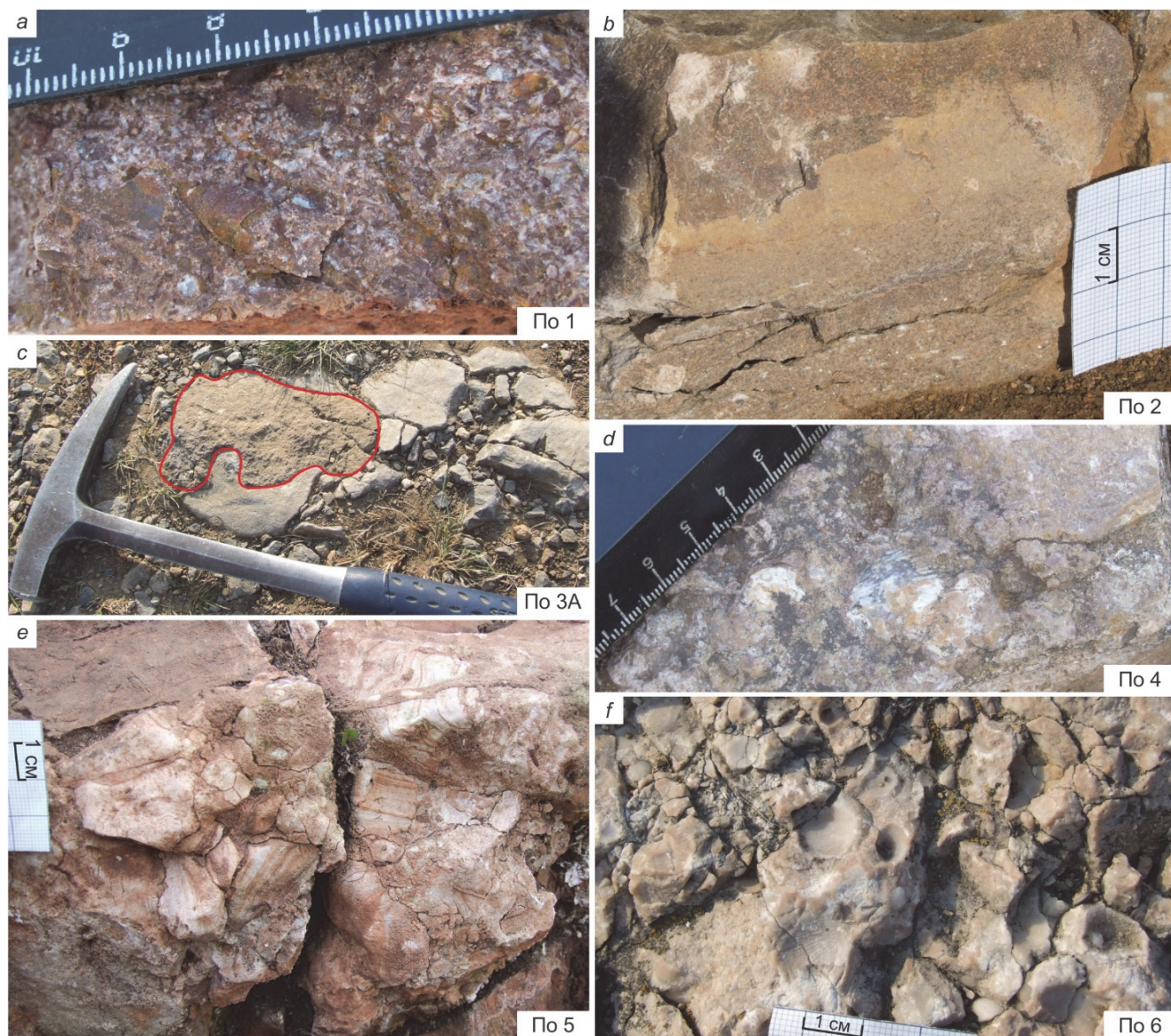


Рис. 5. Литологические особенности известняков из обнажений По 1 – По 6

a – красноватые грубозернистые биокластовые известняки с остатками фауны и примесью алюмосиликокластики (обн. По 1); *b* – прямая градационная слоистость в известняках обн. По 2 (белые пятна – ориентированные по слоистости биокласты кораллов); *c* – желваки кремней в известняках обн. По 3А; *d* – скопления брахиопод на бугристых поверхностях напластования известняков (обн. По 4); *e* – карбонатная брекчия, представленная в основном обломками корок строматопороидей (обн. По 5); *f* – брахиоподовая банка в основании обн. По 6

Fig. 5. Sedimentological features of limestones in the Po 1 – Po 6 outcrops

a – reddish coarse-grained bioclastic limestones with fauna fossils and siliciclastic admixture (Po 1 outcrop); *b* – limestones normal grading bedding at Po 2 outcrop (white spots are bioclasts oriented parallel to the lamination); *c* – chert nodules in the Po 3A limestones; *d* – brachiopods aggregation on the uneven bed surface (Po 4 outcrop); *e* – carbonate breccia, composed mainly by stromatoporoids crusts fragments (Po 5 outcrop); *f* – brachiopod shelly bank in the lower part of Po 6 outcrop

Видимая мощность интервала По 9 составляет 2,3 м, По 10–3,3 м. Эта часть разреза описана впервые. По особенностям литологии можно предварительно предположить, что она также принадлежит пачке V.

По 11. Небольшой щебёночный карьер на правом берегу реки, непосредственно ниже моста вблизи устья правого безымянного притока. Здесь вскрыты светло-серые и серые, серые с розовым оттенком, массивные и толстослоистые неравномерно перекристаллизованные и гематитизированные известняки с

брахиоподами, образующими банковые скопления, и строматопорами в виде корок, члениками криноидей, инкрустациями крупнокристаллического кальцита. Породы от микро- до среднезернистых, встречаются брекчиевидные разности (рис. 6, *b*). Они разбиты на блоки и смяты в складки. В нижней части интервала породы падают на север, но в северном борту карьера, по-видимому, падение меняется на западное. Интервал может быть сопоставлен с обн. 88107 и пачкой V [Наседкина, Бороздина, 1999], хотя возможны и другие варианты корреляции.

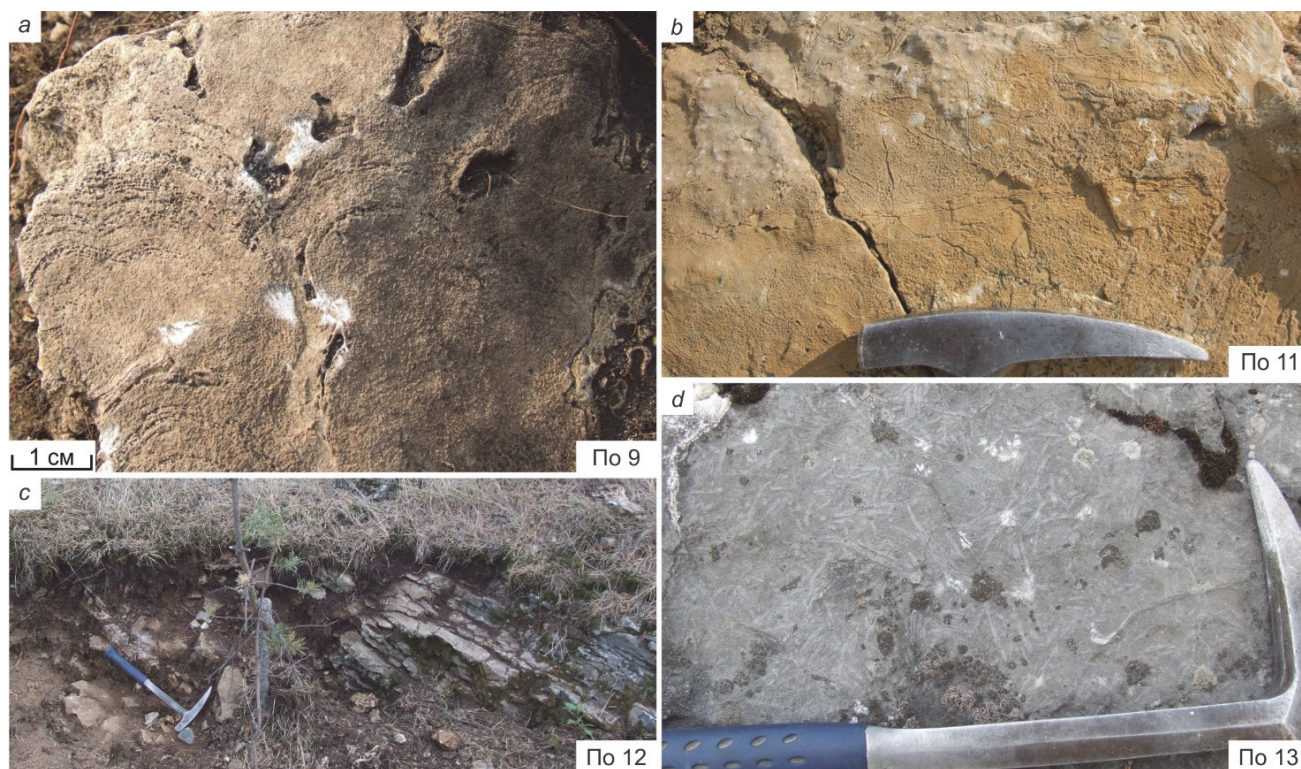


Рис. 6. Литологические особенности известняков из обнажений По 9 – По 13

a – фрагмент постройки строматопор, находящихся, вероятно, в прижизненном положении (обн. По 9); *b* – разнородные обломочные (брекчиевые?) известняки (обн. По 11), содержащие разноориентированные остатки корок строматопор и раковины брахиопод; *c* – смена розовато-серых неотчётливо-слоистых известняков, относящихся к бродовскому горизонту, тёмно-серыми плитчатыми битуминозными известняками губинского горизонта (обн. По 12, молоток соответствует уровню границы); *d* – скопления остатков амфиопор на пластовых поверхностях тёмно-серых известняков губинского горизонта (обн. По 13)

Fig. 6. Sedimentological features of limestones in the По 9 – По 13 outcrops

a – stromatoporoid (perhaps in autochthonous burial state) buildup fragment, По 9 outcrop; *b* – diverse grained (breccia?) limestones (По 11 outcrop), composed of brachiopod shells and stromatopoids crusts with various orientation; *c* – relationship of Brodovka pinkish-grey thick-bedded limestones (on the left) with Gubinsky dark-grey bituminous thin-bedded limestones (on the right) (По 12 outcrop, hammer marks the boundary); *d* – amphipores remains assemblage on Gubinsky dark-grey limestone bedding surface (По 13 outcrop)

По нашим предварительным данным, обломочные известняки (карбонатные брекчии) могут принадлежать или пачке III, или пачке V. Ранее в тексте работы В.А. Наседкиной и Г.Н. Бороздиной [1999, с. 48] они отмечались только в пачках III и IV, а на рис. 2 из этой же публикации [с. 47], наоборот, брекчии «приписаны» к пачке V. Органогенные постройки строматопороидей, по-видимому, находятся на наиболее высоких уровнях бродовского горизонта. Для уточнения

корреляции обнажений известняков, относящихся к этому подразделению, необходимы детальные данные по биостратиграфии.

На этом же берегу реки (**По 12, По 13**) выявляется граница (см. рис. 6, *c*) отложений бродовского и губинского горизонтов: на известняках светло-серых и серых с розовым оттенком с брахиоподами, криноидеями, кораллами и амфипорами в основании (обн. По 12) залегают темно-серые до черных

микрозернистые известняки с амфипорами (см. рис. 6, d), включениями пирита, характерным запахом сероводорода. Элементы залегания для По 12 равны 275 и 25°, для По 13 – 210–220°, 10–20°. Граница характеризуется несогласием или имеет тектоническую природу. Видимая мощность изученного интервала в целом не превышает 4 м. По положению в разрезе и на карте отложения выше литологической границы, вероятно, отвечают обн. 88108 и 88109 – пачкам VI и VII [Наседкина, Бороздина, 1999].

Споры высших растений. Ретроспективный анализ публикаций [Наседкина и др., 1990а; Наседкина, Бороздина, 1999; Мизенс, 2012; Бикбаев и др., 2013], показал, что из разреза «Покровское» изучалась исключительно морская фауна и полностью отсутствуют данные по спорам высших растений, которые позволяют проводить корреляцию разнофациальных (континентальных, морских) отложений в различных палеогеографических областях. Известно, что споры и пыльца высших растений разносятся на достаточно большие расстояния и встречаются, правда в ограниченных количествах, даже в океанических глубоководных отложениях. Но наиболее полные палиноспектры выделяются из континентальных и прибрежно-морских отложений.

Последнее десятилетие палинологические исследования проводились на Южном и Среднем Тимане, где отложения обсуждаемого стратиграфического интервала широко представлены в естественных обнажениях многочисленных рек [Тельнова, 2007; Тельнова, Шумилов, 2019]. Здесь установлена наиболее полная последовательность ПК, разработана детальная палиностратиграфическая схема расчленения пограничного средне-верхнедевонского интервала. Однако палинокомплексы, обнаруженные в мелководно-морских и континентальных отложениях Тимано-Североуральского региона, не позволили скоррелировать большую часть палинозон со стандартными конодонтовыми зонами, установленными в глубоководных отложениях [Тельнова, Шумилов, 2023]. Отсутствие разрезов с полной конодонтовой последовательностью в пограничном интервале из-за особенностей осадконакопления, отражающих разномасштабные трансгрессивно-регрессивные эпизоды, находки преимущественно транзитных таксонов и неопределенность их стратиграфического распространения создают неоднозначное понимание объемов региональных стратиграфических подразделений. В решении этой проблемы ведущую роль могут сыграть разрезы, содержащие наряду с ортостратиграфической группой фауны (конодонты) другую эврифациальную фауну и флору.

Поэтому предпринято палиностратиграфическое изучение разреза «Покровское», где ранее была описана полная последовательность конодонтовых зон живетско-франского стратиграфического интервала в морских фациях. Предполагается, что споры могли продуцироваться флорой, произраставшей на островах вулканической дуги, реликты которой (восточно-бобровский, рудянский и частично маминский комплексы) сохранились в Алапаевско-Теченской зоне [Коровко и др., 2005; Смирнов, 2012]. На палинологический анализ отбирались породы темной цветовой гаммы (признак наличия органической составляющей) – известняки серого цвета, часто с розоватым оттенком (см. рис. 3, 4). После удаления карбоната оставался мацерационный осадок весом всего 2–3 г (обычно при стандартной навеске 150–200 г из терригенных пород мы получаем 20–50 г). Мизерный мацерационный осадок в основном содержал от 1 до 15 спор. Некоторые образцы (По 2-2; По 3-2а; По 4-9; По 4-1; По 4-1а; По 4-9; По 6-13; По 11-1; По 12-1; По 12-2) спор не содержали, но были насыщены обрывками растительного происхождения, в некоторых (По 4-1; По 4-1а) встречены одноклеточные водоросли *Tasmanites* (Chlorophyta), не имеющие стратиграфического значения, но пригодные для реконструкции условий осадконакопления [Тельнова, 2012].

Кроме девонских спор, ряд образцов (По 1-1; По 1-3а; По 1-3а1; По 1-7; По 2а-1; По 2-4; По 2-5; По 2-6; По 3-1; По 4-2; По 4-6а; По 4-9) содержал споры и пыльцу юрского возраста (хорошей сохранности и часто в большем количестве, чем девонские). В этих препаратах девонские споры отличаются более темным цветом, худшей сохранностью. По-видимому, обнаружение мезозойских микрофоссилий обусловлено присутствием в образцах различного количества красноцветных глинистых образований, богатых оксидами железа и алюминия (terra rossa). Контаминация пород молодыми (мезозойскими) фоссилиями не препятствовала определению времени формирования собственно карбонатных отложений. В некоторых образцах по характерным спорам удалось определить возраст вмещающих пород с детальностью до горизонта.

В палинологических препаратах из образцов По 2-1; По 2а-2; По 2-3; По 2-5; По 2-6; По 4-2; По 4-5; 4-7; По 4-11 (таблица) найдены споры в единичных экземплярах, но характерные для определенного стратиграфического интервала – палинокомплекса старооскольского надгоризонта Русской платформы (живетский ярус) [Решение..., 1990]. В палиноспектре из обр. По 4-2 встречен вид-индекс ПК старооскольского надгоризонта – *Geminospora extensa* (Naumova) Gao, а ПС По 2-4, По 2-5, По 2-6 имеют сходный таксономический состав, характеризующий верхнюю

часть старооскольского надгоризонта (муллинский горизонт).

Это группа спор рода *Geminospora*: *G. decora* (Naumova) Arkh. и *G. tuberculata* (Kedo) Allen, которые ниже-выше по стратиграфическому разрезу не известны. Вид *G. notata* (Naumova) Obukh. появляется в старооскольское время и продолжает существовать в позднедевонское. Споры вида *Perotriletes spinosus* (Naumova) Arkh. характеризуют стратиграфический диапазон: муллинский – пашийский горизонты в стратиграфической схеме Русской платформы. Таким

образом, ПС из образцов По 2-4, По 2-5, По 2-6 с полной уверенностью позволяют коррелировать вмещающие породы с муллинским горизонтом старооскольского надгоризонта Русской платформы.

Фауна конодонтов и остракод находится в настоящее время в работе. Первые результаты лабораторной обработки проб из обнажений По 1, По 2, По 3, По 4, По 6 показывают, что породы высотинского и бродовского горизонтов содержат достаточно богатые комплексы конодонтов, характеризующиеся высоким таксономическим разнообразием.

Таксономический состав и количественное содержание спор в палиноспектрах, экз.

Spore taxonomic composition and quantitative content in the palynospectra, specimens

Таксономический состав	По 1-1	По 2a-1	По 1-3a	По 1-3al	По 1-7	По 2-1	По 2a-2	По 2-3	По 2-4	По 2-5	По 2-6	По 3-1	По 4-2	По 4-5	По 4-6a	По 4-7	По 4-10	По 4-11	По 5-1	По 7-5	По 11-2	По 11-5	По 12-4
<i>Ancyrospora furcula</i> Owens																		1					
<i>A. involucera</i> Owens									1?														
<i>A. laciniosa</i> (Naumova) Mants.	1?																						
<i>Aneurospora heterodonta</i> (Naumova) Streel									1														
<i>Archaeotriletes fidus</i> Naumova										1	1												
<i>Archaeozonotriletes. timanicus</i> Naumova				1																			
<i>Calypsopteris domanicus</i> (Naumova) Oshurk.																					1		
<i>C. bellus</i> (Naumova) Oshurk.																	1?						
<i>Cymbosporites magnificus</i> (McGregor) McGregor et Camfield													1						1				
<i>C. krestovnikovii</i> (Naumova) Oshurk.		1?																			1		
<i>Cristatisporites dentata</i> (Naumova) comb. nov.																						1?	
<i>C. triangulatus</i> (Allen) McGregor et Camfield																							
<i>Converrucosporites curvatus</i> (Naumova) Turnau						1																	
<i>Densosporites sorokinii</i> Obukh.				1?																			
<i>Geminospora compta</i> (Naumova) Arkh.														1									1
var. <i>expletivus</i> Tchib.																							

Таксономический состав	По 1-1	По 2a-1	По 1-3a	По 1-3al	По 1-7	По 2-1	По 2a-2	По 2-3	По 2-4	По 2-5	По 2-6	По 3-1	По 4-2	По 4-5	По 4-6a	По 4-7	По 4-10	По 4-11	По 5-1	По 7-5	По 11-2	По 11-5	По 12-4
<i>G. decora</i> (Naumova) Arkh.						1								3						2			
<i>Geminospora extensa</i> (Naumova) Gao										1													
<i>G. egregius</i> (Naum.) Tchib.																2			1				1
<i>G. micromanifesta</i> (Naumova) Owens	1															1		1	2	3	3	2	2
<i>G. notata</i> (Naumova) Obukh.						3	2	1	4			4											
<i>G. rugosa</i> (Naumova) Obukh.																							2
<i>G. tuberculata</i> (Kedo) Allen						4		1		1			1	3		4		4	3	4		1	
<i>Grandispora inculta</i> Allen						1																	
<i>Leiotriletes minutissimus</i> Naumova			3								1				1								
<i>L. nigratus</i> Naumova						1																	
<i>Lophotriletes rugosa</i> Naumova					1	1																	
<i>Perotriletes spinosus</i> (Naumova) Arkh.						2	1																
<i>Reticulatisporites laevis</i> Naumova																							
<i>R. raisae</i> Naumova								1															
<i>Stenozonotriletes conformis</i> Naumova	1																						
<i>Verrucosisporites concessus</i> (Naumova) Obukh.					1																		
Σ	2	1	3	1	2	13	3	3	5	3	2	4	3	8	1	7	1?	6	7	9	5	4	6

Заключение

Полученные нами сведения о литологии высотинского горизонта хорошо согласуются с данными предшественников: в обнажениях По 1 и По 2 диагностируется пачка I плитчатых зернистых известняков с градиционной слоистостью, с обильными остатками пелагической фауны, а в обнажениях По 3 – По 4 – пачка II сходных с ними по текстурам и структурам известняков, но с фауной брахиопод, амфиопор, кораллов и остракод. Реконструированная ранее последовательность пачек бродовского горизонта пока не выглядит полностью удовлетворительной вследствие разных вариантов корреляции отложений в удалённых обнажениях. Так или иначе, в разрезе горизонта можно выделить тела карбонатных брекчий, уровень с органогенными постройками строматопороидей и интервалы с многочисленными брахиоподами (ракушняковые банки) и рассеянными члениками криноидей.

Впервые из пограничных средне-верхнедевонских отложений восточного склона Среднего Урала выделены споры высших растений. В океаническом секторе палеобассейна споры могли продуцироваться флорой, произраставшей на островных дугах: островная флора обычно имеет небольшое таксономическое разнообразие, что отражается на составе палиноспектров, и незначительную биомассу. Большая часть образцов содержит единичные споры, которые позволили определить возраст вмещающих пород только до надгоризонта (ПК аналогичный комплексу старооскольского надгоризонта на Русской платформе).

И только ПС нескольких образцов (По 2-4, По 2-5, По 2-6) указывают на точное стратиграфическое положение отобранных пород: возраст анализируемых известняков аналогичен муллинскому горизонту Русской платформы (верхняя часть живетского яруса).

Сходство таксономического состава ПК из разреза «Покровское» с ПК муллинского горизонта Русской платформы может свидетельствовать о том, что на достаточно больших пространствах суши (в том числе и на островной в океаническом секторе палеобассейна) в это время произрастали сходные растительные сообщества. Споры этих растений, сохранившиеся при разных условиях осадконакопления, являются основой межрегиональных корреляций разнофациальных отложений.

Результаты полевых рекогносцировочных работ на разрезе «Покровское» и лабораторного изучения ПС позволяют дать рекомендации для организации следующего этапа исследований: (1) на палинологический анализ необходим дополнительный отбор образцов. С учетом карбонатности образец должен быть значительно большего веса (возможно 400–500 г); (2) находки юрских микрофоссилий, вероятнее всего, обусловлены проникновением глинистого вещества, обогащённого оксидами железа и алюминия (*terra rossa*) в карбонатные толщи при процессах древнего карстообразования, соответственно в дальнейшем потребуются предварительная очистка всех образцов от красноцветных образований.

Первые результаты по изучению разреза «Покровское» обнадеживающие и нацеливают на продолжение работ. Есть основания допускать, что комплексное изучение отложений пограничного живетско-франского интервала позволит уточнить и откорректировать расчленение разреза, реконструировать обстановку обитания организмов, проследить тренды изменения условно континентальной и морской биот, описать условия седиментации, зафиксировать в разрезе признаки глобальных геологических событий. Данные био- и хемотратиграфии позволят провести корреляцию данного разреза со стратотипическим разрезом границы (GSSP) в Монтань-Нуар, а также с другими разрезами мира. Все построения будут рассматриваться через призму геологической истории Уральского региона. Авторы рассчитывают, что полученная геологическая информация будет достаточной для характеристики границы среднего и верхнего отделов девона и выяснения её положения в разрезе и на местности. Разрез «Покровское» может претендовать на роль опорного для пограничных живетско-франских отложений.

Примечания

¹ Вероятно, третий и четвёртый «горизонты живета» А.А. Пронина – это тоже франский ярус.

² В настоящее время термин «лона» исключен из Стратиграфического кодекса [2019].

³ Таким образом, в качестве основания для определения принадлежности отложений к тому или иному подразделению (пачке или горизонту) была выбрана литология.

⁴ Здесь и далее номера пачек приведены из работы В.А. Наседкиной и др. [1990 б].

⁵ Возможно, данные «прослои», образование которых обусловлено процессами выветривания зернистых известняков, были приняты А.З. Бикбаевым и соавт. за бентониты.

Список источников

Анфимов А.Л. Микрофауна известняков губинского горизонта в разрезе «Покровское» Артемовского района Свердловской области // Ежегодник-2014. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 162. Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2015. С. 3–7.

Анфимов А.Л. Своеобразие франских известняков саргаевского горизонта в разрезе «Покровское» Артемовского района Свердловской области // Ежегодник-2015. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 163. Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2016. С. 3–7.

Артюшкова О.В., Тельнова О.П., Мизенс Л.И., Мизенс А.Г. Первая находка *Skeletognathus norrisi* в ассоциации со спорами высших растений и брахиоподами в пограничных живетско-франских отложениях, вскрытых скважиной № 8 Царичанская (Восточно-Оренбургское сводовое поднятие, Русская платформа) // Литосфера. 2022. № 22. Т. 4. С. 432–447.

Бикбаев А.З., Снигирева М.П. К стратиграфии живетско-франских отложений на восточном склоне Среднего Урала // Ежегодник-1997. Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 1998. С. 3–6.

Бикбаев А.З., Снигирёва М.П., Циглер В., Иванов А.О. К стратиграфии пограничных живетско-франских отложений типового разреза «Покровское» на восточном склоне Среднего Урала // Геология девонской системы : материалы Междунар. симп. Сыктывкар, Респ. Коми, Россия, 9–12 июля 2002 г. Сыктывкар : Геопринт, 2002. С. 138–140.

Бикбаев А.З., Снигирёва М.П., Тупицына М.А. К вопросу о возрасте брахиоподового комплекса с *Rhyssochonetes rugosus* (Lyash.) в живетских отложениях типового разреза «Покровское» (восточный склон Среднего Урала) // Ежегодник-2012. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 160. Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2013. С. 8–12.

Бикбаев А.З., Снигирёва М.П., Тупицына М.А. Литологическая характеристика и конодонты верхнеживетских отложений типового разреза «Покровское» // Ежегодник-2013. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 161. Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2014. С. 7–14.

Бикбаев А.З., Снигирева М.П. К проблеме границы среднего и верхнего отделов девонской системы на восточном склоне Среднего Урала // Общая стратиграфическая шкала и методические проблемы разработки региональных стратиграфических шкал России : материалы Межведомственного рабочего совещания. Санкт-Петербург, 17–20 октября 2016 г. СПб. : ВСЕГЕИ, 2016. С. 22–24.

Брейвель М.Г., Богоявленская О.В., Брейвель И.А., Ходалевич А.Н., Шурыгина М.В., Янет Ф.Е. Кишечнополостные и брахиоподы живетских отложений восточного склона Урала. М. : Недра, 1972. 264 с.

Брейвель М.Г., Брейвель И.А. Биостратиграфия среднего девона восточного склона Среднего и Северного Урала // Средний девон СССР, его граница и ярусное расчленение. М. : Наука, 1985. С. 63–68.

Брейвель М.Г., Брейвель И.А., Брейвель Н.М. Биостратиграфическое расчленение нижнего, среднего и низов верхнего девона восточного склона Урала по брахиоподам // Новые данные по ранне- и среднепалеозойским брахиоподам СССР: Информационные материалы. Свердловск : УрО АН СССР, 1989. С. 9–12.

- Брылин А.И., Коверда П.Т.** Артемовский краеведческий словарь. Артемовский, 1998. 229 с.
- Гладковский А.К.** Новые данные о бокситоносности восточного склона Среднего Урала // Известия АН СССР. Сер. Геологическая. 1943. № 4.
- Гладковский А.К., Шарова А.К.** Бокситы Урала. М. : Гостеолиздат, 1951. 246 с.
- Евдокимова И.О.** О проблеме границы среднего и верхнего девона на Восточно-Европейской платформе // Вестник геонаук. 2023. № 1, т. 337. С. 4–15.
- Зенкова Г.Г.** Остракоды среднего девона Урала // Средний девон СССР, его граница и ярусное расчленение. М. : Наука, 1985. С. 106–111.
- Иванов А.О.** Комплексы позвоночных и зоны верхнего живета и нижнего франа Восточно-Европейской платформы и Урала // Вестник геонаук. 2023. № 1, т. 337. С. 23–29.
- Иванов К.С., Пучков В.Н.** Структурно-формационные зоны Уральского складчатого пояса: обзор данных и развитие новых идей // Геотектоника. 2022. № 6. С. 78–113.
- Информационный отчет** по прогнозно-поисковым работам на золото на Алапаевской площади. Лист О-41-XX. Отчет Исследовательской ГСП за 2000–2002 гг. / отв. исполн. А.В. Коровко. Верхняя Пышма : ОАО СУГРЭ, 2002ф. 282 с.
- Казаков И.И., Стороженко Е.В., Харитонов И.Н., Стефановский В.В., Козьмин С.В., Фауст А.Э., Мартынов С.Э., Фаденчева И.Ф., Прутьян А.М., Гриневич С.В., Ронкин Ю.Л., Звoryгина А.А., Пушкарев Е.В.** Отчет о результатах работ по объекту «ГДП-200 Листа О-41-XX (Алапаевская площадь)» за 2014–2016 гг. Кн. 1. Екатеринбург : ОАО УГСЭ, 2016. 306 с.
- Карпинский А.П.** Геологическая карта восточного склона Урала. Картографическое заведение А. Ильина в С. Петербурге, 1884.
- Карпинский А.П.** Геологические исследования на восточном склоне Урала. К истории геологического изучения России. Т. IV. М. ; Л. : АН СССР, 1949. 463 с.
- Коровко А.В., Бороздина Г.Н., Иванов К.С.** Маминская вулканогенная толща позднего живета-раннего франа Алапаевско-Теченской зоны (Средний Урал) // Ежегодник-2004. Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2005. С. 62–68.
- Коровко А.В., Бурнатная Л.Н.** Отчет по поисковым работам на медное и полиметаллическое оруденения на Бобровской площади за 1998–2003 гг. (инв. № 43509). 2003ф.
- Кучева Н.А., Степанова Т.И.** Новые местные стратиграфические подразделения в нижнем карбоне Алапаевско-Теченской СФЗ // Ежегодник-2003. Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2004. С. 25–28.
- Мельничук О.Ю.** Верхнедевонские терригенные отложения среднего сегмента Восточно-Уральской мегазоны: особенности вещественного состава и условия осадконакопления : дис. ... канд. геол.-минер. наук. Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2022. 241 с.
- Мизенс А.Г.** Биостратиграфическое расчленение живетско-фаменских отложений Среднего и Южного Урала // Литосфера. 2012а. № 2. С. 43–54.
- Мизенс А.Г.** Брахиоподы и биостратиграфия верхнего девона Среднего и Южного Урала. Екатеринбург : РИО УрО РАН, 2012б. 324 с.
- Мизенс А.Г.** Стратиграфическое значение живетско-фаменских брахиопод из типовых разрезов восточного склона Среднего и Южного Урала // Ежегодник-2010. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 158. Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2011. С. 27–31.
- Мизенс А.Г., Мизенс Л.И.** Биостратиграфия и корреляция живетско-фаменских типовых разрезов Среднего и Южного Урала по брахиоподам // Литосфера. 2012. № 5. С. 33–49.
- Мизенс Г.А., Степанова Т.И., Кучева Н.А.** Восточные зоны Среднего Урала в карбоне (эволюция бассейнов осадконакопления и особенности палеотектоники) // Литосфера. 2012. № 4. С. 107–126.
- Мизенс Г.А., Степанова Т.И., Кучева Н.А., Коровко А.В.** Фациальные особенности обломочных пород башкирского яруса на восточном склоне Среднего Урала // Ежегодник-2006. Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2007. С. 94–100.
- Мухина В.П., Шуйский В.П.** Литология, палеогеография и фации живетского века Северного, Среднего и Южного Урала (Отчет по теме «Литолого-палеогеографическая карта живетского века Урала масштаба 1 : 1000000». Инв. № 29503). 1965ф.
- Наседкина В.А., Бороздина Г.Н.** Конодонты из пограничных отложений среднего и верхнего девона на восточном склоне Среднего Урала // Проблемы стратиграфии и палеонтологии Урала : сб. науч. тр. / под. ред. К.К. Золоева, Н.Я. Анцыгина. Екатеринбург : Минприроды РФ, Комприроды по Свердл. обл., ОАО УГСЭ, 1999. С. 45–51.
- Наседкина В.А., Зенкова Г.Г.** Биостратиграфия верхнего девона на восточном склоне Среднего и Северного Урала // Проблемы стратиграфии и палеонтологии Урала : сб. науч. тр. / под. ред. К.К. Золоева, Н.Я. Анцыгина. Екатеринбург : Минприроды РФ, Комприроды по Свердл. обл., ОАО УГСЭ, 1999. С. 51–74.
- Наседкина В.А., Зенкова Г.Г., Абрамова А.Н.** Проблемы стратиграфии девона на Урале // Проблемы стратиграфии Урала. Девонская система (препринт). Свердловск : ИГГ УрО АН СССР, 1990а. С. 2–9.
- Наседкина В.А., Постоялко М.В., Плюснина А.А., Зенкова Г.Г., Петрова Л.Г., Степанова Т.И., Черепанова Н.А., Шишова Д.И.** К стратиграфии верхнего девона на восточном склоне Среднего Урала // Проблемы стратиграфии Урала. Девонская система (препринт). Свердловск : ИГГ УрО АН СССР, 1990б. С. 22–23.
- Ошуркова М.В.** Морфология, классификация и описание форма-родов миоспор позднего палеозоя. СПб. : ВСЕГЕИ, 2003. 377 с.
- Петров Г.А., Жиганов А.А., Стефановский В.В., Шалагинов В.В., Петрова Т.А., Овчинников Р.А., Гертман Т.А.** Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист О-41 – Екатеринбург. Объяснительная записка. СПб. : Картфабрика ВСЕГЕИ, 2011. 492 с.
- Постановления** Межведомственного стратиграфического комитета и его постоянных комиссий. СПб. : ВСЕГЕИ, 2008. Вып. 38. 120 с.
- Постоялко М.В., Черепанова Н.А.** К стратиграфии нижнего визе восточного склона Среднего Урала // Границы биостратиграфических подразделений карбона Урала. Свердловск : ИГГ УрО АН СССР, 1990. С. 35–56.
- Пронин А.А.** Девонские образования Алапаевско-Каменского района на Урале // Тр. Горно-геол. ин-та УФАИ СССР. Свердловск, 1950. Вып. 17. С. 21–36.
- Пронин А.А.** Карбон восточного склона Среднего Урала. М. ; Л. : АН СССР, 1960. 232 с.
- Пучков В.Н.** Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа : Даурия, 2000. 145 с.

Региональная стратиграфическая схема девонских отложений восточного склона Урала (8 листов) // Унифицированные и корреляционные стратиграфические схемы Урала / отв. ред. М.Г. Брейвель, Г.Н. Папулов, А.Н. Ходякович. Свердловск, 1980.

Решение Межведомственного регионального стратиграфического совещания по среднему и верхнему палеозою Русской платформы с региональными стратиграфическими схемами. Девонская система / ред. М.А. Ржонсницкая, В.Ф. Куликова. Л. : ВСЕГЕИ, 1990. 60 с.

Смирнов В.Н. Основные этапы магматизма восточного склона Среднего Урала // Литосфера. 2012. № 5. С. 4–15.

Смирнов Г.А., Смирнова Т.А., Ключина М.Л., Анфимов Л.В. Материалы к палеогеографии Урала. Очерк V. Франский век. М. : АН СССР, 1974. 218 с.

Соболев Н.Н., Евдокимова И.О. Общая стратиграфическая шкала девонской системы: состояние и проблемы // Общая стратиграфическая шкала России: состояние и проблемы обустройства: Всерос. совещ. 23–25 мая 2013 г., Геологический институт РАН, Москва : сб. ст. / М.А. Федонкин (отв. ред.), Ю.Б. Гладенков, В.А. Захаров, А.П. Ипполитов (ред.). М. : ГИН РАН, 2013. С. 139–148.

Степанова Т.И., Кучева Н.А., Постоялко М.В. Литолого-стратиграфическая характеристика нижневизейских карбонатных отложений бассейна р. Реж (мироновская свита) на восточном склоне Среднего Урала // Литосфера. 2008. № 5. С. 15–38.

Степанова Т.И., Постоялко М.В. Микрофаунистическая характеристика и корреляция отложений мироновской свиты (нижневизейский подъярус) в разрезе «Покровское», восточный склон Среднего Урала // Литосфера. 2012. № 1. С. 54–73.

Стратиграфический кодекс России. Издание третье, исправленное и дополненное. СПб. : ВСЕГЕИ, 2019. 96 с.

Субрегиональная стратиграфическая схема девонских отложений восточного Урала, 16 листов // Стратиграфические схемы Урала (докембрий, палеозой) / под ред. Н.Я. Анцыгина, Б.А. Попова, Б.И. Чувашова. Екатеринбург, 1993.

Тельнова О.П. Миоспоры из средне-верхнедевонских отложений Тимано-Печорской провинции. Екатеринбург : УрО РАН, 2007. 136 с.

Тельнова О.П. Морфология и ультраструктура девонских прازیнофитов (Chlorophyta) // Палеонтологический журнал. 2012. № 5. С. 1–7.

Тельнова О.П., Шумилов И.Х. Терригенные отложения среднего–верхнего девона бассейна р. Цильма (Средний Тиман) и их палинологическая характеристика // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2019. Т. 27, № 1. С. 31–56. doi: 10.31857/0869-592X271 31-56

Тельнова О.П., Шумилов И.Х. Палинологическая зональность живецко-франского стратиграфического интервала в Тимано-Североуральском регионе // Вестник геонаук. 2023. Т. 337, № 1. С. 16–22.

Фортунатова Н.К., Зайцева Е.Л., Карцева О.А. Строение девонского терригенного комплекса и положение границы среднего и верхнего девона на западе Татарстана // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 2013. Т. 88, № 2. С. 22–49.

Чернышев Ф.Н. Фауна нижнего девона восточного склона Урала // Тр. Геол. Ком. 1893. Т. 4. 16 с.

Чувашов Б.И., Иванова Р.М., Колчина А.Н. Верхний палеозой восточного склона Урала. Стратиграфия и геологическая история. Свердловск : УНЦ АН СССР, 1984. 230 с.

Шнейдер Б.А., Ширишова Д.И. Литолого-палеогеографическое изучение среднедевонских и верхнедевонских отложений Алапаевско-Теченского мегасинклиория на Среднем Урале (инв. № 33611). 1973ф.

Шумилов И.Х., Тельнова О.П. Методика обработки углито-глинистых девонских пород для палинологического анализа. Часть 1 // Вестник ИГ КНЦ УрО РАН. 2013а. № 5. С. 12–15.

Шумилов И.Х., Тельнова О.П. Методика обработки углито-глинистых девонских пород для палинологического анализа. Часть 2 // Вестник ИГ КНЦ УрО РАН. 2013б. № 6. С. 11–14.

Becker R.T., Marshall J.E.A., Da Silva A.-C. The Devonian Period // The Geologic Time Scale / eds. by F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M.D. Schmitz, G.M. Ogg. 2020. P. 733–810.

Ivanov A.O. Fish assemblages from the Middle–Upper Devonian of the Middle Urals, Russia // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2022. Т. 164, кн. 4. P. 567–576.

Ovnatanova N.S., Kononova L.I. Frasnian conodonts from the Eastern Russian Platform // Paleontological Journal. 2008. № 42 (10). P. 997–1166.

Potonié R., Kremp G. Die Gattungen der paläozoischen Sporae dispersae und ihre Stratigraphie // Geol. Jahrb. 1954. Bd. 69. P. 111–194.

Potonié R., Kremp G. Synopsis der Gattungen des Sporae dispersae // VI Teil. Beih. Geol. Jahrbuch. 1970. № 94. P. 1–195.

Sandberg C.A., Ziegler W., Bultynck P. New standard conodont zones and Early Ancyrodella Phylogeny across Middle–Upper Devonian boundary // Courier Forschungsinstitut Senckenberg. 1989. V. 110. P. 195–230.

Ziegler W., Klapper G. Stages of the Devonian System // Episodes. 1985. № 2. P. 104–109.

Ziegler W., Sandberg C.A. The Late Devonian Standard Conodont Zonation // Courier Forsch.-Inst. Senckenberg. 1990. V. 121. P. 1–115.

References

Anfimov A.L. Mikrofauna izvestnyakov gubinskogo gorizonta v razreze «Pokrovskoe» Artemovskogo rajona Sverdlovskoj oblasti [Gubino limestone microfauna in «Pokrovskoe» section, Artemovsky district, Sverdlovsk region] // Ezhegodnik-2014. Tr. IGG UrO RAN, V. 162. Yekaterinburg: IGG UrO RAN, 2015. pp. 3–7. In Russian

Anfimov A.L. Svoeobrazie franskih izvestnyakov sargaevskogo gorizonta v razreze «Pokrovskoe» Artemovskogo rajona Sverdlovskoj oblasti [Sargaev regional substage limestones diversity in «Pokrovskoe» section, Artemovsky district, Sverdlovsk region] // Ezhegodnik-2015. Tr. IGG UrO RAN, V. 163. Yekaterinburg: IGG UrO RAN, 2016. pp. 3–7. In Russian

Artyushkova O.V., Telnova O.P., Mizens L.I., Mizens A.G. The first finding of Skeletognathus norrisi in association with higher plant spores and brachiopods in the Givetian-Frasnian boundary deposits drilled by borehole No. 8 Tsarichanskaya (East Orenburg uplift, Russian Platform) // Lithosphere (Russia). 2022. V. 22, No. 4. pp. 432–447. In Russian

Bikbaev A.Z., Snigireva M.P. K stratigrafii zhivetsko-franskih otlozhenij na vostochnom sklone Srednego Urala [About Givetian–Frasnian units stratigraphy in the Middle Urals eastern slope] // Ezhegodnik-1997. Yekaterinburg: IGG UrO RAN, 1998. pp. 3–6. In Russian

- Bikbaev A.Z., Snigireva M.P., Tsigler V., Ivanov A.O. *K stratigrafii pogranichnykh zhivetsko-franskikh otlozhenij tipovogo razreza «Pokrovskoe» na vostochnom sklone Srednego Urala* [About Givetian–Frasnian boundary units stratigraphy of the «Pokrovskoe» key section in the Middle Urals eastern slope] // *Geologiya devonskoj sistemy: Materialy Mezhdunarodnogo simpoziuma. Syktyvkar, Resp. Komi, Rossiya, 9–12 iyulya 2002 g. Syktyvkar: Geoprint, 2002. pp. 138–140. In Russian*
- Bikbaev A.Z., Snigireva M.P., Tupitsyna M.A. *K voprosu o vozraste brachiopodovogo kompleksa s Rhysochonetes rugosus (Lyash.) v zhivetskikh otlozheniyakh tipovogo razreza «Pokrovskoe» (vostochnyj sklon Srednego Urala)* [About brachiopods complex with Rhysochonetes rugosus (Lyash.) in Givetian of the «Pokrovskoe» key section (Middle Urals eastern slope)] // *Ezhegodnik-2012. Tr. IGG UrO RAN, V. 160. Yekaterinburg: IGG UrO RAN, 2013. pp. 8–12. In Russian*
- Bikbaev A.Z., Snigireva M.P., Tupitsyna M.A. *Litologicheskaya kharakteristika i konodonty verkhnezhivetskikh otlozhenij tipovogo razreza «Pokrovskoe»* [Sedimentology and conodonts of the Upper Givetian strata in the «Pokrovskoe» key section] // *Ezhegodnik-2013. Tr. IGG UrO RAN, V. 161. Yekaterinburg: IGG UrO RAN, 2014. pp. 7–14. In Russian*
- Bikbaev A.Z., Snigireva M.P. *K probleme granitsy srednego i verhnego otdelov devonskoj sistemy na vostochnom sklone Srednego Urala* [About Middle/Upper Devonian boundary problem in the Middle Urals eastern slope] // *Obshchaya stratigraficheskaya shkala i metodicheskie problemy razrabotki regional'nykh stratigraficheskikh shkal Rossii. Materialy Mezhdunarodnogo rabochego soveshchaniya. Sankt-Peterburg, 17–20 oktyabrya 2016 g. St.Petersburg: VSEGEI, 2016. pp. 22–24. In Russian*
- Breyvel M.G., Bogoyavlenskaya O.V., Brejvel' I.A., Khodalevich A.N., Shurygina M.V., Yanet F.E. *Kishechnopolostnye i brachiopody zhivetskikh otlozhenij vostochnogo sklona Urala* [Zhivetian strata coelenterates and brachiopods in the Urals eastern slope]. Moscow: Nedra, 1972. 264 p. In Russian
- Breyvel M.G., Breyvel I.A. *Biostratigrafiya srednego devona vostochnogo sklona Srednego i Severnogo Urala* [Middle Devonian biostratigraphy in the Middle and North Urals eastern slope] // *Sredniy devon SSSR, ego granitsa i yarusnoe raschlenenie. Moscow: Nauka, 1985. pp. 63–68. In Russian*
- Breyvel M.G., Breyvel I.A., Breyvel N.M. *Biostratigraficheskoe raschlenenie nizhnego, srednego i nizov verhnego devona vostochnogo sklona Urala po brachiopodam* [Biostratigraphic subdivision of the Lower, Middle, and lower Upper Devonian of the eastern slope of the Urals based on brachiopods] // *Novye dannye po ranne- i srednepaleozojskim brachiopodam SSSR: Informatsionnye materialy. Sverdlovsk: UrO AN SSSR, 1989. pp. 9–12. In Russian*
- Brylin A.I., Koverda P.T. *Artemovskiy kraevedcheskiy slovar'* [Artemovsky regional vocabulary]. Artemovsky, 1998. 229 p. In Russian
- Gladkovskiy A.K. *Novye dannye o boksitonostnosti vostochnogo sklona Srednego Urala* [New data about bauxite potential in the Middle Urals eastern slope] // *Izvestiya AN SSSR. Ser. Geologicheskaya. 1943. № 4. In Russian*
- Gladkovskiy A.K., Sharova A.K. *Boksity Urala* [Urals bauxites]. Moscow: Gosgeolizdat, 1951. 246 p. In Russian
- Evdokimova I.O. *O probleme granitsy srednego i verhnego devona na Vostochno-Evropejskoj platforme* [About the problem of the Middle-Upper Devonian boundary in the East European Platform] // *Vestnik geonauk. 2023. No. 1. V. 337. pp. 4–15. In Russian*
- Zenkova G.G. *Ostrakody srednego devona Urala* [Middle Devonian ostracodes in the Urals] // *Sredniy devon SSSR, ego granitsa i yarusnoe raschlenenie. Moscow: Nauka, 1985. pp. 106–111. In Russian*
- Ivanov A.O. *Kompleksy pozvonochnykh i zony verhnego zhiveta i nizhnego frana Vostochno-Evropejskoj platformy i Urala* [Assemblages of vertebrates and zones from the Upper Givetian and Lower Frasnian of the East European Platform and Urals] // *Vestnik geonauk. 2023. No. 1. V. 337. pp. 23–29. In Russian*
- Ivanov K.S., Puchkov V.N. *Structural-Formational Zoning of the Ural Fold Belt: An Overview and New Approach* // *Geotektonika [Geotectonics]. 2022. No.6. pp. 78–113. In Russian*
- Informatsionnyj otchet po prognoznno-poiskovym rabotam na zoloto na Alapaevskoy ploschadi* [Gold forecasting and search works status report of the Alapayevsk field]. List O-41-XX. Otchet Isetskoy GSP za 2000-2002 gg. / A.V. Korovko. Verkhnyaya Pyshma: OAO SUGRE, 2002ф. 282 p. In Russian
- Kazakov I.I., Storozhenko E.V., Kharitonov I.N., Stefanovskiy V.V., Koz'min S.V., Faust A.Je., Martynov S.Je., Fadeicheva I.F., Prut'yan A.M., Grinevich S.V., Ronkin Yu.L., Zvorygina A.A., Pushkarev E.V. *Otchet o rezul'tatakh rabot po ob'ektu «GDP-200 Lista O-41-XX (Alapaevskaya ploschad')» za 2014-2016 gg. Kniga 1.* [Object «GDP-200 sheet O-41-XX (Alapayevsk)» work report for 2014-2016 yrs. Book 1.] Yekaterinburg: OAO UGSE, 2016. 306 p. In Russian
- Karpinsky A.P. *Geologicheskaya karta vostochnogo sklona Urala* [Urals eastern slope geological map]. Kartograficheskoe zavedenie A. Il'ina v St. Peterburge, 1884. In Russian
- Karpinsky A.P. *Geologicheskie issledovaniya na vostochnom sklone Urala. K istorii geologicheskogo izucheniya Rossii* [Geological research in the Urals eastern slope. About Russia history of the geological research]. V. IV. Moscow-Leningrad: AN SSSR, 1949. 463 p. In Russian
- Korovko A.V., Borozdina G.N., Ivanov K.S. *Maminskaya vulkanogennaya tolshcha pozdnego zhiveta-rannego frana Alapaevsko-Techenskoj zony (Srednij Ural)* [Givetian–Lower Frasnian Maminskoye volcanogenic unit in the Alapayevsk-Techa zone (Middle Urals)] // *Ezhegodnik-2004. Yekaterinburg: IGG UrO RAN, 2005. pp. 62–68. In Russian*
- Korovko A.V., Burnatnaya L.N. *Otchet po poiskovym rabotam na mednoe i polimetallicheskoe orudneniya na Bobrovskoj ploschadi za 1998-2003 gg.* [Report about copper and polymetallic mineralization in the Bobrovka field for 1998-2003 yrs] (inv. № 43509). 2003ф. In Russian
- Kucheva N.A., Stepanova T.I. *Novye mestnye stratigraficheskie podrazdeleniya v nizhnem karbone Alapaevsko-Techenskoj SFZ* [New Lower Carboniferous local units of the Alapayevsk-Techa structural zone] // *Ezhegodnik-2003. Yekaterinburg: IGG UrO RAN, 2004. pp. 25–28. In Russian*
- Mel'nichuk O.Yu. *Verkhnedevonskie terrigennye otlozheniya srednego segmenta Vostochno-Ural'skoj megazony: osobennosti veshchestvennogo sostava i usloviya osadkonakopleniya. Dis. ... kand. geol.-min. nauk.* [Upper Devonian sedimentary deposits in the Eastern Urals megazone middle part: composition features and sedimentary environments. PhD thesis]. Yekaterinburg: IGG UrO RAN, 2022. 241 p. In Russian
- Mizens A.G. *Stratigraficheskoe znachenie zhivetsko-famenskikh brachiopod iz tipovykh razrezov vostochnogo sklona Srednego i Yuzhnogo Urala* [Stratigraphical significance of Givetian–Famennian brachiopods from the key sections in the Middle and Southern Urals eastern slope] // *Ezhegodnik-2010. Tr. IGG UrO RAN, vyp. 158. Yekaterinburg: IGG UrO RAN, 2011. pp. 27–31. In Russian*

- Mizens A.G. *Biostratigraficheskoe raschlenenie zhivetsko-famenskikh otlozhenij Srednego i Yuzhnogo Urala* [Givetian–Famennian strata biostratigraphical subdivision in the Middle and Southern Urals] // *Litosfera*. 2012a. No. 2. pp. 43–54. In Russian
- Mizens A.G. *Brakhiopody i biostratigrafiya verkhnego devona Srednego i Yuzhnogo Urala* [Upper Devonian brachiopods and biostratigraphy in the Middle and Southern Urals]. Yekaterinburg: RIO UrO RAN, 2012b. 324 p. In Russian
- Mizens A.G., Mizens L.I. *Biostratigrafiya i korrelyatsiya zhivetsko-famenskikh tipovykh razrezov Srednego i Yuzhnogo Urala po brakhiopodam* [Biostratigraphy and correlation of Givetian–Famennian key sections based on brachiopods in the Middle and Southern Urals eastern slope] // *Litosfera*. 2012. No. 5. pp. 33–49. In Russian
- Mizens G.A., Stepanova T.I., Kucheva N.A. *Vostochnye zony Srednego Urala v karbone (evolyutsiya bassejnov osadkonakopleniya i osobennosti paleotektoniki)* [Middle Urals facies zones in Carboniferous (sedimentary basin evolution and paleotectonic features)] // *Litosfera*. 2012. No. 4. pp. 107–126. In Russian
- Mizens G.A., Stepanova T.I., Kucheva N.A., Korovko A.V. *Fatsial'nye osobennosti oblomochnykh porod bashkirskogo yarusa na vostochnom sklone Srednego Urala* [Facial features of the Bashkirian sedimentary rocks in the Middle Urals eastern slope] // *Ezhegodnik-2006*. Yekaterinburg: IGG UrO RAN, 2007. pp. 94–100. In Russian
- Mukhina V.P., Shujskij V.P. *Litologiya, paleogeografiya i fatsii zhivetskogo veka Severnogo, Srednego i Yuzhnogo Urala (Otchet po teme «Litologo-paleogeograficheskaya karta zhivetskogo veka Urala masshtaba 1:1000000». Inv. № 29503)* [Givetian sedimentology, paleogeography and facies in the Northern, Middle and Southern Urals («Givetian sedimentology map of the Urals scale 1 : 1000000»)]. 1965ф.
- Nasedkina V.A., Borozdina G.N. *Konodonty iz pogranichnykh otlozhenij srednego i verkhnego devona na vostochnom sklone Srednego Urala* [Middle-Upper Devonian boundary strata conodonts in the Middle Urals eastern slope] // *Problemy stratigrafii i paleontologii Urala*. Sb. nauch. tr. / pod. red. K.K. Zoloeva, N.Ya. Antsygina. Yekaterinburg: Minprirody RF, Komprirody po Sverdl. obl., OAO UGSE, 1999. pp. 45–51. In Russian
- Nasedkina V.A., Zenkova G.G. *Biostratigrafiya verkhnego devona na vostochnom sklone Srednego i Severnogo Urala* [Upper Devonian biostratigraphy in the Middle Northern Urals eastern slope] // *Problemy stratigrafii i paleontologii Urala*. Sb. nauch. tr. / pod. red. K.K. Zoloeva, N.Ya. Antsygina. Yekaterinburg: Minprirody RF, Komprirody po Sverdl. obl., OAO UGSE, 1999. pp. 51–74. In Russian
- Nasedkina V.A., Zenkova G.G., Abramova A.N. *Problemy stratigrafii devona na Urale* [Problems of Devonian stratigraphy in the Urals] // *Problemy stratigrafii Urala*. Devonskaya sistema (preprint). Sverdlovsk: IGG UrO AN SSSR, 1990a. pp. 2–9. In Russian
- Nasedkina V.A., Postoyalko M.V., Plyusnina A.A., Zenkova G.G., Petrova L.G., Stepanova T.I., Cherepanova N.A., Shirshova D.I. *K stratigrafii verkhnego devona na vostochnom sklone Srednego Urala* [About Upper Devonian stratigraphy in the Middle Urals eastern slope] // *Problemy stratigrafii Urala*. Devonskaya sistema (preprint). Sverdlovsk: IGG UrO AN SSSR, 1990b. pp. 22–23. In Russian
- Oshurkova M.V. *Morfologiya, klassifikatsiya i opisanie forma-rodov miospor pozdnego paleozoya* [Morphology, classification and description of Late Paleozoic miospore form-genus]. St.Petersburg: VSEGEI, 2003. 377 p. In Russian
- Petrov G.A., Zhiganov A.A., Stefanovskij V.V., Shalaginov V.V., Petrova T.A., Ovchinnikov R.A., Gertman T.A. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Ural'skaya. List O-41 – Ekaterinburg. Ob'yasnitel'naya zapiska* [State geological map of Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (Third edition). Urals series. Sheet O-41 – Yekaterinburg. Explanatory note]. St.Petersburg: Kartfabrika VSEGEI, 2011. 492 p. In Russian
- Postanovleniya Mezhdomeystvennogo stratigraficheskogo komiteta i ego postoyannykh komissij* [Resolutions of the Interdepartmental Stratigraphic Committee and its standing committees]. St. Petersburg: VSEGEI, 2008. 38. 120 p. In Russian
- Postoyalko M.V., Cherepanova N.A. *K stratigrafii nizhnego vize vostochnogo sklona Srednego Urala* [About Lower Viséan stratigraphy in the Middle Urals eastern slope] // *Granitsy biostratigraficheskikh podrazdelenij karbona Urala*. Sverdlovsk: IGIG UrO AN SSSR, 1990. pp. 35–56. In Russian
- Pronin A.A. *Devonskie obrazovaniya Alapayevsko-Kamenskogo rajona na Urale* [Devonian rocks of the Alapayevsk-Kamensk region in the Urals] // *Tr. Gorno-geol. in-ta UFAN SSSR*. Sverdlovsk, 1950. V. 17. pp. 21–36. In Russian
- Pronin A.A. *Karbon vostochnogo sklona Srednego Urala* [Carboniferous in the Middle Urals eastern slope]. Moscow-Leningrad: AN SSSR, 1960. 232 p. In Russian
- Puchkov V.N. *Paleogeodinamika Yuzhnogo i Srednego Urala* [Southern and Middle Urals paleogeodynamics]. Ufa: Dauriya, 2000. 145 p. In Russian
- Regional'naya stratigraficheskaya skhema devonskikh otlozhenij vostochnogo sklona Urala (8 listov)* [Regional stratigraphic scheme of Devonian deposits of the Urals eastern slope (8 sheets)] // *Unifitsirovannyye i korrelyatsionnyye stratigraficheskiye skhemy Urala* / M.G. Breyvel', G.N. Papulov, A.N. Khodalevich (otv. red.). Sverdlovsk, 1980. In Russian
- Reshenie Mezhdomeystvennogo regional'nogo stratigraficheskogo soveshchaniya po srednemu i verkhnemu paleozoyu Russkoj platformy s regional'nymi stratigraficheskimi skhemami. Devonskaya sistema* [Decision of the Interdepartmental Regional Stratigraphic Conference on the Middle and Upper Paleozoic of the Russian Platform with regional stratigraphic schemes. Devonian system] / Ed. Rzhonsnitskaya M.A., Kulikova V.F. Leningrad: VSEGEI, 1990. 60 p. In Russian
- Smirnov V.N. *Osnovnye jetapy magmatizma vostochnogo sklona Srednego Urala* [Main magmatic stages in the Middle Urals eastern slope] // *Litosfera*. 2012. No. 5. pp. 4–15. In Russian
- Smirnov G.A., Smirnova T.A., Klyuzhina M.L., Anfimov L.V. *Materialy k paleogeografii Urala. Ocherk V. Franskij vek* [Urals paleogeography data. Study V. Frasnian age]. Moscow: AN SSSR, 1974. 218 p. In Russian
- Sobolev N.N., Evdokimova I.O. *Obshchaya stratigraficheskaya shkala devonskoj sistemy: sostoyanie i problemy* [General stratigraphic scale of Devonian stage: state and problems] // *Obshchaya stratigraficheskaya shkala Rossii: sostoyanie i problemy obustrojstva: Vseros. soveshch.* 23-25 maya 2013 g., Geologicheskij institut RAN, Moskva: Sbornik statey / M.A. Fedonkin (otv. red.), Yu.B. Gladenkov, V.A. Zakharov, A.P. Ippolitov (red.). Moscow: GIN RAN, 2013. pp. 139–148. In Russian
- Stepanova T.I., Kucheva N.A., Postoyalko M.V. *Litologo-stratigraficheskaya kharakteristika nizhnivejskikh karbonatnykh otlozhenij bassejna r. Rezh (mironovskaya svita) na vostochnom sklone Srednego Urala* [Sedimentological and stratigraphic features of the Lower Viséan rocks in the Rezh river basin (Mironovo Formation), the Middle Urals eastern slope] // *Litosfera*. 2008. No. 5. pp. 15–38. In Russian

- Stepanova T.I., Postoyalko M.V. *Mikrofaunisticheskaya kharakteristika i korrelyatsiya otlozhenij mironovskoj svity (nizhneprevizjskij pod"yarus) v razreze «Pokrovskoe», vostochnyj sklon Srednego Urala* [Microfauna characteristics and correlation of Mironovo Formation (Lower Visian substage) in the «Pokrovskoe» section, Middle Urals eastern slope] // *Litosfera*. 2012. No. 1. pp. 54–73. In Russian
- Stratigraficheskij kodeks Rossii. Izdanie tret'e, ispravlennoe i dopolnennoe* [Stratigraphic Code of Russia. 3rd edition, corrected and updated]. St.Petersburg: VSEGEI, 2019. 96 p. In Russian
- Subregional'naya stratigraficheskaya skhema devonskikh otlozhenij vostochnogo Urala, 16 listov* [Subregional stratigraphic scheme of Devonian deposits of the Eastern Urals, 16 sheets] // *Stratigraficheskie skhemy Urala (dokembriy, paleozoy)* / N.Ya. Antsygin, B.A. Popov, B.I. Chuvashov (red.). Yekaterinburg, 1993. In Russian
- Telnova O.P. *Miospory iz sredne-verkhnedevonskikh otlozhenij Timano-Pechorskoj provintsii* [Miospores from Middle and Upper Devonian rocks in the Timan-Pechora province]. Yekaterinburg: UrO RAN, 2007. 136 p. In Russian
- Telnova O.P. *Morfologiya i ul'trastruktura devonskikh prazinofitov (Chlorophyta)* [Morphology and ultrastructure of Devonian prasinophytes (Chlorophyta)] // *Paleontological Journal*. 2012. No. 5. pp. 1–7. doi: 10.1134/S0031030112050127. In Russian
- Telnova O.P., Shumilov I.K. *Terrigennye otlozheniya srednego-verkhnego devona bassejna r. Tsil'ma (Srednij Timan) i ikh palinologicheskaya kharakteristika* [Middle–Upper Devonian Terrigenous Rocks of the Tsil'ma River Basin and Their Palynological Characteristics] // *Stratigrafiâ. Geologičeskââ korrelâciâ* [Stratigraphy and Geological Correlation]. 2019. V. 27. pp. 31–56. doi: 10.1134/S0869593819010064. In Russian
- Telnova O.P., Shumilov I.Kh. *Palinologicheskaya zonal'nost' zhivetsko-franskogo stratigraficheskogo intervala v Timano-Severoural'skom regione* [Palinological zonation of the Givetian-Frasnian stratigraphic interval in the Timan-Northern Urals region] // *Vestnik geonauk*. 2023. V. 337. No. 1. pp. 16–22. In Russian
- Fortunatova N.K., Zaitseva E.L., Kartseva O.A. *Stroenie devonskogo terrigennogo kompleksa i polozenie granitsy srednego i verkhnego devona na zapade Tatarstana* [Devonian clastic complex structure and Middle/Upper Devonian boundary location in the Tatarstan west part] // *Byull. MOIP. Otd. geol.* 2013. V. 88, No. 2. pp. 22–49. In Russian
- Chernyshev F.N. *Fauna nizhnego devona vostochnogo sklona Urala* [Lower Devonian fauna in the Urals eastern slope]. *Tr. Geol. Kom.* 1893. V. 4. 16 p. In Russian
- Chuvashov B.I., Ivanova R.M., Kolchina A.N. *Verkhniy paleozoy vostochnogo sklona Urala. Stratigrafiya i geologicheskaya istoriya* [Upper Paleozoic in the Urals eastern slope. Stratigraphy and geological history]. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR, 1984. 230 p. In Russian
- Schneider B.A., Shirshova D.I. *Litologo-paleogeograficheskoe izuchenie srednedevonskikh i verkhnedevonskikh otlozhenij Alapaysko-Techenskogo megasinklinoriya na Srednem Urale* [Sedimentology and paleogeography research of the Middle and Upper Devonian rocks in the Eastern Urals Alapayevsk-Techa megasinclinalorium] (inv. № 33611). 1973ф. In Russian
- Shumilov I.Kh., Telnova O.P. *Metodika obrabotki uglisto-glinistyx devonskikh porod dlya palinologicheskogo analiza. Chast' 1* [Treatment methodic for Devonian coaly-mud deposits for the pollen analysis. Article 1] // *Vestnik IG KNTs UrO RAN*. 2013a. No. 5. pp. 12–15. In Russian
- Shumilov I.Kh., Telnova O.P. *Metodika obrabotki uglisto-glinistyx devonskikh porod dlya palinologicheskogo analiza. Chast' 2* [Treatment methodic for Devonian coaly-mud deposits for the pollen analysis. Article 1] // *Vestnik IG KNTs UrO RAN*. 2013b. No. 6. pp. 11–14. In Russian
- Becker R.T., Marshall J.E.A., Da Silva A.-C. The Devonian Period / F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M.D. Schmitz, G.M. Ogg (Eds.) // *The Geologic Time Scale*. 2020. pp. 733–810.
- Ivanov A.O. Fish assemblages from the Middle–Upper Devonian of the Middle Urals, Russia // *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki* [Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series]. 2022. T. 164. 4. pp. 567–576.
- Ovnatanova N.S., Kononova L.I. Frasnian conodonts from the Eastern Russian Platform // *Paleontological Journal*. 2008. 42 (10). pp. 997–1166.
- Potonie R., Kremp G. Die Gattungen der palaozoischen Sporae dispersae und ihre Stratigraphie // *Geol. Jahrb.* 1954. Bd. 69. pp. 111–194.
- Potonie R., Kremp G. Synopsis der Gattungen des Sporae dispersae // VI Teil. *Beih. Geol. Jahrbuch*. 1970. No. 94. pp. 1–195.
- Sandberg C.A., Ziegler W., Bultynck P. New standard conodont zones and Early Ancyrodella Phylogeny across Middle– Upper Devonian boundary // *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*. 1989. V. 110. pp. 195–230.
- Ziegler W., Klapper G. Stages of the Devonian System // *Episodes*. 1985. 2. pp. 104–109.
- Ziegler W., Sandberg C.A. The Late Devonian Standard Conodont Zonation // *Courier Forsch.-Inst. Senckenberg*. 1990. V. 121. pp. 1–115.

Информация об авторах:

Тельнова О.П., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН им. Н.П. Юшкина, Сыктывкар, Россия.

Email: telnova@geo.komisc.ru

Дуб С.А., научный сотрудник, Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого, УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

Email: sapurin@igg.uran.ru

Мельничук О.Ю., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого, УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

Email: melnichuk@igg.uran.ru

Артюшкова О.В., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии, УФИЦ РАН, Уфа, Россия.

Email: stpal@ufaras.ru

Евдокимова И.О., старший научный сотрудник, председатель комиссии по девонской системе МСК, Всероссийский научно-исследовательский институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: Irina_Evdokimova@karpinskyinstitute.ru

Вклад авторов: все авторы участвовали в полевых работах.

Тельнова О.П.: выполнен палинологический анализ; написаны разделы: «Аннотация», «Введение», «Материалы и методы исследования», «Споры высших растений», частично «Заключение», составлена таблица 1; обсуждение и редактирование рукописи.

Дуб С.А.: написаны разделы «Геологическая позиция», «История геологического изучения...», частично «Современное состояние разреза», частично «Заключение»; обсуждение и редактирование рукописи.

Мельничук О.Ю.: написан раздел «Современное состояние разреза», выполнены иллюстрации к рукописи, перевод рукописи на английский, оформление.

Артюшкова О.В.: полевое описание обнажений, приведена предварительная информация о конодонтах, написан раздел «Заключение», частично «Введение», «История геологического изучения...», «Современное состояние разреза»; обсуждение и редактирование рукописи, корректура.

Евдокимова И.О.: обсуждение и редактирование рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Tel'nova O.P., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Institute of Geology Komi Scientific Centre, UB RAS, Syktyvkar, Russia.

Email: telnova@geo.komisc.ru

Dub S.A., Researcher, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, Yekaterinburg, Russia.

Email: sapurin@igg.uran.ru

Mel'nichuk O.Yu., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, Yekaterinburg, Russia.

Email: melnichuk@igg.uran.ru

Artyushkova O.V., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher, Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia.

Email: stpal@ufaras.ru

Evdokimova I.O., Senior Researcher, Chairman of the Commission on the Devonian system of MSK, Karpinsky Russian Geological Research Institute, Saint-Petersburg, Russia.

Email: Irina_Evdokimova@karpinskyinstitute.ru

Authors' contribution: All authors participated in the fieldwork.

Tel'nova O.P.: performed palynological analysis; wrote the sections: "Abstract", "Introduction", "Material and Methods", "Spores of Higher Plants", partially "Conclusion", compiled Table 1; discussion and editing of the manuscript.

Dub S.A.: wrote the sections "Geological position", "History of geological study...", partially "Current state of the section", partially "Conclusion"; discussion and editing of the manuscript.

Melnichuk O.Yu.: wrote the section "Current state of the section", made illustrations for the manuscript, translated the manuscript into English, design.

Artyushkova O.V.: field description of outcrops, provided preliminary information on conodonts, wrote the section "Conclusion", partially "Introduction", "History of geological study...", "Current state of the section"; discussion and editing of the manuscript, proofreading.

Evdokimova I.O.: discussion and editing of the manuscript.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.04.2024; одобрена после рецензирования 17.09.2024; принята к публикации 29.08.2025

The article was submitted 17.04.2024; approved after reviewing 17.09.2024; accepted for publication 29.08.2025

Научная статья

УДК 569.32/551.79/551.89

doi: 10.17223/25421379/36/3

АССОЦИАЦИИ ГРЫЗУНОВ ВОЛЧЬЕЙ ГРИВЫ: ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ СТРАТИГРАФИИ И ПАЛЕОГЕОГРАФИИ ПОЗДНЕГО НЕОПЛЕЙСТОЦЕНА – ГОЛОЦЕНА ЮГА ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ РАВНИНЫ



Александра Сергеевна Самандросова¹, Сергей Владимирович Лещинский²,
Елена Михайловна Бурканова³, Александр Васильевич Бородин⁴, Павел Андреевич Косинцев⁵

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

² Музей Природы и Человека, Ханты-Мансийск, Россия

^{4, 5} Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия

¹ a.samandrosova@gmail.com

² mammothfauna@gmail.com

³ bv.elen@mail.ru

⁴ bor@ipae.uran.ru

⁵ kpa@ipae.uran.ru

Аннотация. Представлены результаты тафономического и морфологического анализов остатков грызунов из отложений верхнего неоплейстоцена – голоцена местонахождения Волчья грива (Новосибирская область). Выделены две ассоциации микротериофауны, существовавшие в период последнего ледникового максимума и позднем голоцене, которые характеризуют степные и лугостепные (возможно, лесостепные) ландшафты соответственно.

Ключевые слова: Барабинская низменность, поздний неоплейстоцен, голоцен, грызуны

Благодарности: Авторы признательны Н.В. Погодиной и М.В. Синице (Уральский федеральный университет, Екатеринбург), С.Е. Голованову (Московский государственный университет) за помощь при описании остатков суслика и цоколя соответственно. За помощь в проведении полевых и лабораторных исследований мы благодарим А.Т. Джуманова, А.С. Климова, С.С. Перфильева, Д.Ю. Кадочникова, Н.С. Кравчука и Е.А. Осипову (Томский государственный университет), В.Н. Зенина (Институт археологии и этнографии СО РАН, Новосибирск), Я.В. Кузьмина (Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск), И.Г. Кривокорина (Таллиннский технический университет, Эстония).

Для цитирования: Самандросова А.С., Лещинский С.В., Бурканова Е.М., Бородин А.В., Косинцев П.А. Ассоциации грызунов Волчьей гривы: значение для стратиграфии и палеогеографии позднего неоплейстоцена – голоцена юга Западно-Сибирской равнины // Геосферные исследования. 2025. № 3. С. 41–64. doi: 10.17223/25421379/36/3

Original article

doi: 10.17223/25421379/36/3

VOLCHIA GRIVA RODENT ASSOCIATIONS: STRATIGRAPHY AND PALEOGEOGRAPHY SIGNIFICANCE FOR THE LATE NEO-PLEISTOCENE – HOLOCENE OF SOUTHERN WEST SIBERIAN PLAIN

Aleksandra S. Samandrosova¹, Sergey V. Leshchinskiy², Elena M. Burkanova³,
Aleksandr V. Borodin⁴, Pavel A. Kosintsev⁵

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

² Museum of Nature and Man, Khanty-Mansiysk, Russia

^{4, 5} Institute of plant and animal ecology, UB RAS, Yekaterinburg, Russia

¹ a.samandrosova@gmail.com

² mammothfauna@gmail.com

³ bv.elen@mail.ru

⁴ bor@ipae.uran.ru

⁵ kpa@ipae.uran.ru

Abstract. The West Siberian Plain is a huge territory ~ 2.7 million square kilometers. Due to the flat relief, research covers only limited areas. This makes it difficult to study of Quaternary small mammals. Rodents play an important role in paleontological

and stratigraphic research. Considering the relatively high evolutionary advancement and low migration ability, their remains provide a clear picture of the natural zones structure and boundaries, which is of key importance for establishing the stratigraphic boundaries of faunal complexes and paleogeographic reconstructions. This study provides a detailed description of rodent associations at the Volchia Griva site (Baraba Lowland) during the Last Glacial Maximum and the Late Holocene.

The study includes taphonomic and morphological analyses. Taphonomic analysis of remains from the lower bone-bearing level revealed that they could have come from excrement or pellets. Root marks were also found on the most rodent remains of this level. The Holocene remains are very well preserved. There were no signs of exposure to gastric juice on them; therefore, the animals died from exhaustion, disease or other reasons. The diets of living rodents are presented and, on their ecology basis, the environmental conditions in the Late Neo-Pleistocene – Holocene are reconstructed. Both associations are autochthonous and reflect the predominance of open landscapes. The results we obtained allow us to speak about the wide distribution of dry steppes at the beginning of the MIS 2 and the predominance of meadow steppes (or forest-steppes) in the last third of the MIS 1. The Volchia Griva is keystone site for studying the of mammal colonization processes of open landscapes with cold and dry climates, as well as for studying the mechanisms and ways of modern biogeocenoses formation. This site plays an important role in substantiating natural barriers and limiting environmental factors on the migration routes of mammals, including Stone Age humans.

Keywords: Baraba Lowland, Late Neo-Pleistocene, Holocene, rodents

Acknowledgments: The authors are grateful to N.V. Pogodina and M.V. Sinita (Ural Federal University, Yekaterinburg), and S.E. Golovanov (Moscow State University) for help in describing of the ground squirrel and zokor remains, respectively. For assistance in conducting field and laboratory studies, we thank A.T. Dzhumanov, A.S. Klimov, S.S. Perfilov, D.Y. Kadochnikov, N.S. Kravchuk and E.A. Osipova (Tomsk State University), V.N. Zenin (Institute of Archeology and Ethnography SB RAS, Novosibirsk), Y.V. Kuzmin (Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk), I.G. Krivokorin (Tallinn University of Technology, Estonia).

For citation: Samandrosova A.S., Leshchinskiy S.V., Burkanova E.M., Borodin A.V., Kosintsev P.A. (2025) Volchia Griva rodent associations: stratigraphy and paleogeography significance for the Late Neo-Pleistocene – Holocene of southern West Siberian Plain. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 41–64. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/36/3

Введение

Мелкие млекопитающие, особенно грызуны, при палеонтолого-стратиграфическом изучении четвертичного периода играют большую роль. Учитывая относительно высокую стенобионтность, эволюционную продвинутость и низкую миграционную способность (в сравнении с крупными млекопитающими), их остатки дают четкую картину о структуре и границах природных зон, что имеет ключевое значение для установления стратиграфических рубежей фаунистических комплексов и палеогеографических реконструкций [Зажигин, 1980; Смирнов и др., 1986; Тесаков, 2004; Агаджанян, 2009; Маркова и др., 2017; Бородин и др., 2019; Markova et al., 2022]. Таким образом, изменение состава комплексов грызунов позднего неоплейстоцена – голоцена прямо говорит о смене условий окружающей среды в короткие промежутки геологического времени.

Огромная площадь Западно-Сибирской равнины (~ 2,7 млн км²) и труднодоступность многих ее районов, где естественные геологические разрезы формируются в основном по берегам рек, объясняют проведение планомерных исследований местонахождений мелких млекопитающих квартала лишь на отдельных отрезках долин среднего и нижнего течения Оби и Иртыша [Вангенгейм, 1977; Зажигин, 1980; Смирнов и др., 1986; Круковер, 1992; Тесаков и др., 2016; Бондарев и др., 2017]. По этой причине лучше известна микротериофауна плейстоцена хорошо освоенной в

хозяйственном отношении приподнятой юго-восточной окраины региона (Приобское плато и Предалтайская предгорная равнина) и ее горного обрамления – северо-западного Алтая [Панычев, 1979; Большаков и др., 1980; Зажигин, 1980; Круковер, 1992; Дупал, 1998, 2004], тогда как междуречные пространства обширного пояса лесостепей и степей остаются практически *terra incognita*.

В стратиграфической схеме квартала Западно-Сибирской равнины для огромной внеледниковой зоны верхнего неоплейстоцена выделен единый комплекс мелких млекопитающих, состоящий из пяти видов грызунов, при этом голоцен вовсе не охарактеризован [Унифицированная..., 2000]. В то же время в озерных и аллювиальных отложениях верхнего неоплейстоцена Южного Зауралья – соседнего района стратиграфической схемы Урала [Объяснительная..., 1997] – найдена представительная микротериофауна [Стефановский и др., 2003]. На этом фоне Барабинская низменность выглядит совершенно белым пятном.

Изучение мелких млекопитающих позднего неоплейстоцена – голоцена Барабы началось во время полевых работ 2015 г. Тогда экспедицией лаборатории континентальных экосистем мезозоя и кайнозоя ТГУ впервые проводились раскопки местонахождения Новодубровское, при которых в совместном залегании были обнаружены остатки крупных млекопитающих и грызунов. В тот же сезон после почти четвертьвекового перерыва возобновились раскопки

местонахождения мамонтовой фауны и палеолита Волчья грива [Лещинский и др., 2015].

Данное место, известное с 1957 г. как палеонтологический и археологический объект, привлекало исследователей находками мамонтов и других крупных млекопитающих, а также палеолитических артефактов [Алексеева, Волков, 1969; Алексеева, Верещагин, 1970; Окладников и др., 1971; Leshchinskiy et al., 2008, 2021].

Раскопки Волчьей гривы во второй половине XX в. и 2015 г. (северо-восточное фаунистическое скопление), и 2016–2021 гг. (центральное фаунистическое скопление) на общей площади более 550 м² дали более 9 тыс. остатков ископаемых млекопитающих, а также более 10 тыс. каменных артефактов из экзотического импортного сырья, изделия из костей и бивней [Лещинский, 2018; Климов и др., 2022; Leshchinskiy, Burkanova, 2022; Leshchinskiy et al., 2023]. Опубликованная серия из 50 радиоуглеродных дат указывает, что захоронение мамонтовой фауны формировалось ~ 10 тысяч лет – с последнего ледникового максимума до голоцена [Kuzmin et al., 2024]. В 2016 г. на Волчьей гриве были впервые найдены кости и зубы грызунов. С тех пор из данной локализации получен массовый материал по мелким млекопитающим, что позволило приступить к его детальному анализу [Самандросова, Лещинский, 2021]. Целью настоящей работы являлось изучение тафономии и морфологии остатков грызунов, уточнение геологического возраста и условий захоронения, а также реконструкция палеогеографических обстановок.

Региональная позиция

Волчья грива – сигарообразная возвышенность (длина ~ 11 км, ширина до 1 км, относительная высота до 15 м, максимальная альтиту́да 149,3 м), расположенная на востоке Барабинской низменности, в 220 км северо-восточнее границы России и Казахстана (рис. 1). Являясь классическим элементом геоморфологии лесостепной зоны, она почти прямолинейно ориентирована по азимуту ~ 50–55°. Местонахождение приурочено к северо-восточной части гривы, а пространственное распределение фаунистических и культурных материалов вписано в границы с. Мамонтовое (Каргатский район, Новосибирская область).

Барабинская низменность занимает территорию Обь-Иртышского междуречья и представлена лесостепными ландшафтами. Открытые участки, неизменные человеком, покрыты остепненными галофитно-злаковыми лугами. В колках доминирует береза, встречается ива и осина [Готов и др., 1978; Орлова, 1990]. Современные лесопосадки в основном представлены сосной – *Pinus sylvestris* L.

[Leshchinskiy, Burkanova, 2022]. Климат резко континентальный со средними температурами воздуха (по наблюдениям с середины XX в. на метеостанциях в Камне-на-Оби и Барабинске) в июле +18,3–19,7 °С, январе –19,1–18,2 °С; среднегодовыми температурами +0,5–1,2 °С при разнице между минимальными и максимальными температурами 85–95 °С. Годовое количество осадков 315–450 мм [Архив..., 2012].

Материалы и методы исследования

В работе использован материал из раскопок центрального фаунистического скопления Волчьей гривы (GPS координаты: 54°39'48.4" с.ш., 80°19'47.6" в.д.), полученный в 2016–2021 гг. на площади 55 м² [Самандросова, Лещинский, 2021; Leshchinskiy, Burkanova, 2022; Leshchinskiy et al., 2023]. Коллекция остатков грызунов хранится в лаборатории континентальных экосистем мезозоя и кайнозоя ТГУ.

Раскопки проводились классически – послойное или уровненое снятие отложений костеносного горизонта шпателями, кисточками и другими инструментами с почти полным отбором обнаруженных ископаемых остатков (кроме образцов очень плохой сохранности). Весь объем костеносных отложений промывался сквозь сита (1 мм) для поиска костей и зубов мелких позвоночных и микроартефактов. Костеносный горизонт Волчьей гривы местами пронизан ходами землеройных животных. Учитывая периодическую гибель в норах их строителей (грызунов) и, возможно, преследователей (мелких хищников), вероятно смешивание ископаемого материала разного возраста. Для исключения этого фактора заполнение ходов выбиралось и промывалось отдельно. В результате найдены сотни костей и зубов грызунов отличной сохранности, которые учитывались отдельно. Описание разрезов и тафономические наблюдения в поле сопровождались фотографированием и зарисовками.

Всего обнаружено 564 остатка грызунов: зубы, челюсти и другие кости (целые и фрагменты), которые лабораторно были очищены в ультразвуковой ванне ПСБ–Галс. Тафономические и морфологические исследования материала проводились с помощью стереомикроскопов Leica M 205 C (с цифровой камерой FLEXACAM C1) и Leica MZ 16 (с цифровой камерой AxioCam ERc5s) при увеличении до ×200. Особое внимание уделялось посмертным изменениям поверхностей костей и зубов [Andrews, 1990; Fernández-Jalvo, Andrews, 1992; López, Chiavazza, 2019; Royer et al., 2019]. Для сравнения использовались микрофотографии и растровые изображения жевательных поверхностей зубов, построенные с помощью графического редактора CorelDRAW X8.

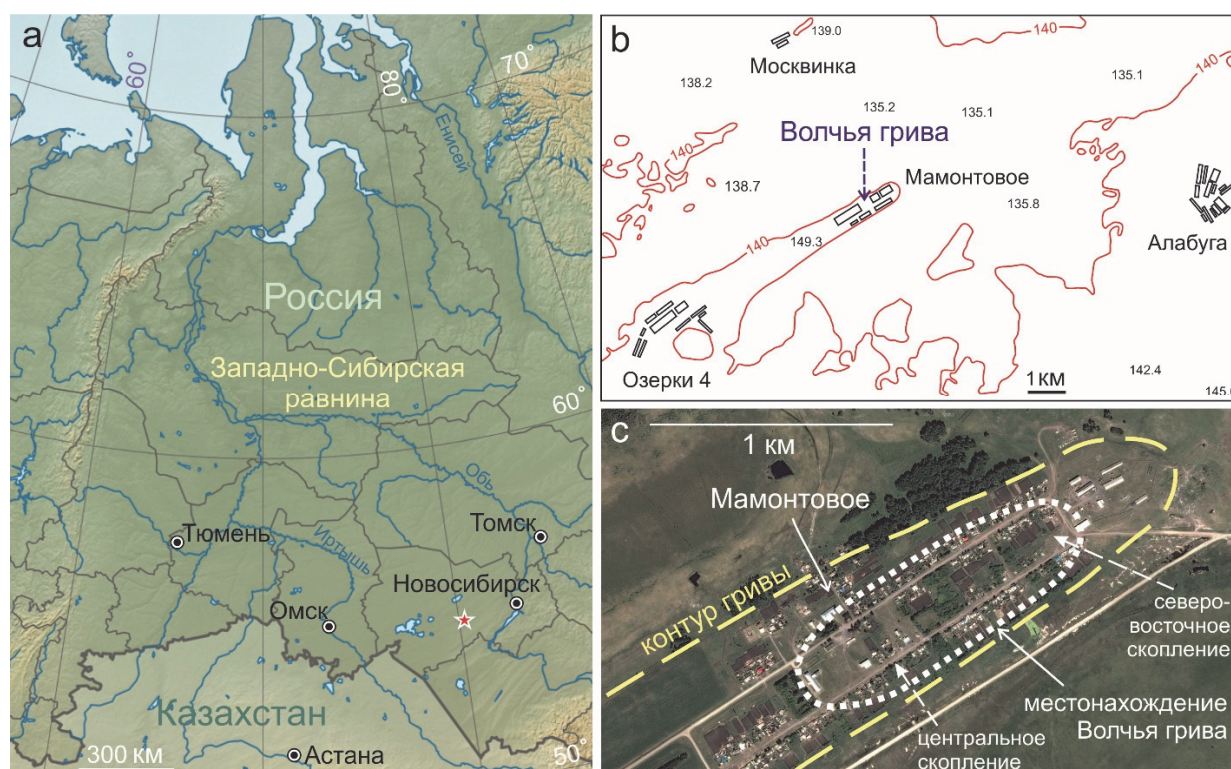


Рис. 1. Расположение Волчьей гривы

а – Административная карта Западно-Сибирской равнины (звездочкой отмечена Волчья грива); б – карта района работ с указанием альтитуд в метрах; с – местонахождение Волчьей Гривы в пределах с. Мамонтовое (спутниковый снимок)

Fig. 1. Position of the Volchia Griva

а – Administrative map of the West Siberian plain (the asterisk indicates the site); б – county map with local altitudes in meters; с – the Volchia Griva site within Mamontovoe Village (satellite image)

Таксономическая принадлежность зубов и челюстей определялась по дентальным элементам: отряд Rodentia, семейство Cricetidae, род *Lasiopodomys* – первые нижние моляры (m1); рода *Arvicola*, *Lagurus*, *Eolagurus* – все моляры; семейство Spalacidae, род *Myospalax* – щечные зубы; семейство Sciuridae, род *Spermophilus* – щечные зубы. Терминология элементов жевательной поверхности зубов подсемейства Arvicolinae дана по общепринятой схеме [van der Meulen, 1973]. Зубы m1 степной пеструшки – *Lagurus lagurus* дифференцированы по пяти морфотипам параконидного отдела [Маркова, 1982; Яковлев, 2015]: I и II – «транзиентные», III – «переходный», IV и V – «лагурусные». Зубы M3 степной пеструшки классифицировались по трем морфотипам [Яковлев, 2015]: I – соответствует *L. transiens*, II и III – *L. lagurus*. Зубы m1 узкочерепной полевки – *Lasiopodomys gregalis* (название вида обосновано молекулярно-генетическими данными [Павлинов, Лисовский, 2012]) по комбинации входящих углов с обеих сторон параконидной головки были разделены на три морфотипа: I – «грегалоидный», II – «грегалоидно-микротид-

ный», III – «микротидный» [Бородин, 2009]. Эволюционная стадия водяной полевки – *Arvicola amphibius* определялась по индексу толщины зубной эмали – SDQ (Schmelzband-Differenzierung-Quotient), рассчитанному в процентах, как отношение толщины замыкающего края эмалевой стенки к толщине ведущего края, измеренное для всех выступающих краев моляра [Бородин, 2009].

Волчья грива расположена в лесостепной зоне, где границы палеобиомов менялись в зависимости от физико-географических условий. Поэтому для описываемых остатков была также применена классификация градиента ареалов руководящих форм полевок [Бородин и др., 2019]: анализируемые ассоциации соответствуют контакту зон AIV (линии *Stenocranius*, *Arvicola* и *Lagurus*) и AV (линия *Lagurus*). Для формализации эволюционного уровня руководящих форм полевок использована классификация биохронов MQR (Mammal Quaternary Russia), предложенная для европейской части России [Вангенгейм и др., 2001]. Она основана на времени появления и исчезновения ключевых таксонов в филетических линиях полевок,

терминальными видами которых являются современные *L. lagurus*, *L. gregalis* и *A. amphibius*. Эти биохроны легко применимы к степным или лесостепным фаунам: для ископаемых – зонам AV и AIV соответственно. Анализируемые нами формы полевок по морфологии соответствуют современным видам или не выходят за рамки изменчивости, соответствующей MQR1.

Сопоставляя данные о протяженности современных ареалов ключевых видов полевок по долготе с зональной приуроченностью [Бородин, 2012; Borodin et al., 2013], мы отнесли анализируемые таксоны к следующим биогеографическим группам: западно-палеарктическая (интраполизональный тип – интразональные биотопы) – *A. amphibius*; восточно-палеарктическая (полизональный тип – тундровые и степные биотопы) – *L. gregalis*; центрально-палеарктическая (зональный тип – степные биотопы) – *L. lagurus* и, вероятно, *E. luteus*. При оценке и формализации зонально-экологических характеристик для полевок использовался индекс относительной увлажненности местообитаний RH_A [Markova et al., 2022], рассчитанный по формуле:

$$RH_A = \sum N_i k_i / \sum N_i,$$

где $\sum$ – сумма; i – значения от 1 до 5, обозначающие экологические группы; N – количество раз, когда каждая экологическая группа фиксируется в единице анализа; k – коэффициент предпочтения влажности среды обитания (*Eolagurus* и *Lagurus* = 1; *L. gregalis* = 2; *A. amphibius* = 5). В зависимости от типа растительности и баланса влаги местообитаний, размножения и выживания современных полевок, выделяется пять экологических групп: 1 – ксерофитная; 2 – мезоксерофитная; 3 – мезофитная; 4 – мезогигрофитная; 5 – гигрофитная.

Результаты

Представлены данные полевых и лабораторных исследований. Остатки грызунов связаны с нижним уровнем костеносного горизонта мамонтовой фауны и норами землеройных животных, проникающими в него из современной почвы [Leshchinskiy, Burkanova, 2022]. Глубина залегания находок изменяется от менее 1 м в осевой части гривы (раскопы 2016–2019 гг.) до более 3,3 м на склоне (раскопы 2020–2021 гг.). Изучение и интерпретация остатков грызунов позволили выделить две разновозрастные ассоциации и реконструировать условия окружающей среды в периоды их формирования.

Тафономический анализ

Изменения костных поверхностей и фрагментация скелетных элементов грызунов после их гибели могут быть вызваны выветриванием (при изменениях

температуры и влажности, коррозии грунтовых вод и корней растений, деятельности бактерий и др.), хищничеством позвоночных, транспортировкой или иными тафономическими причинами, включая деятельность человека. Полевые работы и последующее радиоуглеродное датирование ископаемых остатков [Leshchinskiy, Burkanova, 2022; Kuzmin et al., 2024] показали, что грызуны Волчьей гривы образуют поздненеоплейстоценовую и позднеголоценовую ассоциации. Важно указать, что проведенный тафономический анализ привел к хронологическому перераспределению некоторых находок из раскопок 2016–2019 гг.

Поздненеоплейстоценовая ассоциация. Остатки грызунов из нижнего уровня костеносного горизонта представлены изолированными зубами и костями всех элементов скелета, включая фрагменты черепов, верхних и нижних челюстей с зубами. Чаще встречаются длинные кости, но нередко при промывке отложений на сите остаются метаподии, фаланги и другие кости дистальных отделов конечностей (возможно, их основная часть проходит через ячейку сечением 1 мм). Окраска костей и зубов неоднородная с преобладанием серо-коричневых тонов.

Сохранность материала в целом хорошая, хотя на поверхностях большинства костей имеются следы коррозии от корней растений. Важно, что на некоторых эпифизах длинных костей фиксируется коррозия желудочной кислоты плотоядных млекопитающих или птиц. Поэтому, возможно, существенная часть остатков грызунов происходит из экскрементов или (и) погадок. В любом случае все они автохтонные и накапливались синхронно с остатками крупных млекопитающих и каменными артефактами.

Позднеголоценовая ассоциация. На исследованных участках выявлены ископаемые ходы землеройных животных, пронизывающие отложения на глубину до 2,5 м (крайне редко 3 м и более) от уровня дневной поверхности. Норы имеют овальную или круглую форму поперечного сечения диаметром 7–14 см, также встречены гнездовые камеры разнообразных форм (максимальный размер более 60×45×45 см), располагавшиеся на глубинах 1,4–2,7 м в осевой части гривы и 1,8–3,2 м на южном склоне. Все они, как правило, заполнены смесью отложений вышележащих слоев (с большой или ведущей ролью чернозема современного почвенного горизонта), но нередко остаются полые. В них обнаружены остатки грызунов, представленные костями всех элементов скелета и изолированными зубами. Окраска остатков желтовато-серая.

Сохранность материала в большинстве случаев очень хорошая (встречаются почти целые скелеты), хотя поверхность некоторых костей несет следы коррозии от корней растений.

Механические повреждения и признаки воздействия желудочной кислоты в пищеварительной системе плотоядных животных не выявлены. Таким образом, сохранность этих остатков свидетельствует о гибели зверьков в транзитных ходах и жилых камерах от истощения, болезней или иных причин, не связанных с хищниками, что говорит о первичном типе захоронения – *in situ*.

Морфологический анализ

Значительный объем нового материала позволил расширить видовой состав ископаемых грызунов Волчьей гряды. Это вместе с указанными тафономическими причинами привело к тому, что выделенные ранее ассоциации [Самандросова, Лещинский, 2021]

претерпели коррекцию таксономического состава. Кроме того, ревизия материала 2016–2019 гг., полученного из нор, позволила уточнить принадлежность полевков (зуб, отнесенный ранее к *Microtus arvalis* Pall., переопределен как *Lasiopodomys gregalis* Pall.).

Поздненеоплейстоценовая ассоциация. Ассоциация грызунов, полученная из нижнего уровня костеносного горизонта мамонтовой фауны, составляет 238 остатков. Основная часть представлена фрагментами и целыми костями посткраниального скелета, и определить их таксономическую принадлежность по морфологическим признакам проблематично. Меньшая часть – фрагменты челюстей с зубами и изолированные зубы, принадлежащие не менее чем четырем видам (табл. 1); один таксон не определен до вида из-за плохой сохранности зубов.

Таблица 1

Таксономический состав поздненеоплейстоценовой ассоциации

Table 1

Rodent taxonomic composition of the Late Neo-Pleistocene association

Таксон	Количество зубов	Количество особей (минимум)	k
<i>Spermophilus</i> aff. <i>erythrogegnys</i> Brandt	10	1	–
<i>Lagurus lagurus</i> Pallas	47	15	1
<i>Eolagurus luteus</i> Eversmann	4	2	1
<i>Lasiopodomys gregalis</i> Pallas	1	1	2
Arvicolini	3	1	–
Всего	65	20	4

Примечание. Здесь и в табл. 4 k – коэффициент предпочтения влажности.

Note. Here and in the Table 4 k – Moisture preference rate.

Отряд Rodentia Bowdich, 1821

Семейство Sciuridae Fischer von Waldheim, 1817

Триба Marmotini Pocock, 1923

Род *Spermophilus* F. Cuvier, 1825

Подрод *Colobotis* Brandt, 1843

Spermophilus aff. *erythrogegnys* Brandt, 1841 – Краснощекий суслик

Материал: верхняя челюсть с двумя зубными рядами – 2 МЗ, 2 М2, 2 М1; 2 Р4, 2 Р3. Всего 10 зубов.

Остатки принадлежат суслику подрода «колобо-тисов». Длина зубного ряда составляет 11,6 мм, что лежит в зоне изменчивости современных представителей группы *S. erythrogegnys* и *relictus-ralli* (данный параметр меньше чем у *major-fulvus* и больше чем у сусликов подрода *Citellus*). Предварительно можно сказать, что это челюсть суслика, близкого к *S. erythrogegnys*, но с отличиями в строении М1 и М2 (эти зубы менее укорочены в передне-заднем направлении, а выступ антерокона у них не так сильно выражен).

Семейство Cricetidae Fischer von Waldheim, 1817

Подсемейство Arvicolinae Gray, 1821

Триба Lagurini Kretzoi, 1955

Род *Lagurus* Gloger, 1841

Lagurus lagurus Pallas, 1773 – степная пеструшка

Материал: изолированные моляры – 3 МЗ, 6 М2, 6 М1; 6 м2, 26 м1. Всего 47 щечных зубов.

Описание. Некорнезубые полевки без отложений цемента во входящих углах моляров. Противоположные петли моляров симметричны, эмаль дифференцирована (толще на передних стенках дентинных призм нижних коренных и на задних стенках верхних зубов). Для м1 характерна передняя петля в виде хорошо развитого «трилистника». Аналогичное строение имеет задняя петля МЗ. Моляры вытянуты в передне-заднем направлении. Характерной чертой является наличие небольшого отчетливого выступа на внутренней стенке средних входящих углов М1 и М2 (остаток «протоконуля»). Общие размеры МЗ и м1 представлены в табл. 2. В коллекции м1 представлен переходным (III) и лагурусными (IV и V) морфотипами (рис. 2); зубы с архаичным строением I и II морфотипов отсутствуют. Морфотипы м1 приведены в табл. 3. Зуб МЗ с лингвальной стороны имеет два хорошо выраженных входящих угла, с буккальной – три. Жевательная поверхность состоит из передней петли, трех треугольников и задней непарной петли. Все МЗ соответствуют III морфотипу.

Таблица 2

Зубы *Lagurus lagurus* позднеплейстоценовой ассоциации

Table 2

Lagurus lagurus teeth of the Late Neo-Pleistocene association

Зуб	n	Размеры (мм): м–с–м	
		Длина	Ширина
M3	3	2,27 – 2,16 – 2,08	0,93 – 0,96 – 0,99
m1	26	2,35 – 2,66 – 2,82	0,86 – 0,97 – 1,06

Примечание: сокращения в таблицах и тексте: n – количество, м–с–м – «минимальный–средний–максимальный».

Note: Abbreviations in tables and text: n – quantity, m–s–m – “min–average–max”.

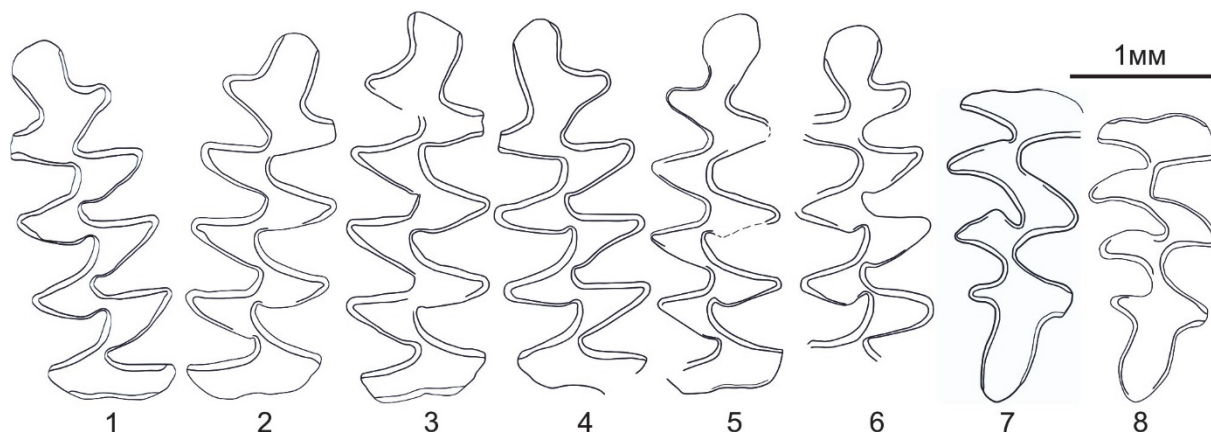


Рис. 2. Жевательные поверхности m1 (1–6) и M3 (7–8) *Lagurus lagurus* из местонахождения Волчья грива
Морфотипы: III – 1, 2, 7, 8; IV – 3, 4; V – 5, 6

Fig. 2. Chewing surfaces of *Lagurus lagurus* m1 (1-6) and M3 (7-8) from the Volchia Griva site
Morphotypes: III – 1, 2, 7, 8; IV – 3, 4; V – 5, 6

Таблица 3

Морфотипы m1 *Lagurus lagurus* позднеплейстоценовой ассоциации

Table 3

Lagurus lagurus m1 morphotypes of the Late Neo-Pleistocene association

Морфотип	Длина (мм): м–с–м	n	%	Ширина (мм): м–с–м	n	%
III	2,58 – 2,68 – 2,79	9	41	0,88 – 0,97 – 1,03	11	44
IV	2,48 – 2,67 – 2,82	10	45	0,89 – 0,98 – 1,06	10	40
V	2,35 – 2,6 – 2,72	3	14	0,86 – 0,94 – 1,02	4	16

Род *Eolagurus* Argyropulo, 1946

Eolagurus luteus Eversmann, 1840 – желтая пеструшка

Материал: 1 M3, 1 M2, фрагмент нижней челюсти с m1 и m2. Всего 4 зуба.

Описание. Моляры *Eolagurus* в целом похожи на зубы *Lagurus*, но заметно крупнее. Зуб m1 желтой пеструшки имеет три входящих угла на внешней стороне и четыре – на внутренней. Также различаются M3 – *Eolagurus* имеет по два входящих угла с наружной и внутренней сторон этого зуба. Размер m1: длина 3,76 мм, ширина 1,34 мм. Другие зубы (M3 и M2) представлены фрагментарно.

Подтриба *Microtina* Miller, 1896

Группа родов «*Microtus*»

Род *Lasiopodomys* Lataste, 1887

Lasiopodomys gregalis Pallas, 1779 – узкочерепная полевка

Материал: 1 зуб – m1.

Описание. Безкорневой зуб (длина 2,45 мм, ширина 0,97 мм) с плотным, хорошо заметным цементом – морфотип III (входящий угол хорошо развит). Эмаль дифференцирована по «микротусному» типу.

Триба *Arvicolini* Gray, 1821

Материал: 1 M3; 1 m3, 1 m2. Всего три зуба.

Описание. Детальное описание до рода и вида проблематично. Зубы без корней, во входящих углах обильное отложение цемента.

Дентиновые поля основных призм щечных зубов изолированы. Эмаль дифференцирована по «микротусному» типу – передняя (вогнутая) стенка толще задней.

Позднеголоценовая ассоциация. Ассоциация грызунов, полученная из ископаемых нор, составляет 326 остатков. Хорошо определимая (меньшая) часть материала – целые черепа, фрагменты челюстей с зубами и изолированные зубы не менее чем трех видов (табл. 4); один таксон не определен до вида из-за плохой сохранности зубов. Таксономическая принадлежность большинства фрагментов и целых посткраниальных костей определима до вида, так как они происходят от двух почти полных скелетов цокоров. Ниже дана характеристика остатков цокора (предварительная), узкочерепной и водяной полевок.

Отряд Rodentia Bowdich, 1821

Семейство Spalacidae Gray, 1821

Подсемейство Myospalacinae Lilljeborg, 1866

Род *Myospalax* Laxmann, 1773

Myospalax myospalax Laxmann, 1773 – алтайский цокор

Материал: 3 M3, 4 M2, 3 M1; 3 m3, 3 m2, 3 m1. Всего 19 зубов.

Описание. Корни отсутствуют. На некоторых m2 и m3 присутствуют эмалевые трубки, указывающие на раннюю стадию онтогенеза. Большинство особей были ювенильными, так как дентиновые тракты не достигли жевательной поверхности, а часть входящих углов не закрылась и не образовала эмалевые островки. У зуба M1 единственной взрослой особи отмечается наличие дентинового тракта на передней лингвальной стороне, рядом с протофлексусом. Эмалевые трубки (островки), вместе с отсутствием корней, являются достоверным признаком алтайских цокоров. По морфологии округлых и изометричных эмалевых островков описанные зубы являются типичными для *Myospalax myospalax*, у предкового вида – *Myospalax convexus* они имеют овальную, вытянутую форму [Golovanov, Zazhigin, 2023].

Таблица 4

Таксономический состав грызунов позднеголоценовой ассоциации

Table 4

Rodent taxonomic composition of the Holocene association

Таксон	Количество зубов	Количество особей (минимум)	k
<i>Myospalax myospalax</i> Laxmann	19	6	–
<i>Arvicola amphibius</i> Linnaeus	13	2	5
<i>Lasiopodomys gregalis</i> Pallas	6	2	2
Arvicolini	2	1	–
Всего	40	11	7

Семейство Cricetidae Fischer von Waldheim, 1817

Подсемейство Arvicolinae Gray, 1821

Триба Arvicolini Gray, 1821

Род *Arvicola* Lacepede, 1799

Вид *Arvicola amphibius* Linnaeus, 1758 – водяная полевка

Материал: 2 M1, 2 M2, 2 M3, 3 m1, 2 m2, 2 m3. Всего 13 зубов.

Описание. Зубы без корней с цементом во входящих углах. Строение параконидного комплекса довольно простое. Треугольники хорошо разобщены. Эмаль довольно толстая, во входящих углах всегда утончается, более тонкая на выпуклых стенках призм. Дифференциация эмали выраженная. Ранние ископаемые *Arvicola* имеют более толстую эмаль на задних выпуклых стенках призм нижних зубов и на передних стенках верхних зубов [Hinton, 1926], во второй половине плейстоцена это соотношение меняется на обратное. Поздненеоплейстоценовые, голоценовые и рецентные водяные полевки имеют $SDQ < 100\%$ [Бородин, 2009]. Данный индекс для двух описанных зубов m1 (длина 4,04–4,15 мм, ширина 1,82–1,9 мм) составляет 83 и 84 %.

Триба Microtini Miller, 1896

Род *Lasiopodomys* Lataste, 1887

Lasiopodomys gregalis Pallas, 1779 – узкочерепная полевка

Материал: 2 m3, 2 m2, 2 m1. Всего шесть зубов.

Описание. Безкорневые зубы с плотным, хорошо заметным цементом. Эмаль дифференцирована по «микротусному» типу (более тонкая на выпуклых стенках призм, во входящих углах всегда утончается). Один m1 относится к морфотипу II – входящий угол на буккальной стороне намечается или хорошо заметен, но развит слабее, чем с лингвальной стороны. Другой m1 относится к морфотипу III – входящий угол хорошо развит. Размеры обоих m1: длина 2,36–2,37 мм, ширина 0,78–0,79 мм.

Триба Arvicolini Gray, 1821

Материал: 1 M3, 1 m3. Всего два зуба.

Описание. Детальное описание до рода и вида проблематично. Зубы без корней, во входящих углах обильное отложение цемента. Дентиновые поля основных призм щечных зубов изолированы. Эмаль дифференцирована по «микротусному» типу – передняя (вогнутая) стенка толще задней.

Палеогеографические реконструкции

Отряд Rodentia представлен огромным разнообразием видов, обитающих почти во всех биотопах планеты, за исключением высоких гор, отдельных полярных островов и Антарктиды. Поэтому сотни остатков представителей Cricetidae, Sciuridae и Spalacidae, выявленные на местонахождении Волчьей гривы, можно достоверно использовать в качестве палеогеографических и палеоэкологических маркеров. Описанные ниже палеообстановки основаны на сравнении современных ареалов грызунов (и их пищевых предпочтений) с плейстоценовыми и голоценовыми. Таким образом, реконструкции окружающей среды удалось провести для отдельных этапов позднего неоплейстоцена и позднего голоцена.

Последний ледниковый максимум. Поздненеоплейстоценовая ассоциация грызунов Волчьей гривы связана с нижним костеносным уровнем мамонтовой фауны, который надежно датирован по костному коллагену и древесному углю в интервале 20–18 тыс. радиоуглеродных (или 24–22 тыс. календарных) лет назад [Leshchinskiy, Burkanova, 2022; Kuzmin et al., 2024]. Существующие представления о глобальной палеогеографии помещают этот отрезок времени в более широкий период последнего ледникового максимума, пик которого выражался снижением уровня Мирового океана на ~ 130 м относительно современного [Thompson, Goldstein, 2006; Clark et al., 2009; Hughes, Gibbard, 2015; Harrison et al., 2019]. При этом геохронологические границы «последнего ледникового максимума» не ратифицированы и указанный интервал, заключающий остатки грызунов, может быть связан с его ранней, средней или поздней фазой. В описанную ассоциацию входят четыре вида – краснощекий суслик, степная пеструшка, желтая пеструшка и узкочерепная полевка. Ниже представлены их современные ареалы и пищевые предпочтения.

Краснощекий суслик. Вид распространен в зоне пустынь, полупустынь, степей и лесостепей. Однако по долинам рек у северной границы ареала он проникает в зону хвойно-мелколиственных лесов [Глотов и др., 1978; Млекопитающие Казахстана, 1978; Громов, Ербаева, 1995]. Зверек до 60 % нор роет на злаково-разнотравных лугах с невысоким травостоем, где хороший обзор, поэтому в низинах с высокой травой плотность нор наименьшая, при этом там их заливают талая и дождевая вода [Москвитина, Сучкова, 2015].

В рацион краснощекого суслика входят вегетативные части растений, корневища и клубни, семена, а также беспозвоночные и мелкие позвоночные животные. Растительные корма очень разнообразны, но предпочтительней злаковые (*Dactylis glomerata* L., *Poa pratensis* L., *Phleum pratense* L., *Festuca valesiaca*

Gaudin и др.), бобовые (*Astragalus onobrychis* L., *Medicago romanica* Prodan., *Onobrychis arenaria* (Kit.) DC и др.) и капустные (*Descurainia sophia* (L.) Webb ex Prantl., *Lepidium rudemale* L., *Bunias orientalis* L.). Кроме того, он поедает гречишные (*Polygonum aviculare* L., *P. patulum* M. Bieb., *Rumex* sp.), розоцветные (*Fragaria vesca* L., *Potentilla* sp.), маревые (*Ceratocarpus arenarius* L., *Kochia prostrata* (L.) Schrad.), полыни (*Artemisia frigida* Willd., *A. schrenkiana* Ledeb.), подорожник (*Plantago media* L.), хвощ (*Equisetum arvense* L.) [Млекопитающие Казахстана, 1978; Москвитина, Сучкова, 2015].

Степная пеструшка. Вид обитает в лесостепях, степях и северных полупустынях Евразии (от бассейна Нижнего Днепра до Западной Монголии) и занимает, главным образом, наиболее ксерофитные травянистые участки ландшафта, поросшие типчаком и полынью. При этом он плохо переносит засухи, во время которых популяция может сокращаться на 90 %, сохраняясь только во влажных низинах, где остаются вегетирующие растения. В лесостепях зверек встречается в пределах злаково-разнотравных и ковыльно-типчаковых степных участков, селится на выгонах, залежах, около озер и современных полей [Глотов и др., 1978; Млекопитающие Казахстана, 1978; Громов, Ербаева, 1995; Дупал, 2014].

Степная пеструшка поедает зеленые вегетативные части растений самых разнообразных видов, но чаще всего – преобладающие на конкретном участке, из-за чего состав ее кормов различен не только в разных районах, но и в соседних биотопах. Изредка она употребляет клубни и луковицы эфемеров, семена и насекомых. Сезонность также влияет на видовой состав кормов: ранней весной она предпочитает узколистные злаки, летом и осенью – широколиственные злаки, полыни и разнотравье [Млекопитающие Казахстана, 1978; Громов, Ербаева, 1995]. В рационе чаще всего присутствуют злаковые (*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn., *A. orientale* (L.) Roem. & Schult., *Elymus* sp., *Festuca valesiaca* Gaudin., *Stipa lessingiana* Trin. & Rupr., *Poa bulbosa* L.), полыни (*Artemisia maritima* L., *A. pauciflora* Weber., *A. austriaca* Jacq.) и маревые (*Kochia prostrata* (L.) Schrad.), реже – зонтичные (Apiaceae, *Peucedanum* sp.), осоки (*Carex supina* Willd. ex Wahlenb.), розоцветные (*Tanacetum* sp.), луковицы и надземные части *Tilipa* sp. и Alliaceae [Громов, Поляков, 1977; Млекопитающие Казахстана, 1978]. Для степной пеструшки коэффициент предпочтения влаги k равен 1, что соответствует ксерофитной экологической группе [Markova et al., 2022] – начальные стадии экологических сукцессий, когда количество влаги в наземных экосистемах / или количество кислорода в полуводных экосистемах регулируется аутогенными процессами.

Желтая пеструшка. Основное местообитание вида в настоящее время связано с пустынями северного типа, полупустынями и пустынными степями Синьцзяна, Тибетского нагорья и севера Цайдамской котловины в Китае, частично ареал расположен на востоке Зайсанской котловины Казахстана и юго-западе Монголии. Изолированный ареал находится в Курайской и Чуйской степях Алтая в России. Зверек избегает участков с высоким густым травянистым покровом, затрудняющим обзор и передвижение. На песчаных почвах он предпочитает селиться в редких кустарниковых зарослях саксаула, караганы и джугуна [Млекопитающие Казахстана, 1978; Громов, Ербаева, 1995].

Желтая пеструшка поедает преимущественно наземные вегетирующие части растений и, вероятно, незрелые семена злаков (животный корм не отмечен). В рационе присутствуют разные виды полыни (*Artemisia* sp.), молодые побеги злаковых (Poaceae), маревые (*Atriplex cana* С.А. Меу., *Ceratocarpus* sp.) и разнотравье (Asteraceae, в том числе *Ferula* sp.; Fabaceae, в том числе *Astragalus* sp., Alliaceae, Ranunculaceae, Liliaceae, Iridaceae и др.) [Млекопитающие Казахстана, 1978]. Для желтой пеструшки, как и степной, коэффициент предпочтения влаги k равен 1, что соответствует ксерофитной экологической группе [Markova et al., 2022].

Узкочерепная полевка. Крупные изолированные местообитания данного вида представлены на северо-востоке Европы, севере и юге Западной Сибири, в Восточной Сибири, Казахстане, Центральной Азии (включая горные системы Тянь-Шаня, Памиро-Алая, Саян и Алтая) и северо-восточном Китае [Млекопитающие Казахстана, 1978; Громов, Ербаева, 1995]. Узкочерепная полевка заселяет открытые луга в тундровой, лесотундровой, лесостепной, степной зонах, горные альпийские луга, участки с пышным травянистым и кустарниковым покровом, опушки колков, долины рек и берега озер. В Якутии, на юге Западной и Восточной Сибири она также проникает в лесную зону. В Барабинской лесостепи вид часто доминирует среди грызунов [Глотов и др., 1978; Громов, Ербаева, 1995; Москвитина, Сучкова 2015].

Узкочерепная полевка поедает большинство травянистых растений, как наземные (вегетирующие, семена), так и подземные (луковицы, клубни) их части. Состав кормов зависит от места обитания и сезона года. Чаще в корме отмечены злаковые (*Alopecurus* sp., *Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub., *Elytrigia repens* (L.) (Nevsk) Holub., *Koeleria macrantha* (Ledeb.) Schult., *Poa pratensis* L., *P. bulbosa* L., *Stipa* sp., и др.) и полыни (*Artemisia maritima* L., *A. absinthium* L., *A. glauca* Pall. ex Willd., *A. frigida* Willd.), а из разнотравья – бобовые

(*Astragalus onobrychis* L., *Medicago falcata* L.), яснотковые (*Dracocephalum grandiflorum* L., *Lamium album* L.), розоцветные (*Sanguisorba officinalis* L.), астровые (*Achillea* sp., *Taraxacum* sp.), гречишные (*Rumex acetosa* L) и др. [Глотов и др., 1978; Млекопитающие Казахстана, 1978; Москвитина, Сучкова, 2015]. Для узкочерепной полевки коэффициент предпочтения влаги k равен 2, что соответствует мезоксерофитной экологической группе [Markova et al., 2022] – начальные стадии сукцессий, начинающиеся в средах с определенным уровнем влажности.

Таким образом, позднелепистоценовая ассоциация Волчьей гривы, безусловно, отражает развитие сухих степных ландшафтов, а ее ядром являются степная и желтая пеструшки. Сопутствующие находки суслика и узкочерепной полевки не противоречат данному выводу. Индекс относительной увлажненности местообитаний (RH_A), рассчитанный по степной и желтой пеструшкам и узкочерепной полевке, для последнего ледникового максимума составил 1,33.

Поздний голоцен. Ассоциация грызунов, полученная из нор, образована в позднем голоцене, что подтверждено прямым датированием черепа водяной полевки – 1590 ± 20 радиоуглеродных лет назад (IGANAMS-8206) или 1410–1530 календарных лет назад [Kuzmin et al., 2024]. Данные остатки представляют собой первичный тип захоронения – *in situ*. Видовой состав позднего голоценовой ассоциации Волчьей гривы представлен тремя видами – алтайским цокором, водяной полевкой и узкочерепной полевкой. Современный ареал и питание узкочерепной полевки рассмотрены ранее, эти же показатели для других двух видов представлены ниже.

Алтайский цокор. Данный вид является западно-сибирским эндемиком с сокращающимся современным ареалом. Его граница проходит по левому берегу р. Оби – от устья р. Чаи на юг до р. Алей, где ареал расширяется в предгорьях и горных территориях Алтая. Далее ареал простирается до южного Алтая, окрестностей оз. Маркаколь, западной части Тарбагатайского хребта и хребта Чингизтау с южной границей до 47° с.ш.; на западе ареал доходит до оз. Чаны [Галкина, Надеева, 1980; Громов, Ербаева, 1995; Cassola, 2016; Власенко, Кривопапов, 2017; Golovanov et al., 2024]. Алтайский цокор предпочитает открытые участки с мягкими и однородными по механическому составу почвами (часто лугово-черноземными), где мощность гумуса не менее 25 см [Глотов, Телегин, 1969; Москвитина, Сучкова, 2015].

Зверек поедает подземные (корни, корневища, клубни) и наземные вегетирующие зеленые части растений. Состав и соотношение кормов зависят от

сезона: летом в основном – зелень, зимой – подземные части многолетних трав и кустарников, реже, в основном весной, в рационе встречаются животные корма – дождевые черви и мелкие грызуны. Видовой состав растительных кормов крайне разнообразен, но чаще всего в нем присутствуют розоцветные (*Filipendula hexapetala* Gili., *Potentilla asiatica* (Th. Wolf) Juz., *P. orientalis* Juz., *Sanguisorba officinalis* L.), астровые (*Achillea millefolium* L., *Aster alpinus* L. *Sonchus arvensis* L., *S. oleraceus* L.) и злаковые (*Elytrigia repens* (L.) Nevski., *Phleum pratense* L., *Poa bulbosa* L.). Кроме того, в рационе присутствуют яснотковые (*Phlomis tuberosa* (L.) Moench), бобовые (*Medicago falcata* L., *Caragana* sp.), эфедровые (*Ephedra equisetina* Bunge.) и др. [Шубин, Ермаков, 1967; Млекопитающие Казахстана, 1978; Москвитина, Сучкова, 2015].

Водяная полевка. Вид распространен на огромной территории – от берегов Атлантического океана до оз. Байкал и бассейна р. Лены. На севере водяная полевка встречается до кустарниковых тундр, на юге – до степной зоны и побережья Средиземного моря, Турции, Ирана и Центральной Азии [Громов, Ербаева, 1995; Москвитина, Сучкова, 2015]. Она повсюду заселяет околотовные биотопы, так как адаптирована к пресным и солоноватым водоемам. Для нее характерна сезонная смена мест обитания: летом селится преимущественно вблизи рек, озер, прудов, проток и ручьев, зимой переселяется на повышенные участки.

Водяная полевка поедает водные и прибрежные растения, имеющие влажность 67–87 %, но при недостатке пищи зимой и при половодьях она может кормиться корой деревьев (основания стволов и ветви ив). Растительный корм очень разнообразен – более 180 видов (~ 28 % водные, 39 % луговые, 18 % полевые растения и огородные культуры, 15 % кустарники и деревья). Она предпочитает листья, верхние части побегов и корневища водных и околотовных злаков (*Agrostis stolonifera* L., *Phragmites communis* Trin., *Scolochloa festuacea* (Willd.) Link., *Scirpus* sp.), рогоза (*Typha angustifolia* L.), кувшинник (*Nymphaea candida* J. Presl & C. Presl), а также листья и стебли осоковых (*Scirpus spiralis* (A. Rich.) Druce., *Carex* sp.), болотного чистеца (*Stachys palustris*) и др. Редко в рацион входят животные: моллюски, насекомые, рыба [Млекопитающие Казахстана, 1978; Москвитина, Сучкова, 2015]. Для водяной полевки коэффициент предпочтения влаги k равен 5, что соответствует гигрофитной экологической группе [Markova et al., 2022] – начальные стадии сукцессий, начинающиеся в средах с определенным уровнем влажности.

Доминирующим видом в ассоциации является алтайский цокор (*Myospalax myospalax*), обитающий в открытых луговых ландшафтах с обильной травянистой растительностью. Водяная полевка (*Arvicola*

amphibius) указывает на наличие водоемов или заболоченных участков в непосредственной близости. Узкочерепная полевка (*Lasiopodomys gregalis*) подтверждает существование открытых ландшафтов. Таким образом, позднеголоценовая ассоциация Волчьей гривы отражает развитие лугостепей или лесостепей. Индекс относительной увлажненности местообитаний (РН_А), рассчитанный по водяной и узкочерепной полевкам, для позднего голоцена составил 3,5.

Дискуссия

Юг Западно-Сибирской равнины в целом слабо изученная территория в плане расчленения, корреляции и обоснования возраста четвертичных отложений. Во многом это объясняется плоским характером рельефа, который на отдельных участках осложнен ложбинно-грядными комплексами. Высокая заболоченность и малое количество естественных обнажений до сих пор связывают современные представления о строении верхней части осадочного чехла, главным образом, с результатами геолого-съёмочных и тематических работ советского периода, основанных на бурении [Панади, 1952; Петриловский и др., 1967; Бабин и др., 2015]. Поэтому в сводных палеогеографических реконструкциях по лесостепной и степной зонам преобладают представления авторов второй половины XX века [Архипов и др., 1980; Архипов, Волкова, 1994; Зыкин, Зыкина, 2009]. Исследования остатков грызунов, представленные в данной работе, существенным образом корректируют имеющиеся палеонтолого-стратиграфические и палеогеографические данные.

Ассоциация грызунов и окружающая среда Барабинской низменности в последний ледниковый максимум. Автохтонность и датировка позднеплейстоценовой ассоциации грызунов Волчьей гривы последним ледниковым максимумом не вызывают сомнений. Следы воздействия на поверхностях костей грызунов желудочной кислоты плотоядных животных и коррозия от корней растений, указанные в результатах, являются типичными и часто фиксируются при исследовании местонахождений *in situ* [Andrews, 1990; Fernández-Jalvo, Andrews, 1992; López, Chiavazza, 2019; Royer et al., 2019]. Ниже сравниваются описанные находки с опубликованными ископаемыми и рецентными остатками грызунов из других регионов.

Распространение степной пеструшки в конце плейстоцена и начале голоцена было значительно шире современного. Данный вид заселял перигляциальные ландшафты и степи Северной Евразии: Кузнецкую котловину, Приобское плато, Северо-Западный Алтай, Чулымо-Енисейскую впадину, Средний Енисей, Нижний Иртыш, Предбайкалье, Урал, Предуралье, Прикаспийскую низменность, Русскую равнину, отдельные районы современных территорий

Польши, Украины, Молдавии и Румынии [Дупал, 2014]. Соотношение морфотипов степных пеструшек Волчьей гривы соответствует позднему этапу развития вида. Согласно А.К. Марковой [1982], такие морфотипы характерны для конца плейстоцена, что подтверждает возраст местонахождения Волчьей гривы по мегафауне и радиоуглеродному датированию. Обзор известных местонахождений среднего неоплейстоцена – голоцена показывает, что зубы (m1) степных пеструшек Волчьей гривы были одни из самых крупных (табл. 5). Близкие значения наблюдаются в южных предуральских местонахождениях (средний – верхний неоплейстоцен): Игнatieвская (раскоп 2014 г., слой 10) [Фадеева и др., 2019], Красный Яр, Климовка и Груздевка [Яковлев, 2015]. Степные пеструшки времени последнего похолодания плейстоцена Западной Европы, Украины и Зауралья также были довольно крупными [Chaline, 1972; Малеева, Воробьева, 1973; Nadachowski, 1982]. На Русской равнине в среднем и начале позднего плейстоцена (согласно стратиграфическим схемам, принятым в СССР) представители *L. lagurus* были несколько меньше [Маркова, 1982, 1986].

Зубы современных степных пеструшек (Южная Украина, Астраханская, Рязанская и Воронежская области, Чувашия, Западный и Северный Казахстан) отличаются мелкими размерами [Маркова, 1982, 1986; Малеева, Воробьева, 1973]. Только абаканский подвид *L. l. abacanicus* крупный – m1 (м–с–м): длина 2,1–2,6–2,9 мм, ширина 0,90–1,00–1,10 мм – по размерам он близок к позднеплейстоценовым формам [Рековец, 1985]. Здесь необходимо отметить, что для большей части алтайских пещерных и открытых местонахождений (Тальменка, Шадринцево, Повалиха и др.) промеры зубов степных пеструшек и точные определения геологического возраста отсутствуют [Зажигин, 1980]. То же можно сказать об объектах в центре и на юге Западно-Сибирской равнины, включая позднепалеолитические стоянки Шикаевка II и Черноозерье II [Петрин, Смирнов, 1975; Смирнов, 1985; Смирнов и др., 1986; Borodin et al., 2013]. Тем не менее общая тенденция изменения размеров моляров степной пеструшки в позднем неоплейстоцене указывает на их увеличение к последнему похолоданию, после чего они уменьшаются. Нелинейность изменений размеров зубов данного вида в позднем плейстоцене – голоцене отмечена как для Европы, так для Урала и Зауралья. Это, возможно, связано с разными условиями обитания – увеличение могло происходить по мере нарастания экстремальности климата [Бородин, 2012].

Желтая пеструшка сегодня отсутствует в фауне Западной Сибири [Громов, Ербаева, 1995]. Современ-

ные *E. luteus* имеют крупные размеры. Промеры зубов m1 из рецентных и субфоссильных выборок центральноазиатских регионов следующие (м–с–м): Монголия – длина 3,00–3,29–3,60 мм, ширина 1,05–1,17–1,30 мм; Китай (Синьцзян) – длина 3,00–3,22–3,50 мм, ширина 1,20–1,22–1,27 мм; Казахстан (Актюбинская область) – длина 3,10–3,34–3,50 мм, ширина 1,20–1,29–1,43 мм [Агаджанян, Маркова, 1984]. Позднеплейстоценовые m1 желтой пеструшки из украинского местонахождения Новгород-Северский не менее крупные – 2,90–3,30–3,80 мм [Рековец, 1985]. Единственный зуб m1 из нижнего костеносного уровня Волчьей гривы имеет длину 3,76 мм и ширину 1,34 мм, что близко к максимальным значениям.

В плейстоцене желтая пеструшка была распространена на огромном пространстве Евразии – от Западной Румынии до Забайкалья [Прокопов, 2021]. В позднем плейстоцене ее остатки выявлены в отложениях микулинского горизонта Русской равнины, в Восточной Европе, на Южном Урале [Маркова, 1982, 1986; Рековец, 1994; Markova, 1998; Фадеева и др., 2022]. На юге Западной Сибири (бассейн р. Тобола) микротериофауна степного и полупустынного облика с желтой пеструшкой в основном приурочена к отложениям стрелецкого и ханмейского горизонтов стратиграфической схемы Урала [Объяснительная..., 1997; Стефановский и др., 2003], что по современной оценке дает ее возраст ~ 130–57 (50) тыс. лет назад. Однако остатки этого зверька также найдены на позднепалеолитических стоянках Ишимской равнины – Шикаевка II и Черноозерье II [Петрин, Смирнов, 1975; Смирнов, 1985].

В первой половине XIX в. *E. luteus* был обычен в прикаспийских и казахстанских пустынях, и полупустынях [Прокопов, 2021]. Сегодня ареал ограничен локальными районами Центральной Азии. По-видимому, этот зверек показывает быстрый ответ на изменения климата. Так, при наблюдениях 1960–1970-х гг. в Казахстане выявлено повышение плотности населения желтых пеструшек после многоснежных и теплых зим, а после малоснежных зим, частых оттепелей и ранних весенних обильных дождей численность их резко падала [Громов, Поляков, 1977; Млекопитающие Казахстана, 1978; Громов, Ербаева, 1995]. Основная часть современного ареала желтой пеструшки находится в северном Синьцзяне, где она является ключевым видом пустынной степи. Это один из самых засушливых регионов мира с чрезвычайно хрупкой экосистемой, уязвимой для экстремальных климатических явлений. Здесь ведется постоянный мониторинг численности *E. luteus* из-за угрозы уничтожения больших площадей луговой растительности и переносимых патогенов, представляющих большую

опасность для здоровья человека. Многолетние исследования показали, что для расселения и благополучного существования *E. luteus* наиболее важны следующие параметры климата: изотермичность (отношение среднесуточного и среднемесячного диапазонов температур к годовому диапазону), среднегодовая температура воздуха, средняя температура самого влажного и самого сухого сезонов (и ее кумулятивный эффект), сезонность осадков. Температура воздуха определяет характер активности зверьков, репродуктивное поведение, количество выводков, уровень выживаемости и плотность популяции. Результаты анализа экологических предпочтений *E. luteus* показывают, что оптимальными для обитания вида являются: диапазон среднегодовых температур от 0 до +9 °С; пороговый диапазон изотермичности 20–28 %; средние температуры самого влажного сезона +14–23 °С, самого сухого – –18...–7 °С; сезонность (коэффициент вариации) осадков 24–77 %. Причем плотность популяции грызунов растет с повышением среднемесячной температуры до +21 °С, но при дальнейшем повышении температуры она снижается. Высокая температура подавляет скорость размножения, так как при этом самки абортуют. Пик размножения соответствует диапазону +10–25 °С при оптимальной температуре +17 °С. При этом очень низкая температура подавляет сперматогенез у самцов. Поскольку в Сынцзяне умеренный континентальный климат с холодной зимой, то *E. luteus* размножается летом. Коэффициент вариации осадков еще один важный фактор, влияющий на выживание *E. luteus* – существует значительная отрицательная корреляция между количеством осадков и плотностью популяции (при количестве более 90 мм/год плотность населения желтой пеструшки уменьшается, и наоборот). В то же время значительное уменьшение количества осадков приводит к плохому росту растительности, ухудшает условия питания грызунов и косвенно приводит к увеличению их смертности [An et al., 2023]. Все это говорит о том, что *E. luteus* чутко реагирует

на изменения окружающей среды, а его современные местообитания являются рефугиумами огромного ареала, существовавшего в конце плейстоцена и включавшего Центральную Азию, юг Западной Сибири и Урала, и юго-восток Европы.

Остатки суслика из нижнего костеносного уровня Волчьей гривы морфологически близки краснощечному суслику, систематическое положение которого требует уточнения. Плейстоценовые остатки известны из восточной части современного ареала [Громов, Ербаева, 1995].

Ареал узкочерепной полевки в позднем неоплейстоцене был огромен – он охватывал территории, не только представленные в настоящее время, но и покрывал современную зону лесов, которая была занята смешанным («гипербореальным» / «тундро-степным») сообществом мамонтовой фауны. На западе ареал узкочерепной полевки протягивался до Британских островов и центральных районов современной Франции [Громов и др., 1965; Смирнов и др., 2007]. Сегодня ареал вида, как сказано выше, разорван.

Результаты исследований остатков грызунов из нижнего костеносного уровня Волчьей гривы говорят о широком распространении сухих степных ландшафтов на юге Западно-Сибирской равнины во время последнего ледникового максимума. Данный вывод достоверно подтверждается массовым синхронным захоронением крупных млекопитающих: мамонтов, лошадей и бизонов – типичных обитателей открытых пространств. Важно отметить, что большое количество остатков грызунов на Волчьей гриве говорит о хорошей кормовой базе для лисиц (*Vulpes lagopus*, возможно, также *V. vulpes* и *V. corsac*), многочисленные остатки которых найдены в нижнем костеносном уровне [Самандросова, Лещинский, 2021]. Палинологический анализ отложений Волчьей гривы также свидетельствует о сухих условиях окружающей среды – в нижнем уровне костеносного горизонта пыльца деревьев редка, а доля трав превышает 90 % [Leshchinskiy, Burkanova, 2022; Leshchinskiy et al., 2023].

Размеры m1 *Lagurus lagurus* из местонахождений Европы, Южного Урала, Западно-Сибирской равнины, Казахстана (геологический возраст приведен согласно ссылкам)

Таблица 5

Lagurus lagurus m1 sizes in Europe, Southern Urals, West Siberian Plain and Kazakhstan sites (geological age is given in accordance with the references)

Table 5

Местонахождение	Радиоуглеродная датировка лет назад /период	n	Длина, мм (м–с–м)	Источник
Поволжье	Современный	29	2,17–2,40–2,69	[Малесева, Воробьева, 1973]
Северный Казахстан		30	1,99–2,36–2,69	
Астраханская степь, Западный Казахстан	Современный	20	2,00–2,48–2,75	[Маркова, 1982]
Северный Казахстан		30	2,20–2,38–2,65	
Рязанская и Воронежская области		47	2,20–2,27–2,60	
Чувашия, Южная Украина		20	2,15–2,32–2,55	

Местонахождение	Радиоуглеродная датировка лет назад / период	n	Длина, мм (м–с–м)	Источник
р. Абакан (Минусинская котловина)	Современный	20	2,10–2,60–2,90	[Рековец, 1985]
Бреды (Зауралье)	Современный	28	2,50 ± 0,01	[Струкова, 2002]
Байслан-Таш (Предуралье)	9616±62 (IEMAЕ-1340); 13560±250 (GIN-10853)	29	2,32–2,63–3,00	[Фадеева и др., 2022]
Иманай (Предуралье)	13255±60 (IGAN-9116)	86	2,10–2,45–2,65	
Першинская пещера, слой 6 (Зауралье)	15580±130 (ГИН-11225)	105	2,54 ± 0,01	[Струкова, 2002]
Максютковский грот (Предуралье)	15650±150 (SOAN-7755)	6	2,55–2,69–2,90	[Фадеева и др., 2022]
Иманай (Предуралье)	17100±50 (IGAN-9117)	35	2,20–2,45–2,65	
Волчья грива, нижний костеносный уровень	20–18 тысяч	26	2,35–2,66–2,82	данное исследование
Мальково 2 (Зауралье)	31800±350 (COAN-2711)	126	2,58 ± 0,01	[Струкова, 2002]
Новгород-Северский (Восточная Европа)	40–12 тысяч	50	2,44–2,66–3,00	[Рековец, 1985]
Прижим II (Зауралье), глубина 0,10–0,20 м	16650±400 (ИЭРЖ-32); 17070±1017 (ИЭМЭЖ-700)	46	2,62–2,65–2,69	[Смирнов и др., 1990]
Вторая Серпиевская пещера (Зауралье)	25200±1800 (ИЭРЖ-46)	43	2,59–2,63–2,67	
Южное Зауралье	Введенка	2	2,65; 2,70	[Стефановский и др., 2003]
	Верхняя Алабуга	324	2,20–2,57–3,00	
	Стрелецкое (слой 4)	1	2,45	
	Южный (слой 4)	6	2,20–2,45–2,62	
	Южный (слой 3)	1	2,60	
	Миасское (слой 5)	1	2,60	
Араповичи (Восточная Европа)	Поздний плейстоцен	13	2,35–2,50–2,65	[Маркова, 1982]
Южное Предуралье	Горнова	25	2,35–2,56–2,75	[Яковлев, 1996, 2015]
	Климовка	10	2,30–2,65–2,87	
	Груздевка	9	2,27–2,55–2,82	
	Красный Яр	100	2,20–2,61–3,02	
Гадяч (Восточная Европа)	Начало позднего плейстоцена	3	2,10–2,40–2,70	[Маркова, 1982, 1986, 2017]
Мальково 1 (Зауралье)	Начало позднего плейстоцена	165	2,57 ± 0,01	[Струкова, 2002]
Ярсино (Зауралье)	Начало позднего плейстоцена	30	2,35–2,62–3,00	[Смирнов и др., 1986]
Игнatieвская, 2014 г., слой 10 (Предуралье)	Глубина 3,25–4,00 м	36	2,25–2,52–2,90	[Фадеева и др., 2019]
	Глубина 4,00–4,30 м	6	2,45–2,54–2,70	
Озерное (Восточная Европа)	Конец среднего плейстоцена	10	2,60–2,70–2,80	[Рековец, 1994]

Данный факт общепринято интерпретируется как признак засушливости климата [Hughes, Gibbard, 2015]. Спорово-пыльцевые спектры этого стратиграфического уровня включают до 18 таксонов трав, соответствующих пищевым предпочтениям грызунов позднеплейстоценовой ассоциации. Основная часть трав принадлежит сложноцветным (Asteraceae, включая полыни и цикориевые), злаковым (Poaceae), розоцветным (Rosaceae) и лютиковым (Ranunculaceae), постоянно присутствует маревые (Chenopodiaceae), отмечены бобовые (Fabaceae), гвоздичные (Caryophyllaceae), яснотковые (Lamiaceae), капустные (Brassicaceae), гречишные (Polygonaceae), валириановые (Valerianaceae), свинчатковые (Plumbaginaceae – Limonium-type), примулы (Primulaceae) и эфедра (*Ephedra* sp.). Богатый таксономический состав указывает на развитие разнотравно-злаковых степей с участками солонцов что привлекало на Волчью гриву мамонтовую фауну [Leshchinskiy, 2009; Leshchinskiy, Burkanova, 2022].

Изотопный анализ зубов мамонтов из Волчьей гривы, проведенный нами недавно, говорит о том, что

среднегодовые температуры воздуха в Барабинской низменности в период ~ 20–18 тыс. ¹⁴C лет назад были близки современным, при этом зимы, вероятно, были холоднее, а лето жарче, чем сегодня. Поэтому во время последнего ледникового максимума мамонтовая фауна здесь процветала [Krivokorin et al., 2024]. Таким образом, новейшие комплексные исследования не подтверждают значительное снижение среднегодовых температур воздуха (до –10 °C и ниже), также как максимальную аридизацию ландшафтов на юге Западно-Сибирской равнины – наличие зоны лесовой аккумуляции в окружении холодных пустынь в последний ледниковый максимум, предполагаемые рядом авторов [Волкова, Михайлова, 2001; Зыкин и др., 2002; Зыкин, Зыкина, 2009; Velichko et al., 2011].

Ассоциация грызунов и окружающая среда Барабинской низменности в позднем голоцене. Геологические, тафономические и микропалеонтологические данные, подтвержденные прямой ¹⁴C датой [Leshchinskiy, Burkanova, 2022; Kuzmin et al., 2024],

предварительно оценивают нижний рубеж голоценовой ассоциации Волчьей гривы не древнее ~ 4000 лет назад. Данный тафоценоз сформировался в результате гибели грызунов в норах, с чем связано доминирование в его составе цокора, который почти все время проводит под землей. Большинство ископаемых нор, выявленных нами при раскопках, вероятно, принадлежали цокорам. Их современные аналоги описаны так: «...Норы цокора... в поперечном сечении округлой формы, диаметр которого равен 9,5–11,5 см. Старые ходы всегда крупнее недавно открытых, так как цокоры постоянно очищают их от осыпавшейся земли...» [Лаптев, Лосев, 1949, с. 75–76]; от горизонтальных ходов, на глубине 25–30 см от поверхности, отходят вниз вертикальные ветви, идущие до глубины 60–380 см, затем вновь ход идет горизонтально или под небольшим углом до гнездовой или кормовой камеры [Млекопитающие Казахстана, 1978]. Залегание камер, выявленных на Волчьей гриве, находится в интервале глубин современных гнездовых камер цокоров: в Томской области – от 2 до 3 м, на Алтае – от 2,75 до 3,75 м и Тарбагатае – от 1,25 до 2,60 м [Лаптев, Лосев, 1949; Шубин, Ермаков, 1967; Махмутов, 1972]. При этом локализация гнезд зависит от глубины сезонного промерзания [Млекопитающие Казахстана, 1978]. Следовательно, в период обитания цокоров на Волчьей гриве в основном не наблюдалось длительных и глубоких промерзаний грунта.

Сокращение ареала алтайского цокора произошло в историческое время в направлении с севера на юг и с северо-запада на юго-восток [Golovanov et al., 2024]. Несколько субфоссильных черепов были найдены И.Д. Черским в окрестностях Омска [Огнев, 1947]. В 1940-е гг. вид обитал в Барабе – в районе оз. Карачи (Чановский район), и между оз. Чаны и Ордынским районом [Глотов, Телегин, 1969]. Ископаемые остатки цокора найдены в Новосибирском Приобье и Кузнецкой котловине. Размеры ареалов всех представителей *Myospalax* чутко реагируют на изменения климата и поэтому нестабильны: влажные условия способствуют увеличению площади обитания, а с увеличением сухости климата она принимает островной характер. На численность цокора также влияет установление постоянного снегового покрова. В малоснежные холодные зимы зверьки нередко гибнут от переохлаждения и голода, так как глубокое промерзание почвы лишает их корма [Млекопитающие Казахстана, 1978].

Позднеголоценовый возраст «норной» ассоциации подтверждают низкие значения индекса SDQ водяной полевки, которая обитает на Волчьей гриве и в настоящее время. Для нее также важна небольшая глубина промерзания грунта, так как это основное

условие для добывания корма в зимний период [Млекопитающие Казахстана, 1978]. Водяная и узкочерепная полевки адаптированы к разнообразным условиям окружающей среды и обитают в различных природных зонах. В целом позднеголоценовая ассоциация грызунов отражает развитие лугостепных или лесостепных ландшафтов вблизи постоянного водоема, или заболоченного участка. Наличие болот и озер вблизи Волчьей гривы в то время подтверждает данные предшественников [Орлова, 1990; Кривоногов и др., 2018] и палинологические анализы [Leshchinskiy, Burkanova, 2022]. Таким образом, наши исследования указывают на увлажнение климата, что фиксировалось ранее [Зыкин и др., 2000]. Стоит отметить, что с конца плейстоцена наблюдается общее сокращение видов и количества степных грызунов, продолжающееся ныне. При этом ряд авторов предполагают, что экстенсивное развитие земледелия при освоении целинных земель в XX в. отрицательно сказалось на ареалах сусликов, узкочерепной полевки, степной и желтой пеструшек [Иванов и др., 1969; Млекопитающие Казахстана, 1978; Опарин, Опарина, 2000; Дупал, 2014].

Заключение

Барабинская низменность – один из наименее изученных районов в палеонтолого-стратиграфическом аспекте. Поэтому важно, что именно здесь находится крупнейшее в Азии «кладбище» мамонтов – зверовой солонец / минеральный оазис Волчья грива и одноименная палеолитическая стоянка [Leshchinskiy, 2009; Leshchinskiy et al., 2021, 2023; Leshchinskiy, Burkanova, 2022]. Данные, полученные ранее по геоархеологии, фауне крупных млекопитающих и палинологическому анализу, хорошо дополняют исследования микротериофауны, представленные в настоящей работе.

Впервые описаны ассоциации грызунов, захороненные на Волчьей гриве *in situ*, которые датированы последним ледниковым максимумом и поздним голоценом. Обе ассоциации являются автохтонными и отражают преобладание открытых – степных и лугостепных (возможно, лесостепных) ландшафтов. В тафоценозах отсутствуют тундровые, лесотундровые и лесные элементы, включая, переотложенные или заносные. Установлены характерные виды, которые могут являться климато-экологическими маркерами последнего ледникового максимума (степная и желтая пеструшки) и позднего голоцена (алтайский цокор и, возможно, водяная полевка) на юге Западно-Сибирской равнины. Наличие данных ассоциаций позволяет впервые использовать их в региональной стратиграфической схеме четвертичных отложений (для внеледниковой литофациальной зоны).

Полученные результаты имеют большое стратиграфическое и палеогеографическое значение – они не только характеризуют относительный возраст отложений, но и позволяют уверенно говорить о широком распространении сухих степей в первой половине MIS 2 и преобладании луговых степей (или лесостепей) в последней трети MIS 1. Таким образом, проведенные исследования подтверждают, что вблизи рубежа плейстоцена и голоцена произошла кардинальная смена биогеоценозов. Поиск причин этого феномена является крайне актуальным и напрямую связан с выявлением пределов устойчивости экологических связей – необходимого условия выживания популяций как крупных, так и мелких млекопитающих.

В целом южная половина Западно-Сибирской равнины имеет большое значение для изучения процесса заселения млекопитающими открытых ландшафтов с холодным и сухим климатом, адаптации к меняющимся условиям окружающей среды и динамики ареалов. В связи с этим местонахождение Волчьей гривы можно рассматривать в качестве опорного объекта Северной Евразии при комплексных исследованиях переходного периода – MIS 2–1, в том числе определяющих механизмы трансформации континентальных экосистем и пути формирования современных биогеоценозов. Данный объект также является ключевым при обосновании природных барьеров и лимитирующих факторов окружающей среды на путях миграций млекопитающих, включая человеческие популяции в каменном веке.

Список источников

- Агаджанян А.К., Маркова А.К.** Желтые пеструшки *Eolagurus* (Rodentia, Mammalia) плейстоцена Русской равнины // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. 1984. № 53. С. 75–85.
- Агаджанян А.К.** Мелкие млекопитающие плиоцен-плейстоцена Русской равнины. М. : Наука, 2009. 676 с.
- Алексеева Э.В., Волков И.А.** Стоянка древнего человека в Барабинской степи (Волчья Грива) // Проблемы четвертичной геологии Сибири. Новосибирск : Наука, 1969. С. 142–150.
- Алексеева Э.В., Верещагин Н.К.** Охотники на мамонтов в Барабинской степи // Природа. 1970. № 1. С. 71–74.
- Архипов С.А., Астахов В.И., Волков И.А., Волкова В.С., Паньчев В.А.** Палеогеография Западно-Сибирской равнины в максимум позднелеринского оледенения. Новосибирск : Наука, 1980. 110 с.
- Архипов С.А., Волкова В.С.** Геологическая история, ландшафты и климаты плейстоцена Западной Сибири. Новосибирск : НИЦ ОИГТМ СО РАН, 1994. 105 с.
- Архив** климатических данных. 2012. URL: <http://climatebase.ru/> <http://climatebase.ru/station/29612> (дата обращения: 01.05.2024).
- Бабин Г.А., Черных А.И., Головина А.Г., Жигалов С.В., Долгушин С.С., Ветров Е.В., Кораблева Т.В., Бодина Н.А., Светлова Н.А., Федосеев Г.С., Хилько А.П., Епифанов В.А., Лоскутов Ю.И., Лоскутов И.Ю., Михаревич М.В., Пихутин Е.А.** Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Серия Алтай-Саянская. Лист N-44 – Новосибирск. Объяснительная записка. СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. 392 с.
- Большаков В.Н., Васильева И.А., Малеева А.Г.** Морфотипическая изменчивость зубов полевок. М. : Наука, 1980. 140 с.
- Бордаков А.А., Тесаков А.С., Дорогов А.Л.** Новые находки четвертичных млекопитающих из окрестностей г. Омска (Западная Сибирь, Россия) // Материалы X Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода (г. Москва, 25–29 сентября 2017 г.). М. : Геос, 2017. С. 56–57.
- Бородин А.В.** Определитель зубов полевок Урала и Западной Сибири (поздний плейстоцен – современность). Екатеринбург : УрО РАН, 2009. 100 с.
- Бородин А.В.** Полевки (Arvicolinae, Rodentia) Урала и Западной Сибири (эоплейстоцен-современность) : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Екатеринбург : ИЭРиЖ УрО РАН, 2012. 40 с.
- Бородин А.В., Маркова Е.А., Струкова Т.В.** Подход к унификации межзональных и межрегиональных корреляций фаунистических комплексов мелких млекопитающих в широтных зонах северной Евразии (на примере фаун полевок четвертичного периода) // Зоологический журнал. 2019. Т. 98, № 10. С. 1137–1147.
- Вангенгейм Э.А.** Палеонтологическое обоснование стратиграфии антропогена Северной Азии. М. : Наука, 1977. 170 с.
- Вангенгейм Э.А., Певзнер М.А., Тесаков А.С.** Зональное расчленение квартала Восточной Европы по мелким млекопитающим // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2001. Т. 9, № 3. С. 76–88.
- Власенко П.Г., Кривопапов А.В.** Гельминты алтайского цокора *Myospalax myospalax* Laxmann, 1773 (Rodentia: Spalacidae) на северной периферии ареала // Российский паразитологический журнал. 2017. Т. 41, вып. 3. С. 214–219.
- Волкова В.С., Михайлова И.В.** Природная обстановка и климат в эпоху последнего (сарматского) оледенения Западной Сибири (по палинологическим данным) // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 4. С. 678–689.
- Галкина Л.И., Надеев И.В.** Некоторые вопросы морфологии, распространения и истории цокоров (Rodentia, Myospalacinae) Западной Сибири // Фауна и экология позвоночных Сибири. Труды Биологического института СО АН СССР. Новосибирск : Наука, 1980. № 44. С. 162–176.
- Глотов И.Н., Ермакова Л.Н., Кузякин В.А., Максимов А.А., Мерзлякова Е.П., Николаев А.С., Сергеев В.Е.** Сообщества мелких млекопитающих Барабы. Новосибирск : Наука, 1978. 232 с.
- Глотов И.Н., Телегин В.И.** Распространение большого тушканчика и алтайского цокора // Биологическое районирование Новосибирской области. Новосибирск : Наука, 1969. С. 59–62.
- Громов В.И.** Материалы по геологии Омско-Барабинского района // Труды Института геологических наук. Вып. 28. М., 1940. № 8. С. 1–47.
- Громов И.М., Гуреев А.А., Новиков Г.А.** Млекопитающие фауны СССР. М. : АН СССР, 1963. Ч. 1. 639 с.

- Громов И.М., Бибииков Д.И., Калабухов Н.И., Мейер М.Н.** Фауна СССР. Млекопитающие. Наземные белычьи. Т. 3, вып. 2. М. : Л. : Наука, 1965. 467 с.
- Громов И.М., Ербаева М.А.** Млекопитающие фауны России и сопредельных территорий. Зайцеобразные и грызуны. СПб. : Зоологический институт РАН, 1995. 522 с.
- Громов И.М., Поляков И.Я.** Фауна СССР. Млекопитающие. Полевки (Microtinae). Л. : Наука, 1977. Т. III, вып. 8. 504 с.
- Дупал Т.А.** Грызуны позднего плейстоцена юга Западной Сибири // Палеоэкология плейстоцена и культуры каменного века Северной Азии и сопредельных территорий. Новосибирск : Изд. Института археолог. и этногр. СО РАН, 1998. Т. 1. С. 185–190.
- Дупал Т.А.** Перестройка сообществ мелких млекопитающих на рубеже плейстоцена и голоцена Северо-Западного Алтая // Палеонтологический журнал. 2004. № 1. С. 78–84.
- Дупал Т.А.** Распространение, численность и структура популяции степной пеструшки (*Lagurus lagurus*, Rodentia, Arvicolinae) на периферии ареала // Зоологический журнал. 2014. Т. 93, № 12. С. 1454–1460.
- Зажигин В.С.** Грызуны позднего плиоцена и антропогена юга Западной Сибири. М. : Наука, 1980. 156 с.
- Зыкин В.С., Зыкина В.С.** Проблемы расчленения и корреляции четвертичных отложений юга Западной Сибири // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. Специальный выпуск. Четвертичный период Западной Сибири: результаты и проблемы новейших исследований. М. : ГЕОС. 2009. № 69. С. 71–84.
- Зыкин В.С., Зыкина В.С., Орлова Л.А.** Стратиграфия и основные закономерности изменения природной среды и климата в плейстоцене и голоцене Западной Сибири // Археология, этнография и антропология Евразии. 2000. № 1. С. 3–22.
- Зыкин В.С., Зыкина В.С., Орлова Л.А.** Новые данные об изменении природной среды и климата в позднем плейстоцене юга Западно-Сибирской равнины по осадкам котловины озера Аксор // Основные закономерности глобальных и региональных изменений климата и природной среды в позднем кайнозое Сибири. Новосибирск : Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2002. С. 220–233.
- Иванов О.А., Галкина Л.И., Телегин В.И.** Распространение и стациональное размещение краснощекого суслика // Биологическое районирование Новосибирской области (в связи с проблемой природноочаговых инфекций). Новосибирск, 1969. С. 87–92.
- Климов А.С., Бухарова О.В., Зенин В.Н., Лещинский С.В.** Геоархеологические исследования каменных артефактов Волчьей гривы // Геоархеология и археологическая минералогия – 2022 / ред.: А.М. Юминов, Н.Н. Анкушева. Миасс ; Челябинск : Из-во ЮУрГГПУ, 2022. С. 87–91.
- Кривоногов С.К., Гусев В.А., Пархомчук Е.В., Жилич С.В.** Промежуточные озера долин рек Чулым и Каргат и их роль в эволюции бассейна озера Чаны // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 5. С. 673–689.
- Круковер А.А.** Четвертичные микротериофауны приледниковой и внеледниковой зон Западной Сибири : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Новосибирск, 1992. 20 с.
- Лаптев И.П., Лосев А.В.** О распространении западносибирского цокора (*Myospalax myospalax* Laxmann) // Вопросы географии Сибири. 1949. № 1. С. 69–77.
- Лещинский С.В.** Результаты новейших палеонтолого-стратиграфических и геоархеологических исследований местонахождения мамонтовой фауны Волчьей гривы // Труды ЗИН РАН. 2018. Т. 322, № 3. С. 315–332.
- Лещинский С.В., Зенин В.Н., Бурканова Е.М., Дудко А.А., Гулина А.В., Федяев Н.Я., Семиряков А.С., Канищева Е.В.** Комплексные исследования Барабинского мамонтового рефугиума в 2015 г. // Вестник Томского государственного университета. 2015. № 400. С. 354–365.
- Малеева А.Г., Воробьева Т.Д.** Степная пеструшка (*Lagurus lagurus* Pall.) из состава «смешанной фауны» юга Тюменской области // Фауна Европейского Севера, Урала и Западной Сибири. Свердловск : Изд-во УрГУ, 1973. С. 49–66.
- Маркова А.К.** Плейстоценовые грызуны Русской равнины (их значение для палеогеографии и стратиграфии). М. : Наука, 1982. 183 с.
- Маркова А.К.** Морфологические особенности зубов полевок родов *Microtus*, *Lagurus* и *Eolagurus* (Rodentia, Cricetidae) из микулинских местонахождений Русской равнины // Млекопитающие четвертичной фауны СССР. Труды ЗИН АН СССР. 1986. Т. 149. С. 74–97.
- Маркова А.К.** Европейские фауны мелких млекопитающих второй половины среднего плейстоцена: видовой состав, распространение, корреляции // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. 2017. № 75. С. 11–33.
- Маркова Е.А., Струкова Т.В., Бородин А.В.** Полевки (Arvicolinae, Rodentia) как объект палеоэкологических исследований: классификация видов центральной части северной Евразии по экологическим предпочтениям современных форм // Зоологический журнал. 2017. Т. 96, № 10. С. 1254–1266.
- Махмутов С.М.** Норы алтайского цокора в Казахстане // Каз. ССР. Гылым Акад. Хабарлары. Известия АН Каз. ССР (сер. биол.). Вып. 6. 1972. С. 54–60.
- Млекопитающие Казахстана** : В 4 т. Т. 1, ч. 3. Алма-Ата : Наука, 1978. 491 с.
- Москвитина Н.С., Сучкова Н.Г.** Биоразнообразие Томского Приобья. Млекопитающие : учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Томск : Издательский дом ТГУ, 2015. 382 с.
- Объяснительная записка к стратиграфическим схемам Урала (мезозой, кайнозой) / ред. Н.Я. Анцыгин и др.** Екатеринбург : Уральская геологосъемочная экспедиция, 1997. 139 с.; прил.
- Огнев С.И.** Звери СССР и прилежащих стран. Т. 5. М. ; Л. : Изд-во АН СССР. 1947. С. 558–641.
- Окладников А.П., Григоренко Б.Г., Алексеева Э.В., Волков И.А.** Стоянка верхнепалеолитического человека Волчьей Гривы (раскопки 1968 года) // Материалы полевых исследований Дальневосточной археологической экспедиции. Вып. 2. Новосибирск, 1971. С. 87–131.
- Опарин М.Л., Опарина О.С.** Изменение ареалов сусликов (*Citellus pigmaeus* Pall., *C. major* Pall., *C. fulvus* Licht.) в саратовском Заволжье на протяжении двадцатого столетия // Вопросы степеведения. Оренбург : Оренбург. губерния, 2000. С. 137–142.
- Орлова Л.А.** Голоцен Барабы (стратиграфия и радиоуглеродная хронология). Новосибирск : Наука, 1990. 128 с.
- Павлинов И.Я., Лисовский А.А.** Млекопитающие России: систематико-географический справочник. М. : Т-во научн. изданий КМК, 2012. 604 с.
- Панадиани А.Д.** Барабинская низменность. М. : Изд-во географической литературы, 1952. 120 с.

- Панычев В.А.** Радиоуглеродная хронология аллювиальных отложений Предалтайской равнины. Новосибирск : Наука, 1979. 103 с. (Труды ИГГ СО АН СССР. Вып. 451)
- Петриловский С.В., Богдасhev В.А., Ружанский В.В.** Геологическая карта СССР масштаба 1 : 200000. Серия Кулундинско-Барабинская. Лист N-44-I. Объяснительная записка. М. : Недра, 1967. 76 с.
- Петрин В.Т., Смирнов Н.Г.** Палеолитический памятник в Шикаевке на правом берегу Тобола // Вопросы археологии Урала. 1975. Вып. 13. С. 75–85.
- Прокопов К.П.** «Ожившее» ископаемое: история желтой пеструшки // Природа. 2021. № 4. С. 46–56.
- Рековец Л.И.** Микротериофауна деснянско-поднепровского позднего палеолита. Киев : Наукова думка, 1985. 168 с.
- Рековец Л.И.** Мелкие млекопитающие антропогена юга Восточной Европы. Киев : Наукова думка, 1994. 372 с.
- Самандросова А.С., Лещинский С.В.** Остатки грызунов и лисиц из местонахождения мамонтовой фауны Волчья грива (Барабинская низменность) // Палеонтология, стратиграфия и палеогеография мезозоя и кайнозоя бореальных районов: Материалы науч. онлайн-сессии, 19–22 апреля 2021 г. / ред. Н.К. Лебедева, А.А. Горячева, О.С. Дзюба, Б.Н. Шурыгин. Новосибирск : ИНИГ СО РАН, 2021. С. 378–382.
- Смирнов Н.Г.** Материалы по фауне млекопитающих позднепалеолитической стоянки Черноозерье II // Позднепалеолитическая эпоха на юге Западной Сибири. Новосибирск : Наука, 1985. Приложение 2. С. 71–79.
- Смирнов Н.Г., Большаков В.Н., Бородин А.В.** Плейстоценовые грызуны севера Западной Сибири. М. : Наука, 1986. 144 с.
- Смирнов Н.Г., Большаков В.Н., Косинцев П.А., Панова Н.К., Коробейников Ю.А., Ольшванг В.Н., Ерохин Н.Г., Быкова Г.В.** Историческая экология животных гор Южного Урала. Свердловск : УрО АН СССР, 1990. 244 с.
- Смирнов Н.Г., Кузьмина Е.А., Головачев И.Б., Фадеева Т.В.** Узкочерепная полевка (*Microtus gregalis* Pall.) в динамике зональных сообществ грызунов Северной Евразии // Экология. 2007. № 2. С. 117–123.
- Стефановский В.В., Бородин А.В., Струкова Т.В.** Корреляция аллювиальных и озерных отложений верхнего неоплейстоцена Южного Зауралья // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2003. Т. 11, № 4. С. 87–100.
- Струкова Т.В.** Степная пеструшка (*Lagurus lagurus* Pall.) и узкочерепная полевка (*Microtus gregalis* Pall.) в четвертичных фаунах Среднего и Южного Зауралья : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Екатеринбург, 2002. 24 с.
- Тесаков А.С.** Биостратиграфия среднего плиоцена-эоплейстоцена Восточной Европы (по мелким млекопитающим). М. : Наука, 2004. 247 с.
- Тесаков А.С., Бондарев А.А., Фролов П.Д.** Исаковка 4 – новое местонахождение наземной биоты раннего плейстоцена Западной Сибири // Материалы LXII сессии Палеонтологического общества 4–8 апреля 2016 г. ВСЕГЕИ. СПб. : Палеонтологическое общество РАН, 2016. С. 276–277.
- Унифицированная региональная стратиграфическая схема четвертичных отложений Западно-Сибирской равнины** // Объяснительная записка / ред. В.С. Волкова. Новосибирск : СНИИГГиМС, 2000. 64 с.; прил.
- Фадеева Т.В., Косинцев П.А., Гимранов Д.О.** Млекопитающие горной части Южного Урала в последнее межледниковье // Зоологический журнал. 2019. Т. 98, № 11. С. 1304–1322.
- Фадеева Т.В., Гимранов Д.О., Косинцев П.А., Яковлев А.Г.** Ископаемая фауна мелких млекопитающих из пещеры Иманай (Южный Урал, Россия) // Зоологический журнал. 2022. Т. 101, № 10. С. 1–14.
- Шубин Н.Г., Ермаков Л.Н.** Об экологии алтайского цокора // Экология млекопитающих и птиц. М. : Наука, 1967. С. 101–111.
- Яковлев А.Г.** Морфологическая характеристика моляров степных пеструшек (*Lagurus lagurus* Pallas, 1773) из неоплейстоценовых местонахождений Южного Предуралья // Геологический сборник. 2015. № 12. С. 56–61.
- Яковлев А.Г.** Мелкие млекопитающие плейстоцена и голоцена Башкирского Предуралья : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Уфа : Екатеринбург, 1996. 269 с.
- An Q., Zheng J., Guan J., Wu J., Lin J., Ju X., Wu R.** Predicting the effects of future climate change on the potential distribution of *Eolagurus luteus* in Xinjiang // Sustainability. 2023. V. 15 (10). 7916.
- Andrews P.** Owls, caves and fossils: predation, preservation, and accumulation of small mammal bones in caves, with an analysis of the Pleistocene cave faunas from Westbury-sub-Mendip, Somerset, U.K. Natural History Museum Publication. London, 1990. 231 p.
- Borodin A., Markova E., Zinovyev E., Strukova T., Fominykh M., Zykov S.** Quaternary rodent and insect faunas of the Urals and Western Siberia: Connection between Europe and Asia // Quaternary International. 2013. V. 284. P. 132–150.
- Cassola F.** *Myospalax myospalax*. The IUCN Red List of Threatened Species 2016: e.T14119A22277335. doi: 10.2305/IUCN.UK.2016-2.RLTS.T14119A22277335.en
- Chaline J.** Les rongeurs du pleistocene moyen et superieur de France. Centre National de la Recherche Scientifique. Paris, 1972. 395 p.
- Clark P.U., Dyke A.S., Shakun J.D., Carlson A.E., Clark J., Wohlfarth B., Mitrovica J.X., Hostetler S.W., McCabe A.M.** The Last Glacial Maximum // Science. 2009. V. 325. P. 710–714.
- Fernández-Jalvo Y., Andrews P.** Small mammal taphonomy of Gran Dolina, Atapuerca (Burgos), Spain // Journal of Archaeological Science. 1992. V. 19. P. 407–428.
- Golovanov S.E., Zazhigin V.S.** Characterization of the West Siberian lineage of zokors (Mammalia, Rodentia, Spalacidae, Myospalacinae) and divergence in molar development // Journal of Paleontology. 2023. V. 97 (5). P. 1133–1146.
- Golovanov S.E., Shpansky A.V., Rusanov G.G.** Pleistocen and modern distribution of the subterranean rodent *Myospalax myospalax* (Rodentia, Myospalacidae) in response to environmental factors // Proceedings of the Zoological Institute RAS. 2024. V. 328, № 2. P. 214–226.
- Harrison S., Smith D.E., Glasser N.F.** Late Quaternary meltwater pulses and sea level change // Journal of Quaternary Science. 2019. V. 34 (1). P. 1–15.
- Hinton M.A.C.** Monograph of the voles and lemmings (Microtinae) living and extinct. London : Brit. Mus. of Natural History, 1926. V. 1. 488 p.
- Hughes P.D., Gibbard P.L.** A stratigraphical basis for the Last Glacial Maximum (LGM) // Quaternary International. 2015. V. 383. P. 174–185.

- Krivokorin I., Amon L., Leshchinskiy S.V., Arppe L. Oxygen isotope studies of the largest West Siberian mammoth sites and implications for last glacial maximum climate reconstruction // *Quaternary Science Reviews*. 2024. V. 343. P. 108938. doi: 10.1016/j.quascirev.2024.108938
- Kuzmin Y.V., Leshchinskiy S.V., Zenin V.N., Burkanova E.M., Zazovskaya E.P., Samandrosova A.S. Chronology of the Volchia Griva megafaunal locality and Paleolithic site (Western Siberia) and the issue of human occupation of Siberia at the Last Glacial Maximum // *Radiocarbon*. 2024. V. 66 (6). P. 1630–1624. doi: 10.1017/RDC.2023.82
- Leshchinskiy S.V. Mineral deficiency, enzootic diseases and extinction of mammoth of Northern Eurasia // *Doklady Biological Sciences*. 2009. V. 424. P. 72–74.
- Leshchinskiy S.V., Burkanova E.M. The Volchia Griva mineral oasis as unique locus for research of the mammoth fauna and the late Pleistocene environment in Northern Eurasia // *Quaternary Research*. 2022. V. 109. P. 157–182.
- Leshchinskiy S.V., Kuzmin Y.V., Zenin V.N., Jull A.J.T. Radiocarbon chronology of the “Mammoth cemetery” and Paleolithic site of Volchia Griva (Western Siberia) // *Current Research in the Pleistocene*. 2008. V. 25. P. 53–56.
- Leshchinskiy S.V., Zenin V.N., Bukharova O.V. The Volchia Griva mammoth site as a key area for geoarchaeological research of human movements in the Late Paleolithic of the West Siberian Plain // *Quaternary International*. 2021. V. 587–588. P. 368–383.
- Leshchinskiy S. V., Zenin V.N., Burkanova E.M., Kuzmin Y.V. The unique Late Paleolithic artifactual bone assemblage from the Volchia Griva site, Western Siberia // *Quaternary Research*. 2023. V. 114. P. 93–113.
- López J.M., Chiavazza H. Amidst wind, sand and raptors. Small mammal bone remains recovered in open-air archaeological sites from the Monte Desert in Central Western Argentina: taphonomic and palaeoenvironmental implications // *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2019. V. 11 (10). P. 5149–5169.
- Markova A.K. Pleistocene rodents of the central and southern Russian Plain // *Quaternary Paleozoology in the Northern Hemisphere*. Illinois State Museum Scientific Papers. 1998. V. 26. P. 119–143.
- Markova E.A., Strukova T.V., Borodin A.V. Can we infer humidity gradients across the Ural Mountains during the Late Quaternary using Arvicoline rodents as an environmental proxy? // *Russian Journal of Ecology*. 2022. V. 53, No. 6. P. 485–499.
- van der Meulen A.J. Middle Pleistocene smaller mammals from the Monte Pegalia (Orvieto, Italy) with special reference to the phylogeny of *Microtus* (Arvicolidae, Rodentia) // *Quaternaria*. 1973. V. 17. P. 1–144.
- Nadachowski A. Late quaternary rodents Poland with special reference to morphotype dentition analysis of voles // Warszawa: PWN. 1982. 108 p.
- Royer A., Montuire S., Gilg O., Laroulandie V. A taphonomic investigation of small vertebrate accumulations produced by the snowy owl (*Bubo scandiacus*) and its implications for fossil studies // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2019. V. 514. P. 189–205.
- Thompson W.G., Goldstein S.L. A radiometric calibration of the SPECMAP timescale // *Quaternary Science Reviews*. 2006. V. 25. P. 3207–3215.
- Velichko A.A., Timireva S.N., Kremenetski K.V., MacDonald G.M., Smith L.C. West Siberian Plain as a late glacial desert // *Quaternary International*. 2011. V. 237. P. 45–53.

References

- Agadzhanyan A.K., Markova A.K. *Zheltye pestrushki Eolagurus (Rodentia, Mammalia) pleystotsena Russkoy ravniny* [Yellow pestles *Eolagurus* (Rodentia, Mammalia) of the Pleistocene of the Russian norm] // Bulletin of the protocol for the study of the Quaternary period. 1984. No. 53. pp. 75–85. In Russian
- Agadzhanyan A.K. *Melkie mlekopitayushchie plitsen-pleystotsena Russkoy ravniny* [Small mammals of the Pliocene-Pleistocene of the Russian Plain]. Moscow: Publishing house “Nauka”, 2009. 676 p. In Russian
- Alekseeva E.V., Volkov I.A. *Stoyanka drevnego cheloveka v Barabinskoy stepi* (Volch'ya Griva) [Site of an ancient man in the Barabinsk steppe (Volchya Griva)] // Problems of Quaternary geology of Siberia. Novosibirsk: Publishing house “Nauka”, 1969. pp. 142–150. In Russian
- Alekseeva E.V., Vereshchagin N.K. *Okhotniki na mamontov v Barabinskoy stepi* [Mammoth hunters in the Barabinsk steppe] // Priroda [Nature]. 1970. No. 1. pp. 71–74. In Russian
- Arkhipov S.A., Astakhov V.I., Volkov I.A., Volkova V.S., Panychev V.A. *Paleogeografiya Zapadno-Sibirskoy ravniny v maksimum pozdnezyryanskogo oledeneniya* [Paleogeography of the West Siberian Plain at the maximum of the Late Zyryan glaciation]. Novosibirsk: Publishing house “Nauka”, 1980. 110 pp. In Russian
- Arkhipov S.A., Volkova V.S. *Geologicheskaya istoriya, landshafty i klimaty pleystotsena Zapadnoy Sibiri* [Geological history, landscape and climate of the Pleistocene of Western Siberia]. Novosibirsk: NITs OIGGM SO RAN, 1994. 105 p. In Russian
- Arkhir klimaticheskikh dannykh, 2012 [Climate data archive, 2012]. <http://climatebase.ru/station/29612> (Date of accessed: 01.05.2024) In Russian
- Babin G.A., Chernykh A.I., Golovina A.G., Zhigalov S.V., Dolgushin S.S., Vetrov E.V., Korableva T.V., Bodina N.A., Svetlova N.A., Fedoseev G.S., Khil'ko A.P., Epifanov V.A., Loskutov Yu.I., Loskutov I.Yu., Mikharevich M.V., Pikhutin E.A. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1 : 1000000 (tret'e pokolenie). Seriya Altae-Sayanskaya. List N-44 – Novosibirsk. Ob'yasnitel'naya zapiska*. [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Altai-Sayan series. List N-44 – Novosibirsk. Explanatory letter]. St. Petersburg: Cartographic Factory VSEGEI, 2015. 392 p. In Russian
- Bol'shakov V.N., Vasil'eva I.A., Maleeva A.G. *Morfotipicheskaya izmenchivost' zubov polevok* [Morphotypic variability of voles' teeth]. Moscow: Publishing house “Nauka”. 1980. 140 p. In Russian
- Bondarev A.A., Tesakov A.S., Dorogov A.L. *Novye nakhodki chetvertichnykh mlekopitayushchikh iz okrestnostey g. Omska (Zapadnaya Sibir', Rossiya)* [New finds of Quaternary mammals from the vicinity of Omsk (Western Siberia, Russia)] // Materialy X Vserossiyskogo soveshchaniya po izucheniyu chetvertichnogo perioda (g. Moskva, 25–29 sentyabrya 2017 g.). Moscow: Publishing house “Geos”, 2017. pp. 56–57. In Russian
- Borodin A.V. *Opredelitel' zubov polevok Urala i Zapadnoy Sibiri (pozdniy pleystotsen – sovremennost')* [Key to the teeth of voles in the Urals and Western Siberia (Late Pleistocene – modern times)]. Yekaterinburg: Ural branch of Russian academy of science. 2009. 100 p. In Russian

- Borodin A.V. *Polevki (Arvicolinae, Rodentia) Urala i Zapadnoy Sibiri (eopleystotsen-sovremennost')* [Voles (Arvicolinae, Rodentia) of the Urals and Western Siberia (Eopleistocene-modern)]. Abstract of the dissertation of the Doct. Sc. Of biological science. Yekaterinburg: Institute of plant and animal ecology. Russian academy of science, 2012. 40 p. In Russian
- Borodin A.V., Markova E.A., Strukova T.V. *Podkhod k unifikatsii mezhzonal'nykh i mezhhregional'nykh korrelyatsiy faunisticheskikh kompleksov melkikh mlekopitayushchikh v shirotnykh zonakh severnoy Evrazii (na primere faun polevok chetvertichnogo perioda)* [An approach to the unification of interzonal and interregional correlations of faunal complexes of small mammals in wide zones of Northern Eurasia (using the example of the Quaternary period faun vole)] // *Zoologicheskii zhurnal* [Zoological journal]. 2019. V. 98, No. 10. pp. 1137–1147. In Russian
- Vangengeym E.A. *Paleontologicheskoe obosnovanie stratigrafii antropogena Severnoy Azii* [Paleontological substantiation of the stratigraphy of the Anthropocene of North Asia]. Moscow: Publishing house "Nauka", 1977. 170 p. In Russian
- Vangengeym E.A. Pevzner M.A., Tesakov A.S. *Zonal'noe raschlenenie kvartera Vostochnoy Evropy po melkim mlekopitayushchim* [Zonal division of the Quaternary of Eastern Europe by small mammals] // *Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya* [Stratigraphy. Geological correlation]. 2001. V. 9, No. 3. pp. 76–88. In Russian
- Vlasenko P.G., Krivopalov A.V. *Gel'minty altayskogo tsokora Myospalax myospalax Laxmann, 1773 (Rodentia: Spalacidae) na severnoy periferii areala* [Helminths of the Altai zokor Miospalax miospalax Laxmann, 1773 (Rodentia: Spalacidae) on the northern periphery of the range] // *Rossiyskii parazitologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Parasitology]. 2017. V. 41. Rel. 3. pp. 214–219. In Russian
- Volkova V.S., Mikhaylova I.V. *Prirodnaya obstanovka i klimat v epokhu poslednego (sartanskogo) oledeneniya Zapadnoy Sibiri (po palinologicheskim dannym)* [Natural situation and climate during the era of the last (Sartan) glaciation of Western Siberia (according to palynological data)] // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2001. V. 42. 4. pp. 678–689. In Russian
- Galkina L.I., Nadeev I.V. *Nekotorye voprosy morfologii, rasprostraneniya i istorii tsokorov (Rodentia, Myospalacinae) Zapadnoy Sibiri* [Some questions of morphology, distribution and history of zokors (Rodentia, Myospalacinae) of Western Siberia] // *Fauna i ekologiya pozvonochnykh Sibiri. Trudy Biologicheskogo instituta SO AN SSSR*. Novosibirsk: Publishing house "Nauka", 1980. No. 44. pp. 162–176. In Russian
- Glotov I.N., Erdakova L.N., Kuzyakin V.A., Maksimov A.A., Merzlyakova E.P., Nikolaev A.S., Sergeev V.E. *Soobshchestva melkikh mlekopitayushchikh Baraby* [Small mammal communities in Baraba]. Novosibirsk: Publishing house "Nauka", 1978. 232 p. In Russian
- Glotov I.N., Telegin V.I. *Rasprostranenie bol'shogo tushkanchika i altayskogo tsokora* [Distribution of the Great Jerboa and the Altai Zokor] // *Biologicheskoe rayonirovanie Novosibirskoy oblasti*. Novosibirsk: Publishing house "Nauka", 1969. pp. 59–62. In Russian
- Gromov V.I. *Materialy po geologii Omsko-Barabinskogo rayona* [Materials on the geology of the Omsk-Barabinsk region] // *Trudy Instituta geologicheskikh nauk* [Proceedings of the Institute of Geological Sciences]. Moscow. 1940. Rel. 28. No. 8. pp. 1–47. In Russian
- Gromov I.M. *Mlekopitayushchie fauny SSSR* [Mammals of the USSR fauna] / I.M. Gromov, A.A. Gureev, G.A. Novikov. Moscow: Academy of Sciences of the USSR. 1963. Ch. 1. 639 p. In Russian
- Gromov I.M., Bibikov D.I., Kalabukhov N.I., Meyer M.N. *Fauna SSSR. Mlekopitayushchie. Nazemnye belichi* [Fauna of the USSR. Mammals. Terrestrial squirrels.]. V. 3. Rel. 2. Moscow-Leningrad: Publishing house "Nauka". 1965. 467 p. In Russian
- Gromov I.M., Polyakov I. Ya. *Fauna SSSR. Mlekopitayushchie. Polevki (Microtinae)* [Fauna of the USSR. Mammals. Voles (Microtinae)]. Leningrad: Publishing house "Nauka", 1977. V. III. Rel. 8. 504 p. In Russian
- Gromov I.M., Erbaeva M.A. *Mlekopitayushchie fauny Rossii i sopredel'nykh territoriy. Zaytseobraznye i gryzuny* [Mammals of the fauna of Russia and adjacent territories. Lagomorphs and rodents]. St. Petersburg: Zoological Institute. Russian Academy of Sciences. 1995. 522 p. In Russian
- Dupal T.A. *Perestroyka soobshchestv melkikh mlekopitayushchikh na rubezhe pleystotsena i golotsena Severo-Zapadnogo Altaya* [Restructuring of small mammal communities at the Pleistocene-Holocene boundary in Northwestern Altai] // *Paleontologicheskii zhurnal* [Paleontological Journal]. 2004. 1. pp. 78–84. In Russian
- Dupal T.A. *Gryzuny pozdnego pleystotsena yuga Zapadnoy Sibiri* [Late Pleistocene rodents of the south of Western Siberia] // *Paleoekologiya pleystotsena i kul'tury kamennogo veka Severnoy Azii i sopredel'nykh territoriy*. Novosibirsk: publishing house of the Institute of Archeology and Ethnography. Siberian branch of Russian academy of science, 1998. V. 1. pp. 185–190. In Russian
- Dupal T.A. *Rasprostraneniye, chislennost i struktura populyatsii stepnoy pestrushki (Lagurus lagurus, Rodentia, Arvicolinae) na periferii areala* // *Zoologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Zoology]. 2014. V. 93, No. 12. pp. 1454–1460. In Russian
- Zazhigin V.S. *Gryzuny pozdnego pliotsena i antropogena yuga Zapadnoy Sibiri* [Rodents of the Late Pliocene and Anthropocene of the south of Western Siberia]. Moscow: Publishing house "Nauka", 1980. 156 p. In Russian
- Zykin V.S., Zykina V.S. *Problemy raschleneniya i korrelyatsii chetvertichnykh otlozheniy yuga Zapadnoy Sibiri* [Problems of subdivision and correlation of Quaternary deposits in the south of Western Siberia] // *Byulleten' komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda. Spetsial'nyy vypusk. Chetvertichnyy period Zapadnoy Sibiri: rezul'taty i problemy noveysikh issledovaniy*. Moscow: GEOS, 2009. No. 69. pp. 71–84. In Russian
- Zykin V.S., Zykina V.S., Orlova L.A. *Novye dannye ob izmenenii prirodnoy sredy i klimata v pozdnem pleystotsene yuga Zapadno-Sibirskoy ravniny po osadkam kotloviny ozera Aksor* [New data on changes in the natural environment and climate in the Late Pleistocene in the south of the West Siberian Plain based on sediments from the Lake Aksor basin] // *Osnovnye zakonomernosti global'nykh i regional'nykh izmeneniy klimata i prirodnoy sredy v pozdnem kaynozoe Sibiri*. Novosibirsk: publishing house of the Institute of Archeology and Ethnography. Siberian branch of Russian academy of science. 2002. pp. 220–233. In Russian
- Zykin V.S., Zykina V.S., Orlova L.A. *Stratigrafiya i osnovnye zakonomernosti izmeneniya prirodnoy sredy i klimata v pleystotsene i golotsene Zapadnoy Sibiri* [Stratigraphy and main patterns of changes in the natural environment and climate in the Pleistocene and Holocene of Western Siberia] // *Arkheologiya, etnografiya i antropologiya Evrazii* [Archaeology, ethnography and anthropology of Eurasia]. 2000. No. 1. pp. 3–22. In Russian
- Ivanov O.A., Galkina L.I., Telegin V.I. *Rasprostranenie i statsial'noe razmeshchenie krasnoshchekogo suslika* [Distribution and static distribution of the red-cheeked ground squirrel] // *Biologicheskoe rayonirovanie Novosibirskoy oblasti (v svyazi s problemoy prirodnoochagovykh infektsiy)*. Novosibirsk, 1969. pp. 87–92. In Russian
- Klimov A.S., Bukharova O.V., Zenin V.N., Leshchinskiy S.V. *Geoarkheologicheskiye issledovaniya kamennykh artefaktov Volchey grivy* // *Geoarkheologiya i arkheologicheskaya mineralogiya-2022* / Red.: Yuminov A.M., Ankusheva N.N. Miass-Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGGPU, 2022. pp. 87–91. In Russian

- Krukover A.A. *Chetvertichnye mikroteriofauny prilednikovoy i vnednikovoy zon Zapadnoy Sibiri* [Quaternary microtheriofaunas of the periglacial and extraglacial zones of Western Siberia]: abstract of the dissertation of the geol.-mineral. nauk. Novosibirsk, 1992. 20 p. In Russian
- Laptev I.P., Losev A.V. *O rasprostraneni zapadnosibirskogo tsokora (Myospalax myospalax Laxmann)* [On the distribution of the West Siberian zokor (Myospalax myospalax Laxmann)] // *Voprosy geografii Sibiri* [Questions of Geography of Siberia]. 1949. No. 1. pp. 69–77. In Russian
- Leshchinskiy S.V. Results of latest paleontological, stratigraphic and geoarchaeological research of the Volchia Griva mammoth fauna site // *Proceedings of the Zoological Institute RAS*. 2018. V. 322, No. 3. pp. 315–322. In Russian.
- Leshchinskiy S.V., Zenin V.N., Burkanova E.M., Dudko A.A., Gulina A.V., Fedyaev N.Ya, Semiryakov A.S., Kanishcheva E.V. Multidisciplinary studies of the Baraba mammoth refugium in 2015 // *Tomsk State University Journal*. 2015. No. 400. pp. 354–365. In Russian
- Maleeva A.G., Vorob'eva T.D. Stepnaya pestrushka (*Lagurus lagurus* Pall.) iz sostava «smeshannoy fauny» yuga Tyumenskoy oblasti [Steppe pied (*Lagurus lagurus* Pall.) from the “mixed fauna” of the south of the Tyumen region] // *Fauna Evropeyskogo Severa, Urala i Zapadnoy Sibiri*. Sverdlovsk: Publishing house of Ural state university. 1973. pp. 49–66. In Russian
- Markova A.K. *Pleistotsenove gryzuny Russkoy ravniny (ikh znachenie dlya paleogeografii i stratigrafii)* [Pleistocene rodents of the Russian Plain (their significance for paleogeography and stratigraphy)]. Moscow: Publishing house “Nauka”, 1982. 183 p. In Russian
- Markova A.K. *Morfologicheskie osobennosti zubov polevok rodov Microtus, Lagurus i Eolagurus (Rodentia, Cricetidae) iz mikulinskikh mestonakhozhdeniy Russkoy ravniny* [Morphological features of the teeth of voles of the genera *Microtus*, *Lagurus* and *Eolagurus* (Rodentia, Cricetidae) from the Mikulino localities of the Russian Plain] // *Mlekopitayushchie chetvertichnoy fauny SSSR. Proceedings of the Zoological Institute of the Academy of Sciences of the USSR*. 1986. V. 149. pp. 74–97. In Russian
- Markova A.K. *Evropeyskie fauny melkikh mlekopitayushchikh vtoroy poloviny srednego pleystotsena: vidovoy sostav, rasprostranenie, korrelyatsii* [European small mammal faunas of the second half of the Middle Pleistocene: species composition, distribution, correlations] // *Byulleten' Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda*. 2017. No. 75. pp. 11–33. In Russian
- Markova E.A., Strukova T.V., Borodin A.V. *Polevki (Arvicolinae, Rodentia) kak ob'ekt paleoekologicheskikh issledovaniy: klassifikatsiya vidov tsentral'noy chasti severnoy Evrazii po ekologicheskim predpochteniyam sovremennykh form* [Voles (Arvicolinae, Rodentia) as an object of paleoecological research: classification of species of the central part of northern Eurasia according to the ecological preferences of modern forms] // *Zoologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Zoology]. 2017. V. 96, No. 10. pp. 1254–1266. In Russian
- Makhmutov S.M. *Nory altayskogo tsokora v Kazakhstane* [Altai zokor burrows in Kazakhstan] // *Kaz. SSR. Gyl'm Akad. Khabarlary. News of the Academy of Sciences of Kaz. SSR (serial biology)*. Rel. 6. 1972. pp. 54–60. In Russian
- Mlekopitayushchie Kazakhstana V 4-kh tomakh* [Mammals of Kazakhstan. In 4 volumes] V.1. Ch. 3. Alma-Ata: Publishing house “Nauka”. KazSSR, 1978. 491p. In Russian
- Moskvitina N.S., Suchkova N.G. *Bioraznoobrazie Tomskogo Priob'ya. Mlekopitayushchie: ucheb. posobie 2-e izd., ispr. i dop* [Biodiversity of the Tomsk Ob region. Mammals: textbook. manual 2nd ed., corrected and expanded]. Tomsk: Publishing house TGU. 2015. 382 p. In Russian
- Ob "yasnitel'naya zapiska k stratigraficheskim skhemam Urala (mezozoy, kaynozoy)* [Explanatory note to the stratigraphic diagrams of the Urals (Mesozoic, Cenozoic)] // Red. Antsygin N.Ya. i dr. AOZT «Ural'skaya geologos"emochnaya ekspeditsiya». Yekaterinburg. 1997. 139 p. In Russian
- Ognev S.I. *Zveri SSSR i prilezhashchikh stran* [Animals of the USSR and adjacent countries]. Vol. 5. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences. 1947. pp. 558–641. In Russian
- Okladnikov A.P., Grigorenko B.G., Alekseeva E.V., Volkov I.A. *Stoyanka verkhnepaleoliticheskogo cheloveka Volch'ya Griva (raskopki 1968 goda)* [The site of the Upper Paleolithic man Volchya Griva (excavations in 1968)] // *Materialy polevykh issledovaniy Dal'nevostochnoy arkhologicheskoy ekspeditsii*. Novosibirsk. 1971. Rel. 2. pp. 87–131. In Russian
- Oparin M.L., Oparina O.S. *Izmenenie arealov suslikov (Citellus pigmaeus Pall., C. major Pall., C. fulvus Licht.) v saratovskom Zavolzh'e na protyazhenii dvadtsatogo stoletiya* [Changes in the ranges of ground squirrels (*Citellus pygmaeus* Pall., *S. major* Pall., *S. fulvus* Licht.) in the Saratov Trans-Volga region during the twentieth century] // *Voprosy stepovedeniya* [STEPPE SCIENCE]. Orenburg: Publishing house «Orenburg, guberniya». 2000. p. 137–142. In Russian
- Orlova L.A. *Golotsen Baraby (stratigrafiya i radiouglerodnaya khronologiya)* [Holocene of Baraba (stratigraphy and radiocarbon chronology)]. Novosibirsk: Publishing house “Nauka”. Siberian branch. 1990. 128 p. In Russian
- Pavlinov I.YA., Lisovskiy A.A. *Mlekopitayushchiye Rossii: Sistematiko-geograficheskii spravochnik*. M.: T-vo nauchn. izdaniy KMK. 2012. 604 p. In Russian
- Panadiadi A.D. *Barabinskaya nizmennost'* [Baraba Lowland]. Moscow: Publishing House of Geographical Literature, 1952. 120 p. In Russian
- Panychev V.A. *Radiouglerodnaya khronologiya allyuvial'nykh otlozheniy Predaltayskoy ravniny* [Radiocarbon chronology of alluvial deposits of the Pre-Altai Plain]. Novosibirsk: Publishing house “Nauka”. 1979. Trudy IGG SO AN SSSR. Rel. 451. 103 p. In Russian
- Petrilovskiy S.V., Bogdashev V.A., Ruzhanskiy V.V. *Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200000. Seriya Kulundinsko-Barabinskaya. List N-44-I. Ob "yasnitel'naya zapiska* [Geological map of the USSR, scale 1:200000. Kulundinsko-Barabinskaya series. Sheet N-44-I. Explanatory note.] Moscow: Publishing house “Nedra”. 1967. 76 p. In Russian
- Petrin V.T., Smirnov N.G. *Paleoliticheskii pamyatnik v Shikaevke na pravoberezh'e Tobola* [Paleolithic monument in Shikaevka on the right bank of the Tobol] // *Voprosy arkheologii Urala*. 1975. Rel. 13. pp. 75–85. In Russian
- Prokopov K.P. *«Ozhivshee» iskopaemoe: istoriya zheltogo pestrushki* [“Revived” fossil: the story of the yellow pied] // *Priroda* [Nature]. 2021. No. 4. pp. 46–56. In Russian
- Rekovets L.I. *Mikroteriofauna desnyansko-podneprovskogo pozdnego paleolita* [Microtheriofauna of the Desnian-Podnieper Late Paleolithic]. Kyiv: Publishing house «Naukova dumka». 1985. 168 p. In Russian
- Rekovets L.I. *Melkie mlekopitayushchie antropogena yuga Vostochnoy Evropy* [Small mammals of the anthropogene of southern Eastern Europe]. Kyiv: Publishing house «Naukova dumka». 1994. 372 p. In Russian

- Samandrosova A.S., Leshchinskiy S.V. *Ostatki gryzunov i lisits iz mestonakhzhdeniya mamontovoy fauny Volchiya griva (Barabinskaya nizmennost')* [Remains of rodents and foxes from the location of the mammoth fauna Volchya Griva (Barabinskaya Lowland)] // *Paleontologiya, stratigrafiya i paleogeografiya mezozoya i kaynozoya boreal'nykh rayonov: Materialy nauch. onlayn-sessii*, 19–22 aprelya 2021 g. / Red. N.K. Lebedeva, A.A. Goryacheva, O.S. Dzyuba, B.N. Shurygin. Novosibirsk: Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. 2021. pp. 378–382. In Russian
- Smirnov N.G. *Materialy po faune mlekopitayushchikh pozdnepaleoliticheskoy stoyanki Chernoozer'e II* [Materials on the mammal fauna of the Late Paleolithic site of Chernoozerye II] // *Pozdnepaleoliticheskaya epokha na yuge Zapadnoy Sibiri*. Novosibirsk: Publishing house «Naukova», 1985. Appendix 2. pp. 71–79. In Russian
- Smirnov N.G., Bol'shakov V.N., Borodin A.V. *Pleistotsenovyie gryzuny severa Zapadnoy Sibiri* [Pleistocene rodents of the north of Western Siberia]. Moscow: Publishing house “Nauka”. 1986. 144 pp. In Russian
- Smirnov N.G., Bol'shakov V.N., Kosintsev P.A., Panova N.K., Korobeynikov Yu.A., Ol'shvang V.N., Erokhin N.G., Bykova G.V. *Istoricheskaya ekologiya zhivotnykh gor Yuzhnogo Urala* [Historical ecology of animals in the mountains of the Southern Urals]. Sverdlovsk: Ural branch of the USSR Academy of Sciences. 1990. 244 pp. In Russian
- Smirnov N.G., Kuzmina E.A., Golovachev I.B., Fadeeva T.V. *Uzkocherepnaya polevka (Microtus gregalis Pall.) v dinamike zonalnykh soobshchestv gryzunov Severnoy Evrazii* // *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology]. 2007. No. 2. pp. 117–123. In Russian
- Stefanovskiy V.V., Borodin A.V., Strukova T.V. *Korrelyatsiya allyuvial'nykh i ozernykh otlozheniy verkhnego neopleystotsena Yuzhnogo Zaural'ya* [Correlation of alluvial and lacustrine deposits of the Upper Neopleistocene of the Southern Trans-Urals] // *Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya* [Stratigraphy. Geological correlation]. 2003. V. 11, No. 4. pp. 87–100. In Russian
- Strukova T.V. *Stepnaya pestrushka (Lagurus lagurus Pall.) i uzkocherepnaya polevka (Microtus gregalis Pall.) v chetvertichnykh faunakh Srednego i Yuzhnogo Zaural'ya* [Steppe pied (Lagurus lagurus Pall.) and narrow-skulled vole (Microtus gregalis Pall.) in the Quaternary faunas of the Middle and Southern Trans-Urals]: abstract of the dissertation of a candidate of biological sciences. Yekaterinburg. 2002. 24 p. In Russian
- Tesakov A.S. *Biostratigrafiya srednego plitsena-eopleistotsena Vostochnoy Evropy (po melkim mlekopitayushchim)* [Biostratigraphy of the Middle Pliocene-Eopleistocene of Eastern Europe (based on small mammals)]. Moscow: Nauka, 2004. 247 pp. In Russian
- Tesakov A.S., Bondarev A.A., Frolov P.D. *Isakovka 4 – novoe mestonakhzhdenie nazemnoy bioty rannego pleystotsena Zapadnoy Sibiri* [Isakovka 4 – a new locality of terrestrial biota of the Early Pleistocene of Western Siberia] // *Materialy LXII sessii Paleontologicheskogo obshchestva 4–8 aprelya 2016 g.* VSEGEI.St. Petersburg: Paleontological Society of the Russian Academy of Sciences. pp. 276–277. In Russian
- Unifitsirovannaya regional'naya stratigraficheskaya skhema chetvertichnykh otlozheniy Zapadno-Sibirskoy ravniny [Unified regional stratigraphic scheme of Quaternary deposits of the West Siberian Plain] // *Ob'yasnitel'naya zapiska* (Red. Volkova V.S.). Novosibirsk: Siberian research Institute of geology, geophysics and mineral raw materials. 2000. 64 p. Appendix. In Russian
- Fadeeva T.V., Kosintsev P.A., Gimranov D.O. *Mlekopitayushchie gornoy chasti Yuzhnogo Urala v poslednee mezhdlednikov'e* [Mammals of the mountainous part of the Southern Urals during the last interglacial] // *Zoologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Zoology]. 2019. V. 98, No. 11. pp. 1304–1322. In Russian
- Fadeeva T.V., Gimranov D.O., Kosintsev P.A., Yakovlev A.G. *Iskopaemaya fauna melkikh mlekopitayushchikh iz peshchery Imanay (Yuzhnyy Ural, Rossiya)* [Fossil fauna of small mammals from Imanai Cave (Southern Urals, Russia)] // *Zoologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Zoology]. 2022. V. 101, No. 10. pp. 1–14. In Russian
- Shubin N.G., Erdakov L.N. *Ob ekologii altayskogo tsokora* [About the ecology of the Altai zokor] // *Ekologiya mlekopitayushchikh i ptits*. Moscow: Publishing house “Nauka”, 1967. pp. 101–111. In Russian
- Yakovlev A.G. *Morfologicheskaya kharakteristika molyarov stepnykh pestrushek (Lagurus lagurus Pallas, 1773) iz neopleystotsenovykh mestonakhzhdeniy Yuzhnogo Predural'ya* [Morphological characteristics of molars of steppe peds (Lagurus lagurus Pallas, 1773) from Neopleistocene localities in the Southern Cis-Urals] // *Geologicheskii sbornik* [Geological collection]. 2015. No. 12. pp. 56–61. In Russian
- Yakovlev A.G. *Melkie mlekopitayushchie pleystotsena i golotsena Bashkirskogo Predural'ya* [Small mammals of the Pleistocene and Holocene of the Bashkir Cis-Urals]: abstract of the dissertation of a candidate of biological sciences Ufa – Yekaterinburg. 1996. 269 p. In Russian
- An Q., Zheng J., Guan J., Wu J., Lin J., Ju X., Wu R. Predicting the effects of future climate change on the potential distribution of *Eolagurus luteus* in Xinjiang // *Sustainability*, 2023. V. 15 (10). 7916.
- Andrews P. Owls, caves and fossils: predation, preservation, and accumulation of small mammal bones in caves, with an analysis of the Pleistocene cave faunas from Westbury-sub-Mendip, Somerset, U.K. Natural History Museum Publication, London. 1990. 231 p.
- Borodin A., Markova E., Zinoviyev E., Strukova T., Fominykh M., Zykov S. Quaternary rodent and insect faunas of the Urals and Western Siberia: Connection between Europe and Asia // *Quaternary International*. 2013. V. 284. pp. 132–150.
- Cassola F. *Myospalax myospalax*. The IUCN Red List of Threatened Species 2016: e.T14119A22277335. doi: 10.2305/IUCN.UK.2016-2.RLTS.T14119A22277335.en
- Chaline J. Les rongeurs du pleistocene moyen et superieur de France. Centre National de la Recherche Scientifique. Paris. France. 1972. 395 p.
- Clark P.U., Dyke A.S., Shakun J.D., Carlson A.E., Clark J., Wohlfarth B., Mitrovica J.X., Hostetler S.W., McCabe A.M. The Last Glacial Maximum // *Science*. 2009. V. 325. pp. 710–714.
- Fernández-Jalvo Y., Andrews P. Small mammal taphonomy of Gran Dolina, Atapuerca (Burgos), Spain // *Journal of Archaeological Science*. 1992. V. 19. pp. 407–428.
- Golovanov S.E., Zazhigin V.S. Characterization of the West Siberian lineage of zokors (Mammalia, Rodentia, Spalacidae, Myospalacinae) and divergence in molar development // *Journal of Paleontology*. 2023. V. 97 (5). pp. 1133–1146.
- Golovanov S.E., Shpansky A.V., Rusanov G.G. Pleistocen and modern distribution of the subterranean rodent *Myospalax myospalax* (Rodentia, Myospalacidae) in response to environmental factors // *Proceedings of the Zoological Institute RAS*. 2024. V. 328, No. 2. pp. 214 – 226.
- Harrison S., Smith D.E., Glasser N.F. Late Quaternary meltwater pulses and sea level change // *Journal of Quaternary Science*. 2019. V. 34 (1). pp. 1–15.

- Hinton M.A.C. Monograph of the voles and lemmings (Microtinae) living and extinct. London: Brit. Mus. of Natural History. 1926. V. 1. 488 p.
- Hughes P.D., Gibbard P.L. A stratigraphical basis for the Last Glacial Maximum (LGM) // *Quaternary International*. 2015. V. 383. pp. 174–185.
- Krivokorin I., Amon L., Leshchinskiy S.V., Arppe L. Oxygen isotope studies of the largest West Siberian mammoth sites and implications for last glacial maximum climate reconstruction // *Quaternary Science Reviews*. 2024. V. 343. pp. 108938. doi: 10.1016/j.quascirev.2024.108938
- Krivonogov S.K., Gusev V.A., Parkhomchuk E.V., Zhilich S.V. Intermediate lakes of the Chulym and Kargat river valleys and their role in the evolution of the Lake Chany basin // *Russian Geology and Geophysics*, 2018. V. 59. pp. 541–555.
- Kuzmin Y.V., Leshchinskiy S.V., Zenin V.N., Burkanova E.M., Zazovskaya E.P., Samandrosova A.S. Chronology of the Volchia Griva megafaunal locality and Paleolithic site (Western Siberia) and the issue of human occupation of Siberia at the Last Glacial Maximum // *Radiocarbon*. 2024. V. 66 (6). pp. 1630–1624. doi: 10.1017/RDC.2023.82
- Leshchinskiy S.V. Mineral deficiency, enzootic diseases and extinction of mammoth of Northern Eurasia // *Doklady Biological Sciences*. 2009. V. 424. pp. 72–74.
- Leshchinskiy S.V., Burkanova E.M. The Volchia Griva mineral oasis as unique locus for research of the mammoth fauna and the late Pleistocene environment in Northern Eurasia // *Quaternary Research*. 2022. V. 109. pp. 157–182.
- Leshchinskiy S.V., Kuzmin Y.V., Zenin V.N., Jull A.J.T. Radiocarbon chronology of the “Mammoth cemetery” and Paleolithic site of Volchia Griva (Western Siberia) // *Current Research in the Pleistocene*. 2008. V. 25. pp. 53–56.
- Leshchinskiy S.V., Zenin V.N., Bukharova O.V. The Volchia Griva mammoth site as a key area for geoarchaeological research of human movements in the Late Paleolithic of the West Siberian Plain // *Quaternary International*. 2021. V. 587–588. pp. 368–383.
- Leshchinskiy S. V., Zenin V.N., Burkanova E.M., Kuzmin Y.V. The unique Late Paleolithic artifactual bone assemblage from the Volchia Griva site, Western Siberia // *Quaternary Research*. 2023. V. 114. pp. 93–113.
- López J.M., Chiavazza H. Amidst wind, sand and raptors. Small mammal bone remains recovered in open-air archaeological sites from the Monte Desert in Central Western Argentina: taphonomic and palaeoenvironmental implications // *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2019. V. 11 (10). pp. 5149–5169.
- Markova A.K. Pleistocene rodents of the central and southern Russian Plain // *Quaternary Paleozoology in the Northern Hemisphere*. Illinois State Museum Scientific Papers. 1998. V. 26. pp. 119–143.
- Markova E. A., Strukova T. V., Borodin A. V. Can we Infer Humidity Gradients across the Ural Mountains during the Late Quaternary using Arvicoline Rodents as an Environmental Proxy? // *Russian Journal of Ecology*. 2022. V. 53, No. 6. pp. 485–499.
- van der Meulen A.J. Middle Pleistocene smaller mammals from the Monte Pegalia (Orvieto, Italy) with special reference to the phylogeny of *Microtus* (Arvicolidae, Rodentia) // *Quaternaria*. 1973. V.17. pp. 1–144.
- Nadachowski A. Late quaternary rodents Poland with special reference to morphotype dentition analysis of voles // Warszawa: PWN. 1982. 108 p.
- Royer A., Montuire S., Gilg O., Laroulandie V. A taphonomic investigation of small vertebrate accumulations produced by the snowy owl (*Bubo scandiacus*) and its implications for fossil studies // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2019. V. 514. pp. 189–205.
- Thompson W.G., Goldstein S.L. A radiometric calibration of the SPECMAP timescale // *Quaternary Science Reviews*. 2006. V. 25. pp. 3207–3215.
- Velichko A.A., Timireva S.N., Kremenetski K.V., MacDonald G.M., Smith L.C. West Siberian Plain as a late glacial desert // *Quaternary International*. 2011. V. 237. pp. 45–53.

Информация об авторах:

Самандросова А.С., младший научный сотрудник, лаборатория континентальных экосистем мезозоя и кайнозоя, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: a.samandrosova@gmail.com

Лецинский С.В., доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией континентальных экосистем мезозоя и кайнозоя, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: sl@ggf.tsu.ru

Бурканова Е.М., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория континентальных экосистем мезозоя и кайнозоя, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: burkanova@ggf.tsu.ru

Бородин А.В., доктор биологических наук, профессор, Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

E-mail: bor@ipae.uran.ru

Косинцев П.А., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

E-mail: kpa@ipae.uran.ru

Вклад авторов:

Самандросова А.С. – подготовка и написание текста, методика работ, тафономический анализ, морфологический анализ, палеогеографическая реконструкция, дискуссия, заключение, корректировка текста.

Лецинский С.В. – подготовка и написание текста, тафономический анализ, палеогеографическая реконструкция, дискуссия, заключение, корректировка текста.

Бурканова Е.М. – палеогеографическая реконструкция, дискуссия, корректировка текста.

Бородин А.В. – методика работ, морфологический анализ, палеогеографическая реконструкция, корректировка текста.

Косинцев П.А. – палеогеографическая реконструкция, корректировка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Samandrosova A.S., Junior Researcher, Laboratory of Mesozoic and Cenozoic Continental Ecosystems, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: a.samandrosova@gmail.com

Leshchinskiy S.V., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory of Mesozoic and Cenozoic Continental Ecosystems, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: sl@ggf.tsu.ru

Burkanova E.M., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Laboratory of Mesozoic and Cenozoic Continental Ecosystems, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: burkanova@ggf.tsu.ru

Borodin A.V., Dr. Sci. (Biology), Professor, Institute of plant and animal ecology, UrB RAS, Yekaterinburg, Russia.

E-mail: bor@ipae.uran.ru

Kosintsev P.A., Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Institute of plant and animal ecology, UrB RAS, Yekaterinburg, Russia.

E-mail: kpa@ipae.uran.ru

Contribution of the authors:

Samandrosova A.S. – writing – original draft, methodology, taphonomic analysis, morphological analysis, paleogeographic reconstructions, discussion, conclusion, text correction.

Leshchinskiy S.V. – writing – original draft, taphonomic analysis, paleogeographic reconstruction, discussion, conclusion, text correction.

Burkanova E.M. – paleogeographic reconstruction, discussion, text correction.

Borodin A.V. – methodology, morphological analysis, paleogeographic reconstruction, text correction.

Kosintsev P.A. – paleogeographic reconstruction, text correction.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 19.06.2024; одобрена после рецензирования 23.06.2025; принята к публикации 29.08.2025

The article was submitted 19.06.2024; approved after reviewing 23.06.2025; accepted for publication 29.08.2025

Научная статья

УДК 569.322.3+551.89

doi: 10.17223/25421379/36/4



БОБРЫ (*CASTOR FIBER* L.) ПОЗДНЕГО ПЛЕЙСТОЦЕНА ЮГО-ВОСТОКА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Андрей Валерьевич Шпанский¹, Никита Андреевич Укоков²

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

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

¹ andreyshpansky@yandex.ru

² ukokov98@mail.ru

Аннотация. Сравнение морфометрических данных по нижним челюстям и бедренным костям ископаемых бобров из местонахождения Красный Яр (Томская область) и современных представителей позволило установить очень высокую степень близости размеров животных. При этом отмечена большая массивность области диастемы ископаемых челюстей, чем у современных животных. Анализ многовидовых местонахождений крупных млекопитающих разного геологического возраста позволил установить долговременное обитание *Castor fiber* на территории юго-восточной части Западной Сибири в течение позднего плейстоцена. Геохронологическое распространение бобров хорошо привязано к теплым и влажным интервалам позднего плейстоцена (МИС 5е и первая половина МИС 3). В оптимум голоцена бобр распространяется на север до 69° с.ш., а в позднем плейстоцене до 58° с.ш. Бобр как вид с узкой экологической валентностью является хорошим биоклиматическим маркером для второй половины среднего и позднего плейстоцена, отражающего теплые и влажные условия природной среды, близкие к современным. Опираясь на экологические особенности современных бобров, с большой долей вероятности можно утверждать, что в геологические отрезки времени, в которые бобры распространялись достаточно широко, существовало несколько важных палеогеографических особенностей. Обязательно существовал устойчивый речной сток с широким дренированием территории, наличием большого количества относительно неглубоких водотоков с устойчивым гидрорежимом и отсутствием на них толстого сплошного ледяного покрова в холодный период. Еще одним важным обстоятельством является наличие кормовой базы в непосредственной близости от русловой части реки, к которой относятся прибрежные древесно-кустарниковые заросли.

Ключевые слова: *Castor fiber*, морфометрия, палеоэкология, биоклиматический маркер, поздний плейстоцен, биостратиграфия, Западная Сибирь

Благодарности: выражаем благодарность заведующему кафедрой зоологии позвоночных и заведующему зоологическим музеем ТГУ доценту В.В. Ярцеву за возможность изучения и сравнительного анализа рецентных остатков бобров, хранящиеся в зоологическом музее ТГУ; А.А. Бондареву (Омское региональное отделение Русского географического общества) за сообщение о находках ископаемых бобров на территории Омской области, а также Я.В. Кузьмину (ИГМ СО РАН, Новосибирск) за помощь в подготовке девятого рисунка.

Источник финансирования: исследования остатков крупных млекопитающих выполнены в ИГМ СО РАН при поддержке гранта РФФИ № 22-17-00140.

Для цитирования: Шпанский А.В., Укоков Н.А. Бобры (*Castor fiber* L.) позднего плейстоцена юго-востока Западной Сибири // Геосферные исследования. 2025. № 3. С. 65–85. doi: 10.17223/25421379/36/4

Original article

doi: 10.17223/25421379/36/4

BEAVERS (*CASTOR FIBER* L.) OF THE LATE PLEISTOCENE OF THE SOUTH-EAST OF WESTERN SIBERIA

Andrei V. Shpansky¹, Nikita A. Ukokov²

¹ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia

¹ andreyshpansky@yandex.ru

² ukokov98@mail.ru

Abstract. A comparison of morphometric data on the mandibles and femurs of fossil beavers from the Krasny Yar site (Tomsk region) and modern representatives made it possible to establish a very high degree of closeness of animal sizes. At the same time, a greater massiveness of the diastema area in fossil jaws was noted than in modern animals. The analysis of the multi-species

locations of large mammals of different geological ages allowed us to establish the long-term habitation of *Castor fiber* in the southeastern part of Western Siberia during the Late Pleistocene. The geochronological distribution of beavers is well tied to the warm and humid intervals of the Late Pleistocene (MIS 5e and the first half of MIS 3). At the optimum of the Holocene, the beaver spreads north to 69 °C, and in the Late Pleistocene to 58 °C. The beaver, as a species with a narrow ecological valence, is a good bioclimatic marker for the Late Middle and Late Pleistocene, reflecting warm and humid environmental conditions close to modern ones. Based on the ecological features of modern beavers, it can be argued with a high degree of probability that during the geological periods of time in which beavers spread quite widely, there were several important paleogeographic features. There was necessarily a stable river flow with wide drainage of the territory, the presence of a large number of relatively small watercourses with stable hydraulic regime and the absence of a thick continuous ice cover on them during the cold period. Another important circumstance is the presence of a forage base in the immediate vicinity of the riverbed, which includes coastal tree and shrub thickets.

Keywords: *Castor fiber*, morphology, Palaeoecology, bioclimatic marker, Late Pleistocene, Biostratigraphy, Western Siberia

Acknowledgements: We express our gratitude to associate professor V.V. Yartsev – Head of the Department of Vertebrate Zoology and the Head of the Zoological Museum of Tomsk State University for the opportunity to study and comparative analysis the abstract remains of beavers stored in the Zoological Museum of Tomsk State University; A.A. Bondarev (Omsk Regional Branch of the Russian Geographical Society) for reporting on the finds of fossil beavers in the Omsk region, as well as Ya.V. Kuzmin (V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk) for assistance in preparing the ninth drawing.

Source of financing: Studies of the remains of large mammals were carried out at the IGM SB RAS with the support by Russian Science Foundation (project No. 22-17-00140).

For citation: Shpansky A.V., Ukokov N.A. (2025) Beavers (*Castor fiber* L.) of the Late Pleistocene of the southeast of Western Siberia. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 65–85. doi: 10.17223/25421379/36/4

Введение

В ископаемом состоянии остатки бобров с территории Западной Сибири известны с позднего плиоцена. Но эти находки очень редки и представлены единичными экземплярами. Первое описание остатков ископаемых бобров сделано Б.С. Виноградовым [1936] из отложений бетекейской свиты (поздний плиоцен) у с. Алгабас (Селим-Джевар, по И.В. Вислобоковой) на реке Бетеке (Кокчетавская область), который отнес их к *Trogontherium minus* Newton. Позднее из глинистых отложений иртышской свиты (MN 17) из местонахождения Лебяжье 2 (в 6 км выше по течению р. Иртыш от п. Лебяжье, Павлодарская область) И.В. Вислобоковой [1974] описана находка черепа и неполного скелета *Trogontherium minus*. Возраст этой находки оценивается концом среднего плиоцена. Данная находка сопоставима со временем палеомагнитной инверсии Гилберт–Гаусс (3,4 млн лет назад) [Vislobokova, 1996]. По мнению И.В. Вислобоковой, особенности строения *T. minus* из Лебяжьего свидетельствуют, что он является наиболее примитивным представителем рода. Выше по разрезу И.В. Вислобокова [1996] отмечает находку фрагмента левой плечевой кости бобра, сходного с современным речным бобром (*Castor aff. fiber* L.). Сопутствующей фауной являются представители позднего подпуск-лебяжьиного фаунистического комплекса *Archidiskodon cf. meridionalis* Nesti, *Equus stenonis* Cocchi и др. Возраст этой фауны сопоставляется со второй половиной гелазия [Vislobokova, 1996; Shpansky, 2024]. Данная находка является самой древней для речного бобра на территории Западно-Сибирской равнины.

В отложениях нижнего-среднего неоплейстоцена (среднего плейстоцена по МСШ) отмечены неописанные остатки *Trogontherium cuvieri* (Fischer von Waldheim) с территории Омской области: Исаковка, Богословка-2, Танатово, Усть-Ишим, Кайсы, Пологрудово и другие [Бондарев и др., 2024].

Из отложений верхнего плейстоцена, без уточнения геологического возраста, находки ископаемых остатков речного бобра *Castor fiber* с территории Северного Казахстана и юга Западной Сибири впервые упоминаются Б.С. Кожамкуловой [1969]. Она отмечает находки в Северо-Казахстанской (у с. Соколовка), Кустанайской и Кокчетавской областях (на р. Ишим). Морфология этих остатков не описана. Позднее Э.В. Алексеевой [1980] дается краткая морфометрическая характеристика нижних челюстей из Красного Яра (Томская область) и Ленинск-Кузнецка (Кемеровская область). В последние годы находки отмечены в других местонахождениях юга Западной Сибири и Алтая: Биби́ха, Ордынское, Красный Яр (Новосибирская область); река Чумыш (Алтай) и др. [Кассал, 2005; Волков, Васильев, 2017; Васильев и др., 2018б; 2021; Васильев, 2021]. Одна кость указана из местонахождения Байгара и три кости из сборов в широтном отрезке нижнего течения р. Иртыш от устья р. Тары до г. Тобольск (Тюменская область) [Косинцев, Бобковская, 2003], эти находки являются самыми северными (~58°02' с.ш.) для ископаемого речного бобра позднего плейстоцена. Перечисленные материалы не описаны, их геологический возраст оценивается по датировкам остатков, принадлежащих другим видам, найденных совместно.

Часто остатки бобров определяются палеонтологами и упоминаются в списках видов из тех или иных местонахождений, но описания и морфометрический анализ их не приводится. Даже для находок из отложений верхнего плейстоцена до настоящего времени не было сделано ни одной радиоуглеродной датировки по костям бобров. Поэтому можно считать, что степень изученности ископаемых материалов очень низкая. Так как этот зверь имеет высокую степень экологической специализации, то его нахождение на тех или иных территориях будет отражать условия природной среды, соответствующие его экологии. Таким образом, бобр является специфическим экологическим маркером и крайне важным элементом фауны, особенно мамонтовой, потому что в этой фауне преобладали формы, специализированные на обитании в холодных и преимущественно открытых ландшафтах. Поздний плейстоцен отличается значительными колебаниями параметров климата. В настоящее время остается открытым вопрос, как на это реагировала популяция бобров – постоянно или временно они присутствовали в составе мамонтовой фауны в течение всего позднего плейстоцена на территории Западной Сибири?

Редкость встречаемости остатков бобров делает их очень важными для палеонтологов. Даже единичный, но хорошей сохранности палеонтологический материал предоставляет уникальную возможность судить о морфологических особенностях древних популяций бобров. В настоящее время современные популяции бобров занимают примерно те же территории и имеют высокую численность и плотность.

Список сокращений, принятых в работе, ПМ ТГУ – Палеонтологический музей Томского государственного университета (Томск); ЗМ ТГУ – Зоологический музей Томского государственного университета (Томск); MIS – морские изотопные стадии; Lin – крайние значения промеров; $M \pm n$ – среднее значение промеров; n – количество костей; Sin – левая; Dex – правая; AMS – ускорительная масс-спектрометрия при проведении радиоуглеродного анализа; МСШ – Международная стратиграфическая шкала.

Геолого-географические данные по основным местонахождениям остатков бобров

В настоящее время остатки позднелейстоценовых *Castor fiber* известны из двух типов местонахождений: аллювиальных и пещерных. Первые, отмечены на крупных реках и их притоках южной части Западно-Сибирской равнины: на реке Обь: Бибиха, Ордынское, Тараданово, Красный Яр (Новосибирская область), Красный Яр (Томская область); Кожевниково-на-Шегарке на реке Шегарка (приток Оби); на реке Чумыш

между поселками Мартыново и Кытманово (Алтайский край); Лебяжье на реке Иртыш (Павлодарская область); Степаниха на реке Ир (приток Ишима; Крутинский район, Омская область) [Кассал, 2005; Васильев и др., 2007, 2018в; Волков, Васильев, 2017; Васильев, 2021; Укоков, Шпанский, 2023] (рис. 1).

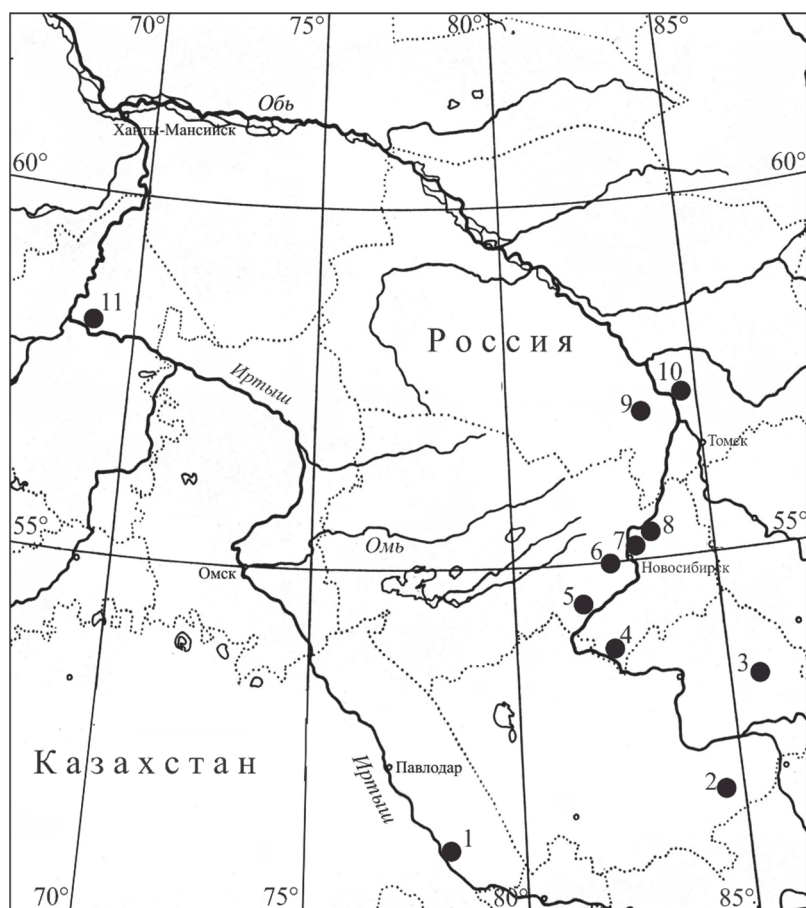
Неописанные остатки речного бобра известны из местонахождений Омской области: Таборы (Знаменский район) – фрагменты таза и бедра; Усть-Ишим (Аэропорт) дистальный отдел большой берцовой кости; несколько костей из других местонахождений, не имеющих видового определения [Бондарев и др., 2024]. В большинстве случаев сборы костного материала авторами проводились на береговых пляжах и отмелях, что подразумевает вторичный перенос и смешение разновозрастного материала.

Присутствие бобров в пещерных комплексах Алтая в настоящее время отмечено для восточной и южной галерей Денисовой пещеры [Васильев и др., 2020, 2022] и в пещерах Страшная [Васильев и др., 2016], Логово Гиены [Васильев и др., 2006], Чагырская [Васильев, 2013]. По мнению С.К. Васильева, ведущая роль в аккумуляции остатков мегафауны в пещерных местонахождениях принадлежала пещерным гиенам и волкам [Васильев и др., 2016]. Во всех местонахождениях находки бобров единичны, и даже в крупных многовидовых местонахождениях их остатки составляют десятые доли процентов (табл. 1). В работе представлены новые неописанные ранее находки из Томской области (Кожевниково-на-Шегарке) и новые сборы из местонахождения Красный Яр (Кривошеинский район).

Местонахождение Красный Яр (Томская область) известно уже около 60 лет. Э.В. Алексеевой [1980] опубликован краткий анализ около 5–7 тысяч костей, собранных в течение десяти лет (1965–1974 гг.). Новые сборы осуществляются А.В. Шпанским с 1991 г. по настоящее время. Общая численность новых полученных остатков составляет 6 382 экземпляра (хранятся в ПМ ТГУ) от 22 видов крупных млекопитающих (табл. 1). Также встречены единичные остатки птиц и рыб. Сборы материалов производятся как на пляжном скоплении (около 8 км ниже по течению), так и из инситуного захоронения на верхней (по течению) окраине п. Красный Яр. В 50 м выше по течению р. Обь от устья р. Черная речка (57°07'41.5" с.ш., 84°31'32.1" в.д.) в слое 6 найден фрагмент скелета самки бизона *Bison priscus* Woj. [Шпанский, Печерская, 2006; Shpansky et al., 2016]. Здесь же найден череп с бивнем и нижней челюстью *Mammuthus primigenius* Blum. Геологическое строение разреза неоднократно описано [Shpansky et al., 2016; Шпанский, 2018; Shpansky, Kuzmin, 2021]. Из слоев 5 и 6 происходят остатки каргинского возраста и

переотложенные более древние, принадлежащие животным второй половины среднего неоплейстоцена – *Stephanorhinus kirchbergensis* Jager, *Panthera fossilis* Reich. По скелету *Bison priscus* и по большой берцовой кости *Crocota spelaea* Goldf. получены близкие конечные даты (45 и 43,1 тыс. лет соответственно) [Shpansky, Kuzmin, 2021]. Для *Castor fiber* получена дата

39200±190 тыс. лет (IGAN_{AMS}-9264, калиброванная дата 42710 лет) [Kuzmin, Shpansky, 2023]. Всего из местонахождения Красный Яр было продатировано радиоуглеродным методом около 20 костей разных животных, для *S. kirchbergensis*, *P. fossilis*, *Ursus savini rossicus* Vereshchagin результаты показали запределный для метода возраст или отсутствие коллагена.



● Местонахождения ископаемых *Castor fiber*

Рис. 1. Местонахождения ископаемых остатков речного бобра (*Castor fiber*)

1 – Лебяжье, 2 – Денисова пещера, 3 – Чумыш, 4 – Тараданово, 5 – Ордынское, 6 – Чик, 7 – Красный Яр (Новосибирская обл.), 8 – Бибиha, 9 – Кожевниково-на-Шегарке, 10 – Красный Яр (Томская область), 11 – Байгара

Fig. 1. The locations of the fossil remains of the river beaver (*Castor fiber*)

1 – Lebyazhye, 2 – Denisova cave, 3 – Chumysh, 4 – Taradanovo, 5 – Ordynskoye, 6 – Chik, 7 – Krasny Yar (Novosibirsk region), 8 – Bibiha, 9 – Kozhevnikovo-on-Shegarka, 10 – Krasny Yar (Tomsk region), 11 – Baigara

Таблица 1

Видовой состав остатков млекопитающих из местонахождения Красный Яр (Томская область), данные на 2022 г.

Table 1

Species composition of mammalian remains from the site of Krasny Yar (Tomsk region), data for 2022

Вид	Количество костей	%	Количество особей (min)	%
<i>Castor fiber</i> L.	14	0,22	4	0,86
<i>Lepus timidus</i> L.	6	0,9	3	0,65
<i>Panthera fossilis</i> (von Reichenau)	4	0,06	2	
<i>Panthera spelaea</i> Goldf.	52	0,81	5	1,1
<i>Ursus savini rossicus</i> Vereshchagin	25	0,4	3	0,65
<i>Ursus arctos</i> L.	10	0,16	3	0,65
<i>Crocota crocota spelaea</i> Goldf.	2	0,03	1	0,22
<i>Canis lupus</i> L.	31	0,49	12+1?	2,4

Вид	Количество костей	%	Количество особей (min)	%
<i>Vulpes lagopus</i> (L.)	3	0,05	2	
<i>Gulo gulo</i> L.	4	0,06	2	0,43
<i>Meles leucurus</i> Hodgson	2	0,03	1	0,22
<i>Mammuthus primigenius</i> Blum.	603	9,45	33	7,1
<i>Bison priscus</i> Boj.	2561	40,1	163+5	35,0
<i>Ovibos moschatus</i> Zimmermann	12	0,19	1	0,22
<i>Saiga tatarica</i> L.	25	0,4	3	0,65
<i>Alces alces</i> L.	478	7,49	28	5,8
<i>Megaloceros giganteus</i> Blum.	269	4,2	22	4,75
<i>Cervus elaphus</i> L.	116	1,82	6	1,3
<i>Rangifer tarandus</i> L.	41	0,64	3	0,65
<i>Coelodonta antiquitatis</i> Blum.	488	7,65	45	9,5
<i>Stephanorhinus kirchbergensis</i> Jäger	23	0,36	2	0,43
<i>Equus ex gr. gallicus</i> Prat	1263	19,8	128	27,4
Не определено	350	5,48		
Всего (n=22)	6382	100	470	100

В песках слоя 3 также найдено несколько костей крупных млекопитающих, по которым получены датировки, соответствующие MIS 2. По большой берцовой кости *Bison priscus* и бивню *Mammuthus primigenius* получены радиоуглеродные даты 18505 ± 215 (СО РАН-5555) и 25650 ± 420 (СО РАН-5201), две даты (16560 ± 75 лет, ОхА-22520 и 23270 ± 160 лет, ОхА-22612) по остаткам *Saiga tatarica* [Jurgensen et al., 2017]. При этом местонахождение Красный Яр (Томская область) на ряду с многовидовыми местонахождениями из Новосибирской области (Тараданово, Красный Яр, Орда и др.) наиболее полно отражает видовое разнообразие фауны крупных млекопитающих позднего плейстоцена.

Местонахождение Денисова пещера находится на Алтае ($51^{\circ}23'51.3''$ N, $84^{\circ}40'34.3''$ E). Раскопки проводятся в трех галереях – в главной, южной и восточной, где отложения имеют разную мощность и стратиграфическое положение. Время формирования отложений оценивается в интервале от 350–400 тыс. лет до голоцена. Геологическое строение всех галерей с датированием с помощью ^{14}C и OSL методов описано коллективом авторов [Jacobs et al., 2019]. Наибольшее количество костей обнаружено в слоях 11 и 12 в южной галереи, свыше 55 тыс. костных остатков, принадлежащие как минимум 37 видам млекопитающих, а также кости рыб, амфибий и птиц [Васильев и др., 2018а, 2022], общая численность остатков превышает 100 тыс. экземпляров. Единичные остатки бобров найдены в восточной и южной галереях. В восточной галерее бобр *Castor fiber* представлен хвостовым позвонком из слоя 17. Возраст верхней части слоя 17 по OSL датированию оценивается в 284 ± 32 тысяч лет [Jacobs et al., 2019], что соответствует началу MIS 8, умеренно теплому времени первой половины среднего неоплейстоцена. В слое 17 и 18 доля степной группировки видов снижается с 50 до 34 % при сохранении лесостепной биотопической группы на уровне 18–

20 % и увеличении лесной с 17 до 35 %. По составу фауны С.К. Васильев считает, что слой формировался во влажное время [Васильев и др., 2020].

В южной галерее из слоя 12 определено пять костей, включая два фрагмента зубов бобра [Васильев и др., 2022] и нижнюю челюсть с поврежденными зубами [Васильев и др., 2020]. Возрастной интервал этого слоя от 64 ± 9 до 47 ± 8 тыс. лет [Jacobs et al., 2019]. Третья фаланга пальца определена из слоя 13. Присутствие костей бобра в слое 12, не смотря на преобладание остатков степных животных (52–63 %), указывает на существование лесной или как минимум приречной лесной растительности. Заросли пойменных деревьев и кустарников позволяют ему жить также в лесостепной и степной зонах.

Красный Яр, Тараданово и Бибиха (Новосибирская область). На территории Новосибирского Приобья известно несколько крупных местонахождения остатков плейстоценовой мегафауны, в которых определены остатки речного бобра (см. рис. 1). Красный Яр и Бибиха расположены на правом берегу р. Оби, соответственно в 17 и 40 км ниже по течению от г. Новосибирска. В разрезе Красный Яр вскрываются аллювиальные отложения казанцевского времени (MIS 5) и второй половины позднего неоплейстоцена (MIS 3 и 2). Геологическое строение разреза неоднократно описывалось [Волков, Архипов, 1978; Зольников и др., 2024].

Основными костеносными горизонтами являются пойменные суглинки слоя 4 (установлено 13 видов, 14,7 % всех находок) и русловые пески 6 слоя (85,3 %) (табл. 2). Остатки бобров отмечены только для слоя 6, их доля составляет 0,33 %, что достаточно много по сравнению с другими местонахождениями. В составе объединенной фауны из слоя 6 установлено 28 видов. Кости здесь были собраны в положении *in situ* либо с точной привязкой к слою. При этом почти 26 % костей, происходящих из слоя 6, не синхронны

казанцевскому аллювию, а имеют более древний – среднеплейстоценовый возраст, т.е. попали в данный слой в результате переотложения. Находки костей в слоях 3 и 5 единичны. В лессовидных суглинках слоя 3, аккумуляция которого происходила в интервале времени приблизительно от 22 до 16 тыс. лет назад [Волков, Архипов, 1978], обнаружены остатки бизона, лошади, шерстистого носорога, сайгака и овцебыка. Для данных костей характерна типичная субэразальная сохранность: серый цвет, выветрелость и рыхлая структура костной ткани. Из 5 слоя собраны остатки бизона, лошади и северного оленя. Слои 1 и 2 являются палеонтологически немymi.

В районе с. Бибиha все остатки крупных млекопитающих ранне- и среднeоплейстоценового возраста были найдены на пляже в переотложенном состоянии [Васильев, 2021]. Источник выноса многочисленных

костных остатков в настоящее время не установлен. Ориктоценоз из Бибиhi (Новосибирская область) имеет близкое соотношение к слою 6 из Красного Яра. Здесь определены единичные остатки ранне-средне-неоплейстоценовых таксонов *Panthera fossilis*, *Mammuthus* sp., *Stephanorhinus kirchbergensis*, *Camelus knoblochi*, *Cervalces latifrons*, *Praeovibos* sp., *Soergelia* cf. *elisabethae*. Основная масса костей принадлежит стадным копытным, характерным для среднего-позднего неоплейстоцена (табл. 2). Минерализация этих костей достаточно высокая, а радиоуглеродное датирование дало за пределы для метода результаты. Остатки бобров здесь единичны и составляют 0,03 %. В значительной степени видовой состав местонахождения Бибиha близок к местонахождению Григорьевка (р. Иртыш, Павлодарская область), которое определяется тобольским горизонтом [Шпанский, 2018].

Таблица 2

Общее число костных остатков, собранных в местонахождениях Бибиha 2015–2022 гг., Красный Яр 1978–2020 гг. (по [Васильеву, 2021] с изменениями) и Тараданово (Новосибирская область)

Table 2

The total number of bone remains collected in the sites of Bibiha 2015–2022, Krasny Yar 1978–2020 (according to [Vasiliev, 2021] with changes) and Taradanovo (Novosibirsk region)

Таксон	Бибиha Q1-2		Красный Яр				Тараданово [Васильев и др., 2018в] (MIS 5)	
			Слой 6 (MIS 5)		Слой 4 (MIS 3)			
	Кости	%	Кости	%	Кости	%	Кости	%
<i>Lepus</i> sp.	—	—	2	0,04	1	0,12	2	0,03
<i>Marmota</i> sp.	—	—	1	0,02	—	—	1	0,01
<i>Castor fiber</i>	2	0,03	16	0,33	—	—	12	0,17
<i>Allactaga</i> sp.	—	—	1	0,02	—	—	—	—
<i>Canis lupus</i>	5	0,06	14	0,28	1	0,12	13	0,19
<i>Cuon alpinus</i>	—	—	6	0,12	—	—	2	0,03
<i>Vulpes vulpes</i>	—	—	—	—	—	—	3	0,04
<i>Ursus arctos</i>	29	0,38	21	0,43	2	0,24	19	0,27
<i>Ursus savini</i>	25	0,33	23	0,47	—	—	30	0,43
<i>Gulo gulo</i>	—	—	3	0,06	—	—	1	0,01
<i>Meles anakuma</i>	—	—	1	0,02	—	—	—	—
<i>Crocota crocuta spelaea</i>	—	—	2	0,04	—	—	6	0,09
<i>Panthera leo fossilis</i>	1	0,02	1	0,02	—	—	—	—
<i>Panthera leo spelaea</i>	25	0,33	33	0,67	8	0,95	40	0,57
<i>Mammuthus primigenius</i>	400	5,30	217	4,41	13	1,54	43	0,61
<i>Equus ferus</i> (ex gr. gallicus)	2095	27,75	1206	24,50	522	61,7	2727	38,96
<i>Equus ovodovi</i>	2	0,03	16	0,33	—	—	114	1,63
<i>Equus</i> cf. <i>hemionus</i>	—	—	—	—	1	0,12	—	—
<i>Stephanorhinus kirchbergensis</i>	5	0,06	1	0,02	—	—	—	—
<i>Coelodonta antiquitatis</i>	431	5,71	315	6,40	85	10,07	495	7,07
<i>Camelus knoblochi</i>	1	0,02	—	—	—	—	—	—
<i>Megaloceros giganteus</i>	271	3,59	294	5,97	—	—	210	3,0
<i>Cervus elaphus</i> cf. <i>sibiricus</i>	276	3,66	250	5,08	28	3,31	362	5,17
<i>Alces</i> cf. <i>alces</i>	136	1,80	213	4,33	25	2,96	139	1,99
<i>Cervalces latifrons</i>	23	0,31	1	0,02	—	—	—	—
<i>Rangifer tarandus</i>	11	0,15	8	0,16	14	1,66	3	0,03
Cervidae gen. indet	—	—	1	0,02	—	—	—	—
<i>Bos</i> sp.	—	—	2	0,04	—	—	—	—
<i>Bison priscus</i>	3774	49,99	2260	45,91	142	16,82	2679	38,27
<i>Saiga tatarica borealis</i>	9	0,10	9	0,18	3	0,36	41	0,59
<i>Ovis ammon</i>	—	—	—	—	—	—	4	0,06
<i>Praeovibos</i> sp./ <i>Ovibos moschatus</i> *	4	0,05	1	0,02	—	—	1*	0,01
<i>Soergelia</i> cf. <i>elisabethae</i>	23	0,31	5	0,1	—	—	52	0,74
Всего таксонов	21		29		13		24	
Всего костных остатков	7549	100	4923	100	845	100	7000	100

Материалы и методы исследования

Сохранность скелетных остатков бобров в значительной степени колеблется в зависимости от прочности тех или иных элементов. Наиболее прочными являются нижние челюсти, так как в них плотно расположены коренные зубы, а горизонтальная ветвь дополнительно «армирована» резцом, который проходит в теле челюсти до основания восходящей ветви. Также высока частота встречаемости бедренных, больших берцовых и тазовых костей из-за своей массивности. Критерии оценки степени окатанности для остатков речного бобра очень близки к данным по костям крупных и средних млекопитающих. На некоторых костях отмечены следы погрызов хищниками. Также отмечены особенности распределения остатков по индивидуальному возрасту, которые основаны на степени прирастания эпифизов длинных костей конечностей.

В работе использованы серийные материалы по нижним челюстям и бедренным костям речных бобров хорошей и удовлетворительной сохранности из местонахождения Красный Яр (Кривошеинский район, Томская область). Также представлены единичные экземпляры тазовых и больших берцовых костей, включая одну кость из местонахождения Кожевниково-на-Шегарке (Кожевниковский район,

Томская область). Общее количество изученных остатков – 15 экземпляров, хранящиеся в ПМ ТГУ (табл. 3). Дополнительно использованы табличные данные промеров по нижним челюстям (6 экземпляров) и зубам из местонахождения Красный Яр (Томская область), представленные в работе Э.В. Алексеевой [1980]. В качестве материала для сравнения использованы два скелета, нижние челюсти (5 экземпляров) и бедренные кости (4 экземпляра) рецентных бобров (добыты на территории Томской области), хранящиеся в Зоологическом музее ТГУ.

Измерения нижних челюстей, зубов и бедренных костей выполнены по схемам, приведенным на рис. 2, а-с. Для нижней челюсти рассчитывались: индекс длины диастемы как отношение длины диастемы к длине зубного ряда P_4-M_3 (4:1), %; индекс массивности диастемы как отношение длины диастемы к ее высоте (промеры 4:3), %. Последний индекс оказался очень показательным для разделения ископаемых и рецентных форм (табл. 4). Для больших берцовых костей измерялись: общая длина, минимальная ширина диафиза, ширина проксимального и дистального концов, их поперечники. Для тазовой кости измерялись: общая длина от переднего края крыла подвздошной кости до заднего края седалищной кости, длина и поперечник вертлужной впадины. Промеры костей проводились с помощью штангенциркулей с точностью до 0,1 мм.

Таблица 3

Изученный материал по *Castor fiber* L.

Table 3

The studied material on *Castor fiber* L.

Название кости	Коллекционный номер ПМ ТГУ	Местонахождение	Примечание
Нижняя челюсть	5/3933	Красный Яр (Томская область)	Adult, sin
	5/2848		Adult, dex
	5/2849		Adult, dex
	5/6063		Adult, dex
	5/5705		Adult, sin
Бедренная кость	5/647	Красный Яр (Томская область)	Adult, dex
	5/2232		Subadult, dex
	5/3033		Adult, dex
	5/6127		Adult, sin
	5/3034		Subadult, sin
	5/5399		Adult, dex
Большая берцовая кость	57/47	Кожевниково-на-Шегарке (Томская область)	Subadult, dex
	5/3677	Красный Яр (Томская область)	Subadult, sin
	5/3240		Subadult, dex
Тазовая кость	5/4582	Красный Яр (Томская область)	Adult, dex

Таблица 4

Промеры mandibula и зубов *Castor fiber* из местонахождения Красный Яр и рецентных из Томской области

Table 4

Measurements of mandibula and *Castor fiber* teeth from the Krasny Yar site and recent ones from the Tomsk region

Промеры, мм	Красный Яр					Современные				
	5/2848	5/2849	5/6063	5/5705	5/3933	1	2 sin	3 dex	4	5
1. Длина зубного ряда (альвеолярная)	37,2	38	34,9	37,6	38,5	36	33,4	33,6	36,9	34,9

Промеры, мм	Красный Яр					Современные				
	5/2848	5/2849	5/6063	5/5705	5/3933	1	2 sin	3 dex	4	5
Ширина резца	8,5	9,1	8,2	9,5	9,1	7,5	8,1	8,3	10,1	9,9
2. Высота тела нижней челюсти на уровне Р ₄	33,4	29,2	30,2	31,4	35	30,5	31,8	31,7	31,2	32,1
3. Высота на уровне диастемы	22,6	С 19,8	21,5	23,4	22,6	19,2	18,1	17,9	17,8	18,1
4. Длина диастемы	27,5	С 24,5	С 17,0	27,2	С 22,6	25,1	25,1	24,9	27,1	27,1
Индекс длины диастемы (4:1), %	73,92	–	–	72,34	–	69,72	75,15	74,11	73,44	77,65
Индекс массивности диастемы (4:3), %	82,2	–	–	86,03	–	76,49	72,11	71,89	65,68	66,79
5/6. Длина/ширина коронки:										
Р ₄	С9,1/8,0	9,6/8,8	8,9/8,0	9,2/9,1	10,1/9,2	11,0/9,0	9,2/8,0	9,4/7,8	11,8/8,9	11,3/8,3
М ₁	9,0/8,4	9,0/9,5	8,1/7,9	9,8/10	9,9/9,6	8,0/7,8	7,1/8,0	7,9/8,0	8,8/8,9	8,4/9,1
М ₂	8,9/8,0	9,0/8,9	7,2/7,0	9,1/9,0	9,1/9,0	8,0/8,1	7,1/7,9	7,7/7,9	8,8/9,0	8,1/9,0
М ₃	–	–	6,6/6,2	–	8,0/7,0	8,0/7,0	8,4/6,8	8,9/6,7	9,3/7,1	8,9/6,9

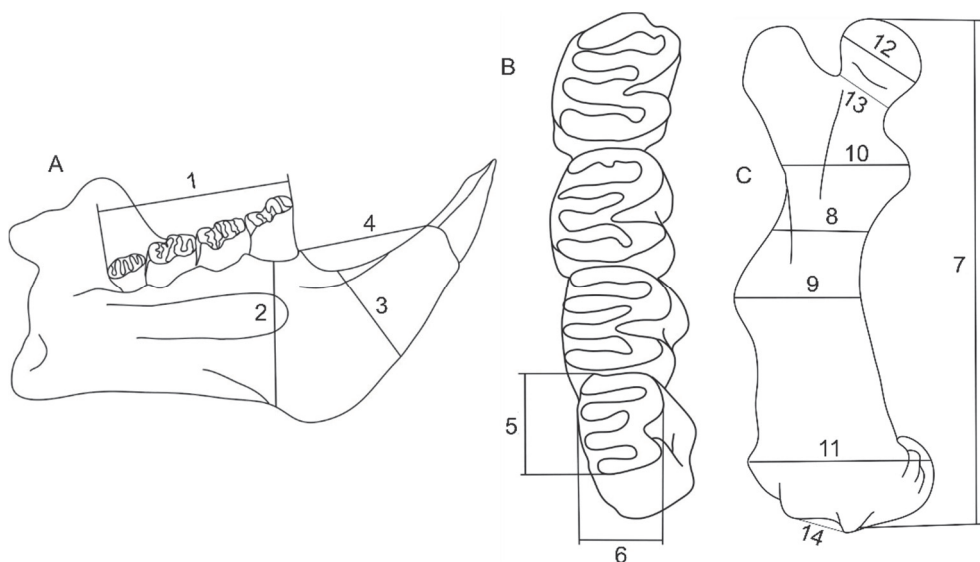


Рис. 2. Схемы промеров некоторых костей речных бобров

А – нижней челюсти: 1 – длина зубного ряда (Р₄–М₃); 2 – высота тела нижней челюсти на уровне Р₄; 3 – высота на уровне диастемы; 4 – длина диастемы; В – зубов: 5 – длина коронки зуба; 6 – ее ширина; С – бедренной кости: 7 – длина кости от головки; 8 – минимальная ширина диафиза; 9 и 10 – ширина на уровне 4-го и 3-го вертелов соответственно; 11 – ширина дистального эпифиза; 12 – диаметр головки; 13 – ширина шейки; 14 – ширина фасетки коленной чашечки

Fig. 2. Schemes of measurements of some bones of river beavers

A – mandible: 1 – length of dentition (P₄–M₃); 2 – height of mandible body at P₄ levels; 3 – height at diastema level; 4 – length of diastema; B – teeth: 5 – length of tooth crown; 6 – its width; C – femur: 7 – the length of the bone from the head; 8 – the minimum width of the diaphysis; 9 and 10 – the width at the level of the 4th and 3rd trochanter, respectively; 11 – the width of the distal epiphysis; 12 – the diameter of the head; 13 – the width of the neck; 14 – the width of the facet of the knee cups

Морфологическое описание остатков *Castor fiber*

Отряд Rodentia Bowdich, 1821
Подотряд Sciuromorpha Brandt, 1855
Семейство Castoridae Gray, 1821
Род *Castor* Linnaeus, 1758
Вид *Castor fiber* L.

Все нижние челюсти *Castor fiber* из Красного Яра имеют удовлетворительную или хорошую сохран-

ность, во всех сохранились щечные зубы, на восходящих ветвях отмечены повреждения (рис. 3). На экземплярах ПМ ТГУ 5/3933, ПМ ТГУ 5/2849, ПМ ТГУ 5/6063 резцы сломаны на уровне альвеолы. У экземпляров ПМ ТГУ 5/2848, ПМ ТГУ 5/2849, ПМ ТГУ 5/5705 отсутствуют М₃, но их альвеолы хорошо сохранились. Все челюсти имеют крупные размеры и массивную переднюю часть (табл. 4). Особенно заметную разницу с рецентными формами дают: длина

зубного ряда, высота горизонтальной ветви и высота диастемы (рис. 4). Высота горизонтальной ветви у ископаемых экземпляров превышает 21 мм, тогда как у современных представителей она составляет 17,8–19,2 мм.

При этом длина диастемы у ископаемых и рецентных форм близка друг к другу. Индекс массивности диастемы у ископаемых экземпляров (82,2–86,03 %) также превышает значения для современных представителей (65,68–76,49 %).



Рис. 3. Нижние челюсти речных бобров (*Castor fiber*) из местонахождения Красный Яр (Томская область)
а – Buccальный вид, б – Лингвальный вид, с – Оклюзальный вид; 1 – ПМ ТГУ 5/2848 dex, 2 – ПМ ТГУ 5/5705 sin, 3 – ПМ ТГУ 5/3933 sin, 4 – ПМ ТГУ 5/2849 sin, 5 – ПМ ТГУ 5/6063 dex

Fig. 3. Lower jaws of river beavers (*Castor fiber*) from the location Krasny Yar (Tomsk region)
а – buccal view, б – lingual view, с – occlusive view; 1 – PM TSU 5/2848 dex, 2 – PM TSU 5/5705 sin, 3 – PM TSU 5/3933 sin, 4 – PM TSU 5/2849 sin, 5 – PM TSU 5/6063 dex

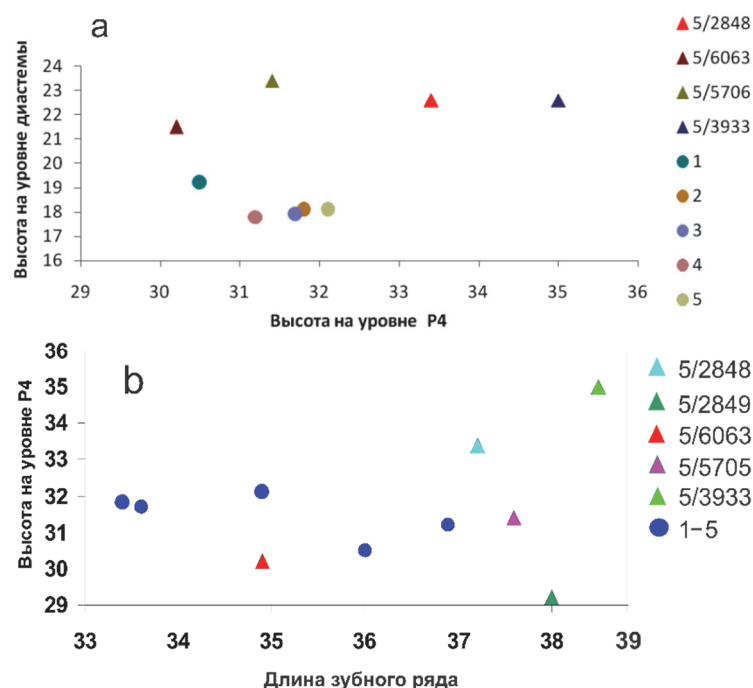


Рис. 4. Морфометрические параметры mandibula *Castor fiber* позднего плейстоцена (треугольники) и рецентных форм (круги)

а – соотношение высоты горизонтальной ветви на уровне P4 и высоты диастемы; б – соотношение длины зубного ряда и высоты горизонтальной ветви на уровне P4. Исходные данные – в табл. 4

Fig. 4. Morphometric parameters of mandibula *Castor fiber* of the Late Pleistocene (triangles) and recentate forms (circles)

a – the ratio of the height of the horizontal branch at the P4 level and the height of the diastema; b – the ratio of the length of the dentition and the height of the horizontal branch at the P4 level. The initial data in table 4

Рисунок эмали коренных зубов ископаемых экземпляров из Красного Яра похож на таковой у современных представителей вида. Верхушки бугров и гребней щечных зубов у речного бобра очень рано стираются, и жевательная поверхность представляет собой плоскость с узкими поперечными петлями, разделёнными глубокими входящими складками. При дальнейшем стирании складки замыкаются в марки разной формы, так как соответствующие складкам желобки на боковой поверхности зуба мельчают и выклиниваются по направлению к основанию коронки, а гребни и бугры теряют при этом свои первоначальные очертания. На первой стадии стирания зубов рисунок упрощен, более сложную форму он имеет на средней стадии, когда петли причудливо волнисты, и вновь упрощается к старости, при выдвигании снашивающегося зуба до уровня начала боковых борозд. Средняя степень стирания отразилась на состоянии эмалевых складок в случае экземпляра ПМ ТГУ 5/2848, у которого отмечен более сложный рисунок: входящие складки с внутренней стороны несут боковые выступы усложняющие

структуру петель. На жевательной поверхности зубов образца ПМ ТГУ 5/2849 такие выступы не развиты, зубы хорошо сохранились, но резец и сама кость сильно обломаны.

Бедренные кости из местонахождения Красный Яр (Томская область) представлены серией из шести экземпляров (рис. 5). У четырех костей дистальный эпифиз и головка бедра приросшие и они отнесены к взрослым животным. Из них экземпляры ПМ ТГУ 5/3034 и ПМ ТГУ 5/5399 имеют повреждения проксимального и дистального концов соответственно. У двух костей ПМ ТГУ №5/6127 и ПМ ТГУ 5/2232 оба эпифиза отсутствуют, а поверхности сочленения на диафизах указывают на сохранение при жизни хрящевой прослойки и неполного прирастания эпифизов. Эти экземпляры отнесены к подросткам. При этом размеры бедренных костей подростков (ширина диафиза и общая длина) очень близки к размерам экземпляра ПМ ТГУ 5/3033 (рис. 6), что позволяет предполагать принадлежность подростковых костей к самцам, а взрослый полный экземпляр ПМ ТГУ 5/3033 отнести к самкам.

Вероятно, к самкам относится и неполный экземпляр ПМ ТГУ 5/3034.

Размеры ископаемых костей в целом соответствуют размерам рецентных экземпляров (табл. 5).

Отмеченная на рис. 6 значительно меньшая ширина дистального эпифиза для двух экземпляров (ПМ ТГУ 5/6127 и ПМ ТГУ 5/2232) соотносится с подростковыми экземплярами.



Рис. 5. Бедренные кости речных бобров (*Castor fiber*) из местонахождения Красный Яр (Томская область)
а – вид спереди, б – вид сзади; 1 – ПМ ТГУ 5/647, 2 – ПМ ТГУ 5/ 2232, 3 – ПМ ТГУ 5/3033, 4 – ПМ ТГУ 5/6127 (sin), 5 – ПМ ТГУ 5/3034, 6 – ПМ ТГУ 5/5399

Fig. 5. Femoral bones of river beavers (*Castor fiber*) from the site Krasny Yar (Tomsk region)
а – front view, б – rear view; 1 – PM TSU 5/647, 2 – PM TSU 5/2232, 3 – PM TSU 5/3033, 4 – PM TSU 5/6127 (sin), 5 – PM TSU 5/3034, 6 – PM TSU 5/5399

Таблица 5

Промеры бедренных костей *Castor fiber* из местонахождения Красный Яр и рецентных из Томской области

Table 5

Measurements of *Castor fiber* femurs from the Krasny Yar site and recents from the Tomsk region

Промеры, мм	Красный Яр						Современные			
	5/647	5/2232	5/3033	5/6127	5/3034	5/5399	1	2	3	4
Длина бедренной кости	121	С100,4	110,2	С96,5	С83,9	—	113,6	118,9	121	122,1
Ширина диафиза	27	23,8	21	21,2	23,5	24,1	21,1	22,9	22,2	22,2
Ширина дистального эпифиза	43,7	С 34,0	39,1	С 31,9	40,6	—	40,9	39,3	41,2	41,2
Поперечник дистального эпифиза (латеральный)	34	С 17,4	30	—	28,5	—	30,6	30,4	28,9	30,9
Диаметр головки	20	С 15,9	18,9	17	—	18,1	17,2	18,2	17,8	17,8
Поперечник головки	20,5	С 16,4	18,5	15,1	—	18	17,1	17,8	17,2	16,7
Ширина шейки бедра	13,5	15	12,8	13,5	—	14,1	11,2	12,9	13,1	13,2
Ширина фасетки коленной чашечки	17,5	—	14,9	—	13,5	—	14,9	16	16	16,1
Ширина на уровне 3-го вертела	31,5	28,1	26	26,1	—	28	28,8	30,1	30,8	30,1
Ширина на уровне 4-го вертела	33	30,9	27,9	27,5	30,8	30,5	32,3	36,2	32,5	32,9
Индекс ширины диафиза	22,3	—	19,1	—	—	—	18,6	19,3	18,3	18,2
Индекс ширины дистального эпифиза	36,1	—	35,5	—	—	—	36,0	33,1	34,0	33,7

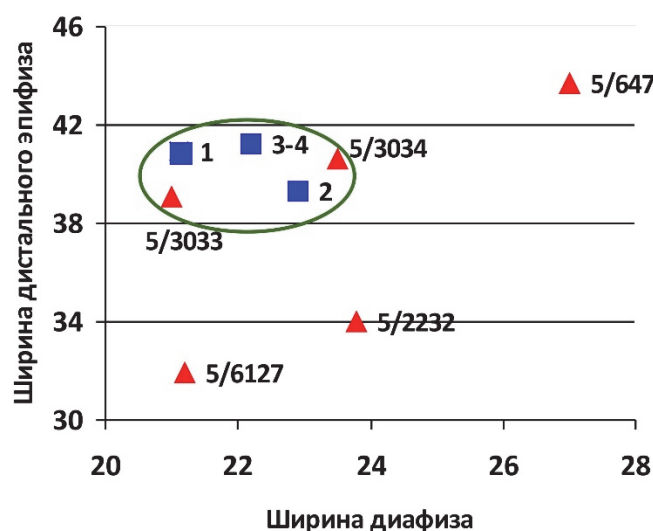


Рис. 6. Соотношение ширины диафиза и ширины дистального эпифиза бедренных костей *Castor fiber*. Треугольники – экземпляры позднего плейстоцена; квадраты – рецентные экземпляры. Исходные данные – в табл. 5

Fig. 6. The ratio of the width of the diaphysis and the width of the distal epiphysis of the femoral bones *Castor fiber*

Triangles – specimens of the Late Pleistocene; squares – recent specimens. The initial data in table 5

Большие берцовые кости из Красного Яра имеют незначительную окатанность, у экземпляра ПМ ТГУ 5/3240 сохранилась дистальная половина. У всех костей эпифизы не были неприросшими, поэтому их можно отнести к подростковым особям (рис. 7, а–д). Экземпляр ПМ ТГУ 57/47 из местонахождения Кожевниково-на-Шегарке обладает крупными размерами, значительно превосходящими экземпляры из Красного Яра, и находится на уровне средних значений для взрослых современных экземпляров [Громова, 1950].

Размеры костей: ПМ ТГУ 5/3240 – ширина дистального конца – 17,7 мм, поперечник – 17,2 мм; ПМ ТГУ 5/3677 – длина кости – 112,4 мм, ширина проксимального конца – 20,2 мм, его поперечник – 21,7 мм, ширина диафиза по середине – 11,1 мм, ширина дистального конца – 16 мм, его поперечник – 16,7 мм; ПМ ТГУ 57/47 – длина кости – 126,5 мм, ширина проксимального конца – 26,4 мм, его поперечник – 26,5 мм, ширина диафиза по середине – 11,6 мм, ширина дистального конца – 20,7 мм, его поперечник – 17,7 мм.

Правая половина таза ПМ ТГУ 5/4582 (рис. 7, е) имеет погрызы на краниальном конце крыла подвздошной кости и отломленные седалищную и подвздошную кости. Размеры: длина подвздошной кости

от переднего края вертлужной впадины – 95,9 мм, переднезадний диаметр вертлужной впадины – 23,4 мм, вертикальный диаметр вертлужной впадины – 21,5 мм.



Рис. 7. Большие берцовые и тазовые кости *Castor fiber* из местонахождений Томской области: ПМ ТГУ 5/3677 (Красный Яр)

a – вид спереди; b – вид с медиальной стороны; ПМ ТГУ 57/47 (Кожевниково-на-Шегарке): c – вид спереди; d – вид с медиальной стороны; e – ПМ ТГУ 5/4582 (Красный Яр), вид с латеральной стороны

Fig. 7. Tibia and pelvic bones *Castor fiber* from the locations of the Tomsk region: PM TSU 5/3677 (Krasny Yar)
a – front view; b – view from the medial side; PM TSU 57/47 (Kozhevnikovo-on-Shegarka): c – front view; d – view from the medial side; e – PM TSU 5/4582 (Krasny Yar), view from the lateral side

Палеоэкологические аспекты обитания речного бобра

Современные речные бобры – животные с хорошо выраженной экологической специализацией как в питании, так и в ландшафтно-климатических условиях обитания. Кормовой базой речного бобра являются вегетативные побеги кустарников и молодых деревьев, произрастающих вблизи водоемов. Возможность обитания бобров в конкретном водоеме определяется, прежде всего, его гидрологическими условиями. Маленькие, мелководные, систематически промерзающие зимой и пересыхающие летом водоемы бобрами не заселяются. Сочетание достаточной кормовой базы вблизи водоема, благоприятный гидрорежим водоема и удобные спуски-подъемы в береговой зоне обеспечивают успешное существование бобровым семьям. Более того, бобры своей деятельностью оказывают влияние на гидрорежим водотоков и, как следствие, проводят средообразующие изменения в локальных экосистемах. Построение бобровой плотины приводит к более устойчивому уровню воды на отдельном участке водотока, снижению скорости те-

чения, как следствие происходит подтопление пониженных участков, затопление береговых кустарниковых зарослей, что делает их более доступными пищевыми ресурсами и обеспечивает большую защиту от хищников. Длительное присутствие бобров может приводить и к ландшафтным изменениям – подпруживанию, заболачиванию, подъему грунтовых вод, изменению растительных ассоциаций. Экологические особенности существования и средообразующая роль современных речных бобров многократно описаны [Данилов и др., 2007; Тютина, 2008; Алейников, 2010], поэтому нет необходимости углубляться в эту тему. Так как морфологические особенности позднелейстоценовых бобров в основном аналогичны современным представителям, можно предполагать, что и экологические условия существования ископаемых *Castor fiber* очень близки к современным. Различия отмечены в степени развития диастемы нижней челюсти, что может отражать некоторые особенности питания. Можно предположить, что бобры в первой половине каргинского времени питались более плотной древесиной, что стимулировало увеличение мощности диастемы. Предположительно это

связано с более сложными ландшафтно-климатическими условиями в позднем плейстоцене или более короткими периодами роста растений (связанными с более коротким теплым сезоном).

Присутствие в ориктоценозе местонахождения Красный Яр единичных остатков водоплавающих птиц – уток и гусей, косвенно подтверждает наличие слабопроточных заводей, что является благоприятными условиями для обитания речного бобра. Не исключено, что высокая численность остатков *Alces alces* в Красном Яру (7,5 % от общей численности, табл. 1) также связана с присутствием бобров. Состав древесных и кустарниковых растений, употребляемых в пищу современным бобром, лосем и зайцем-беляком, полностью совпадает. Бобр в процессе заготовки корма валит осины, ивы, но использует он лишь 30–40 % их коры и 50–60 % ветвей. Лоси во время суточных жировочных перемещений, попадая на бобровые кормовые участки, охотно поедают кору сваленных бобрами осин.

Врагами для современного бобра являются волк, медведь, росомаха, лисица и рысь. Бобрятам могут угрожать: выдра, норка, филин, орлан-белохвост, скопа, и даже щука [Колосов и др., 1961; Соколов, 1986; Собанский, 2006; Завьялов и др., 2010]. Для ископаемого биота наиболее вероятную угрозу для бобров составляли волк и росомаха [Шпанский, 2021]. Не исключены

нападения со стороны пещерного льва, пещерной гиены, бурого медведя. В общем можно отметить, что роль хищников в жизни современного и ископаемого бобра очень невелика, так как, имея возможность укрываться в воде, бобры несут небольшие потери от всех хищников, вместе взятых [Собанский, 2006]. Однако если животные отходят за кормом более чем на 40–50 м от воды, они рискуют вовремя не обнаружить хищника, оказавшегося между ними и берегом пруда (реки), и в этом случае шансы бобров на спасение близки к нулю [Завьялов и др., 2010]. Наблюдения за состоянием ископаемых бедренных и больших берцовых костей из местонахождения Красный Яр (Томская область) показали, что на трех из шести экземпляров бедренных костей и одной большой берцовой достаточно четко различимы следы погрызов. Среди бедренных костей две принадлежат к взрослым особям и одна – к подростку (рис. 8). Эти наблюдения позволяют проводить аналогии отношений бобр – хищник для позднего плейстоцена. По особенностям погрызов можно предположить, что они выполнены волком или росомахой. Достаточно высокая численность костей с погрызами не обязательно отражает высокую долю гибели бобров в результате охоты хищников. Эти погрызы могли появиться и в результате употребления хищниками падали.

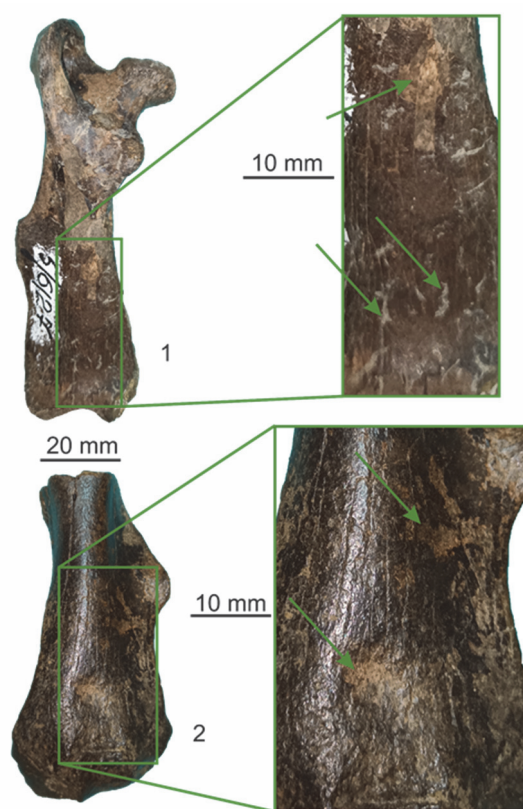


Рис. 8. Бедренные кости *Castor fiber* со следами погрызов хищниками

1 – ПМ ТГУ 5/6127 (молодая особь); 2 – ПМ ТГУ 5/3034 (взрослая особь)

Fig. 8. *Castor fiber* femurs with traces of gnawing by predators

1 – PM TSU 5/6127 (subadult); 2 – PM TSU 5/3034 (adult)

Пищевых конкурентов среди диких животных у бобров немного. Это, прежде всего, лоси, маралы, другие копытные, которые кормятся теми же растительными кормами, в том числе водными и околоводными, что и бобры [Собанский, 2006; Данилов и др., 2007]. Впервые в 2022 г. по бедренной кости бобра из Красного Яра (Томская обл.) получены данные по стабильным изотопам $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$, которые хорошо сопоставимы с данными по другим растительноядным животным. Углерод ($\delta^{13}\text{C}$) составляет $-20,7\text{‰}$, азот ($\delta^{15}\text{N}$) – $3,5\text{‰}$ [Kuzmin, Shpansky, 2023; Fig. 3]. Полученные данные наиболее близки к данным по *Megaloceros giganteus*, *Alces alces* и значительно отличаются от стадных копытных, живущих в открытых ландшафтах – *Equus* sp., *Bison priscus*, *Saiga tatarica*, *Ovibos moschatus*, *Rangifer tarandus*, еще сильнее отличаются данные по $\delta^{15}\text{N}$ для *Coelodonta antiquitatis* и *Mammuthus primigenius*. Современные бобры очень устойчивы к инфекционным заболеваниям, а для ископаемых форм такие данные в настоящее время отсутствуют.

Связь палеоэкологии и биохронологии бобров

Морфологическое сходство костей ископаемых и современных бобров позволяет сделать вывод об их высокой степени экологической близости. На этой основе можно провести решение обратной задачи в палеоэкологии – установление условий существования бобров в отдельные эпохи плейстоцена на основании данных по современным представителям. Так как бобр является очень узко специализированным в экологическом отношении животным, мы можем предположить, что в те временные интервалы, к которым приурочены известные ископаемые остатки, существовали условия природной среды, удовлетворяющие их особенностям жизнедеятельности. Мы можем предположить, что эти условия были близки к тем, что наблюдаются в местах его современного распространения.

В настоящее время данные о стратиграфической приуроченности местонахождений крупных млекопитающих Западной Сибири, включающих остатки бобров, приурочены к межледниковым и интерстадиальным интервалам среднего-позднего плейстоцена (рис. 9). Данных о находках остатков бобров в местонахождениях, датируемых холодными эпохами (MIS 4, MIS 2), в настоящее время нет. На основании радиоуглеродных дат по местонахождениям, попадающим в интервал последних 50 тысяч лет, можно сделать небольшую детализацию времени распространения бобра на юго-востоке Западно-Сибирской равнины. По данным из местонахождений голоцена (MIS

1), появление бобра отмечается со второй его половины – суббореального времени (около 5 тыс. лет назад) [Девяшин, 2013]. В последние десятилетия ареал бобров расширяется. В местонахождениях, относимых со временем LGM (последний ледниковый максимум; MIS 2) остатки бобров отсутствуют, что является вполне закономерным. Более интересным является распределение находок для каргинского интерстадиала (MIS 3). Этому временному интервалу (57–24 тыс. лет) на территории юго-востока Западно-Сибирской равнины соответствуют два крупных многовидовых местонахождения: верхний костеносный уровень Красного Яра (Новосибирская область) и Красный Яр (Кривошеинский район, Томская область). Видовые составы этих местонахождений очень близки (табл. 1, 2) и однозначно соответствуют мамонтовому фаунистическому подкомплексу [Shpansky, 2024]. Радиоуглеродное датирование показало, что формирование верхнего костеносного уровня в местонахождении Красный Яр (Новосибирская область) происходило в интервале 39–27,5 тыс. лет назад [Васильев, 2021]. А основные даты по костям из Красного Яра (Томская область) находятся в интервале 48–38 тыс. лет назад [Shpansky, Kuzmin, 2021; Kuzmin, Shpansky, 2023]. При этом остатки бобра присутствуют только в томском Красном Яру. Радиоуглеродная дата по бедренной кости ПМ ТГУ 5/3034 получилась 39200 ± 190 лет (IGAN_{AMS} – 9264; календарный возраст 42710 лет), что также хорошо укладывается в определенный интервал формирования местонахождения в Томской области.

Таким образом, новосибирский Красный Яр характеризует вторую половину каргинского интерстадиала, а томский Красный Яр отражает более раннее время, считающееся более теплым. Близкий геологический возраст (64–47 тыс. лет; [Jacobs et al., 2019]) к томскому Красному Яру имеет слой 12 в южной галерее Денисовой пещеры, из которого известно несколько костей *Castor fiber*. Детальные палинологические исследования, проведенные по отложениям второй половины верхнего плейстоцена, позволил И.В. Михайловой [2004] выделить несколько этапов изменения растительности и климата на территории Среднего Приобья. На этапе 50–46 тыс. лет существовала растительность северной тайги, климат был более холодный и сухой, чем современный. В интервале 46–37 тыс. лет происходят ландшафтно-климатические изменения – в начале интервала распространена среднетаежная растительность, а к концу интервала климат становится более холодным и сухим, «возрастает роль хвойных, преимущественно ели, увеличивается доля карликовой березки», среди травянистых растений доминирует пыльца маревых [Михайлова, 2004, с. 214–215].

В подтверждение этому в спорово-пыльцевом спектре, полученном из местонахождения Красный Яр (Томская область), из слоя 4, датированного в интервале 46–37 тыс. лет [Shpansky, Kuzmin, 2021], наибольшее количество (42,1 %) составляет пыльца древесных пород, в основном хвойных, небольшая часть пыльцы березы (*Betula pendula*) и ивы (*Salix* sp.). Травы (7,1 %) представлены единичными зернами астровых, цикориевых, маревых, в большом количестве встречаются полыни (*Artemisia* sp.). В меньшем количестве (1,6 %) встречаются споры зеленого мха (*Bryales* sp.) и плауна

(*Lycopodium* sp.) (определения И.А. Севастьяновой, лаб. микропалеонтологии ТГУ [Shpansky et al., 2016]). Отмечается значительное смещение лесных ассоциаций на юг Западно-Сибирской равнины [Волкова, 2011]. В более позднее время (37–30 тыс. лет) отмечается дальнейшее похолодание с изменением растительности – среди древесных доминируют сосна и береза и увеличивается доля трав, распространяются полынно-маревые ассоциации. Для сартанского времени отмечается сначала распространение ксерофитной растительности степного типа, а затем – тундровой растительности.

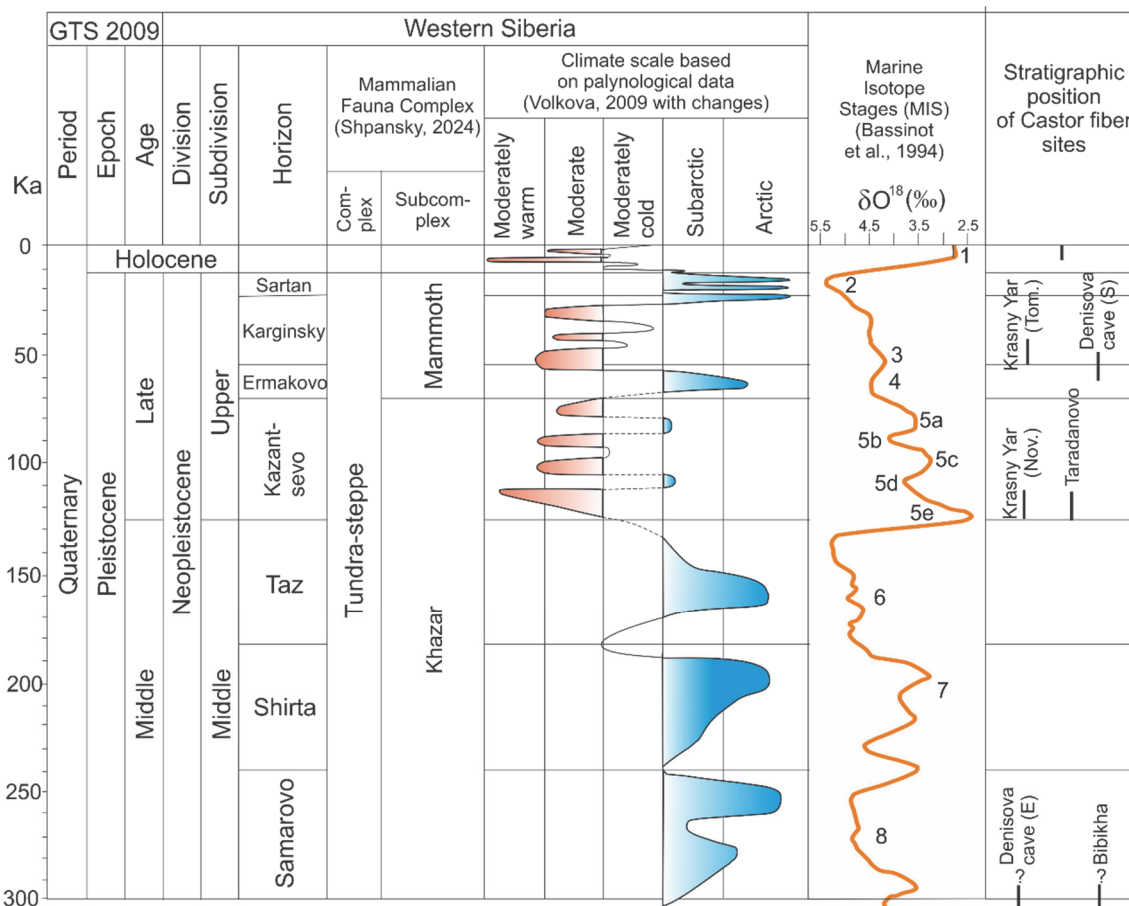


Рис. 9. Схема стратиграфического положения местонахождений, содержащих остатки *Castor fiber*, на юго-востоке Западно-Сибирской равнины

Krasny Yar (Tom.) – Красный Яр (Томская область); Krasny Yar (Nov.) – Красный Яр (Новосибирская область, слой 6); Denisova cave (S) – Денисова пещера (южная галерея, слой 12); Denisova cave (E) – Денисова пещера (восточная галерея, слой 17)

Fig. 9. Diagram of the stratigraphic position of sites containing *Castor fiber* remnants in the southeast of the West Siberian Plain

Krasny Yar (Tom.) – Krasny Yar (Tomsk region); Krasny Yar (Nov.) – Krasny Yar (Novosibirsk region, layer 6); Denisova cave (S) – Denisova Cave (south gallery, layer 12); Denisova cave (E) – Denisova Cave (east gallery, layer 17)

На переходный рубеж в интервале 37–40 тыс. лет назад в изменениях палеогеографической обстановки указывают и некоторые другие данные. Достаточно высокий уровень залесенности прибрежных территорий отражается на высокой доле остатков лосей (*Alces alces* L.) среди всех оленей в местонахождении

Красный Яр (Томская область) (около 7,5 % от всех остатков животных; см. табл. 1).

Вероятно, увеличенная влажность в первой половине каргинского времени могла отразиться на снижении скорости стирания зубов мамонтов. Как следствие, происходила задержка процесса последней

смены зубов (когда размеры челюстей достигли взрослого состояния) и возникновение патологических изменений на зубах (МЗ) мамонтов [Мащенко, Шпанский, 2005]. Возраст черепа и нижней челюсти ПМ ТГУ 1/36 с такими изменениями имеет близкую к бобрам из томского Красного Яра радиоуглеродную дату 35920 ± 140 лет (IGAN_{AMS} 9267), особенно в калиброванном виде: 41033 лет. Этому времени примерно соответствует начавшееся вымирание некоторых таксонов – *Stephanorhinus kirchbergensis*, *Elasmotherium sibiricum*, сокращение с севера на юг ареалов *Ursus savini rossicus*, *Crocota spelaea*. Радиоуглеродная дата пещерной гиены из Красного Яра (Томская область) составляет 43140 ± 370 лет (UBA-28335) и является самой молодой для равнинной территории Западной Сибири. Исчезновение этого хищника, вероятно, связано с усилением промерзания грунтов и невозможностью создавать подземные убежища, как это делают современные африканские гиены [Шпанский, 2021]. Таким образом, можно отметить определенный рубеж в каргинском интерстадиале на границе около 40–37 тыс. лет, который отразился в изменениях природной среды на территории Западно-Сибирской равнины. Можно предположить, что направленность этих изменений происходила в сторону начавшейся аридизации климата и смещению температурных параметров как по абсолютным значениям (в отрицательную сторону), так и по соотношению продолжительности теплых и холодных сезонов в году. Не исключено увеличение продолжительности холодного периода с нарастанием мощности ледового покрова на реках, снижения водности рек. Все эти сопряженные процессы являются негативными для существования бобров и некоторых других видов, тяготеющих к древесно-кустарниковым биотопам.

Более древние находки речного бобра связаны с отложениями казанцевского межледниковья (MIS 5e). Для этого времени в Новосибирском Приобье известно два многовидовых местонахождения – нижний костеносный слой Красного Яра и Тараданово [Васильев и др., 2018б; Васильев, 2021]. В первом местонахождении определено 16 костей речного бобра (0,33 % от общей численности), а в Тараданово 12 костей (0,17 %), что вполне сопоставимо с присутствием бобра в каргинское время в томском местонахождении Красный Яр – 14 костей (0,22 %) (см. табл. 1, 2). Сход-

ство видовых составов и соотношений таксонов косвенно указывает на близость условий природной среды, благоприятных для бобров, в казанцевское время и в первую половину каргинского времени.

Для второй половины среднего плейстоцена присутствие *Castor fiber* отмечено также в двух многовидовых местонахождениях: в слое 17 восточной галереи Денисовой пещеры, чей верхний возрастной интервал ограничен 284 ± 32 тыс. лет, что соответствует началу самаровского оледенения в Западной Сибири. Возраст местонахождения Бибиха менее четко определен, в нем присутствует большое количество представителей вяткинского фаунистического комплекса (первая половина среднего плейстоцена) и представители фаун второй половины среднего и позднего плейстоцена (тундра-степной фаунистический комплекс [Shpansky, 2024]). По мнению С.К. Васильева [2021], кости представителей тундра-степного комплекса относятся к ко второй половине среднего плейстоцена, они имеют большую степень минерализации, а радиоуглеродное датирование показало запредельные результаты для метода ^{14}C , но не исключен и казанцевский возраст этого местонахождения.

Таким образом, можно считать, что бобр как вид с узкой экологической валентностью является хорошим биоклиматическим маркером для второй половины среднего и позднего плейстоцена, отражающего для этого времени интервалы с теплыми и влажными условиями природной среды, близкие к современным. Опираясь на экологические особенности современных бобров, с большой долей вероятности можно утверждать, что в геологические отрезки времени, в которые бобры распространялись достаточно широко, существовало несколько важных палеогеографических особенностей. Обязательно существовал устойчивый речной сток с широким дренированием территории, наличием большого количества относительно не крупных водотоков с устойчивым гидрорежимом и отсутствием на них толстого сплошного ледяного покрова в холодный период. Еще одним важным обстоятельством является наличие кормовой базы в непосредственной близости от русловой части реки – прибрежные древесно-кустарниковые заросли. Для более объективного анализа необходимы дальнейшие исследования и расширение представительности выборки по ископаемому материалу для подтверждения предложенной гипотезы.

Список источников

- Алейников А.А. Средопреобразующая деятельность бобра европейского (*Castor fiber*) на территории заповедника «Брянский лес» и его охранной зоны // Вестник ТвГУ. Серия «Биология и экология». 2010. Вып. 18.
- Алексеева Э.В. Млекопитающие плейстоцена юго-востока Западной Сибири. М. : Наука, 1980. 188 с.
- Бондарев А.А., Голубев А.С., Тесаков А.С., Шпанский А.В. Бобровые (Castoridae, Rodentia, Mammalia) плейстоцена юга Западной Сибири // Закономерности эволюции и биостратиграфия. Материалы LXX сессии Палеонтологического общества при РАН. СПб. : Картфабрика Института Карпинского, 2024. С. 205–207.
- Васильев С.К. Фауна крупных млекопитающих из плейстоценовых отложений Чагырской пещеры (Северо-Западный Алтай) по материалам раскопок 2007–2011 годов // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Новосибирск : Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2013. Т. 19. С. 28–44.

Васильев С.К. Крупные млекопитающие раннего, среднего и позднего плейстоцена Новосибирского Приобья // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Новосибирск : Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2021. Т. 27. С. 66–73.

Васильев С.К., Козликин М.Б., Шуньков М.В. Остатки мегафауны из верхней части плейстоценовых отложений в южной галерее Денисовой пещеры // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Новосибирск : Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2018а. Т. 24. С. 37–41.

Васильев С.К., Козликин М.Б., Шуньков М.В. Фаунистические остатки из плейстоценовых отложений в южной галерее Денисовой пещеры (материалы 2019 года) // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Новосибирск : Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2020. Т. 26. С. 37–42.

Васильев С.К., Кривошапкин А.И., Зенин В.Н., Шалагина А.В. Предварительные итоги исследования остатков мегафауны из отложений пещеры Страшной (Северо-Западный Алтай) // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Новосибирск : Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2016. Т. 22. С. 15–22.

Васильев С.К., Оводов Н.Д., Мартынович Н.В. Новые палеотериологические исследования пещеры Логово Гиены (Северо-Западный Алтай) // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Новосибирск : Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2006. Т. 12. № 1. С. 43–49.

Васильев С.К., Орлова Л.А., Кузьмин Я.В. Местонахождение фауны крупных млекопитающих сартанского времени на реке Орда (Ордынский район Новосибирской области) // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Новосибирск : Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2007. Т. 13. С. 29–32.

Васильев С.К., Пархомчук Е.В., Середнёв М.А., Милютин К.И., Кузьмин Я.В., Калинин П.Н., Растигеев С.А. Радиоуглеродное датирование остатков редких видов плейстоценовой мегафауны Южной Сибири // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Новосибирск : Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2018б. Т. 24. С. 42–46.

Васильев С.К., Середнёв М.А., Милютин К.И. Остатки плейстоценовой мегафауны из аллювиальных местонахождений Бибиха, Тараданово на реке Оби (Новосибирская область) и реке Чумыш (Алтайский край) // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Новосибирск : Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2018в. Т. 24. С. 47–51.

Васильев С.К., Середнёв М.А., Милютин К.И. Новые находки остатков плейстоценовых крупных млекопитающих на вторичных аллювиальных местонахождениях Верхнего Приобья в 2021 году // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Новосибирск : Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2021. Т. 27. С. 74–82.

Васильев С.К., Шуньков М.Б., Козликин М.Б. Новые данные по мегафауне позднего плейстоцена из Денисовой пещеры // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Новосибирск : Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2022. Т. 28. С. 82–88.

Виноградов Б.С. Заметка об ископаемых грызунах и насекомоядных Северного Казахстана // Труды Палеозоол. ин-та АН СССР. 1936. Т. V.

Вислобокова И.А. О находке *Trogontherium minus* Newton в нижнеоплейстоценовых отложениях Павлодарского Прииртышья // Геология и геофизика. 1974. № 2. С. 128–129.

Волков И.А., Архипов С.А. Четвертичные отложения района Новосибирска. Новосибирск, 1978. 89 с.

Волков П.В., Васильев С.К. Находки остатков мегафауны со следами воздействия палеолитического человека на юго-востоке Западно-Сибирской равнины // Вестник НГУ. Серия: История, филология. 2017. Т. 16, № 7: Археология и этнография. С. 66–73.

Волкова В.С. Стратиграфия и палеогеография плейстоцена Западной Сибири: современное состояние, проблемы и пути их решения // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. М. : ГЕОС, 2009. С. 25–31.

Волкова В.С. Проблемы палинологии, динамика растительных зон в позднем кайнозое Западной Сибири и их значение для стратиграфии // Новости палеонтологии и стратиграфии. Прил. К журналу «Геология и геофизика». 2011. Вып. 16–17. С. 131–136.

Громова В. Определитель млекопитающих СССР по костям скелета. Вып. 1. Определитель по крупным трубчатым костям // Тр. Комиссии по изучению четвертичного периода. 1950. Т. IX. 240 с.

Данилов П.И., Каньшиев В.Я., Федоров Ф.В. Речные бобры Европейского Севера России / отв. ред. П.И. Данилов. М. : Наука, 2007. 199 с.

Деяшин М.М. Крупные млекопитающие юго-востока Западной Сибири в голоцене : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 2013. 19 с.

Завьялов Н.А., Альбов С.А., Петросян В.Г., Хляп Л.А., Горайнова З.И. Инвазия средообразователя – речного бобра в бассейне р. Таденки (Приокско-Террасный заповедник) // Российский журнал биологических инвазий. 2010. № 3. С. 39–61.

Зольников И.Д., Филатов Е.А., Шпанский А.В., Глушкова Н.В., Данильсон Д.А., Бордюгова Е.А. Геолого-геоморфологические свидетельства суперпаводков в Верхнем Приобье // Геоморфология и палеогеография. 2024. Т. 55, №4. С. 13–25.

Кассал Б.Ю. Состояние популяции бобра речного западносибирского (*Castor fiber pohlei* Serebrennikov, 1929) // Труды Зоологической комиссии ОРО РГО. 2005. № 2. С. 81–98.

Кожамкулова Б.С. Антропогенная ископаемая териофауна Казахстана. Алма-Ата : Наука, 1969. 149 с. Таблицы I–XXXIV.

Колосов А.М., Лавров Н.П., Наумов С.П. Биология промысловых зверей СССР. М. : Высшая школа, 1961. 379 с.

Косинцев П.А., Бобковская Н.Е. Крупные млекопитающие неоплейстоцена широтного отрезка Нижнего Иртыша // Четвертичная палеозоология на Урале. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2003. С. 226–231.

Машенко Е.Н., Шпанский А.В. Аномалии строения зубов у шерстистого мамонта (*Mammuthus primigenius* Blumenbach, 1799) // Палеонтологический журнал. 2005. № 1. С. 96–102. Табл. VI–VII.

Михайлова И.В. История развития растительности и климата Среднего Приобья в позднем плейстоцене (по данным палинологических исследований) // Новости палеонтологии и стратиграфии. Прил. К журналу «Геология и геофизика». 2004. Вып. 6–7. С. 209–217.

Собанский Г.Г. Пушные звери Алтая. Барнаул, 2006. 151 с.

Соколов В.Е. Редкие и исчезающие животные. Млекопитающие. М. : Высшая школа, 1986. 519 с.

Тютин Е.В. Распространение речного бобра (*Castor fiber*) и его влияние на водные экосистемы заповедника «Оренбургский» // Биологические науки. Оренбург, 2008. С. 180–182.

Укоков Н.А., Шпанский А.В. Бобры (*Castor fiber* L.) позднего плейстоцена юго-востока Западной Сибири // Азимут Геонаук. Вып. 3. Томск : Изд-во Томского ЦНТИ, 2023. С. 72–77.

Шпанский А.В. Четвертичные крупные млекопитающие Западно-Сибирской равнины: условия обитания и стратиграфическое значение : дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. 2018. 313 с.

Шпанский А.В. О мамонтах и их спутниках: палеоэкология мамонтовой фауны. М. : Фитон XXI, 2021. 152 с.

Шпанский А.В., Печерская К.О. Тафономический анализ местонахождения скелета бизона у п. Красный Яр (Кривошеинский район, Томская область) // Позднекайнозойская геологическая история севера аридной зоны : материалы международного симпозиума. Ростов-на-Дону, 2006. С. 268–273.

Bassinet F.C., Labeyrie L.D., Vincent E., Quidelleure X., Shackleton N.J., Lancelot Y. The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal // *Earth and Planetary Science Letters*. 1994. V. 126, No. 1–3. P. 91–108.

Jacobs Z., Li B., Shunkov M.V., Kozlikin M.B., Bolikhovskaya N.S., Agadjanian A.K., Uliyanov V.A., Vasiliev S.K., O’Gorman K., Derevianko A.P., Roberts R.G. Timing of archaic hominin occupation of Denisova Cave in southern Siberia // *Nature*. 2019. V. 565. P. 594–599.

Jürgensen J., Drucker D.G., Schneider M., Bocherens H., Stuart A.J., Buuveibaatar B. Diet and habitat of the saiga antelope during the Late Quaternary using stable carbon and nitrogen isotope ratios // *Quaternary Science Reviews*. 2017. V. 160. P. 150–161.

Kuzmin Y.V., Shpansky A.V. The Late Pleistocene megafauna of the Chulym River basin, southeastern West Siberian Plain: chronology and composition of stable isotopes // *Journal of Quaternary Science*. 2023. V. 38, No. 1. P. 2–7.

Shpansky A.V. Stratigraphic distribution of large Quaternary mammals in the territory of the West Siberian Plain // *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2024. 1. P. 90–120.

Shpansky A.V., Kuzmin Y.V. Chronology of the MIS 3 megafauna of the southeastern West Siberia and the possibility of late survival of the khazarian steppe mammoth (*Mammuthus trogontherii chosaricus*) // *Radiocarbon*. 2021. V. 63, No. 2. P. 575–584.

Shpansky A.V., Svyatko S.V., Reimer P.J., Titov S.V. Records of *Bison priscus* Bojanus (Artiodactyla, Bovidae) skeletons in Western Siberia // *Russian Journal of Theriology*. 2016. V. 15 (2). P. 100–120.

Vislobokova I.A. The Pliocene Podpusk-Lebbyazh’e mammalian faunas and assemblage, Western Siberia // *Palaeontographia Italica*. 1996. V. 83. P. 1–23.

References

Aleinikov A.A. *Sredopreobrazuyushchaya deyatelnost bobra evropeiskogo (Castor fiber) na territorii zapovednika «Bryansky les» i ego okhrannoi zony* [The environmental transformation activity of the European beaver (*Castor fiber*) in the Bryansk Forest Nature Reserve and its protected area] // *Vestnik TvGU. Seria «Biologia i ekologiya»* [Tver State University Bulletin. Series "Biology and Ecology"]. 2010. Vyp. 18. In Russian

Alexeeva E.V. *Mlekovpitayushchie pleistocena yugo-vostoka Zapadnoi Sibiri* [Pleistocene mammals of southeastern Western Siberia]. Moscow: Nauka, 1980. 188 p. In Russian

Bondarev A.A., Golubev A.S., Tesakov A.S., Shpansky A.V. *Bobrovye (Castoridae, Rodentia, Mammalia) Pleistocena yuga Zapadnoi Sibiri* [Beavers (*Castoridae*, *Rodentia*, *Mammalia*) of the Pleistocene of the south of Western Siberia] // *Zakonomnosti evolucii i biostratigrafii. Materialy LXX sessii Paleontologicheskogo obshchestva pri RAN*. St. Petersburg: Kartfabrika Instituta Karpinskogo, 2024. pp. 205–207. In Russian

Vasiliev S.K. *Fauna krupnykh mlekovpitayushchikh iz pleistocenovykh otlozheniy Chagyrskoi peshchery (Severo-Zapadnyi Altai) po materialam raskopok 2007–2011 godov* [Fauna of large mammals from the Pleistocene deposits of the Chagyrskaya Cave (Northwestern Altai) based on excavations in 2007–2011] // *Problemy arkheologii, etnografii, antropologii Sibiri i sopredelnykh territorii*. Novosibirsk: Izd-vo IAE SB RAS, 2013. V. 19. pp. 28–44. In Russian

Vasiliev S.K. *Krupnye mlekovpitayushchie rannego, srednego i pozdnego pleistocena Novosibirskogo Priobiya* [Large mammals of the Early, Middle and Late Pleistocene of the Novosibirsk Ob region] // *Problemy arkheologii, etnografii, antropologii Sibiri i sopredelnykh territorii*. Novosibirsk: Izd-vo IAE SB RAS, 2021. V. 27. pp. 66–73. In Russian

Vasiliev S.K., Kozlikin M.B., Shunkov M.V. *Ostatki megafauny iz verkhnei chasti pleistocenovykh otlozheni v yuzhnoi galeree Denisovoi peshchery* [Remains of megafauna from the upper Pleistocene deposits in the southern gallery of Denisova Cave] // *Problemy arkheologii, etnografii, antropologii Sibiri i sopredelnykh territorii* [Problems of archeology, ethnography, and anthropology of Siberia and adjacent territories]. Novosibirsk: Izd-vo IAE SB RAS, 2018a. V. 24. pp. 37–41. In Russian

Vasiliev S.K., Kozlikin M.B., Shunkov M.V. *Faunisticheskie ostatki iz pleistocenovykh otlozheni v yuzhnoi galeree Denisovoi peshchery (materialy 2019 goda)* [Faunal remains from Pleistocene deposits in the southern gallery of Denisova Cave (materials from 2019)] // *Problemy arkheologii, etnografii, antropologii Sibiri i sopredelnykh territorii* [Problems of archeology, ethnography, and anthropology of Siberia and adjacent territories]. Novosibirsk: Izd-vo IAE SB RAS, 2020. V. 26. pp. 37–42. In Russian

Vasiliev S.K., Krivoshepin A.I., Zenin V.N., Shalagina A.V. *Predvaritelnye itogi issledovaniya ostatkov megafauny iz otlozheni peshchery Strashnoi (Severo-Zapadnyi Altai)* [Preliminary results of the study of megafauna remains from the Strashnaya Cave (Northwestern Altai)] // *Problemy arkheologii, etnografii, antropologii Sibiri i sopredelnykh territorii* [Problems of archeology, ethnography, and anthropology of Siberia and adjacent territories]. Novosibirsk: Izd-vo IAE SB RAS, 2016. V. 22. pp. 15–22. In Russian

Vasiliev S.K., Ovodov N.D., Martynovich N.V. *Novye paleoteriologicheskie issledovaniya peshchery Logovo Gieny (Severo-Zapadnyi Altai)* [New paleotheriological studies of the Hyena's Lair cave (Northwestern Altai)] // *Problemy arkheologii, etnografii, antropologii Sibiri i sopredelnykh territorii* [Problems of archeology, ethnography, and anthropology of Siberia and adjacent territories]. Novosibirsk: Izd-vo IAE SB RAS, 2006. V. 12, No. 1. pp. 43–49. In Russian

Vasiliev S.K., Orlova L.A., Kuzmin Y.V. *Mestonakhozhdenie fauny krupnykh mlekovpitayushchikh sartanskogo vremeni na reke Orda (Ordynsky raion Novosibirskoi oblasti)* [Location of the fauna of large mammals of the Sartan period on the Orda River (Ordynsky district of the Novosibirsk region)] // *Problemy arkheologii, etnografii, antropologii Sibiri i sopredelnykh territorii* [Problems of archeology, ethnography, and anthropology of Siberia and adjacent territories]. Novosibirsk: Izd-vo IAE SB RAS, 2007. V. 13. pp. 29–32. In Russian

Vasiliev S.K., Parkomchuk E.V., Serednev M.A., Milyutin K.I., Kuzmin Y.V., Kalinkin P.N., Rastigeev S.A. *Radiouglerodnoe datirovanie ostatkov redkikh vidov pleistocenovoi megafauny Yuzhnoi Sibiri* [Radiocarbon dating of the remains of rare species of

Pleistocene megafauna in Southern Siberia] // *Problemy arkheologii, etnografii, antropologii Sibiri i sopredelnykh territoriy* [Problems of archeology, ethnography, and anthropology of Siberia and adjacent territories]. Novosibirsk: Izd-vo IAE SB RAS, 2018b. V. 24. pp. 42–46. In Russian

Vasiliev S.K., Serednev M.A., Milyutin K.I. *Ostatki pleistocenovoi megafauny iz allyuvialnykh mestonakhozhdeni Bibikha, Taradanovo na reke Obi (Novosibirskaya oblast) i reke Chumysh (Altayskiy krai)* [Remains of Pleistocene megafauna from the alluvial localities of Bibikha, Taradanovo on the Ob River (Novosibirsk Region) and the Chumysh River (Altai Krai)] // *Problemy arkheologii, etnografii, antropologii Sibiri i sopredelnykh territoriy* [Problems of archeology, ethnography, and anthropology of Siberia and adjacent territories]. Novosibirsk: Izd-vo IAE SB RAS, 2018b. V. 24. pp. 47–51. In Russian

Vasiliev S.K., Serednev M.A., Milyutin K.I. *Novye nakhodki ostatkov pleistocenovykh krupnykh mlekopitayushchikh na vtorichnykh allyuvialnykh mestonakhozhdeniyakh Verkhnego Priobiya v 2021 godu* [New discoveries of Pleistocene large mammal remains at secondary alluvial sites in the Upper Ob region in 2021] // *Problemy arkheologii, etnografii, antropologii Sibiri i sopredelnykh territoriy* [Problems of archeology, ethnography, and anthropology of Siberia and adjacent territories]. Novosibirsk: Izd-vo IAE SB RAS, 2021. V. 27. pp. 74–82. In Russian

Vasiliev S.K., Shunkov M.V., Kzlikin M.B. *Novye dannye po megafaune pozdnego pleistocena iz Denisovoi peshchery* [New data on the late Pleistocene megafauna from Denisova Cave] // *Problemy arkheologii, etnografii, antropologii Sibiri i sopredelnykh territoriy* [Problems of archeology, ethnography, and anthropology of Siberia and adjacent territories]. Novosibirsk: Izd-vo IAE SB RAS, 2022. V. 28. pp. 82–88. In Russian

Vinogradov B.S. *Zametka ob iskopaemykh gryzunakh i nasekomoyadnykh Severnogo Kazakhstana* [A note on fossil rodents and insectivores of Northern Kazakhstan] // *Trudy Paleozoologicheskogo in-ta AN SSSR*. V. 5, 1936. In Russian

Vislubokova I.A. *O nakhodke Trogontherium minus Newton v nizhneopleistocenovykh otlozheniyakh Pavlodarskogo Priirtyshia* [On the discovery of Trogontherium minus Newton in the Lower Pleistocene deposits of the Pavlodar Irtysh region] // *Geologia i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 1974. No. 2. pp. 128–129. In Russian

Volkov I.A., Arkhipov S.A. *Chetvertichnye otlozheniya raiona Novosibirska* [Quaternary deposits of the Novosibirsk region]. Novosibirsk, 1978. 89 p. In Russian

Volkov P.V., Vasiliev S.K. *Nakhodki ostatkov megafauny so sledami vozdeystvia paleoliticheskogo cheloveka na yugo-vostoke Zapadno-Sibirskoi ravniny* [inds of megafauna remains with traces of Paleolithic human influence in the southeast of the West Siberian Plain] // *Vestnik NGU. Seria: Istoria, philologia*. 2017. V. 16, No. 7. pp. 66–73. In Russian

Volkova V.S. *Stratigrafia i paleogeografia pleistocena Zapadnoi Sibiri: sovremennoe sostoyanie, problemy i puti ikh reshenia* [Stratigraphy and paleogeography of the Pleistocene of Western Siberia: current status, problems and solutions] // *Bull. Komis. po izucheniu chetvertichnogo perioda*. Moscow: GEOS, 2009. pp. 25–31. In Russian

Volkova V.S. *Problemy palinologii, dinamika rastitelnykh zon v pozdnem kainozoe Zapadnoi Sibiri i ikh znachenie dlya stratigrafii* [Problems of palynology, dynamics of vegetation zones in the late Cenozoic of Western Siberia and their significance for stratigraphy] // *Novosti paleontologii i stratigrafii. Pril. k zhurnalu "Geologia i geofizika"*. 2011. Vyp. 16–17. pp. 131–136. In Russian

Gromova V. *Opredelitel mlekopitayushchikh SSSR po kostyam skeletal. Vyp. 1. Opredelitel po krupnym trubchatym kostyam* [Identification of mammals of the USSR by bones skeletal. Issue 1. Identification of large tubular bones] // *Trudy Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda*. 1950. V. 9. 240 p. In Russian

Danilov P.I., Kanyshov V.Y., Fedorov F.V. *Rechnye bobry evropeiskogo severa Rossii* [River beavers of the European north of Russia]. Moscow: Nauka, 2007. 199 p. In Russian

Devyashin M.M. *Krupnye mlekopitayushchie yugo-vostoka Zapadnoi Sibiri v Holocene* [Large mammals of the south-east of Western Siberia in Holok]. Abstract of Cand. Dis. Tomsk, 2013. 19 p. In Russian

Zavyalov N.A., Albov S.A., Petrosyan V.G., Khlyap L.A., Goryainova Z.I. *Invaziya sredooobrazovatelya – rechnogo bobra v basseine r. Tadenki (Prioksko-Terrasnyi zapovednik)* [Invasion of the habitat-forming species, the European beaver, in the Tadenka River basin (Prioksko-Terrasnyi Nature Reserve)] // *Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invazii* [Russian Journal of Biological Invasions]. 2010. No. 3. pp. 39–61. In Russian

Zolnikov I.D., Filatov E.A., Shpansky A.B., Glushkova N.V., Danilov D.A., Bordyugova E.A. *Geologo-geomorfologicheskie svidetelstva superpavodkov v Verkhnem Priobie* [Geological evidence of megafloods in the Upper Ob Region] // *Geomorfologiya i Paleogeografia*. 2024. V. 55, No. 4. pp. 13–25. In Russian

Kassal B.Y. *Sostoyanie populyatsii bobra rechnogo zapadnosibirskogo (Castor fiber pohlei Serebrennikov, 1929)* [The state of the West Siberian river beaver population (Castor fiber pohlei Serebrennikov, 1929)] // *Trudy Zoologicheskoi komissii ORO RGO*. 2005. No. 2. pp. 81–98. In Russian

Kozhamkulova B.S. *Antropogennaya iskopaemaya teriofauna Kazakhstana* [Anthropogenic fossil theriofauna of Kazakhstan]. Alma-Ata: Nauka, 1969. 149 p. Table I-XXXIV. In Russian

Kolosov A.M., Lavrov N.P., Naumov S.P. *Biologiya promyslovnykh zveri SSSR* [Biology of game animals of the USSR]. Moscow: Vysshaya shkola, 1961. 379 p. In Russian

Kosincev P.A., Bobkovskaya N.E. *Krupnye mlekopitayushchie neopleistocena shirotnogo otrezka Nizhnego Irtysha* [Large mammals of the Neopleistocene of the latitudinal segment of the Lower Irtysh] // *Chetvertichnaya paleozoologiya na Urale*. Yekaterinburg: Izd-vo Ural. Un-ta, 2003. pp. 226–231. In Russian

Mashchenko E.N., Shpansky A.V. *Abnormal Dental Morphology in the Mammoth Mammuthus primigenius Blumenbach, 1799* // *Paleontological Journal*. 2005. V. 39(1). pp. 96–102. Tabl. VI–VII. In Russian

Mikhailova I.V. *Istoria razvitiya rastitelnosti i klimata rednego Priobia v pozdnem pleistocene (po dannym palinologicheskikh issledovani)* [History of the development of vegetation and climate of the Middle Ob region in the late Pleistocene (based on palynological studies)] // *Novosti paleontologii i stratigrafii. Pril. k zhurnalu "Geologia i geofizika"*. 2004. Vyp. 6–7. pp. 209–217. In Russian

Sobansky G.G. *Pushnye zveri Altaya* [Fur-bearing animals of Altai]. Barnaul, 2006. 151 p. In Russian

Sokolov V.E. *Redkie i ischezayushchie zhivotnye. Mlekopitayushchie* [Rare and endangered animals. Mammals]. Moscow : Vysshaya shkola, 1986. 519 p. In Russian

Tyutina E.V. *Rasprostraneniye rechnogo bobra (Castor fiber) i ego vliyaniye na vodnye ecosistemy zapovednika «Orenburgskiy»* [Distribution of the European beaver (Castor fiber) and its impact on the aquatic ecosystems of the Orenburg Reserve] // *Biologicheskie nauki* [Biological Sciences]. Orenburg, 2008. pp. 180–182. In Russian

Ukokov N.A., Shpansky A.V. *Bobry (Castor fiber L.) pozdnego pleistocena yugo-vostoka Zapadnoi Sibiri* [Beavers (*Castor fiber* L.) of the late Pleistocene of southeastern Western Siberia] // *Azimuth Geonauk*. Vyp. 3. Tomsk: Izd-vo Tomskogo CNTI, 2023. pp. 72–77. In Russian

Shpansky A.V. *Chetvertichnye krupnye mlekopitayushchie Zapadno-Sibirskoi ravniny: uslovia obitania I stratigraficheskoe znachenie* [Quaternary large mammals of the West Siberian Plain: habitat conditions and stratigraphic significance]. Dissertation Dokt. Geol.-min. nauk. Tomsk, 2018. 313 p. In Russian

Shpansky A.V. *O mamontakh i ikh sputnikakh: paleoekologia mamontovoi fauny* [About mammoths and their companions: paleoecology of the mammoth fauna]. Moscow : Fiton XXI, 2021. 152 p. In Russian

Shpansky A.V., Pecherskaya K.O. *Taphonomichesky analiz mestonakhozhdeniya skeletal bisona u p. Krasny Yar (Krivosheinsky raion, Tomskaya oblast)* [Taphonomic analysis of the bison skeletal site near the village of Krasny Yar (Krivosheinsky District, Tomsk Region)] // *Pozdnekainozoiskaya geologicheskaya istoriya severa aridnoi zony. Materialy mezhdunarodnogo simpoziuma*. Rostov-on-Don, 2006. pp. 268–273. In Russian

Bassinot F.C., Labeyrie L.D., Vincent E., Quidelleure X., Shackleton N.J., Lancelot Y. The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal // *Earth and Planetary Science Letters*. 1994. V. 126, No. 1–3. pp. 91–108.

Jacobs Z., Li B., Shunkov M.V., Kozlikin M.B., Bolikhovskaya N.S., Agadjanian A.K., Uliyanov V.A., Vasiliev S.K., O’Gorman K., Derevianko A.P., Roberts R.G. Timing of archaic hominin occupation of Denisova Cave in southern Siberia // *Nature*. 2019. V. 565. pp. 594–599.

Jürgensen J., Drucker D.G., Schneider M., Bocherens H., Stuart A.J., Buuveibaatar B. Diet and habitat of the saiga antelope during the Late Quaternary using stable carbon and nitrogen isotope ratios // *Quaternary Science Reviews*. 2017. V. 160. pp. 150–161.

Kuzmin Y.V., Shpansky A.V. The Late Pleistocene megafauna of the Chulym River basin, southeastern West Siberian Plain: chronology and composition of stable isotopes // *Journal of Quaternary Science*. 2023. V. 38. No. 1. pp. 2–7.

Shpansky A.V. Stratigraphic distribution of large Quaternary mammals in the territory of the West Siberian Plain // *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2024. 1. pp. 90–120.

Shpansky A.V., Kuzmin Y.V. The Chronology of the MIS 3 megafauna of the southeastern West Siberia and the possibility of late survival of the khazarian steppe mammoth (*Mammuthus trogontherii chosaricus*) // *Radiocarbon*. 2021. V. 63, No. 2. pp. 575–584.

Shpansky A.V., Svyatko S.V., Reimer P.J., Titov S.V. Records of *Bison priscus* Bojanus (Artiodactyla, Bovidae) skeletons in Western Siberia // *Russian Journal of Theriology*. 2016. V. 15(2). pp. 100–120.

Vislobokova I.A. The Pliocene Podpusk-Lebbyzh’e mammalian faunas and assemblage, Western Siberia // *Palaeontographia Italica*. 1996. V. 83. pp. 1–23.

Информация об авторах:

Шпанский А.В., доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой палеонтологии и исторической геологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия; старший научный сотрудник (2022–2024 гг.) Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: andreyspansky@yandex.ru

Укоков Н.А., магистр геологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: ukokov98@mail.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Shpansky A.V., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Head of the Department of Palaeontology and Historical Geology, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia; Senior Researcher (2022–2024) at the V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: andreyspansky@yandex.ru

Ukokov N.A., Master of Geology, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: ukokov98@mail.ru

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

The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 18.12.2023; одобрена после рецензирования 06.09.2024; принята к публикации 29.08.2025

The article was submitted 18.12.2023; approved after reviewing 06.09.2024; accepted for publication 29.08.2025

ПЕТРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.24; 551.25

doi: 10.17223/25421379/36/5

ПАЛЕОЗОЙСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КААХЕМСКОГО МАГМАТИЧЕСКОГО АРЕАЛА (ВОСТОЧНАЯ ТУВА)

Ирина Владимировна Кармышева¹, Владислав Александрович Яковлев²,
Евгений Дмитриевич Зюков³



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

¹ iri@igm.nsc.ru

² yakovlevva@igm.nsc.ru

³ evgzyukov@gmail.com

Аннотация. По результатам структурных исследований восточной части Каахемского ареала были выделены три тектонических этапа: 1 – фрагментация базитовых тел и их цементация гранитами (476±4 млн лет); 2 – становление базитовых даек (~450 млн лет); 3 – деформации, контролируемые внедрением монцодиорит-граносиенитов (282–293 млн лет). Характер деформаций хрупко-пластичный. Второй и третий этапы обусловлены обстановками растяжения со сдвигом и относятся к палеозойскому этапу эволюции Каахемской структурной зоны.

Ключевые слова: хрупко-пластичные деформации, вязко-пластичные деформации, дайковый комплекс, Каахемская тектоническая зона

Источник финансирования: Исследование выполнено по государственному заданию ИГМ СО РАН № 122041400176-0.

Для цитирования: Кармышева И.В., Яковлев В.А., Зюков Е.Д. Палеозойские деформации восточной части Каахемского магматического ареала (Восточная Тува) // Геосферные исследования. 2025. № 3. С. 86–103. doi: 10.17223/25421379/36/5

Original article

doi: 10.17223/25421379/36/5

PALEOZOIC DEFORMATIONS OF THE EASTERN KAAKHEM MAGMATIC AREA (EAST TUVA)

Irina V. Karmysheva¹, Vladislav A. Yakovlev², Evgeny D. Zyukov³

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

¹ iri@igm.nsc.ru

² yakovlevva@igm.nsc.ru

³ evgzyukov@gmail.com

Abstract. Based on the results of structural-petrological and microstructural studies of Paleozoic complexes in the eastern part of the Kaakhem magmatic area, three stages of tectonic activity were identified. The first stage is marked by the formation of the diorite-tonalite-plagiogranite association of the Tannuola complex (476±4 MA) and the fragmentation of earlier mafic rocks. As a result of tectonic-magmatic activity, a complex with breccia-like textures was formed: fragments of basite cemented by granitoid. The second stage is recorded by the formation of a complex of mafic dikes (~450 Ma) in the conditions of the upper crust. Dikes cut gabbro-granite deformation of the first stage, which indicates the presence of a long-lived tectonical weakened zone in this region. The third stage is the deformations that controls the formation of monzodiorite-granosyenites of the Shivey and Chadal massifs (282–293 MA). As a result of the simultaneous intrusion of basic and acidic melts, mingling structures are formed, complicated by synmagmatic deformations – lens-shaped small (up to 3 cm) mafic inclusions in granite material, feathery echelon cracks in mafic rocks filled with acidic material. The nature of the deformations of the first and third stages is brittle-plastic, which is due to different rheology of rocks at the same depth of the Earth crust (about 15 km). Mafic rocks are harder bodies that deform through brittle fault mechanisms. They have a rigid frame of partially crystallized minerals, but still contain a certain proportion of melt, which provides ductile deformations. The duration of all episodes of tectonic activity was insignificant and did not exceed

the time of melt consolidation. The second and third stages of deformation are caused by extension and extension and transtension conditions. The submeridional orientation of shear planes in Early Permian rocks and the position of Early Ordovician dikes allow us to consider them as a Paleozoic stage in the evolution of the southern part of the Kaakhem structural zone. Its activation and development in the Paleozoic are associated with the formation of permeable weakened zones at the final stage of the collision stage of development of the area. The data obtained do not allow us to classify the Kaakhem zone exclusively as a rift zone. For this object, the term “tectonic zone” or “zones of deformation concentration” is more appropriate, since it does not include geodynamic interpretation and kinematic characteristics – parameters that change during the long-term evolution of the tectonic structure.

Keywords: brittle-plastic deformation, ductile-plastic deformation, dike complex, Kaakhem tectonic zone

Source of financing: Work is done on state assignment № 122041400176-0.

For citation: Karmysheva I.V., Yakovlev V.A., Zyukov E.D. (2025) Paleozoic deformations of the Eastern Kaakhem magmatic area (East Tuva). *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 86–103. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/36/5

Введение

Крупные тектонические зоны представляют собой линейные структуры, размерами от первых километров до нескольких сотен и тысяч километров, со сложной внутренней структурой и интенсивной вещественной переработкой горных пород. Их строение обусловлено длительной эволюцией, сменой геодинамических режимов и, как следствие, формированием различных вещественных комплексов [Ажгирей, 1960; Sanderson, Marchini, 1984; Silvester, 1988; Чиков, 1990; Морозов, 2002; Fossen, 2010; Леонов, 2012]. Породы, слагающие тектоническую зону, могут быть сформированы в процессе ее активизации, иметь синтектоническую природу и значительно отличаться по составу от прилегающих к тектонической зоне комплексов. Также внутри тектонической зоны могут быть расположены комплексы пород, сформировавшиеся ранее и вовлеченные в деформационные процессы. Соответственно, от аналогичных по составу и возрасту комплексов, расположенных вне пределов зон концентрации деформаций, их будут отличать только интенсивные текстурные изменения. За время своего формирования подобные зоны чаще всего претерпевают несколько пиков реактивации, характеризующихся различными тектоническими режимами (сжатия, растяжения, сдвига и (или) их комбинациями) и самим характером деформаций, что отражается на вещественных комплексах.

Внутри крупной зоны формируются более мелкие участки концентрации деформаций и жесткие литоны, что связано с длительностью и характером деформационных процессов, а также реологией пород [Лукьянов, 1997; Талицкий, Галкин, 1997]. В зонах тектонических деформаций выделяются зоны хрупких и вязких деформаций, а также зоны перехода [Scholz, 1988; Van der Pluijm, Marshak, 2004]. Глубина перехода между хрупкими и пластическими деформациями зависит от геотермального градиента, состава пород, давления и состава флюида, скорости деформаций. Исследование конкретных тектонических обстановок, их привязка к определенному периоду

времени проявления, определение уровня глубинности деформаций позволяют реконструировать эволюцию подвижных участков земной коры на разных этапах ее эволюции.

В данной работе рассматриваются палеозойские деформации восточной части Каахемского ареала (Восточная Тува). В его пределах выделена крупная тектоническая структура – Каахемский глубинный разлом [Агентов, Агентова, 1960; Коробейников, Исаков, 1981; Черезов и др., 1999; Сугоракова, Бутанаев, 2014], простирающийся в северо-западной части ареала в субширотном направлении и отклоняющийся к югу в субмеридиональном направлении в центральной части ареала. Также данная структура описывается как Каахемская рифтогенная зона [Коробейников, Исаков, 1981; Черезов и др., 1999], что связано с широким развитием в ее северной части терригенно-и вулканогенно-осадочных комплексов, характерных для зон вулканической активности. Длительная эволюция Каахемской зоны и геологическое строение одноименного магматического ареала предполагают более сложную историю развития тектонической структуры.

Объекты исследования данной статьи расположены в зоне субмеридиональных разломов Каахемской зоны (южная часть тектонической структуры) и в верхнем течении р. Каа-Хем, где какие-либо тектонические нарушения не закартированы. Целью работы является соотнесение данных деформаций со структурами Каахемской зоны и этапами ее эволюции.

Геологический обзор

Каахемский магматический ареал расположен в раннекаледонских структурах Восточной Тувы, его формирование происходило в длительный период времени 570–300 млн лет в разных геодинамических обстановках: от островодужной и аккреционно-коллизийной стадий до режима внутриконтинентального растяжения [Руднев и др., 2006; Руднев и др., 2015; Сугоракова, Хертек, 2017].

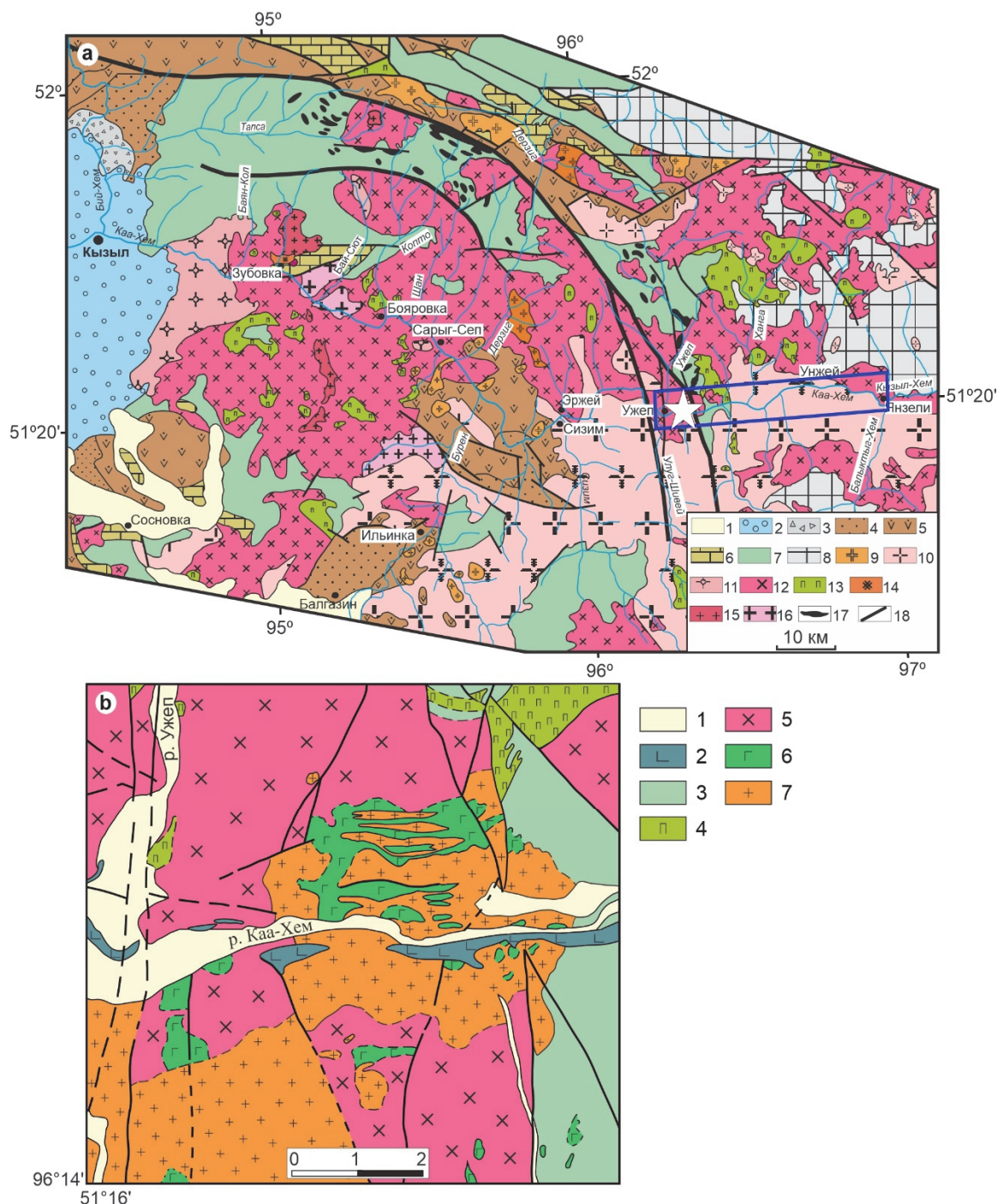


Рис. 1. Схема геологического строения Каахемского гранитоидного батолита (а) [Руднев, 2013] и геологическая карта контакта Шивейского и Чадалского массивов (b) [Karmysheva et al., 2022]

Синим прямоугольником выделена область объектов исследования. Звездочкой показано положение врезки (b).

а: 1 – рыхлые отложения; 2 – осадочные и терригенные отложения, J_{1-2} ; 3 – осадочные и терригенные отложения, C_1 ; 4 – красочетные осадочные отложения, D_3 ; 5 – осадочные и вулканогенно-осадочные отложения, D_{1-2} ; 6 – терригенные и карбонатные отложения, S_1 ; 7 – вулканогенные и вулканогенно-осадочные отложения, $V-E_1$; 8 – метаморфические образования Тувино-Монгольского массива, R_3-E_1 ; 9 – брельский граносиенит-гранит-лейкогранитный комплекс, D_1 ; 10 – сархойский гранодиорит-гранитный комплекс, O_3 ; 11 – чарашский плагиигранитный комплекс, O_1 ; 12 – ранне- и позднеаннуольский диорит-тоналит-плагиигранитный комплекс, O_{1-3} ; 13 – мажалькский перидотит-пироксенит-габбро-норитовый комплекс; 14 – зубовский монцогаббро-монзонит-граносиенитовый комплекс, E_1 ; 15 – байсютский тоналит-плагиигранитный комплекс, $V-E_1$; 16 – коптинский диорит-тоналит-плагиигранитный комплекс, V ; 17 – основные и ультраосновные образования актоврацкого комплекса, $V-E_1$; 18 – тектонические нарушения

б: 1 – рыхлые отложения, Q ; 2 – базальты, Q ; 3 – вулканогенно-терригенно-карбонатные образования, $V-E_1$; 4 – габбро-нориты, габбро-диориты, O_{1-3} ; 5 – граниты, плагииграниты, тоналиты, кварцевые диориты, O_{1-3} ; 6 – габбро-монцодиориты Чадалского массива, P_1 ; 7 – щелочные граниты, кварцевые сиениты, субщелочные граниты, сиенодиориты, сиениты Шивейского массива, P_1

Fig. 1. Scheme of the geological structure of the Kaakhem granitoid batholith (a) [Руднев, 2013] and geological map of the Shivey and Chadal massifs structure (b) [Karmysheva et al., 2022]

The area of study objects is highlighted with a blue rectangle. The star shows the position of the insert (b).

a: 1 – Quaternary deposits; 2 – sedimentary and terrigenous, J₁₋₂; 3 – sedimentary and terrigenous, C₁; 4 – red-colored sedimentary, D₃; 5 – sedimentary and volcanosedimentary, D₁₋₂; 6 – terrigenous and carbonate, S₁; 7 – volcanic and volcanosedimentary, V–Є₁; 8 – metamorphic of the Tuva-Mongolian massif, R₃–Є₁; 9 – Bren’ granosienite-granite-leucogranite complex, D₁; 10 – Sarkhoi granodiorite-granite complex, O₃; 11 – Charash plagiogranite complex, O₁; 12 – Early- and Late Tannuola diorite-tonalite-plagiogranite complex, O₁₋₃; 13 – Mazhalyk peridotite-pyroxenite-gabbro-norite complex; 14 – Zubov monzogabbro-monzonite-granosyenite complex, Є₁; 15 – Baisyut tonalite-plagiogranite complex, V–Є₁; 16 – Kopta diorite-tonalite-plagiogranite complex, V; 17 – mafic and ultramafic deposits Actovrac complex, V–Є₁; 18 – faults.

b: 1 – Quaternary deposits; 2 – basalts, Q; 3 – volcanogenic-terrigenous-carbonate formations, V–Є₁; 4 – gabbro-norite, gabbro-diorite, O₁₋₃; 5 – Early- and Late Tannuola diorite-tonalite-plagiogranite complex, O₁₋₃; 6 – gabbro-monzodiorite of the Chadal massif, P₁; 7 – alkaline granite, quartz syenite, subalkaline granite, syenodiorite, syenite of the Shivey massif, P₁

Более 80 % площади занимают разновозрастные гранитоидные ассоциации, среди которых наиболее распространены таннуольский (ранне- (O₁) и поздне-таннуольский (O₂₋₃)) и сархойский (O₃) [Козаков и др., 1998; Руднев, 2013] комплексы (см. рис. 1). Более поздний гранитоидный магматизм представлен девонским бреньским граносиенит-гранит-лейкогранитным комплексом и небольшим раннепермским Шивейским граносиенит-гранитным массивом. Породы основного состава менее распространены на территории Каахемского ареала, возраст габброидов варьирует от позднепротерозойского до раннепермского [Сугоракова, Хертек, 2017].

Габброиды слагают небольшие массивы, комплексы даек, а также многочисленные мелкие включения (от первых сантиметров до 1 м) в гранитоидах. Характерной чертой Каахемского магматического ареала является широкое распространение минглинг структур, свидетельствующих об одновременном внедрении и сосуществовании контрастных по составу магм.

Вмещающими породами для магматических ассоциаций Каахемского ареала являются позднепротерозойские-раннекембрийские метаморфические образования Тувино-Монгольского массива и вулканогенные, вулканогенно-осадочные венд-раннекембрийские отложения, наиболее широко развитые в северной части ареала.

Протяженность Каахемской тектонической зоны составляет около 150 км при ширине 15–25 км, ее заложение предполагается в позднем рифее [Коробейников, Исаков, 1981; Черезов и др., 1999; Сугоракова, Бутанаев, 2014], а неоднократная активизация проявляется с начала палеозоя до настоящего времени. Каахемская зона выделена по наличию сложной сети крупных и мелких разрывных нарушений. Породы подвержены расщеплению разной степени интенсивности, наблюдаются зоны дробления и милонитизации [Агентов, Агентова, 1960].

В восточной части Каахемского батолита, расположенной в стороне от основной линии Каахемского

разлома, отмечаются выходы таннуольского и сархойского гранитоидных комплексов с многочисленными базитовыми включениями, а также комплекс параллельных базитовых даек, прослеживающийся вдоль р. Каа-Хем на протяжении 10 км. Данная область является зоной сочленения докембрийских комплексов Тувино-Монгольского массива и гранитоидных комплексов Каахемского ареала. Породы, относящиеся к таннуольскому комплексу, значительно деформированы, иногда до образования гнейс-огранитов и бластомилонитов.

Раннепалеозойские деформации

В районе слияния рек Кызыл-Хем и Балыктыг-Хем на протяжении около 10 км в береговых обнажениях отмечаются сложные взаимоотношения габброидов и гранитов, которые представляют собой остроугольные неправильной формы и линзовидные блоки базитов в гранитном матриксе (рис. 2). Размеры тел базитов варьируют от первых сантиметров до нескольких метров. Они значительно фрагментированы, трещины заполнены гранитным материалом (рис. 2, а). Блоки и мелкие тела базитов расположены закономерно, что особенно отчетливо наблюдается, если они имеют линзовидную форму (рис. 2, б, в). Ориентировка трещин закономерная, и доминирующее направление совпадает с директивностью в гранитах, опережающие трещины расположены к ним под углами 45–75° (рис. 2, д). Плоскости скалывания в гранитах имеют преимущественно субширотную ориентировку (азимут падения 165–180°, углы – 35–85°). Направление минеральной линейности составляет 40–45° и 330–350°, что подчеркивает структуры облекания тел базитов гранитным материалом.

В шлифах на контакте гранитоидов и базитов не отмечается секущих резких структур, отчетливо наблюдается укрупнение зерен амфибола и плагиоклаза со стороны габброидов, что указывает на рекристаллизацию базитов на контакте с гранитами под воздействием температуры от внедрившейся магмы (рис. 3, а).

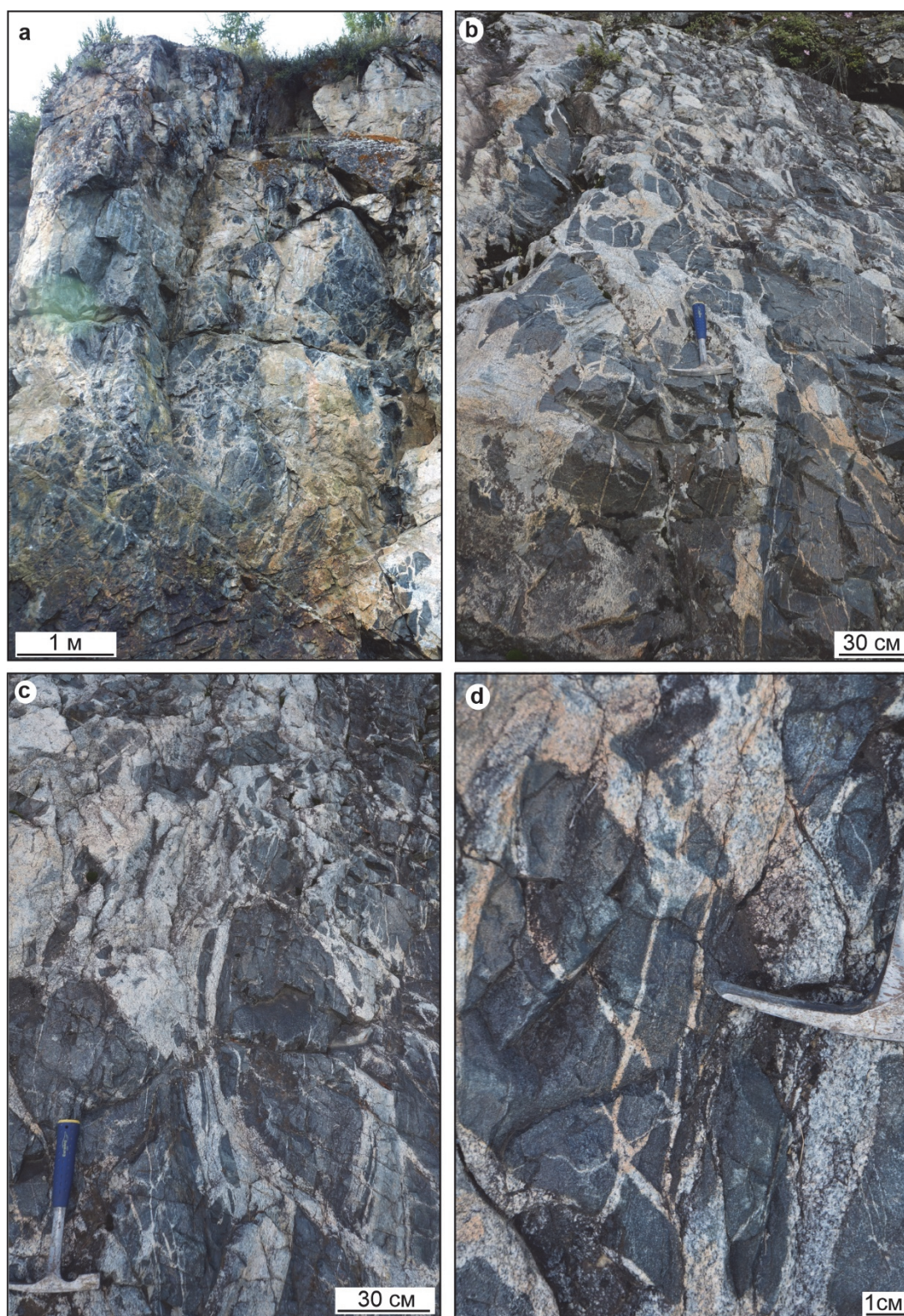


Рис. 2. Фрагменты габбро в гранитном матриксе

a – фрагментированные на остроугольные обломки тела габбро; b – линейное расположение фрагментов базитов; c – линзовидные фрагменты габбро; d – закономерные трещины раскрытия в обломках габбро

Fig. 2. Gabbro fragments in granite matrix

a – fragmented acute-angled gabbro; b – linear arrangement of mafic fragments; c – lens-shaped gabbro fragments; d – regular opening cracks in gabbro fragments

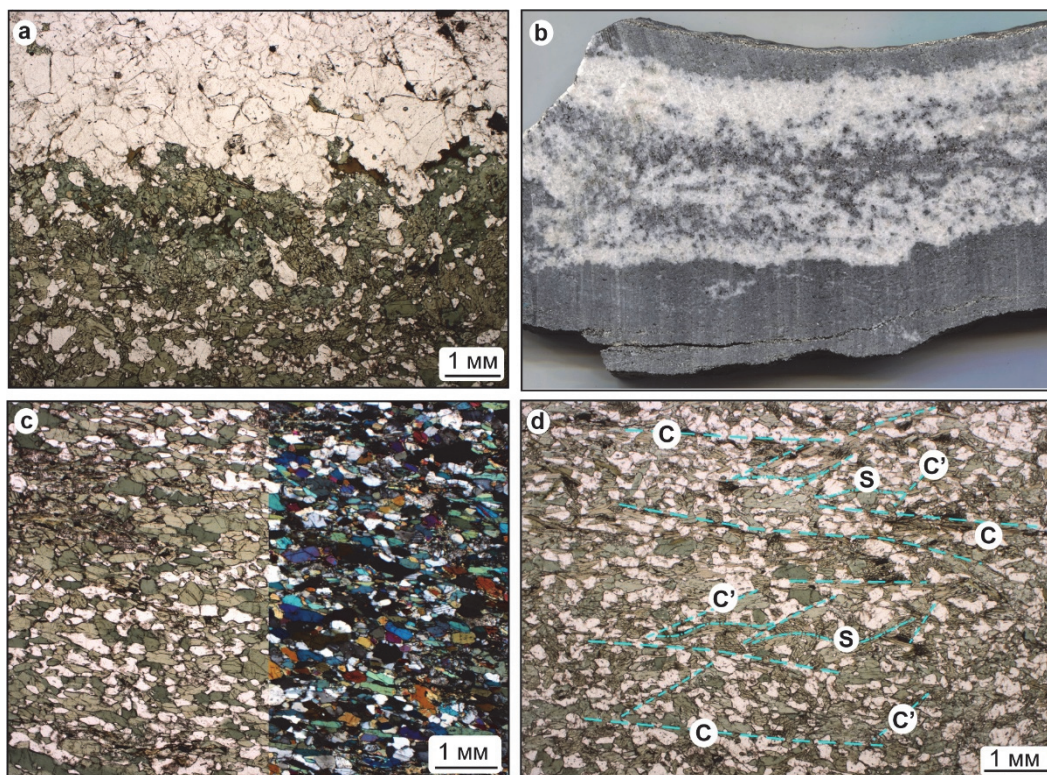


Рис. 3. Контактные взаимоотношения базитов и гранитов

а – магматический контакт габброидов и гранитоидов (476±4 млн лет); б – контактовые взаимоотношения основных и кислых пород в трещинах растяжения; в – минеральная линейность в габброидах с рекристаллизованными агрегатами плагиоклаза; д – C/C'/S структуры в основных породах

Fig. 3. Contact relationships between basit and granite

а – magmatic contact between gabbro and granit (476±4 MA); б – contact relationships between basic and acidic rocks in tensile fractures; в – mineral linearity in gabbro with recrystallized plagioclase; д – C/C'/S structures in basic rocks

В гранитных жилах, секущих базиты, иногда отмечаются фрагментированные прослои основных пород (см. рис. 3, б). Текстура габброидов в краевых частях, а также в центральных частях не крупных тел (до 0,5 м) линейная, с отчетливой директивностью и слабо выраженным структурам C/C'/S по амфиболу, кварцу и плагиоклазу. Плагиоклаз и кварц занимают межзерновое пространство, образуя вытянутые мелкие агрегаты с отсутствием внутрикристаллических деформаций (рис. 3, в, д).

Граниты, вмещающие фрагменты габбро, относятся к диорит-тоналит-плагиогранитной ассоциации таннуольского комплекса с оценкой возраста 476±4 млн лет [Руднев и др., 2023]. Текстура пород от массивной до полосчатой со следами течения в узких зонах между фрагментами базитов. В шлифах отчетливо наблюдаются внутрикристаллические и межзерновые деформационные структуры – зоны дробления и скольжения на границах зерен (рис. 4, а), закономерное распределение биотита (рис. 4, б), блочное погасание кварца, деформационные двойники и полосы излома в агрегатах плагиоклаза (рис. 4, в, д).

Зоны дробления и скольжения развиты на границах крупных агрегатов калиевого полевого шпата и плагиоклаза и совпадают по направлению с линейностью в габброидах. Сильно деформированные агрегаты кварца на контакте с базитами также вытянуты согласно минеральной линейности в базитах (рис. 4, е, ф).

Наблюдаемые структуры указывают на хрупко-пластичный характер деформаций, наложенных на консолидированные тела базитов. Разрывные нарушения привели к их фрагментации, появлению остроугольных обломков и закономерно ориентированных трещин в крупных телах. Деформации сопровождались внедрением гранитов, которые цементировали обломки базитов и привели к их частичной рекристаллизации за счет повторного прогрева от кислого расплава. Наблюдаемые деформации в гранитах также носят хрупко-пластичный характер и указывают на динамическую рекристаллизацию пород, т.е. процессы перемещения расплава и консолидации сопровождались направленным давлением.

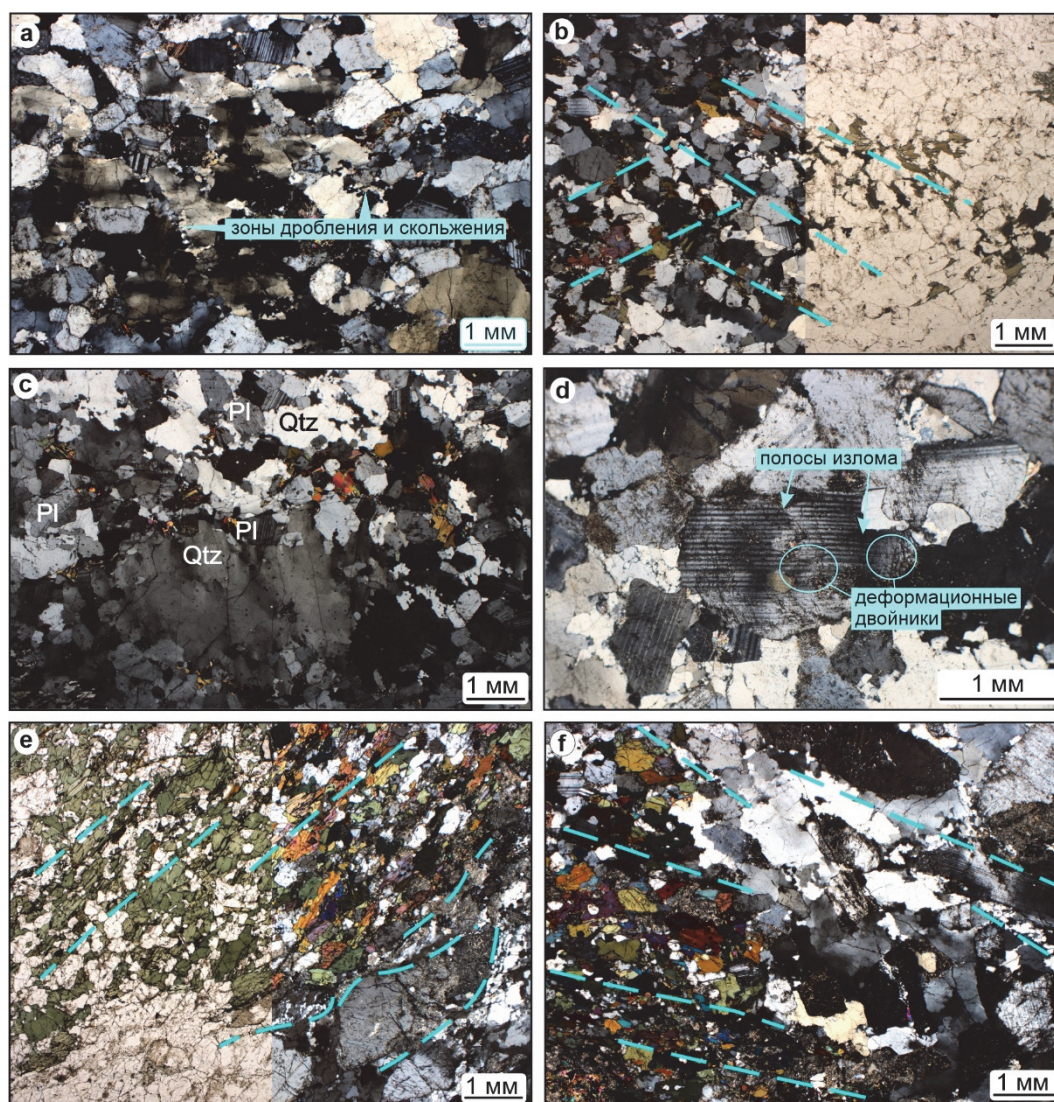


Рис. 4. Хрупко-пластичные деформации в гранитах (476±4 млн лет) и на контакте с габбро

a – межзерновые зоны дробления и скольжения в гранитах; b – биотит в зонах скалывания с распределением по ним лейст биотита; c – внутрикристаллические деформации в агрегатах кварца; d – деформационные двойники и полосы излома в плагиоклазе; e–f – зоны дробления и скольжения на контакте гранитов и габброидов

Fig. 4. Brittle-plastic deformations in granit (476±4 MA) and in contact with gabbro

a – intergranular zones of crushing and sliding in granit; b – biotite in shear zones; c – intracrystalline deformations in quartz; d – deformation twins and fracture bands in plagioclase; e–f – zones of crushing and sliding at the contact of granit and gabbro

Хрупко-пластичные габбро-гранитные структуры прорываются мафическими дайками с оценкой возраста ~450 млн лет [Яковлев и др., 2024], т.е. деформации были проявлены в период 476–450 млн лет, однако структурные данные указывают на их активизацию синхронно с перемещением и консолидацией кислого расплава в раннем ордовике.

Становление комплекса мафических даек в позднем ордовике [Яковлев и др., 2024] маркирует еще один раннепалеозойский этап деформаций в восточной части Каахемского магматического ареала. Они секут всю зону габбро-гранитных раннеордовикских брек-

чий, имеют достаточно строго выдержанные элементы залегания (азимут падения 270–310°, углы падения 45–85°), мощность – 1,5–3 м (рис. 5). Расположены дайки друг от друга на разных расстояниях – от 1–2 до 20–30 м. Стоит отметить, что по направлению с востока на запад расстояние между дайками становится больше, а также наиболее пологолежащие дайки с углами 45° тоже расположены в западной части участка распространения дайковых роев. Структурно-текстурные характеристики габбро не отражают каких-либо деформаций, на микроуровне в шлифах они также отсутствуют.



Рис. 5. Мафические дайки (450 млн лет), секущие плагиогранитоиды таннуольского комплекса (476±4 млн лет)

Fig. 5. Mafic dikes (450 MA) in plagiogranitoid of the Tannuola complex (476±4 MA)

Позднепалеозойские деформации

Деформационные структуры, относящиеся к периоду 282–293 млн лет, зафиксированы в районе пос. Ужеп на правом берегу р. Каа-Хем и приурочены к становлению граносиенит-гранитного Шивейского и габбро-монцодиоритового Чадалского массивов. Зафиксировано два сближенных этапа формирования минглинг-структур, обусловленных одновременным внедрением основных и кислых магм. Структуры plutonic минглинга первого типа значительно осложнены синмагматическими хрупко-пластичными деформациями [Karmysheva et al., 2022].

Деформации наблюдаются на протяжении около 20 км вдоль течения р. Каа-Хем, где они формируют узкие линейные зоны мощностью примерно от 10–15 м до 0,5 км, чередуясь с участками, не подверженными деформациям. Зоны концентрации деформаций расположены друг от друга на разном расстоянии: от первых метров до 1,5 км, однако характер их проявления сохраняется на всем протяжении. В деформации вовлечены все породы Шивейского и Чадалского массивов. Ориентировка плоскостей скалывания в породах варьирует по азимуту падения от 35 до 120°, с доминирующим восточным направлением. Углы

падения преимущественно крутые – 65–90°. Доминирующее направление минеральной линейности (hade), характеризующее движение вещества в процессе деформации, составляет 20–60° (рис. 6). Кинематика деформаций в кислых и основных породах отвечает преимущественно вертикальным перемещениям с незначительной левосторонней компонентой.

Наиболее интенсивные деформации отмечаются в граносиенитах, насыщенных включениями диоритов. Здесь деформации носят вязко-пластичный характер и отчетливо наблюдаются в обнажениях и шлифах [Karmysheva et al., 2022]. Включения диоритов образуют линзовидные тела, вытянутые в одном направлении, совпадающим с направлением минеральной линейности во вмещающих граносиенитах (рис. 7, а, b). В наиболее деформированных зонах наблюдаются следы течения, S-образные структуры диоритов и граносиенитов. В шлифах деформации фиксируются по C/C'/S структурам, вращению крупных агрегатов калиевого полевого шпата, плагиоклаза, кварца или их сростков (рис. 7, с, d). В агрегатах кварца, плагиоклаза и калиевого полевого шпата также отмечаются деформации на внутрикристаллическом уровне – облачное погасание кварца, деформационные двойники плагиоклаза и нарушение кристаллической решетки калиевого полевого шпата (рис. 7, е, f).

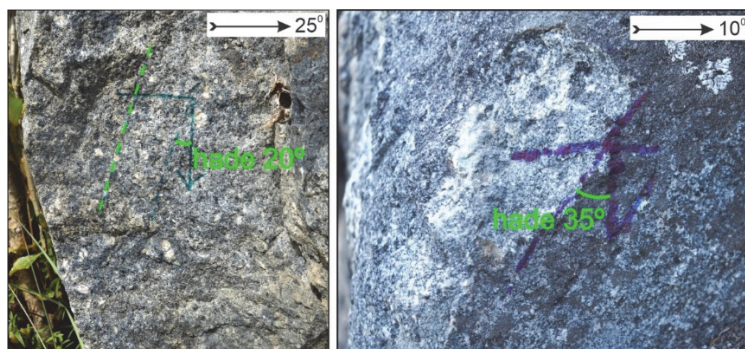


Рис. 6. Примеры замеров направления минеральной линейности (hade) в ориентированных образцах в пределах Шивейского массива

Fig. 6. Examples of measurements of the direction of mineral linearity (hade) in oriented samples within the Shivey massif



Рис. 7. Вязко-пластичные деформации в граносиенитах

a–b – линзообразные включения диоритов, вытянутые согласно минеральной линейности в граносиенитах; c – C/C'/S структуры с левосторонней кинематикой; d – вращение агрегата калиевого полевого шпата с нарушением внутренней структуры минерала; e – деформационные двойники плагиоклаза и хрупкие нарушения крупного агрегата плагиоклаза с «залечиванием» трещин; f – агрегат калиевого полевого шпата с блочным погасением из-за деформаций на внутрикристаллическом уровне

Fig. 7. Ductile-plastic deformations in granosyenites

a–b – lens-shaped diorite inclusions elongated according to mineral linearity in granosyenites; c – C/C'/S structures with left kinematic; d – rotation of the potassium feldspar with disruption of the internal structure; e – deformation twins of plagioclase and brittle fractures of a large plagioclase aggregate with “healing” of cracks; f – block extinction of potassium feldspar due to crystal lattice deformations

Тела основных пород деформированы в условиях хрупких и хрупко-пластичных деформаций. В обнажениях они отмечаются по трещинам в диоритах, заполненных кислым материалом, и в зонах смещения диоритов с гранитами. Составы гранитоидов в трещинах и жилах аналогичны кислым породам, составляющим крупные объемы Шивейского массива. Контакты между контрастными по составу породами могут быть как резкие и секущие, так и с постепенным переходом. Ориентировка гранитных прожилков и минеральная линейность внутри них совпадают с направлением минеральной линейности в монцодиоритах и длинными осями линзовидных диоритовых

включений (рис. 8, а). В крупных фрагментах основных пород отмечаются кулисные системы трещин растяжения, заполненные граносиенит-гранитным материалом (рис. 8, b).

На микроуровне в монцодиоритах по расположению агрегатов плагиоклаза и амфибола фиксируются линейные структуры (рис. 8, c), вращение порфировых вкрапленников калиевого полевого шпата (рис. 8, d), структуры C/C' (рис. 8, c, d). Внутрикристаллические деформации (блочное погасание, нарушение микроклиновой решетки) наиболее отчетливо видны в крупных вкрапленниках калиевого полевого шпата (рис. 8, d).



Рис. 8. Хрупко-пластичные деформации в монцодиоритах

а – синдеформационные минглинг структуры; б – кулисные системы трещин растяжения во фрагментах монцодиоритов; в – C/C' структуры и минеральная линейность по плагиоклазу в монцодиоритах; д – вращение порфирового вкрапленника калиевого полевого шпата с внутрикристаллическими деформациями

Fig. 8. Brittle-ductile deformations in monzodiorite

а – syndeformation mingling structures; б – echelon systems of tensile cracks in monzodiorite fragments; в – C/C' structures and mineral linearity of plagioclase in monzodiorite; д – rotation of a porphyritic potassium feldspar phenocryst with intracrystalline deformation

Размер базитовых тел и, как следствие, их реологическое состояние на момент деформаций напрямую влияют на характер проявленных деформаций. Наиболее крупные участки базитов представляли собой консолидированные фрагменты массива, которые деформировались как хрупкие тела. Трещины растяжения с секущими контактами в монцодиоритах образуют сложные структуры: от закономерных, ориентированных перпендикулярно друг к другу зон отрыва до перистых, ориентированных под разными углами сколов (рис. 9).

В перпендикулярно ориентированных трещинах наблюдается их значительное расширение с увеличением количества гранитного материала в точках пересечения и постепенное выклинивание трещин по мере удаления от зоны пересечения. Перпендикулярное развитие сопряженных зон скалывания и отсутствие значительных закономерных смещений по зонам отрыва характерны для образования трещин по модели Кулона-Андерсена (рис. 9, а). Формирование разнонаправленных сколов (основных и сопряженных) реализуется при образовании трещин Риделя (рис. 9, b, c).

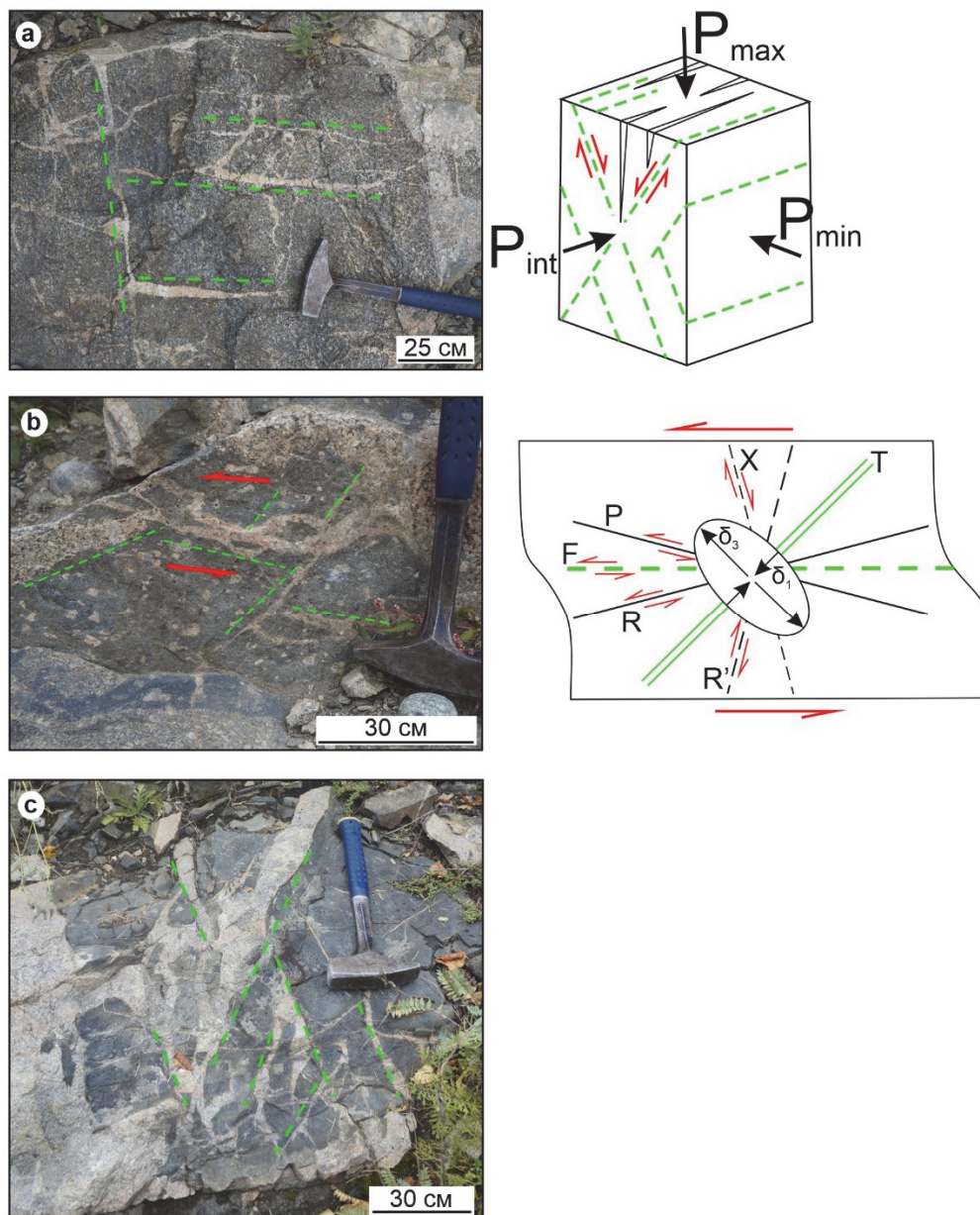


Рис. 9. Хрупкие деформации в монцодиоритах

а – перпендикулярно ориентированные трещины, модель образования Кулона-Андерсена; б – сопряженные трещины, отвечающие модели образования трещин Риделя; в – две системы сопряженных сколов

Fig. 9. Brittle deformation in monzodiorite

а – perpendicularly oriented cracks, Coulomb–Anderson formation model; б – conjugate cracks (Riedel crack formation model); в – two systems of conjugate chips

Мелкие фрагменты монцодиоритов, а также участки смешения контрастных по составу магм на момент проявления деформаций достигли только второго реологического порога, т.е. имели относительно жесткий каркас, но сохраняли некоторую долю расплава, что обусловило проявление хрупко-пластичных деформаций. Реологические особенности пород, их взаимоотношения, наблюдаемые в береговых обнажениях, не позволяют однозначно выявить доминирующее направление основных осей сжатия и растяжения при формировании разрывных нарушений в монцодиоритах, но однозначно можно говорить о наличии сдвиговой составляющей при тектонических деформациях.

Процессы рекристаллизации пород носят синтектонический (динамический) характер [Karmysheva et al., 2022] и осуществлялись за счет миграции границ зерен и появления субзерен. При этом субзерна характеризуются отсутствием внутризерновых деформаций в отличие от более крупных минеральных агрегатов, что говорит об их окончательной кристаллизации уже в отсутствии стрессового напряжения.

Таким образом, позднепалеозойские субмеридиональные деформации сопровождали становление значительных объемов габбро-гранитных расплавов на

стадии их внедрения и консолидации. Петрогеохимический состав монцодиоритов Чадалского массива соответствует базитам обогащенного внутриплитного типа [Karmysheva et al., 2022]. Деформационные структуры указывают на обстановки растяжения с левосдвиговой кинематикой, причем транспорт вещества был преимущественно вертикальным.

Обсуждение результатов

Глубина и длительность этапов деформации. Анализ деформаций в кислых и основных породах восточной части Каахемского ареала позволил выделить как минимум три этапа тектонической активизации в период 476–282 млн лет: 1 – деформации, синхронные со становлением диорит-тоналит-плаггиогранитной ассоциации таннуольского комплекса (476±4 млн); 2 – становление комплекса базитовых даек по ослабленным зонам в период (~450 млн лет); 3 – деформации, контролирующие становление монцодиорит-граносиенитов Шивейского и Чадалского массивов (282–293 млн лет). Деформации второго и третьего этапов являются хрупко-пластичными, что характерно для глубин около 15 км и температуре 300–500 °C (рис. 10).

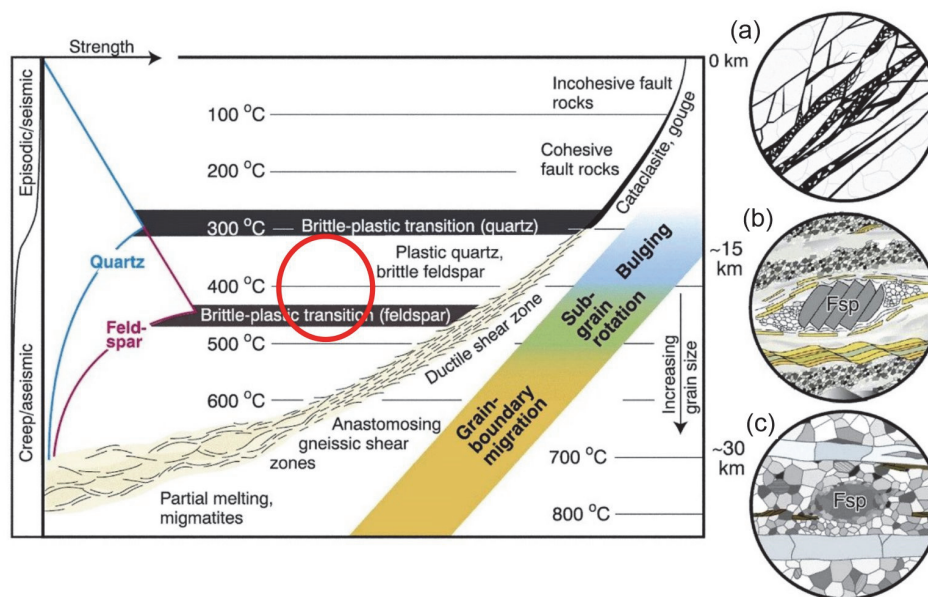


Рис. 10. Принципиальная схема, иллюстрирующая закономерное изменение механизмов релаксации напряжений в породах по мере возрастания глубинности процессов (до 30 км) и температуры (до 800 °C) [Fossen, 2010]

a–c – микроструктуры различных режимов деформации: a – хрупкое растрескивание; b – хрупко-пластичные деформации полевого шпата и рекристаллизация мелких агрегатов кварца в зонах пониженного давления; c – высокотемпературная рекристаллизация кварца и полевого шпата в условиях пластичных деформаций. Красным ареалом выделена область палеозойских деформаций южной части Каахемского ареала

Fig. 10. Schematic diagram illustrating the natural change in stress relaxation mechanisms in rocks as the depth of the processes increases (up to 30 km) and temperature (up to 800 °C) [Fossen, 2010]

a–c – microstructures of various deformation modes: a – brittle cracking; b – brittle-ductile deformation of feldspar and recrystallization of small quartz aggregates in low pressure zones; c – high-temperature recrystallization of quartz and feldspar under conditions of plastic deformation. The area of Paleozoic deformations in the southern part of the Kaakhem area is highlighted in red

Становление комплекса габброидных даек (~450 млн лет) происходило в гипабиссальных обстановках, на что указывает мелкозернистая структура пород. Однако подъем расплава, образовавшегося за счет метасоматического преобразования пород мантийного клина адакитовыми расплавами [Яковлев и др., 2024], происходил со значительных глубин. Формирование комплекса даек является индикатором ослабленной тектонической зоны, а внедрение мантийного расплава указывает на большую глубину залегания деформационной зоны.

Длительность деформаций всех трех этапов можно оценить только относительно. Во всех случаях это были кратковременные проявления тектонической активности, не превышающие длительность консолидации расплавов. Раннеордовикский этап, синхронный становлению диорит-тоналит-плагиогранитной ассоциации, представляет собой глубинное землетрясение с высокими скоростями первичного сброса напряжения, что привело к дроблению основных пород. Заполнение образовавшегося пространства гранитным материалом сопровождалось остаточными кратковременными импульсами, результатом которых стало появление внутрикристаллических деформаций, зон дробления и скольжения на границах зерен в гранитах и на контакте гранитов и базитов.

Становление комплекса базитовых даек является результатом однократного внедрения расплава по трещинам по механизму магмораспора, так как на контактах не видно следов взаимодействия магмы с вмещающими породами и отсутствует внутренняя зональность в строении даек [Морозов и др., 2017]. Формирование трещин связано с нормальным растяжением без участия сдвиговой компоненты, что привело к формированию параллельных стенок даек без кулисных апофизов, коленообразных изломов и деформационной линейной текстуры пород внутри даек. Выдержанное залегание даек и отсутствие сопряженных трещин, заполненных тем же базитовым материалом, указывают на кратковременность деформационного события. В противном случае наблюдалась бы сложная сеть даек с вероятным постепенным изменением состава.

Раннепермские деформации были проявлены неоднократно, что способствовало двухэтапному становлению основных и кислых расплавов [Karmysheva et al., 2022], а также появлению многочисленных более поздних гранитных жил и даек, сильно осложняющих зону контакта Шивейского и Чадалского массивов. Структурные индикаторы синтетектонического внедрения граносиенитов и монцодиоритов (C/C'/S структуры, вращение порфирировых вкрапленников ка-

лиевого полевого шпата, внутрикристаллические деформации крупных зерен и их отсутствие в субзернах) указывают на длительность деформаций, не превышающей времени консолидации расплавов. Более поздние деформации, маркирующиеся по внедрению минглинг-даек, гранитных даек и жил, были еще более кратковременными, поскольку в породах отсутствуют следы синдеформационного внедрения и кристаллизации магмы.

Корреляция деформаций с Каахемским разломом. Синтетектонические Шивейский и Чадалский массивы расположены в южной части Каахемской тектонической зоны, где выделяется несколько субмеридиональных разломов с современной тектонической активностью [Сугоракова, Бутанаев, 2014]. Анализ раннепермских деформаций указывает на существование и активизацию данных разломов с конца палеозоя. Деформации проявлены в обстановках растяжения со сдвигом при субвертикальном транспорте вещества и связаны с внутриплитной тектонической активностью.

Ориентировка и положение комплекса ордовикских базитовых даек свидетельствуют о субширотном растяжении (рис. 11). Максимальные концентрации деформаций были проявлены в районе слияния рек Кызыл-Хем и Балыктыг-Хем. По направлению на запад интенсивность деформаций становится менее выраженной, что фиксируется по увеличению расстояния между дайками и более пологим углам их залегания. Направление растяжения совпадает с субмеридиональными разломами в Каахемской зоне, что позволяет рассматривать область становления базитовых даек как один из фрагментов крупной тектонической структуры. Формирование даек происходило на завершающей стадии коллизионного этапа развития Каахемского магматического ареала [Яковлев и др., 2024]. К этому же периоду относится становление Майского и Шуйского габброидных массивов, расположенных непосредственно в пределах Каахемской зоны [Монгуш, Сугоракова, 2013]. Петрогеохимические характеристики этих массивов близки по составу к комплексу базитовых даек, что позволяет рассматривать их как единый этап плавления деплетированного надсубдукционного источника, формировавшегося на субдукционном (островодужном) этапе за счет метасоматического преобразования пород мантийного клина адакитовыми расплавами [Яковлев и др., 2024].

Пространственное распространение комплекса базитовых даек полностью перекрывает зону хрупкопластичных деформаций, наложенных на раннетаннуольские гранитоидные ассоциации. Это может говорить о существовании тектонически ослабленной

зоны, активизирующейся в раннем и позднем ордовике. Однако, унаследованности структур сжатия и растяжения не наблюдается (рис. 11). Внедрение даек

не происходит по сколам, заложенных при раннеордовикских хрупко-пластичных деформациях, что указывает на смену полей напряжения в позднем ордовике.

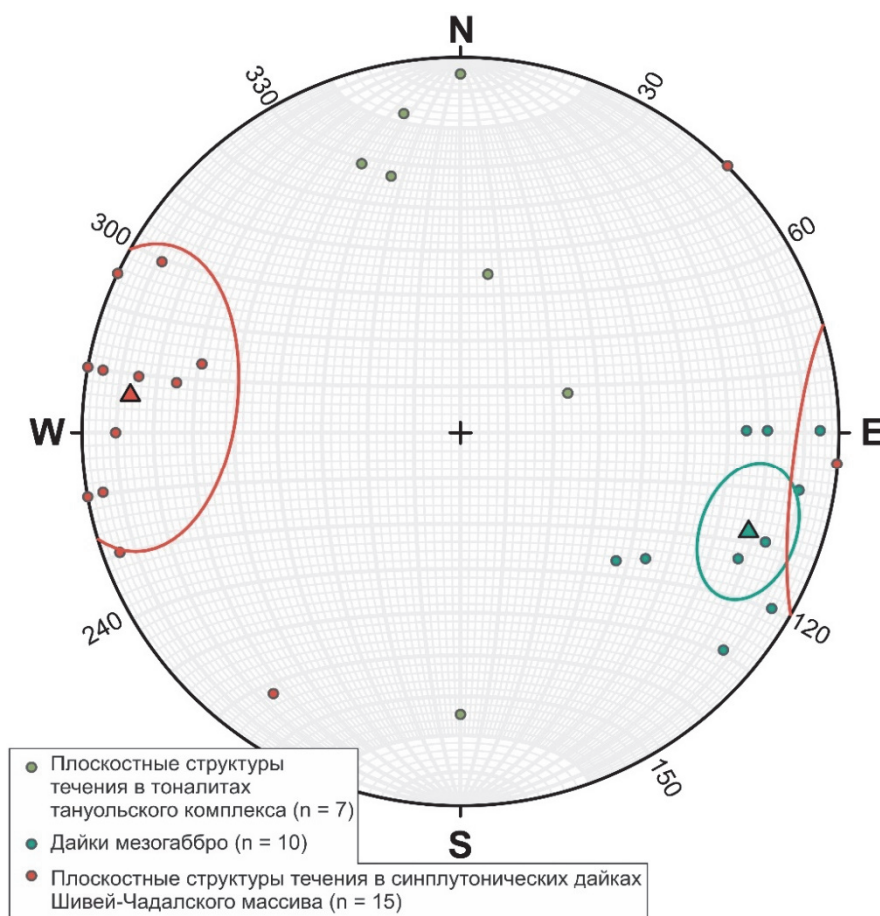


Рис. 11. Ориентировка плоскостных структур в изученных палеозойских магматических комплексах
Равноплощадная проекция, нижняя полусфера. Треугольниками показаны координаты усредненных полюсов

Fig. 11. Orientation of planar structures in the studied Paleozoic igneous complexes
Lower hemisphere, equal-angle projection. The triangles show the coordinates of the average poles

Проявление этих хрупко-пластичных деформаций и образование габбро-гранитных брекчиеподобных структур нельзя напрямую связать с заложением и развитием Каахемской зоны. Они расположены на ее периферии, в зоне сочленения окраины Тувино-Монгольского массива и задуговых бассейнов. По возрасту диорит-тоналит-плагиогранитной ассоциации таннуольского комплекса (476 ± 4 млн лет) деформации относятся к аккреционно-коллизийному этапу эволюции региона. Развитие Каахемской зоны в данный период связывается с циклической сменой сжатия и растяжения при развороте палеотектонических структур Алтае-Саянской складчатой области по часовой стрелке [Монгуш и др., 2023]. Эти обстановки и привели к формированию тектонически ослабленной зоны, претерпевшей позднее реактивацию в позднеордовикский период.

Вопросы терминологии. В опубликованной литературе [Агентов, Агентова, 1960; Черезов и др., 1999; Сугоракова, Бутанаев, 2014; Монгуш и др., 2023] Каахемская зона характеризуется как «глубинный разлом» или «рифтогенная (палеорифтогенная)». Первый термин, введенный А.В. Пейве в 1945 г. [Пейве, 1945], опирается на геосинклинальную теорию и подразумевает существование протяженной тектонической границы структурных элементов литосферы с глубинным заложением и активизацией в течение длительного времени.

Хрупко-пластичные деформации, наблюдаемые в пределах Каахемской зоны, и современная сейсмическая активность полностью подходят под данное определение, однако комплексы пород, развитые на северо-восток и юго-запад от зоны, отличаются от вещественных комплексов тектонической зоны только

отсутствием деформационных изменений, а также друг от друга – мощностями стратиграфического разреза [Агентов, Агентова, 1960]. Следовательно, говорить в данном случае о тектонической границе не корректно.

Классическое определение «рифтовой зоны» [Борукаев, 1999] отражает геодинамические обстановки горизонтального растяжения земной коры океанического и континентального типа с формированием грабенообразной впадины в центральной части. Для рифтовых зон континентального типа также характерна вулканическая активность с образованием бимодальных магматических ассоциаций. Как было показано выше, образование вещественных комплексов южной части Каахемской структурной зоны связано не только с процессами рифтогенеза, как предполагалось ранее [Черезов и др., 1999; Лебедев и др., 1999; Зайков, 2006]. Ее активизация и развитие в палеозое происходили в обстановках растяжения и растяжения со сдвигом, что связано с формированием проницаемых ослабленных зон на завершающей стадии коллизионного этапа развития ареала.

Таким образом, термины «глубинный разлом» и «рифтогенная зона» не отражают полностью строение, эволюцию и обстановки формирования Каахемской тектонической структуры. Для данных объектов больше всего подходит определение «тектонической зоны» или «зоны концентрации деформаций» [Леонов, 2012], поскольку в термины не включается геодинамическая интерпретация и кинематическая

характеристика – параметры, которые могут изменяться в течении длительной эволюции тектонической структуры.

Заключение

Палеозойские деформации восточной части Каахемского ареала были проявлены в три этапа. Первый маркируется становлением диорит-тоналит-плагиогранитной ассоциации таннуольского комплекса (476 ± 4 млн лет) и фрагментацией более ранних базитовых тел. Второй этап фиксируется по внедрению комплекса базитовых даек (~ 450 млн лет) в условиях верхней коры. Третий этап – проявление деформаций, контролирующих становление монцодиорит-граносиенитов Шивейского и Чадалского массивов (282–293 млн лет). Длительность всех эпизодов тектонической активности была незначительной и не превышала время консолидации расплавов. Характер деформаций первого и третьего этапов – хрупко-пластичный, что обусловлено реологией пород. Базитовые тела подвержены хрупким деформациям, а кислые породы деформируются в хрупко-пластичном состоянии.

Второй и третий этапы деформаций обусловлены обстановками растяжения и растяжения со сдвигом. Субмеридиональная ориентировка плоскостей скалывания в раннепермских породах и положение раннеордовикских даек позволяют рассматривать их в качестве палеозойского этапа эволюции южной части Каахемской структурной зоны.

Список источников

- Агентов В.Б., Агентова В.В. Объяснительная записка к листу М-47-1 Геологической карты СССР м-ба 1 : 200000. М. : Гостеолтехиздат, 1960, 71 с.
- Ажгирей Г.Д. О некоторых важных закономерностях тектонического строения и движений земной коры // Изв. АН СССР. Сер. Геол. 1960. № 8. С. 3–18.
- Борукаев Ч.Б. Словарь-справочник по современной тектонической терминологии. Новосибирск : Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999. 69 с.
- Зайков В.В. Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин: на примере колчеданосных зон Урала и Сибири. М. : Наука, 2006. 429 с.
- Козаков И.К., Сальникова Е.Б., Коваленко В.И., Котов А.Б., Лебедев В.И., Сугоракова А.М., Яковлева С.З. Возраст постколлизийного магматизма ранних каледонид Центральной Азии (на примере Тувы) // Доклады Академии наук. 1998. Т. 360, № 4. С. 514–517.
- Коробейников В.П., Исаков В.М. Структура сопряжения Каахемской и Восточно-Тувинской зон и формирование древнего желоба-разлома // Геология и геофизика. 1981. № 11. С. 18–28.
- Лебедев В.И., Черезов А.М., Лебедева М.Ф. Особенности металлогении фанерозоя Тувы и Северо-Западной Монголии // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 11. С. 1646–1654.
- Леонов М.Г. Внутриплитные зоны концентрированной деформации: тектоническая структура и особенности эволюции // Геотектоника. 2012. № 6. С. 3–28.
- Лукьянов А.В. Парагенетический анализ структур в решении задач теоретической и практической геологии // Структурные парагенезы и их ансамбли. М. : ГЕОС, 1997. С. 87–90.
- Монгуш А.А., Монгуш С.С., Кадыр-Оол Ч.О. Геодинамика формирования долгоживущей палеорифтогенной Каахемской структурной зоны (Восточная Тува) // Природные ресурсы, среда и общество. 2023. № 2 (18). С. 34–48.
- Монгуш А.А., Сугоракова А.М. Возраст и источники магм постколлизийных габброидов Каахемского магматического ареала, Восточная Тува: результаты первых ^{40}Ar - ^{39}Ar и Sm-Nd исследований // Геохимия. 2013. № 11. С. 1042–1047.
- Морозов Ю.А. Структурообразующая роль транспрессии и транстензии // Геотектоника. 2002. № 6. С. 3–24.
- Морозов Ю.А., Галыбин А.Н., Мухамедиев Ш.А., Смутьская А.И. Тектонический и геомеханический контроль размещения даек и силлоподобных тел в северо-западной части Кольского полуострова // Геотектоника. 2017. № 3. С. 28–60.
- Пейве А.В. Глубинные разломы геосинклинальных областей // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1945. № 5. С. 23–46.

Руднев С.Н. Раннепалеозойский гранитоидный магматизм Алтае-Саянской складчатой области и Озерной зоны Западной Монголии. Новосибирск : Издательство СО РАН, 2013. 300 с.

Руднев С.Н., Владимиров А.Г., Пономарчук В.А., Бибикова Е.В., Сергеев С.А., Матуков Д.И., Плоткина Ю.В., Баянова Т.Б. Каахемский полихронный гранитоидный батолит (В. Тува): состав, возрасты, источники и геодинамическая позиция // Литосфера. 2006. № 1. С. 30–42.

Руднев С.Н., Кармышева И.В., Семенова Д.В., Яковлев В.А., Сугорова А.М. Магматические и ксеногенные цирконы из гранитоидов Каахемского батолита как возрастные маркеры коры в зоне сочленения Таннуольской островной дуги и Тувино-Монгольского микроконтинента (Восточная Тува) // Геология и геофизика. 2023. Т. 64 (7). С. 917–933.

Руднев С.Н., Серов П.А., Киселева В.Ю. Венд-раннепалеозойский гранитоидный магматизм Восточной Тувы // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 9. С. 1572–1600.

Сугорова А.М., Бутанаев Ю.В. Каа-Хемская рифтогенная зона (история заложения и развития) // Тувинские землетрясения 2011–2012 гг. Кызыл : ТувИКОП СО РАН, 2014. С. 83–85.

Сугорова А.М., Хертек А.К. Новые данные к вопросу о возрасте Каахемского магматического ареала (Восточная Тува) // Геосферные исследования. 2017. № 3. С. 50–60.

Талицкий В.Г., Галкин В.А. Структурная организация геологической среды и некоторые закономерности ее динамических перестроек // Вестник МГУ. Геология. 1997. № 2. С. 12–17.

Черезов А.М., Сугорова А.М., Черезова О.С. Тектоника и зональность ультрабазит-базитового магматизма Каахемской рифтогенной зоны Тувы // Вопросы петрологии, минералогии, геохимии и геологии офиолитов : сб. науч. ст. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1999. С. 150–156.

Чиков Б.М. Об основах теоретической концепции стресс-метаморфизма (применительно к линейным зонам земной коры) // Структура линейных зон динамометаморфизма. Новосибирск : Изд-во Изд-во ИГиГ СО АН СССР, 1990. С. 6–40.

Яковлев В.А., Кармышева И.В., Руднев С.Н., Семенова Д.В., Юдин Д.С. Дайковые комплексы восточной части Каахемского магматического ареала (Восточная Тува): состав, возраст, геологическая позиция // Geodynamics & Tectonophysics. 2024. V. 15 (3). 0760.

Fossen H. Structural geology. New York ; Cambridge : Cambridge University Press, 2010. 463 p.

Karmysheva I.V., Yakovlev V.A., Sugorakova A.M., Rudnev S.N., Semenova D.V. Late Paleozoic Contrasting Magmatism of the Eastern Kaakhem Magmatic Area (Central Asian Orogenic Belt) // Geodynamics & Tectonophysics. 2022. V. 13 (3). 0637.

Sanderson D.J., Marchini W.R.D. Transpression // Journ. Geol. Struct. Geol. 1984. V. 6. P. 449–458.

Scholz C.H. The brittle-plastic transition and depth of seismic faulting // Geologische Rundschau 1988. V. 77 (1). P. 319–328.

Silvester A.G. Strike-slip faults // Geol. Soc. Am. Bull. 1988. V. 100, No. 11. P. 1666–1703.

Van der Pluijm Ben A., Marshak S. Earth structure: an introduction to structural geology and tectonics (Second edition). New York ; London : W.W Norton&Company, 2004. 656 p.

References

Agentov V.B., Agentova V.V. *Ob 'yasnitelnaya zapiska k listu M-47-I Geologicheskoi karty SSSR meschtaba 1 : 200000*. [Explanatory note to sheet M-47-I of the Geological Map of the USSR, scale 1 : 200000]. Moscow : Gosgeoltekhizdat. 1960. 71 p. In Russian

Azhgirey G.D. *O nekotorykh vazhnykh zakonmernostyakh tektonicheskogo stroeniya i dvizhenii zemnoi kory* [On some important patterns of tectonic structure and movements of the earth's crust]. News of the AS USSR. 1960. Ser. Geol. No. 8. pp. 3–18. In Russian

Borukaev Ch.B. *Slovar'-aprovodnik po sovremennoi tektonicheskoi terminologii* [Glossary of modern tectonics]. Novosibirsk: Published by Siberian Branch. SPC UIGGM, 1999. 69 p. In Russian

Zaikov V.V. () Vulkanizm i sul'fidnye kholmy paleookeanicheskikh okrain: na primere kolchedanonosnykh zon Urala i Sibiri [Volcanism and sulfide hills of paleoceanic margins: the example of sulfide-bearing zones of the Urals and Siberia]. Moscow: Publishing house "Nauka", 2006. 429 p. In Russian

Kozakov I.K., Sal'nikova E.B., Kovalenko V.I., Kotov A.B., Lebedev V.I., Sugorakova A.M., Yakovleva S.Z. The age of post-collisional magmatism in the early Caledonides of Central Asia, with the Tuva region as an example. Doklady Earth Sciences. 1998. V. 360. No 4. pp. 510–513. In Russian

Korobeinikov V.P., Isakov V.M. *Struktura sopryazheniya Kaakhemskoi i Vostochno-Tuvinskoi zon i formirovanie drevnego zheloborazloma* [The structure of the junction of the Kaakhem and East Tuva zones and the formation of an ancient fault trench] // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 1981. No. 11. pp. 18–28. In Russian

Lebedev V.I., Cherezov A.M., Lebedeva M.F. *Osobennosti metallogenii fanerozoia Tuvy i severo-Zapadnoi Mongolii* [Features of Phanerozoic metallogeny of Tuva and Northwestern Mongolia] // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 1999. V. 40, No. 11. pp. 1646–1654. In Russian

Leonov M.G. Within-plate zones of concentrated deformation: tectonic structure and evolution // *Geotektonika* [Geotectonics]. 2012. V. 46. 6. pp. 3–28. In Russian

Luk'yanov A.V. Parageneticheskii analiz struktur v reshenii zadach teoreticheskoi i prakticheskoi geologii [Paragenetic analysis of structures in solving problems of theoretical and practical geology]. Structural parageneses and their ensembles. Moscow: GEOS, 1997. pp. 87–90. In Russian

Mongush A.A., Mongush S.-S.S., Kadyr-Ool Ch.O. The formation geodynamics of the long-lived paleoriftogenic Kaa-Khem structural zone (Eastern Tuva) // Natural resources, environment and society. 2023. No. 2 (18). pp. 34–48. In Russian. doi: 10.24412/2658-4441-2023-2-34-48

Mongush A.A., Sugorakova A.M. Age and magma sources of the post-collisional gabbroids of the Kaakhem magmatic area, Eastern Tuva: first ⁴⁰Ar/³⁹Ar and Sm-Nd data // *Geokhimiya* [Geochemistry International]. 2013. V. 51, No. 11. pp 1042–1047. In Russian. doi: 10.7868/s0016752513110046

- Morozov Yu.A. *Strukturoobrazuyushaya rol' transpressii i transtensii* [The structure-forming role of transpression and transtension] // *Geotektonika* [Geotectonics]. 2002. No. 6. pp. 3–24. In Russian
- Morozov Y.A., Galybin A.N., Mukhamediev S.A., Smul'skaya A.I. Tectonic and geomechanical control of dikes and sill-like bodies: evidence from the northwestern part of the Kola Peninsula // *Geotektonika* [Geotectonics]. 2017. V. 51. No. 3. pp. 28–60. In Russian. doi: 10.7868/S0016853X17030079
- Peive A.V. *Glubinnye razlomy geosinklinal'nykh oblastei* [Deep faults of geosynclinal areas]. News of the AS USSR. Ser. Geol. 1945. No. 5. pp. 23–46. In Russian
- Rudnev S.N. *Rannepaleozoiskii granitoidnyi magmatizm Altae-Sayanskoi skladchatoi oblasti i Ozernei zony Zapadnoi Mongolii* [Early Paleozoic granitoid magmatism in the Altai-Sayan folded area and in the Lake Zone in Western Mongolia]. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the RAS. 2013. 300 p. In Russian
- Rudnev S.N., Vladimirov A.G., Ponomarchuk V.A., Bibikova E.V., Sergeev S.A., Matukov D.I., Plotkina Yu.V., Bayanova T.B. Kaakhem polychromatic granitoid batholith (Eastern Tuva): composition, age sources and geodynamic position // *Lithosphere*. 2006. No. 1. pp. 30–42. In Russian
- Rudnev S.N., Karmysheva I.V., Semenova D.V., Yakovlev V.A., Sugorakova A.M. Magmatic and xenogenic zircons from granitoids of the Kaa-Khem batholith as age markers of the crust in the Junction zone of the Tannu-Ola island arc and the Tuva–Mongolian microcontinent (Eastern Tuva) // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2023. V. 64 (7). pp. 917–933. In Russian. doi: 10.2113/RGG20234527
- Rudnev S.N., Serov P.A., Kiseleva V.Yu. Vendian–Early Paleozoic Granitoid Magmatism in Eastern Tuva // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2015. V. 56 (9). pp. 1572–1600. In Russian. doi: 10.15372/GiG20150902
- Sugorakova A.M., Butanaev Yu.V. *Kaa-Khemskaya riftogennaya zona (istoriya zalozheniya i razvitiya)* [Kaa-Khem rift zone (history of formation and development)]. Tuva earthquakes 2011–2012. Kyzyl: TuvIENR SB RAS. 2014. pp. 83–85. In Russian
- Sugorakova A.M., Khertek A.K. The new data to the question of the age of associations Kaakhem magmatic area (Eastern Tuva) // *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2017. 3. pp. 50–60. In Russian. doi: 10.17223/25421379/4/7.
- Talitskii V.G., Galkin V.A. *Strukturnaya organizatsiya geologicheskoi sredy i nekotorye zakonomernosti ee dinamicheskikh perestroek* [Structural organization of the geological environment and some patterns of its dynamic restructuring] // *Bulletin of Moscow State University. Geology*. 1997. 2. pp. 12–17. In Russian
- Cherezov A.M., Sugorakova A.M., Cherezova O.S. *Tektonika i zonalnost' ul'trabazit-bazitovogo magmatizma Kaakhemskoi raftogennoi zony Tuvy* [Tectonics and zoning of ultramafic-mafic magmatism of the Kaakhem rift zone of Tuva]. Issues of petrology, mineralogy, geochemistry and geology of ophiolites. Collection of scientific articles. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the RAS, 1999. pp. 150–156. In Russian
- Chikov B.M. *Ob osnovakh teoreticheskoi kontseptsii stress-metamorfizma (primenitel'no k lineamentnym zonam zemnoi kory)* [On the fundamentals of the theoretical concept of stress metamorphism (in relation to lineament zones of the earth's crust)]. Structure of lineament zones of dynamometamorphism. Novosibirsk: Published by IGIG SB AS USSR. 1990. pp. 6–40. In Russian
- Yakovlev V.A., Karmysheva I.V., Rudnev S.N., Semenova D.V., Yudin D.S. Dike complexes in the Eastern part of the Kaakhem magmatic area (Eastern Tuva): composition, age geological position // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2024. 15 (3). 0760. In Russian. doi: 10.5800/GT-2024-15-3-0760.
- Fossen H. *Structural geology*. Cambridge University Press, 2010. New York, Cambridge. 463 p.
- Karmysheva I.V., Yakovlev V.A., Sugorakova A.M., Rudnev S.N., Semenova D.V. Late Paleozoic Contrasting Magmatism of the Eastern Kaakhem Magmatic Area (Central Asian Orogenic Belt) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022. 13 (3), 0637. doi: 10.5800/GT-2022-13-3-0637.
- Sanderson D.J., Marchini W.R.D. Transpression // *Journ. Geol. Struct. Geol.* 1984. V. 6. pp. 449–458.
- Scholz C.H. The brittle-plastic transition and depth of seismic faulting // *Geologische Rundschau* 1988. 77(1). pp. 319–328. doi: 10.1007/BF01848693
- Silvester A.G. Strike-slip faults // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1988. V. 100. No. 11. pp. 1666–1703.
- Van der Pluijm Ben A., Marshak S. *Earth structure: an introduction to structural geology and tectonics* (Second edition) // W.W Norton&Company, New-York – London, 2004. 656 p.

Информация об авторах:

Кармышева И.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией структурной петрологии, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: iri@igm.nsc.ru

Яковлев В.А., младший научный сотрудник, лаборатория структурной петрологии, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: yakovlevva@igm.nsc.ru

Зюков Е.Д., лаборант, лаборатория структурной петрологии, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: evgzyukov@gmail.com

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Karmysheva I.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Head of the Laboratory of structural petrology, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: iri@igm.nsc.ru

Yakovlev V.A., Junior Researcher, Laboratory of structural petrology, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: yakovlevva@igm.nsc.ru

Zyukov E.D., Laboratory Assistant, Laboratory of structural petrology, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: evgzyukov@gmail.com

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

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.06.2024; одобрена после рецензирования 09.12.2024; принята к публикации 29.08.2025

The article was submitted 20.06.2024; approved after reviewing 09.12.2024; accepted for publication 29.08.2025

Научная статья
УДК 552.181
doi: 10.17223/25421379/36/6



ПАЛЕООСТРОВОДУЖНАЯ ПРИРОДА ГИПЕРБАЗИТОВ АЛАМБАЙСКОЙ ОФИОЛИТОВОЙ ЗОНЫ САЛАИРА (СЕВЕРО-ЗАПАД ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКОГО СКЛАДЧАТОГО ПОЯСА) ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ СОСТАВА ХРОМШПИНЕЛЕЙ

Алексей Васильевич Котляров¹, Федор Игоревич Жимулев², Аганак Анатолевич Хуурак³,
Марина Анатольевна Фидлер⁴, Никита Алексеевич Бехтерев⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

¹ kotlyarov@igm.nsc.ru

² zhimulev@igm.nsc.ru

³ khuurakaa@igm.nsc.ru

⁴ fidler@igm.nsc.ru

⁵ n.bekhterev@ngsu.ru

Аннотация. Офиолитовые зоны являются источником информации об океанических этапах развития складчатых областей континентов. Химический состав акцессорных хромшпинелидов из офиолитовых гипербазитов используется как один из инструментов для палеотектонических реконструкций. Представлены результаты электронно-зондового микроанализа на микроанализаторе JXA-8100 JEOL состава хромшпинели из серпентинизированных гипербазитов южного и северного ареалов Аламбайской офиолитовой зоны (АОЗ) Салаирского кряжа. Аламбайская офиолитовая зона сложена образованиями палеосубдукционной зоны, пространственно и генетически связанной с кембрийскими островодужными вулканитами Салаира. Хромшпинель из Белининского массива южного ареала АОЗ характеризуется повышенными значениями хромистости (75–92) и магнезиальности (32–55), типичными для высокодеплетированной литосферной мантии под островными дугами. На классификационных диаграммах, используемых для палеотектонических реконструкций, составы хромшпинели Белининского массива лежат в пределах полей «островные дуги», «преддуговые» или «бонинитовые». Хромшпинель из северного ареала АОЗ, включающего Верхне-Аламбайский и Тогул-Сунгайский массивы, образует две популяции зерен. Популяция зерен с повышенным содержанием титана (>1 %), соответствующая мантийным породам из зон плюмового внутриплитного магматизма, получена только из аллювия реки Степной Аламбай, ниже блока базальтов с геохимическими характеристиками ОИВ. Основная популяция, представленная высокохромистыми низкотитанистыми зёрнами характерна, как для Верхне-Аламбайского, так и для Тогул-Сунгайского массивов (хромистость 52–88, магнезиальность 35–68). Хромшпинель данной популяции также характерна для гипербазитов надсубдукционных обстановок (глубоководный желоб, преддуговой блок, островная дуга). Гипербазиты АОЗ представляют собой фрагменты литосферной мантии Салаирского сегмента Алтае-Кузнецкой островодужной системы, их формирование произошло на стадии заложения зоны субдукции и островной дуги, о чем свидетельствуют состав хромшпинели, типичный для бонинитовых серий, и современные тектонические модели, а эксгумация в аккреционную призму явилась результатом столкновения островодужной системы с аламбайским палеосимаунтом. Надсубдукционная природа гипербазитов АОЗ свидетельствует о возможности обнаружения месторождений платиноидов, связанных с массивами зоны.

Ключевые слова: офиолиты, Салаир, хромшпинель, островные дуги, субдукция, хромистость, магнезиальность, гипербазиты

Благодарности: Авторы благодарны д-ру геол.-минерал. наук В.А. Симонову за советы и обсуждение изложенного материала, д-ру геол.-минерал. наук И.С. Новикову и канд. геол.-минерал. наук Н.С. Тычкову за помощь в организации полевых работ, канд. техн. наук Е.С. Жимулевой за помощь в подготовке рукописи.

Источники финансирования: Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 23-27-00033.

Для цитирования: Котляров А.В., Жимулев Ф.И., Хуурак А.А., Фидлер М.А., Бехтерев Н.А. Палеоостроводужная природа гипербазитов Аламбайской офиолитовой зоны Салаира (северо-запад Центрально-Азиатского складчатого пояса) по данным изучения состава хромшпинелей // Геосферные исследования. 2025. № 3. С. 104–119. doi: 10.17223/25421379/36/6

PALAEOISLAND-ARC NATURE OF HYPERBASITES FROM THE ALAMBAY OPHIOLITE ZONE OF SALAIR (NORTHWEST CENTRAL ASIAN OROGENIC BELT) ACCORDING TO THE STUDY CR-SPINELS COMPOSITION

Alexey V. Kotlyarov¹, Fedor I. Zhimulev², Aganak A. Khuurak³, Marina A. Fidler⁴, Nikita A. Bekhterev⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia

¹ kotlyarov@igm.nsc.ru

² zhimulev@igm.nsc.ru

³ khuurakaa@igm.nsc.ru

⁴ fidler@igm.nsc.ru

⁵ n.bekhterev@g.nsu.ru

Abstract. Ophiolite zones are sources of information about the oceanic stage of orogen formation. The chemical composition of accessory Cr-spinels from ophiolite ultrabasites is used as one of the tools for paleotectonic reconstruction. This paper presents the results of electron probe microanalysis on the JXA-8100 JEOL microanalyzer of the composition of chrome-spinelides from the serpentinized hyperbasites of the southern and northern areas of Alambay ophiolite zone (AOZ) of Salair ridge. AOZ is composed of paleosubduction zone formations, spatially and genetically related to the Cambrian island-arc volcanic rocks. Cr-spinel from Belinsky massif of the southern AOZ area is characterized by increased values of chromium content ($Cr\# = 75\text{--}92\%$) and magnesium content ($Mg\# = 32\text{--}55\%$), which is typical for highly depleted lithospheric mantle under island arcs. Classification diagrams which are used for paleotectonic reconstructions show that the compositions of Cr-spinel of Belin massif lie within the fields of “island arcs,” “forearc,” or “boninite.” Chrome spinel from the northern area of AOZ, which includes the Upper Alambay and Togul-Sungai massifs, forms two populations of grains. A population of grains with a high titanium content ($>1\%$), corresponds to mantle rocks from zones of plume intraplate magmatism and was obtained only from the alluvial deposits of the Stepony Alambay River, below a block of basalts with OIB geochemical characteristics. The main population, represented by high-chromium, low-titanium grains, is typical for both Upper Alambay and Togul-Sungai massifs ($Cr\# = 52\text{--}88\%$, $Mg\# = 35\text{--}68\%$). Cr-spinel of this population is also typical for ultramafic rocks in suprasubduction settings (deep-sea trench, forearc block, island arc). The ultrabasites of AOZ are fragments of the lithospheric mantle of the Salair segment of the Altai-Kuznetsk island arc system; their formation occurred at the stage of the formation of the subduction zone and island arc, as evidenced by the composition of Cr-spinel typical for boninite series and by modern tectonic models [Stern et al., 2012], whilst exhumation into an accretionary prism was the result of the collision of the island-arc system with the Alambay paleoseamount. The suprasubduction nature of the ultramafic rocks of AOZ indicates the possibility of discovering platinum group metal deposits associated with the massifs of the zone.

Keywords: ophiolites, Salair, Cr-spinel, island arcs, subduction, Cr content, Mg content, ultramafic rocks

Acknowledgments: The authors are grateful to V.A. Simonov for advice and discussion of the presented data, I.S. Novikov and N.S. Tychkov for assistance in field work providing, and E.S. Zhimuleva for assistance in preparing the manuscript.

Source of financing: The study was supported by the Russian Science Foundation (project № 23-27-00033).

For citation: Kotlyarov A.V., Zhimulev F.I., Khuurak A.A., Fidler M.A., Bekhterev N.A. (2025) Palaeoisland-arc nature of hyperbasites from the Alambay ophiolite zone of Salair (northwest Central Asian orogenic belt) according to the study Cr-spinels composition. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. 104–119. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/36/6

Введение

Офиолитовые зоны являются источником информации об океанических этапах развития складчатых областей континентов (орогенов) [Flower, 2003; Stern et al., 2012; Condie, Stern, 2023]. Ассоциация и состав палеоокеанических пород отражают особенности процессов формирования океанической литосферы данного океанического бассейна. В офиолитовых зонах складчатых областей породы базит-гипербазитовой ассоциации палеоокеанической коры обычно встречаются в виде разобщенных тектонических блоков и подвержены сильным вторичным изменениям. В особенности это касается гипербазитов нижнего

слоя океанической коры и литосферной мантии, которые часто полностью серпентинизированы. В этом случае акцессорные хромшпинелиды остаются единственными первичными минералами, сохраняющими информацию о составе и условиях формирования гипербазитов. Химический состав хромшпинели используется как один из инструментов для палеотектонических реконструкций [Dick, Bullen, 1984; Barnes, Roeder, 2001; Stern et al., 2012].

В данной работе представлены результаты изучения состава хромшпинели из серпентинизированных гипербазитов Аламбайской офиолитовой зоны Салаирского кряжа (Салаира), проведено их сравнение с составами хромшпинели из других гипербазитовых

массивов Сибири и современных океанов и сделаны выводы об условиях формирования гипербазитов АОЗ.

Геологическое строение Аламбайской офиолитовой зоны

Аламбайская офиолитовая зона (АОЗ) расположена в осевой части раннепалеозойской Салаирской складчатой зоны и является северным звеном Аламбайско-Каимской зоны Салаира и Горного Алтая [Пинус и др., 1958; Коновалова, Прусевич, 1977; Шокальский и др., 2000; Токарев и др., 2002, 2019; Dobretsov et al., 2004; Долгушин и др., 2019; Zhimulev et al., 2024]. Раннепалеозойские комплексы Салаирского складчато-покровного сооружения включают тектонические пластины вулканических пород кислого и основного состава, известняков, а также терригенных пород, преимущественно вулканомикового состава. Возраст отложений нижнего структурного этажа охватывает все отделы кембрия и начало раннего ордовика [Фомичев, Алексеева, 1961; Бабин и др., 2007; Токарев и др., 2002, 2019a, 2019b; Vetrova et al., 2022]. Кембрийский вулканический комплекс Салаира формировался в обстановке энсиматической островной дуги [Зоненшайн, 1990; Berzin et al., 1994; Бабин и др., 2007; Ветрова и др., 2022].

АОЗ образует два линзовидных кулисообразно расположенных ареала, один из которых, называемый Тягун-Аламбайским, приурочен к средней части Салаира, а второй, Шалапский (Мартыново-Шалапский), образует осевую часть юго-западного фланга Салаира (рис. 1). Сложная, прерывистая и нелинейная форма АОЗ, вероятно, связана с позднепалеозойским расчешуиванием при надвигании Салаирского чешуйчатого аллохтона. Кроме того, пережимы и раздувы зоны могут иметь и первичную природу – расширенные участки зоны образованы фрагментами палеоокеанических островов в структуре офиолитового шва. В геоэлектрической структуре земной коры АОЗ проявлена проводящей аномалией, погружающейся субвертикально, по крайней мере до уровня средней коры (15–20 км) [Zhimulev et al., 2021, 2023].

В составе офиолитовой зоны выделены аламбайский базальтовый, верхнеаламбайский дунит-гарцбургитовый и шалапский меланжевый геологические комплексы [Шокальский и др., 2000; Токарев и др., 2019a]. Также с АОЗ структурно ассоциирует тектоническая пластина амфиболитов, выделяемая в ангрепский метаморфический комплекс [Zhimulev et al., 2024]. Аламбайский базальтовый комплекс представ-

лен ассоциацией высокотитанистых толеитовых и субщелочных базальтов, по составу соответствующих ОІВ типу, с кремнистыми сланцами и микрокварцитами по кремням, содержащими углеродистое вещество и марганцевую минерализацию. Верхнеаламбайский дунит-гарцбургитовый комплекс образован апогарцбургитовыми и аподунитовыми серпентинитами с телами пироксенитов, габброидов и жилами хромититов. Всего известно около 20 крупных гипербазитовых тел площадью 2–50 км² и более 100 мелких, измеряемых десятками и сотнями метров. Все тела являются бескорневыми и имеют клиновидную или линзовидную форму [Долгушин и др., 2019]. Шалапский меланж представлен серпентинитовым и терригенным полимиктовым типом. Для серпентинитового меланжа характерны включения микрокварцитов, габбро, метабазальтов с геохимическими характеристиками ОІВ, в терригенном меланже преобладают блоки микрокварцитов, встречаются блоки известняков.

Все гипербазитовые тела представляют собой обособления серпентинитового меланжа в терригенном полимиктовом субдукционном меланже (рис. 1). Они ориентированы согласно сланцеватости вмещающих тонкозернистых граувакк, образующих матрикс терригенного меланжа. Одни из наиболее крупных и представительных гипербазитовых массивов – Тогул-Сунгайский и Верхне-Аламабайский, расположенные в пределах Тягун-Аламбайского ареала, и Белининский, приуроченный к Шалапскому ареалу [Пинус и др., 1958; Коновалова, Прусевич, 1977; Долгушин и др., 2019]. Тогул-Сунгайский массив имеет длину 12,5 км и ширину 0,5–1,7 км. Массив сложен преимущественно апогарцбургитовыми и аподунитовыми серпентинитами при подчиненной роли аподиопсидовых серпентинитов и габброидов. Верхне-Аламабайский вытянут в меридиональном направлении на 7 км при ширине от 0,75 до 2 км и занимает площадь 3,5 км². Массив сложен аподунитовыми и апогарцбургитовыми серпентинитами с небольшим количеством пироксенитов. Белининский массив представляет собой северную часть Белининско-Шалапского массива, который является самым крупным гипербазитовым массивом Салаира площадью около 50 км². Особенностью Белининского массива является широкое развитие габброидов, образующих блоки в серпентинитах. Серпентинизированные гипербазиты массива представлены дунитами, гарцбургитами, лерцолитами, вебстеритами и габбро-пироксенитами. Во всех массивах встречаются жилы хромититов. В крупных телах описаны постепенные переходы между дунитами и гарцбургитами, гарцбургитами и пироксенитами, пироксенитами и габбро.

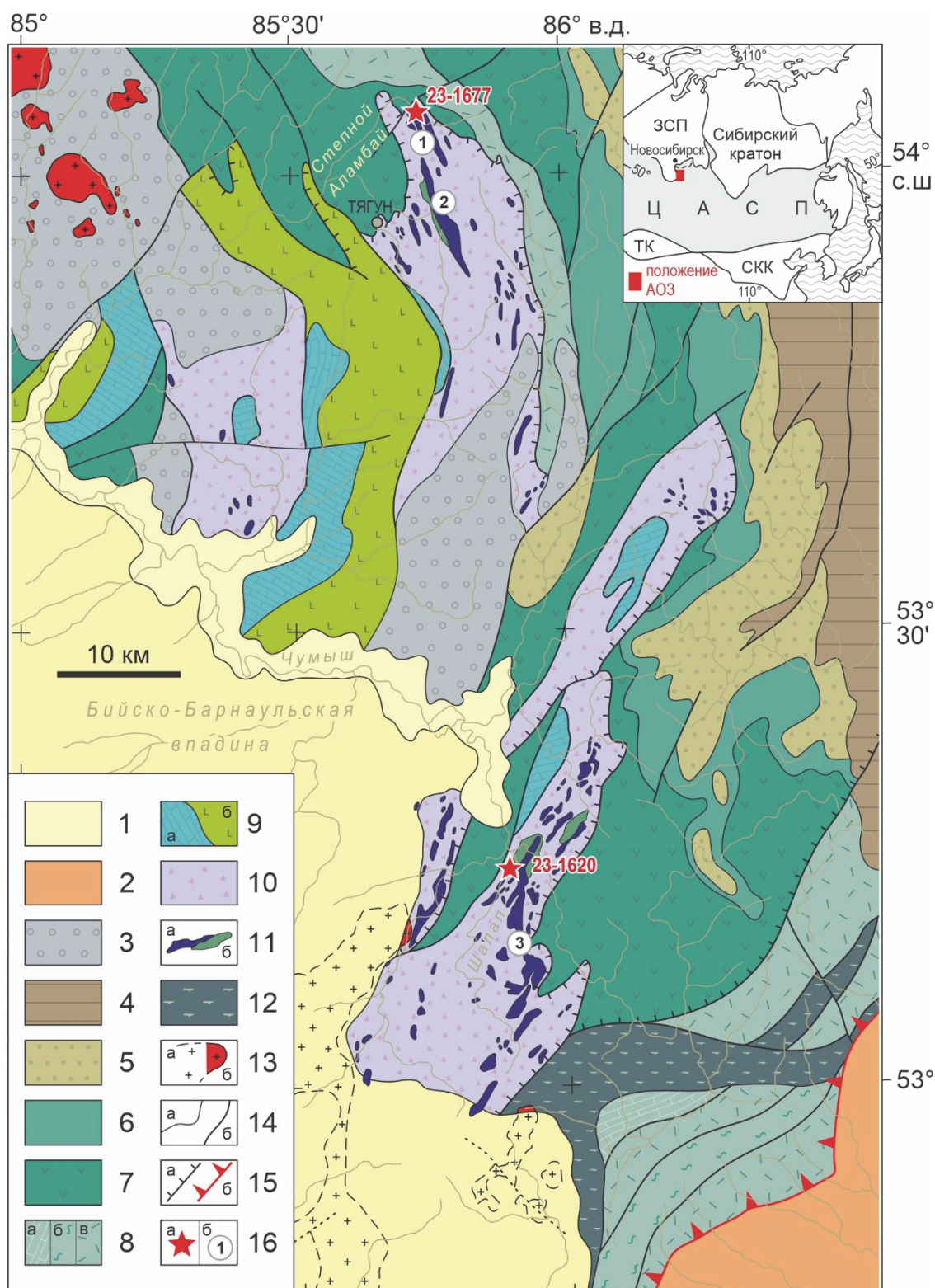


Рис. 1. Схема геологического строения Аламбайской офиолитовой зоны Салаира (АОЗ)

1 – четвертичные отложения; 2 – нижнемеловые отложения Неня-Чумышского прогиба; 3 – терригенные верхне-девонские и нижнекаменноугольные отложения Хмелевского прогиба; 4 – девонские известняки; 5 – карбонатно-терригенные отложения силура; 6 – ордовикские песчаники; 7 – кембрийско-нижнеордовикские туфы, лавы и песчаники островодужного происхождения; 8 – вулканогенные и осадочные породы Аламбайской зоны: а) известняки, б) углеродистые сланцы, алевролиты, микрокварциты, в) туфы, лавы и песчаники; 9 – а) карбонатный чехол палеоострова, б) базальты палеоокеанического острова; 10 – полимиктовый субдукционный меланж; 11 – нижнекембрийские офиолиты АОЗ: а) тектонизированные гипербазиты (дуниты, гарцбургиты, серпентиниты), б) габбро; 12 – раннекембрийские амфиболиты ангурепского метаморфического комплекса; 13 – нерасчлененные гранитные комплексы (позднедевонские, позднепермские); 14 – а) прочие границы, б) разломы; 15 – а) надвиги,

б) Баркинский надвиг, южная граница Салаира; 16 – а) точки отбора и номера отобранных образцов, б) участки расположения крупных гипербазитовых массивов: 1 – Верхне-Аламабайский; 2 – Тогул-Сунгайский; 3 – Белининско-Шалапский. Схема составлена А.В. Котляровым на основе экспедиционных исследований с использованием материалов из работ [Лоскутов, 1993; Бабин и др., 2007; Токарев и др., 2019а, 2019б; Zhimulev et al., 2024]

Fig. 1. Scheme of the geological structure of the Alambay ophiolite zone of Salair (AOZ)

1 – Quaternary deposits; 2 – Lower Cretaceous deposits of the Ninya-Chumysh basin; 3 – clastic Upper Devonian and Lower Carboniferous; 4 – Devonian limestones; 5 – carbonate-clastic Silurian; 6 – Ordovician sandstones; 7 – Cambrian-Lower Ordovician tuffs, lavas and sandstones of island-arc origin; 8 – volcanogenic-sedimentary rocks of the Alambay zone: a) limestones, b) carbonaceous shales, siltstones, microquartzites, c) tuffs, lavas and sandstones; 9 – a) carbonate cap of the paleoisland, b) basalts of oceanic islands; 10 – clastic subduction mélange; 11 – Lower Cambrian ophiolite complexes AOZ: a) tectonized ultramafic rocks (dunites, harzburgites, serpentinites (violet)) and b) gabbro (green); 12 – Early Cambrian amphibolites of the Angurep metamorphic complex; 13 – undivided granite complexes (Late Devonian, Late Permian); 14 – a) other borders, b) faults; 15 – a) other thrust, b) Barka thrust, southern border of Salair; 16 – a) sampling points and numbers of selected samples; b) areas of detail study: 1 – Verkhne-Alamabay, 2 – Togul-Sungai, 3 – Belininsko-Shalapsky. The scheme was compiled by A.V. Kotlyarov on the basis of field observations using data from [Loskutov, 1993; Babin et al., 2007; Tokarev et al., 2019a, 2019b; Zhimulev et al., 2024]

Образцы и методы исследования

Для изучения были выделены фракции хромита из речных и пролювиальных отложений в области распространения гипербазитовых массивов (табл. 1).

Образец (23-1677) отобран из пролювиальных отложений сухого лога, выработанного в пределах Белининского массива южного ареала АОЗ. Образец (23-1620) отобран из аллювиальных отложений верхнего течения реки Степной Аламбай, ниже по течению Верхне-Аламбайского гипербазитового массива, расположенного в северном ареале АОЗ. Хромит из

обоих образцов представлен хорошо ограненными октаэдрическими кристаллами, размер 0,2–2,0 мм.

Химический состав изучался методом микрозондового анализа в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск) на рентгеноспектральном микроанализаторе JXA-8100 JEOL (аналитик В.Н. Королук). Данные о составе хромшпинелидов Тогул-Сунгайского гипербазитового массива центрального Салаира взяты из работы [Лоскутов, 1993], данные по другим офиолитовым комплексам Алтае-Саянской складчатой области из работ [Simonov et al., 1994, 2021, 2022; Chen et al., 2023].

Таблица 1

Местоположение отобранных образцов. Хромистость и магнизиальность проанализированных популяций

Table 1

Location of the selected samples. Chromium and magnesium content of the analyzed populations

№	Координаты	Положение образца	Mg#	Cr#
23–1620	53°10'44.39"C 85°51'54.65"B	Кора выветривания в пределах Белининского массива (южный ареал АОЗ)	32–55	75–92
23–1677	54° 3'39.07"C 85°44'46.52"B	Аллювиальные отложения реки Степной Аламбай ниже Верхне-Аламбайского массива (северный ареал АОЗ)	45–68	54–86
Данные из [Лоскутов, 1993]	Приблизительно 53°56'54"C 85°47'01"B	Тогул-Сунгайский массив, серпентинизированные дуниты и гарцбургиты (северный ареал АОЗ)	35–60	52–88

Mg# = $Mg \times 100 / (Mg + Fe^{2+})$. Cr# = $Cr \times 100 / (Cr + Al)$.

Результаты

Представительные анализы составов хромовых шпинелидов приведены в табл. 2. Вариации составов изученных хромитов значительны. На классификационной диаграмме Н.В. Павлова хромшпинелиды из аллювиальных отложений на юге АОЗ относятся главным образом к хромитам, для них характерна низкая глиноземистость и высокая хромистость при незначительной роли окисного железа. Хромшпинелиды северного аре-

ала имеют более широкий спектр – от субферриалюмохромита до хромита (рис. 2). На диаграмме TiO_2 – Cr_2O_3 они разделяются на две группы: первая (I) с низкими содержаниями TiO_2 <0,4 мас. % и высокими концентрациями Cr_2O_3 и вторая с высокими содержаниями титана в интервале 1,20–2,19 мас. % (II). Сопоставление данных с перидотитами Тогул-Сунгайского массива показывает, что для него, так же, как и для первой группы, характерны высокие концентрации Cr_2O_3 в интервале 37,9–61,2 мас. % (рис. 3).

Таблица 2

Представительные анализы хромшпинелидов, мас. %

Table 2

Representative analyses of chrome spinels, wt. %

№ п/п	№ шлиховой пробы	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	NiO	ZnO	Сумма	Mg#	Cr#
Северный ареал															
1	23-1677	н.о.	0,09	66,57	0,15	7,07	15,30	0,34	9,23	н.о.	0,05	0,15	98,94	47,42	86,33
2		н.о.	1,98	46,89	0,19	12,23	27,09	0,24	11,17	н.о.	0,16	0,11	100,06	51,99	72,01
4		н.о.	0,10	57,02	0,18	12,83	19,16	0,27	10,32	н.о.	0,07	0,20	100,14	50,62	74,88
5		н.о.	1,41	47,96	0,13	14,78	21,18	0,18	14,07	н.о.	0,23	0,05	99,99	64,45	68,53
7		н.о.	1,98	46,17	0,16	14,38	23,40	0,15	13,72	н.о.	0,28	0,07	100,31	62,13	68,29
11		н.о.	0,25	46,82	0,19	16,65	25,31	0,36	9,77	н.о.	0,07	0,17	99,61	47,34	65,36
12		н.о.	1,20	44,38	0,13	17,54	23,97	0,24	12,66	н.о.	0,22	0,05	100,40	58,03	62,92
21		н.о.	0,16	57,66	0,21	10,48	21,32	0,33	9,92	н.о.	0,03	0,12	100,22	49,06	78,68
22		н.о.	1,37	46,02	0,15	16,05	21,36	0,17	14,39	н.о.	0,26	0,03	99,80	65,56	65,79
24		н.о.	1,76	43,98	0,15	15,09	27,27	0,22	11,08	н.о.	0,18	0,08	99,82	51,34	66,16
25		н.о.	0,04	62,66	0,26	6,76	20,73	0,40	8,93	н.о.	0,04	0,14	99,97	45,62	86,15
26		н.о.	0,12	55,64	0,15	12,74	17,63	0,43	11,70	н.о.	0,07	0,15	98,62	57,73	74,56
27		н.о.	0,27	55,12	0,29	11,20	22,71	0,34	9,66	н.о.	0,09	0,12	99,79	47,82	76,75
30		н.о.	1,80	39,67	0,24	18,93	26,82	0,18	12,26	н.о.	0,25	0,09	100,23	55,31	58,44
31		н.о.	2,02	36,36	0,24	21,11	27,03	0,21	12,63	н.о.	0,21	0,11	99,93	56,24	53,61
32		н.о.	0,39	49,92	0,18	15,39	23,98	0,37	9,61	н.о.	0,06	0,15	100,04	46,52	68,51
36		н.о.	1,97	39,05	0,28	18,79	27,64	0,22	11,91	н.о.	0,19	0,07	100,11	53,64	58,24
37		н.о.	0,16	58,23	0,15	11,01	19,83	0,31	10,41	н.о.	0,03	0,15	100,28	51,22	78,01
38		н.о.	1,35	46,07	0,14	16,12	21,34	0,16	14,22	н.о.	0,25	0,03	99,69	64,91	65,72
39		н.о.	1,79	43,68	0,17	14,66	27,18	0,25	10,76	н.о.	0,19	0,09	98,77	50,54	66,65
40		н.о.	1,50	47,56	0,17	16,41	18,79	0,15	15,07	н.о.	0,24	0,06	99,95	68,04	66,04
42		н.о.	1,83	44,02	0,15	14,99	27,35	0,23	11,08	н.о.	0,17	0,06	99,87	51,20	66,34
Южный ареал															
46	23-1620	н.о.	0,12	66,88	0,12	6,18	15,22	0,22	9,01	н.о.	0,06	0,06	97,86	46,73	87,90
47		н.о.	0,21	61,12	0,10	8,89	18,04	0,28	11,08	н.о.	0,08	0,15	99,96	54,86	82,18
48		н.о.	0,09	63,34	0,18	7,88	18,14	0,29	8,22	н.о.	0,07	0,11	98,32	42,51	84,36
49		н.о.	0,10	61,57	0,14	10,61	17,63	0,25	9,31	н.о.	0,07	0,14	99,82	46,52	79,57
50		н.о.	0,08	68,69	0,17	4,90	17,12	0,36	7,55	н.о.	0,05	0,16	99,09	39,68	90,39
51		н.о.	0,09	58,40	0,25	13,02	18,07	0,33	9,23	н.о.	0,05	0,20	99,66	45,92	75,06
52		н.о.	0,06	68,80	0,25	4,57	17,77	0,27	7,07	н.о.	0,05	0,21	99,05	37,31	90,99
53		н.о.	0,08	69,01	0,22	4,50	17,76	0,29	7,06	н.о.	0,07	0,19	99,17	37,23	91,14
54		н.о.	0,07	66,34	0,15	6,08	17,66	0,30	8,52	н.о.	0,04	0,19	99,35	44,00	87,98
55		н.о.	0,11	61,75	0,17	8,94	19,61	0,28	7,93	н.о.	0,09	0,16	99,05	40,67	82,25
56		н.о.	0,16	58,82	0,25	13,36	17,20	0,26	8,83	н.о.	0,06	0,19	99,11	44,04	74,71
57		н.о.	0,23	56,74	0,17	11,99	19,87	0,27	10,49	н.о.	0,07	0,11	99,94	51,36	76,05
58		н.о.	0,15	64,51	0,09	8,67	15,48	0,35	9,89	н.о.	0,05	0,11	99,30	49,91	83,30
59		н.о.	0,23	61,02	0,12	10,42	17,97	0,24	9,08	н.о.	0,04	0,15	99,28	45,52	79,70
60		н.о.	0,05	68,32	0,21	5,16	16,57	0,34	7,86	н.о.	0,08	0,14	98,73	41,29	89,88
61		н.о.	0,09	66,90	0,15	6,22	16,68	0,32	8,59	н.о.	0,03	0,18	99,15	44,41	87,83
62		н.о.	0,16	64,20	0,16	6,05	20,22	0,39	8,40	н.о.	0,02	0,17	99,78	43,19	87,68
63		н.о.	0,17	63,09	0,15	7,94	18,76	0,29	8,08	н.о.	0,04	0,14	98,66	41,60	84,20
64		н.о.	0,17	61,18	0,18	8,80	21,68	0,33	6,10	н.о.	0,06	0,19	98,67	31,82	82,34
65		н.о.	0,19	60,56	0,14	10,71	17,31	0,25	10,06	н.о.	0,05	0,16	99,43	50,03	79,13
67		н.о.	0,08	66,59	0,13	7,02	15,25	0,28	9,13	н.о.	0,05	0,19	98,73	47,05	86,43

Примечание. 1–42 – хромшпинелиды из аллювия р. Степной Аламбай; 46–67 – хромшпинелиды из пролювиальных отложений в пределах Белинского массива.

Note. 1–42 – chrome-spinels from the alluvium of the Steпноy Alambay River; 46–67 – chrome-spinels from proluvial deposits within the Belinsky Massif.

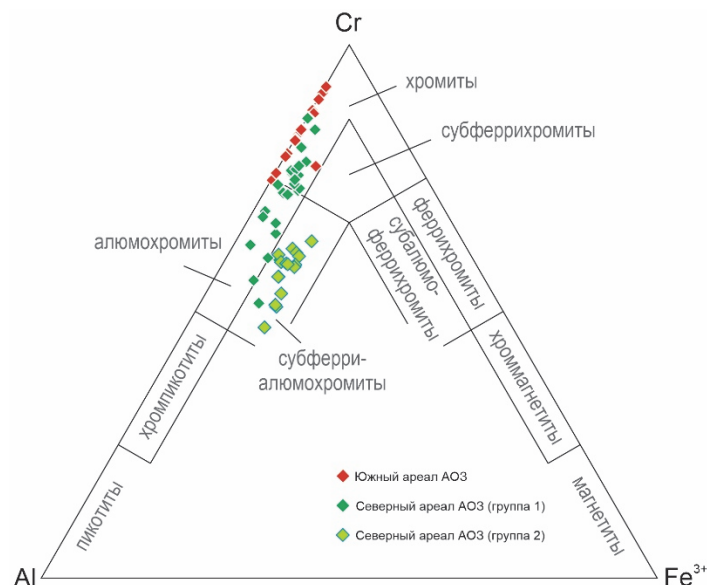


Рис. 2. Положение хромшпинелидов АОЗ на диаграмме Н.В. Павлова [Павлов, 1949]

Fig. 2. The position of the chrome-spinelides of AOZ in the diagram of N.V. Pavlov [Pavlov, 1949]

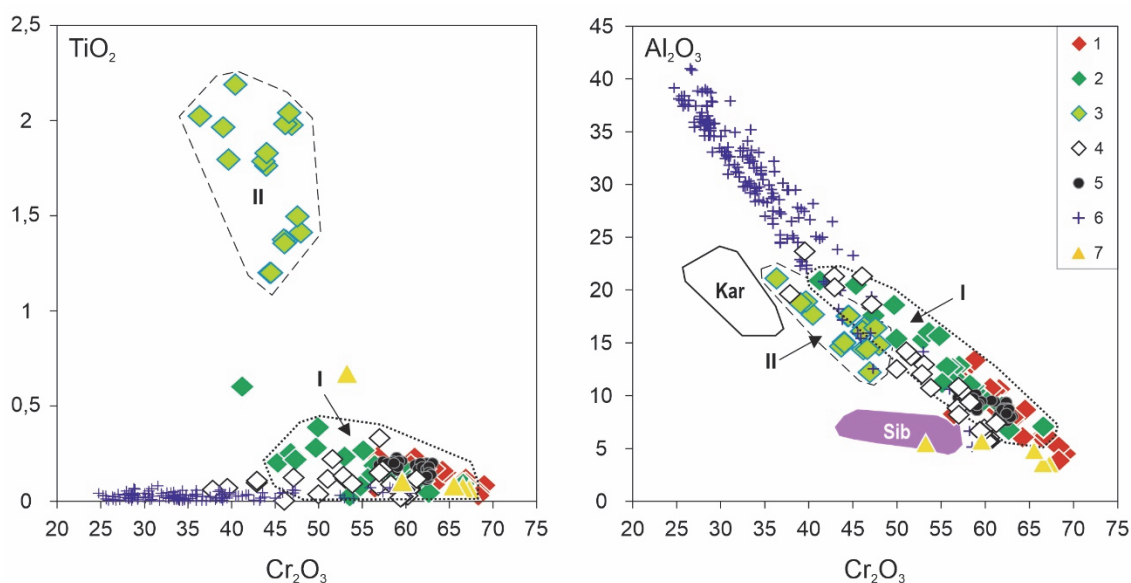


Рис. 3. Диаграммы $\text{TiO}_2\text{--Cr}_2\text{O}_3$ и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Cr}_2\text{O}_3$ (мас. %) для хромшпинелидов АОЗ

1 – хромшпинелиды из южного ареала АОЗ; 2, 3 – хромшпинелиды из аллювиальных отложений р. Степной Аламбай первой (I) и второй (II) группы (северный ареал АОЗ); 4 – хромшпинелиды из дунитов и серпентинитов Тогул-Сунгайского массива [Лоскутов, 1993]; 5 – рудные хромиты Кемпирсайского массива, Южный Урал [Симонов, 1993]; 6 – из перидотитов Чаган-Узунских офиолитов, Горный Алтай [Chen et al., 2023]; 7 – бонинитов Горного Алтая [Simonov et al., 1994].

Поля составов хромшпинелидов: из дунитов Карашатского массива, Южная Тува (Kar) и ультрабазитов юга Сибирской платформы (Sib, массивы Кондер, Инагли, Чад). Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ [Лоскутов, 1993; Симонов, 1993; Simonov et al., 1994, 2022; Chen et al., 2023]

Fig. 3. $\text{TiO}_2\text{--Cr}_2\text{O}_3$ and $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Cr}_2\text{O}_3$ (wt. %) diagrams for chrome-spinelides of AOZ

1 – chrome-spinelides from the southern area of AOZ; 2, 3 – chrome-spinelides from alluvial deposits of the Stepnoy Alambai River of the first (I) and second (II) groups (northern area of AOZ); 4 – chrome-spinelides from the dunites and serpentinites of Togul-Sungai massif [Loskutov, 1993]; 5 – ore chromites of Kempirsai massif, Southern Urals [Simonov, 1993]; 6 – from the peridotites of Chagan-Uzun ophiolites, Gorny Altai [Chen et al., 2023]; 7 – from the boninites of Gorny Altai [Simonov et al., 1994].

Fields of chrome-spinelides compositions from the dunites of: Karashat massif, South Tuva (Kar) and Siberian platform (Sib, Konder, Inagli, Chad massifs). The figure is based on original data including materials from the papers [Loskutov, 1993; Simonov, 1993; Simonov et al., 1994, 2022; Chen et al., 2023]

Обсуждение результатов

Сопоставление составов хромитов АОЗ с другими гипербазитовыми массивами. Составы хромитов северного и южного ареала АОЗ, для которых характерны наиболее высокие значения хрома, на вариационных диаграммах $\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cr}_2\text{O}_3$, $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{FeO}_{\text{tot}}$ соответствуют рудным хромитам Кемпирсайского массива Южного Урала и хромитам из вулканитов бонинитовых серий аккреционной призмы Кузнецко-Алтайской островной дуги (рис. 3, 4). Сопоставление данных по гипербазитам АОЗ с перидотитами Чаган-Узунского офиолитового массива Горного Алтая показывает, что для последнего характерно преобладание шпинелидов с более низким содержанием хрома. На диаграмме $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{FeO}_{\text{tot}}$ точки составов хромитов из перидотитов Тогул-Сунгайского и Чаган-Узунского массивов образуют вертикально вытянутое поле, расположенное в крест линии

тренда (синяя пунктирная линия), включающего составы хромшпинелидов (с расплавленными включениями) из океанических пород Центральной Атлантики и из дунитов Карашатского расслоенного массива Южной Тувы. Все изученные хромиты из четвертичных отложений АОЗ существенно отличаются от концентрически-зональных щелочно-ультраосновных массивов юга Сибирской платформы (Кондер, Инагли и Чад).

Геодинамические условия формирования перидотитов АОЗ по данным изучения хромшпинелидов. Интерпретация геодинамических условий образования гипербазитов по особенностям состава хромшпинелидов используется многими исследователями [Dick, Bullen, 1984; Bonatti, Michael, 1989; Савельева, 1987; Паланджан, 1992; Симонов, 1993; Simonov et al., 1994, 2016, 2021, 2022; Савельев и др., 2008; Савельев, 2013; Arai, 1994, 1992; Pearce et al., 2000; Kamenetsky et al., 2001; Горнова, 2011; Sklyarov et al., 2020; Симонов и др., 2024].

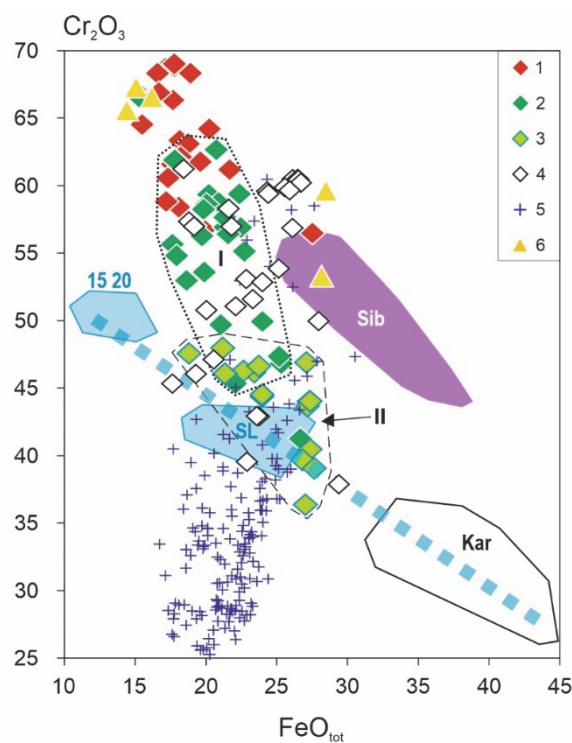


Рис. 4. Диаграмма $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{FeO}_{\text{tot}}$ (мас. %) для хромшпинелидов из четвертичных отложений АОЗ

1 – хромшпинелиды из четвертичных отложений р. Чумыш (южный ареал АОЗ); 2, 3 – хромшпинелиды из четвертичных отложений р. Степной Аламбай (северный ареал АОЗ); 4 – хромшпинелиды из дунитов и серпентинитов Тогул-Сунгайского массива [Лоскутов, 1993]; 5 – из перидотитов Чаган-Узунских офиолитов, Горный Алтай [Chen et al., 2023]; 6 – бонинитов Горного Алтая [Simonov et al., 1994]. Поля составов хромшпинелидов: из троктолитов района Сьерра-Леоне (SL) и из перидотитов зоны разлома 15°20' (15 20) в Центральной Атлантике [Simonov et al., 2022]

Fig. 4. $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{FeO}_{\text{tot}}$ (wt. %) diagram for the chrome-spinelides from the quaternary sediments of AOZ

1 – chrome-spinelides from quaternary deposits of the Chumysh River (southern area of AOZ); 2, 3 – chrome-spinelides from quaternary deposits of the Stepnoy Alambai River (northern area of the AOZ); 3 – chrome-spinelides from the dunites and serpentinites of Togul-Sungai massif [Loskutov, 1993]; 4 – from the peridotites of Chagan-Uzun ophiolites, Gorny Altai [Chen et al., 2023]; 5 – boninites of the Altai Mountains [Simonov et al., 1994]. Fields of chrome-spinelide compositions: from the troctolites of the Sierra Leone region (SL) and from the peridotites of the fault zone 15°20' (15 20) in the Central Atlantic [Simonov et al., 2022]

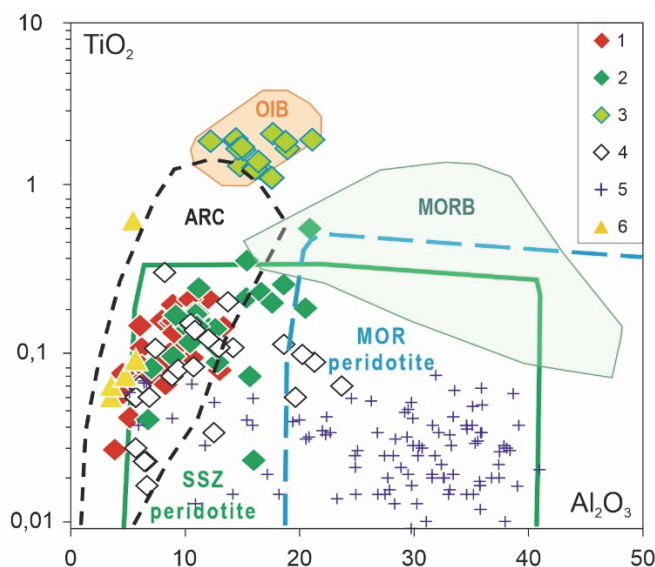


Рис. 5. Диаграмма $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ (мас. %) для хромшпинелидов из четвертичных отложений АОЗ

Поля составов хромшпинелидов: из перидотитов срединно-океанических хребтов (MOR peridotites) и надсубдукционных зон (SSZ peridotites), из плюмовых базальтов океанических островов (OIB) островных дуг (ARC) и срединно-океанических хребтов. Рисунок построен с использованием данных из работ [Kamenetsky et al., 2001]. Остальные условные обозначения см. на рис. 4

Fig. 5. $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ (wt. %) for the chrome-spinelides from the quaternary deposits of AOZ

Fields of chrome-spinelide compositions: from peridotites of mid-oceanic ridges (MORP) and subduction zones (SSZP), from plume basalts of oceanic islands (OIB), from island arcs (ARC) and mid-oceanic ridges. The figure is constructed using data from the works [Kamenetsky et al., 2001]. For the remaining symbols, go to Fig. 4

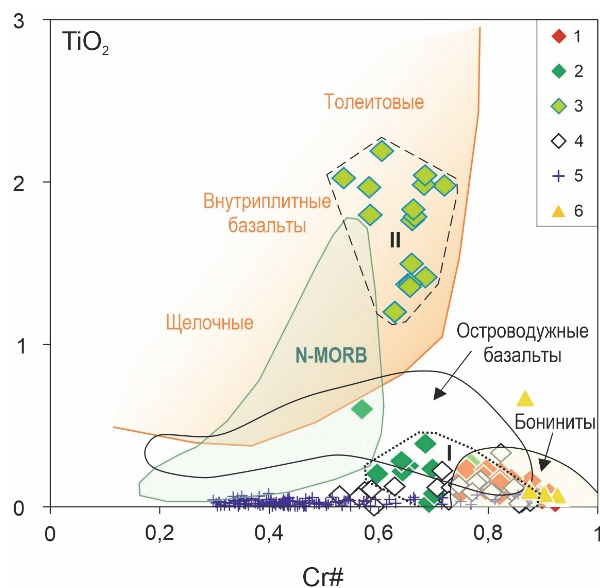


Рис. 6. Диаграмма $\text{TiO}_2 - \text{Cr\#}$ для хромшпинелидов из четвертичных отложений АОЗ

Поля составов хромшпинелидов из вулканических пород [Lee, 1999]. Остальные условные обозначения см. на рис. 4

Fig. 6. $\text{TiO}_2 - \text{Cr\#}$ diagram for the chrome-spinelides from the quaternary deposits of AOZ

Fields of chrome-spinelide compositions from volcanic rocks [Lee, 1999]. For the remaining symbols, go to Fig. 4

Применительно к гипербазитам из современных океанических структур известна закономерность, выраженная в том, что хромшпинелиды глубоководных желобов и основания островных дуг являются более хромистыми по сравнению с хромитами перидотитов срединно-океанических хребтов [Савельев и др., 2008].

Хромистость ($\text{Cr\#}$) определяется как процентное отношение хрома к сумме хрома и алюминия $\text{Cr\#} = 100(\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al}))$. Хромистость в пределах 30–50 % характерна для хромшпинели из перидотитов срединно-океанических хребтов и трансформных разломов. Высокая хромистость шпинели (50–80 %) типична

для ультраосновных реститов, драгированных в пределах глубоководных желобов и залегающих в основании островных дуг [Паланджан, 1992; Савельев, 2013]. Согласно работам [Dick, Bullen, 1984], наиболее деплетированные перидотиты с хромистостью более 60 % встречаются в литосфере преддуговых блоков.

На диаграммах $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{TiO}_2 - \text{Cr\#}$ составы хромшпинелидов из реки Степной Аламбай (северный ареал АОЗ) образуют две группы. Группа высокотитанистых хромитов из аллювия реки Степной Аламбай (3) была сформирована при участии плюмового источника. Она представлена компактным полем с максимальными содержаниями титана (1,0–2,2 мас. %), перекрывающимися с данными по шпинелям из плюмовых базальтов океанических островов (ОИБ). Хромшпинелиды с низкими содержаниями титана на диаграмме $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ соответствуют мантийным перидотитам субдукционных зон (SSZ) и

хромитам из островодужных вулканических комплексов (ARC). На диаграмме $\text{TiO}_2 - \text{Cr\#}$ составы этих хромшпинелидов также частично располагаются в полях островодужных базальтов или бонинитов (см. рис. 5, 6).

В речные отложения, зерна высокотитанистого хромита попали из базальтов ОИБ-типа, слагающих крупные тектонические блоки и пластины в Верхне-Аламбайском гипербазитовом массиве и в терригенном субдукционном меланже. Акцессорный хромит в виде тугоплавких включений был захвачен и вынесен базальтовой магмой из плюмового мантийного источника. Подобного состава хромиты не выявлены в Тогул-Сунгайском и Белинском массивах, где опробовались коренные гипербазиты или пролювиальные отложения в пределах гипербазитовых массивов, а блоки ОИБ-базальтов отсутствуют.

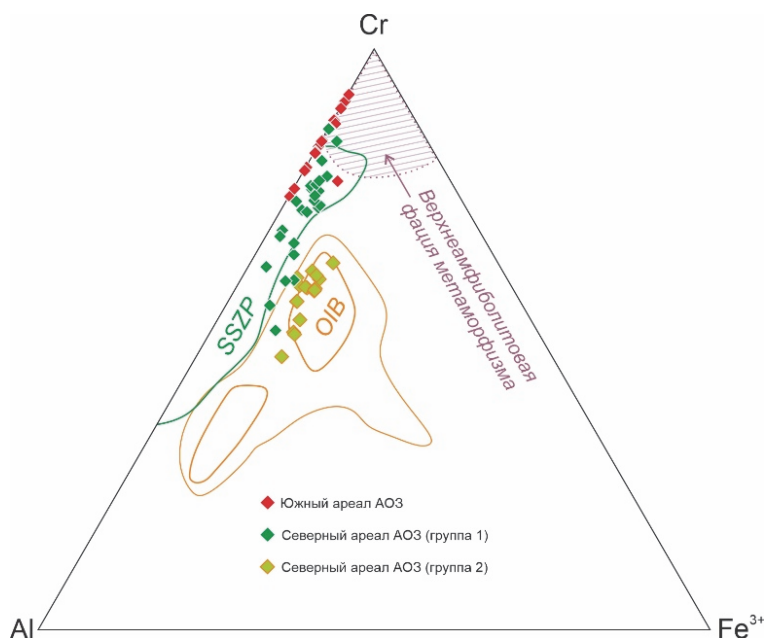


Рис. 7. Положение хромшпинелидов из четвертичных отложений АОЗ на диаграмме $\text{Al}-\text{Cr}-\text{Fe}^{3+}$

Поля составов шпинелей из различных геодинамических обстановок по материалам [Parkinson et al., 1998; Barnes, Roeder, 2001]. Поле верхнеамфиболитовой фации метаморфизма дано по источнику [Muntener et al., 2000]

Fig. 7. The position of the chrome-spinels from the quaternary deposits of AOZ in the $\text{Al}-\text{Cr}-\text{Fe}^{3+}$ diagram

Fields of spinel compositions from various geodynamic settings are based on data from [Parkinson et al., 1998; Barnes, Roeder, 2001]. Field of Upper-amphibolite facies are given by the source [Muntener et al., 2000]

На треугольной диаграмме $\text{Al}-\text{Cr}-\text{Fe}^{3+}$ точки составов хромшпинелидов северного и южного ареалов АОЗ образуют вытянутое поле вдоль стороны $\text{Al}-\text{Cr}$, с диапазоном хромистости от 65 до 92 %, и попадают в поля хромшпинелей из примитивных островных дуг (SSZP). При этом для южного ареала АОЗ характерно наличие более хромистой хромшпинели (75–92 %). Формирование высокохромистых зерен вероятно

происходило за счет выноса Al_2O_3 при метаморфизме перидотитов в условиях максимальных температур амфиболитовой фации [Muntener et al., 2000]. Применительно к шпинелям из лавовых фаций (группа 2) точки составов укладываются в максимум плотности значений поля базальтов океанических островов (см. рис. 7).

На диаграмме $\text{Cr\#} - \text{Mg\#}$ хромшпинелиды из обоих ареалов образуют единый тренд роста $\text{Cr\#}$ и падения

магнезиальности. По этим характеристикам хромиты из ультрабазитов офиолитов Салаира резко отличаются от хромшпинелидов из ультраосновных пород Чаган-Узунского массива (Горный Алтай) и из гипербазитов Атлантического океана, располагаясь в поле хромитов из перидотитов фундамента островных дуг (рис. 8).

Высокие значения хромистости шпинелей и их близость по составу к хромитам из бонинитов можно объяснить воздействием на материнские перидотиты бонинитовых расплавов на начальной стадии субдукции. Анализ состава хромшпинелидов АОЗ показал, что преобладающая часть точек с повышенной хромистостью минерала соответствует надсубдукционным офиолитам, популяция, связанная с базальтами

ОИВ представлена высокотитанистой хромшпинелью, хромшпинелиды с составами типичными для срединно-океанических хребтов выявлены не были.

Обстановка формирования АОЗ. Полученные данные по составам хромшпинели из гипербазитов хорошо согласуются с геохимическими данными по базальтам АОЗ. Базальты АОЗ представляют собой внутримитные образования океанических островов (ОИВ), а амфиболиты ангурепского комплекса и габбро из серпентинитового меланжа являются островодужными породами [Zhimulev et al., 2024]. Таким образом, пород с геохимическими или минералогическими характеристиками срединно-океанических хребтов не выявлено ни в базитовых, ни в гипербазитовых ассоциациях АОЗ.

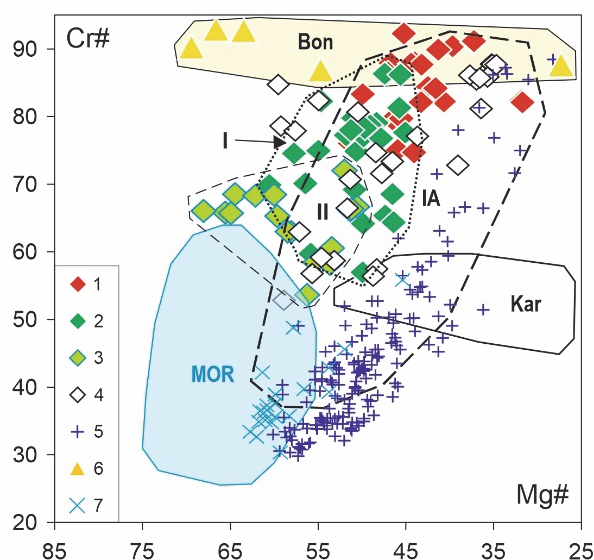


Рис. 8. Диаграмма Cr# – Mg# для хромшпинелидов из четвертичных отложений АОЗ

1 – хромшпинелиды из четвертичных отложений южного ареала АОЗ; 2,3 – хромшпинелиды из четвертичных отложений северного ареала АОЗ; 4 – хромшпинелиды из дунитов и серпентинитов Тогул-Сунгайского массива [Лоскутов, 1993]; 5 – из перидотитов Чаган-Узунских офиолитов, Горный Алтай [Chen et al., 2023]; 6 – бонинитов Горного Алтая [Simonov et al., 1994]; 7 – гарцбургитов Чаган-Узунского массива [Simonov et al., 2021].

Поля составов хромшпинелидов: из дунитов Карашатского массива (Kar); из ультрабазитов Срединно-Атлантического хребта (MOR), из перидотитов фундамента островных дуг и глубоководных желобов (IA) [Симонов и др., 2024], Bon – хромиты из бонинитов Горного Алтая [Simonov et al., 1994]. $Cr\# = Cr \cdot 100 / (Cr + Al)$. $Mg\# = Mg \cdot 100 / (Mg + Fe^{2+})$. Рисунок построен на основе оригинальных данных и материалов из работ [Паланджан, 1992; Simonov et al., 2021]

Fig. 8. Cr# – Mg# Diagram for the chrome-spinelides from the quaternary deposits of AOZ

1 – chrome-spinelides from the quaternary deposits of the southern area of the AOZ; 2, 3 – chrome-spinelides from the quaternary deposits of the northern area of the AOZ; 3 – chrome-spinelides from the dunites and serpentinites of Togul-Sungai massif [Loskutov, 1993]; 4 – from peridotites of Chagan-Uzun ophiolites, Gorny Altai [Chen et al., 2023]; 5 – from Gorny Altai boninites [Simonov et al., 1994]; 6 – Chagan-Uzun massif harzburgites [Simonov et al., 2021].

Fields of chrome-spinelide compositions: from the dunites of Karashat massif (Kar); from the ultrabases of the Mid-Atlantic ridge (MOR), from the peridotites of the basement of island arcs and trenches (IA) [Simonov et al., 2024], Bon – chromites from the boninites of the Altai Mountains [Simonov et al., 1994]. $Cr\# = Cr \cdot 100 / (Cr + Al)$. $Mg\# = Mg \cdot 100 / (Mg + Fe^{2+})$. The figure is based on the original data and materials from the works [Palanjyan, 1992; Simonov et al., 2021]

В последние десятилетия установлено, что большая часть офиолитовых зон складчатых областей об-

разована надсубдукционными офиолитами, представляющими собой образования преддугового блока

океанической литосферы и ранних этапов островодужного магматизма, включая магматизм бонинитового типа [Stern et al., 2012; Condie, Stern, 2023].

Образование преддугового блока связывается с процессами заложения субдукционной зоны в результате разрыва океанической литосферы вдоль границы между литосферными блоками различного возраста, плотности и мощности (например, трансформного разлома) и последующего отката назад (roll-back) зоны глубоководного желоба. Этот процесс на первой стадии приводит к локальному спредингу, образующему протопреддуговой блок из новообразованной океанической коры с базальтами типа MORB, затем, по мере начала погружения и частичного плавления субдуцирующей плиты, формируются бонинитовые вулканы и островодужные толеиты, вместе составляющие породную ассоциацию преддугового блока и энсиматической островной дуги. Как показано в работе [Stern et al., 2012] фрагменты литосферы преддуговых блоков имеют наибольшие возможности быть обдуцированы и войти в состав континентальной земной коры при смене тектонического режима субдукции с растяжения на сжатие. Применительно к АОЗ результаты изучения состава хромитов, в совокупности с ранее проведенными исследованиями [Zhimulev et al., 2024] позволяют заключить, что формирование гипербазитов АОЗ связано с заложением Салаирского сектора Алтае-Кузнецкой островодужной системы, а их тектоническая экструзия в аккреционный клин произошла в результате столкновения островной дуги с цепью океанических островов, в рамках модели, примененной ранее к офиолитовым зонам Горного Алтая [Buslov, 1996; Dobretsov et al., 2004; Safonova et al., 2004].

Металлогенические следствия. Известно, что высокая степень частичного плавления мантии, характерная для зон субдукции, производит бонинитовую магму, обогащенную элементами платиновой группы (ЭПГ) [Prichard, Brough, 2009]. В хромититах из кумулятов бонинитовой магмы ЭПГ могут образовывать рудные концентрации. Платиноиды были выявлены в коренном залегании в гипербазитах Тогул-Сунгайского массива, а также в россыпях АОЗ, пространственно связанных с выходами гипербазитов (россыпи рек Иродов Лог, Таловка), а хромититы То-

гул-Сунгайского массива содержат повышенные содержания ЭПГ [Гусев, Кукоева, 2011]. Установление высокой степени деплетирования мантийных пород АОЗ указывает на мобильность ЭПГ в магматическом процессе и возможность образования рудных концентраций в коренном залегании и в россыпях, пространственно связанных с различными массивами АОЗ.

Заключение

Хромшпинель из Белининского массива южного ареала АОЗ характеризуется повышенными значениями хромистости (75–92) и магнезиальности (32–55), типичными для высокодеплетированной литосферной мантии под островными дугами. На классификационных диаграммах, используемых для палеотектонических реконструкций, составы хромшпинели Белининского массива лежат в пределах полей «островные дуги», «преддуговые» или «бонинитовые».

Хромшпинель из северного ареала АОЗ, включающего Верхне-Аламбайский и Тогул-Сунгайский массивы, образует две популяции зерен. Популяция зерен с повышенным содержанием титана (> 1 %), соответствующая мантийным породам из зон плюмового внутриплитного магматизма, получена только из аллювия реки Степной Аламбай, ниже блока базальтов с геохимическими характеристиками ОИВ. Основная популяция, представленная высокохромистыми низкотитанистыми зернами, характерна как для Верхне-Аламбайского так и для Тогул-Сунгайского массивов. Хромшпинель данной популяции также характерна для гипербазитов надсубдукционных обстановок (глубоководный желоб, преддуговой блок, островная дуга).

Гипербазиты АОЗ представляют собой фрагменты литосферной мантии Салаирского сегмента Алтае-Кузнецкой островодужной системы, их формирование произошло на стадии заложения зоны субдукции и островной дуги, о чем свидетельствует состав хромшпинели, типичный для бонинитовых серий, и современные тектонические модели [Stern et al., 2012], а эксгумация в аккреционную призму явилась результатом столкновения островодужной системы с аламбайским палеосимаунтом.

Надсубдукционная природа гипербазитов АОЗ свидетельствует о возможности обнаружения месторождений платиноидов, связанных с массивами зоны.

Список источников

Бабин Г.А., Гусев Н.И., Юрьев А.А., Уваров А.Н., Дубский В.С., Черных А.И., Шигрев А.Ф., Чусовитина Г.Д., Кораблева Т.В., Косякова Л.Н., Ляпунов И.А., Митрохин Д.В., Бычков А.И., Некипелый В.Л., Савина Ж.Н., Егоров А.С., Шор Г.М., Алексеенко В.Д., Булычев А.В., Радюкевич Н.М., Николаева Л.С., Богомолов В.П., Шипов Р.В., Суслова С.В., Сазонов В.А., Юрьева В.В., Хлебникова Т.В., Кондрашова А.К., Терета Н.Ф. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-45 – Новокузнецк. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2007. 665 с.

Ветрова Н.И., Ветров Е.В., Летникова Е.Ф. Петрологическая модель формирования кислых вулканических пород печеркинской свиты (северо-западная часть Салаирского кряжа) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2022. Т. 67, № 4.

- Горнова М.А.** Геохимия и петрология надсубдукционных перидотитов : дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. 2011.
- Гусев А.И., Кукоева М.А.** Платина и платиноиды в офиолитах Салаира, Алтая и Горной Шории // Успехи современного естествознания. 2011. Т. 11. С. 20–24.
- Долгушин С.С., Жабин В.В., Лоскутов И.Ю., Садур О.Г.** Перспективы создания базы хромового сырья Сибири. Новосибирск : СНИИГиМС, 2019. 239 с.
- Жимулев Ф.И., Котляров А.В., Травин А.В., Фидлер М.А., Хуурак А.А.** Шалапский меланж Аламбайской офиолитовой зоны Салаира (северо-запад Центрально-Азиатского складчатого пояса), геологическое строение и особенности состава амфиболитов и зеленокаменных базальтов // Геодинамика и тектонофизика. 2024. Т. 15? № 3. С. 757. doi[^] 10.5800/GT-2024-15-3-0757
- Зоненшайн Л.П.** Тектоника литосферных плит территории СССР. М. : Недра, 1990. 328 с.
- Коновалова Н.А., Прусевич О.Г.** Дунит-гарцбургитовые массивы Кузнецкого Алатау и Салаира (Геологические особенности, условия формирования, хромитоносность). Новосибирск, 1977. 166 с.
- Лоскутов И.Ю.** Альпинотипные гипербазиты Центрального Салаира : дис. ... канд. геол.-минерал. наук. 1993.
- Павлов Н.В.** Химический состав хромшпинелидов в связи с петрографическим составом пород ультраосновных интрузивов. 1949. 88 с.
- Паланджан С.А.** Типизация мантийных перидотитов по геодинамическим обстановкам формирования. Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 1992. 104 с.
- Пинус Г.В., Кузнецов В.А., Волохов И.М.** Гипербазиты Алтае-Саянской складчатой области. М. : Госгеолтехиздат, 1958. 295 с.
- Савельев Д.Е.** Состав акцессорных хромшпинелидов из ультрабазитов Южного Урала как отражение геодинамической обстановки формирования массивов // Вестник Пермского университета. Геология. 2013. Т. 1, № 18. С. 17–25.
- Савельев Д.И., Сначев В.И., Савельева Е.Н., Бажин Е.А.** Геология, петрогеохимия и хромитоносность габбро-гипербазитовых массивов Южного Урала. Уфа : ДизайнПолиграфСервис, 2008. 320 с.
- Савельева Г.Н.** Габбро-ультрабазитовые комплексы офиолитов Урала и их аналоги в современной океанической коре. М. : Наука. 1987. 246 с.
- Симонов В.А.** Петрогенезис офиолитов (термобарогеохимические исследования). Новосибирск : ОИГМ СО РАН, 1993. 247 с.
- Симонов В.А., Котляров А.В., Куликова А.В.** Условия формирования палеоокеанических комплексов Алтае-Саянской складчатой области/ Новосибирск : Сибирское отделение РАН, 2024. 309 с. doi[^] 10.53954/9785605099505
- Токарев В.Н., Куртигешев В.С., Ефремова Н.М.** Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000 (издание второе). Серия Кузбасская. Лист N-45-XXVI (Целинное): объяснительная записка. М. : Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2019а. 233 с.
- Токарев В.Н., Шатилова Г.А., Котик О.П.** Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Издание второе. Серия Кузбасская. Лист N-45-XIV (Гурьевск). Объяснительная записка. СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2002. 188 с.
- Токарев В.Н., Юрьев А.А., Косякова Л.Н., Глаас Г.А.** Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Издание второе. Серия Кузбасская. Лист N-45-XXI (Проклопьевск): объяснительная записка. СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2019б. 210 с.
- Фомичев В.Д., Алексеева Л.Э.** Геологический очерк Салаира. М. : Госгеолтехиздат, 1961. 218 с.
- Шокальский С.П., Бабин Г.А., Владимиров А.Г., Борнсов С.М., Гусев Н.И., Токарев В.Н., Зыбин В.А., Дубский В.С., Мурзин О.В., Кривчиков В.А., Крук Н.Н., Руднев С.Н., Федосеев Г.С., Титов А.В., Сергеев В.П., Лихачёв Н.Н., Мамлин А.Н., Котельников Е.И., Кузнецов С.А., Зейферт Л.Л., Яшин В.Д., Носков Ю.С., Уваров А.Н., Федак С.И., Гусев А.И., Выставной С.А.** Корреляция магматических и метаморфических комплексов западной части Алтае-Саянской складчатой области. Новосибирск : Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2000. 188 с.
- Arai S.** Chemistry of chromian spinel in volcanic rocks as a potential guide to magma chemistry // Mineral Mag. 1992. V. 56. P. 173–184.
- Arai S.** Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation // Chemical Geology. 1994. V. 113. P. 191–204.
- Barnes S.J., Roeder P.L.** The Range of Spinel Compositions in Terrestrial Mafic and Ultramafic Rocks // Journal of Petrology. 2001. V. 42, No. 12. С. 2279–2302. doi: 10.1093/petrology/42.12.2279
- Berzin N.A., Coleman R., Dobretsov N.L., Zonenshain L.P., Xiao X., Chang E.Z.** Geodynamic map of the western part of the paleo-Asian ocean // Russian Geology and Geophysics. 1994. V. 35. P. 8–28.
- Bonatti E., Michael P.J.** Mantle peridotites from continental rifts to ocean basins to subduction zones // Earth and Planetary Science Letters. 1989. V. 91, No. 3–4. P. 297–311. doi: 10.1016/0012-821X(89)90005-8
- Buslov M.M.** Intrasubduction collision and role in the evolution of an accretionary wedge: The Kurai zone of Gorny Altai // Russian Geology and Geophysics. 1996. V. 37. P. 74–84.
- Chen M., Zheng J., Dai H.-K., Xiong Q., Sun M., Buslov M.M., Zhou X., Liu J.** Boninitic melt percolation makes depleted mantle wedges rich in silica // Geology. 2023. V. 51, No. 8. P. 791–795. doi: 10.1130/G51050.1
- Condie K.C., Stern R.J.** Ophiolites: Identification and tectonic significance in space and time // Geoscience Frontiers. 2023. V. 14, No. 6. P. 101680.
- Dick H.J.N., Bullen T.** Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1984. V. 86. P. 54–76.
- Dobretsov N.L., Buslov M.M., Yu U.** Fragments of oceanic islands in accretion–collision areas of Gorny Altai and Salair, southern Siberia, Russia: early stages of continental crustal growth of the Siberian continent in Vendian–Early Cambrian time // Journal of Asian Earth Sciences. 2004. V. 23, No. P. 673–690. doi: 10.1016/S1367-9120(03)00132-9
- Flower M.F.J.** Ophiolites, historical contingency, and the Wilson cycle // Ophiolite Concept Evol. Geol. Thought. 2003. V. 373. Boulder, Colorado : The Geological Society of America. P. 111–135. doi: 10.1130/0-8137-2373-6.111
- Kamenetsky V.S., Crawford A.J., Meffre S.** Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks // Journal of Petrology. 2001. V. 42, No. 4. P. 655–671.

- Lee Y.I. Geotectonic significance of detrital chromian spinel: a review // *Geosciences Journal*. 1999. V. 3, No. 1. P. 23–29. doi: 10.1007/BF02910231
- Muntener O., Hermann J., Tromsdorff V. Cooling history and exhumation of lower-crustal granulite and upper mantle (Malenco, Eastern Central Alps) // *Journal of Petrology*. 2000. V. 41 (2). P. 175–200.
- Parkinson I.J., Pearce J.A. Peridotites from the Izu–Bonin–Mariana forearc (ODP leg 125): evidence for mantle melting and melt–mantle interaction in the supra-subduction zone setting // *Journal of Petrology*. 1998. V. 39. P. 1577–1618.
- Pearce J.A., Barker P.F., Edwards S.J., Parkinson I.J., Leat P.T. Geochemistry and tectonic significance of peridotites from the South Sandwich arc-basin system, South Atlantic // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2000. V. 139, No. 1. P. 36–53. doi: 10.1007/s004100050572
- Prichard H.M., Brough C.P. Potential of ophiolite complexes to host PGE deposits // *New Dev. Magmat. Ni-Cu PGE Depos.* Geological publishing house. ed. Beijing. 2009. P. 277–290.
- Safonova I.Yu., Buslov M.M., Iwata K., Kokh D.A. Fragments of Vendian–Early Carboniferous Oceanic Crust of the Paleo-Asian Ocean in Foldbelts of the Altai–Sayan Region of Central Asia: Geochemistry, Biostratigraphy and Structural Setting // *Gondwana Research*. 2004. V. 7, No. 3. P. 771–790. doi: 10.1016/S1342-937X(05)71063-7
- Simonov V., Vasil'ev Yu.R., Kotlyarov A., Nikolenko E., Alifirova T., Sharygin V., Aulbach S. Physicochemical Parameters of Ultrabasic Magmatic Systems of the Northeastern Siberian Platform (Data on Melt Inclusions in Chromian Spinel) // *Russian Geology and Geophysics*. 2022. V. 63. P. 1354–1373. doi: 10.2113/RGG20204313
- Simonov V.A., Dobretsov N.L., Buslov M.M. Boninite series in structures of the Paleo-Asian ocean // *Russian Geology and Geophysics*. 1994. V. 35, No. 7–8. P. 182–199.
- Simonov V.A., Kulikova A.V., Kotlyarov A.V., Kolotilina T.B. Paleogeodynamics of magmatic and metamorphic processes of formation of ultramafic rocks of Chagan-Uzun massif (ophiolites of Gorny Altai) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2021. V. 12, No. 4. P. 826–850. doi: 10.5800/GT-2021-12-4-0557
- Simonov V.A., Puchkov V.N., Prikhod'ko V.S., Stupakov S.I., Kotlyarov A.V., Karmanov N.S., Stepanov A.S. Physicochemical conditions of crystallization of dunites of the Nizhnii Tagil Pt-bearing massif (Middle Urals) // *Russian Geology and Geophysics*. 2016. V. 57, No. 6. P. 868–890.
- Sklyarov E.V., Lavrenchuk A.V., Fedorovsky V.S., Pushkarev E.V., Semenova D.V., Starikova A.E. Dismembered Ophiolite of the Olkhon Composite Terrane (Baikal, Russia): Petrology and Emplacement // *Minerals*. 2020. V. 10, No. 4. P. 305. doi: 10.3390/min10040305
- Stern R.J., Reagan M., Ishizuka O., Ohara Y., Whattam S. To understand subduction initiation, study forearc crust: To understand forearc crust, study ophiolites // *Lithosphere*. 2012. V. 4, No. 6. P. 469–483.
- Vetrova N.I., Vetrov E.V., Letnikova E.F., Soloshenko N.G. Age of the Kinterep formation of the Northwestern Salair: chemostratigraphy and U–Pb zircon dating // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022. doi: 10.5800/GT-2022-13-2s-0597
- Zhimulev F.I., Pospeeva E.V., Novikov I.S., Potapov V.V. Deep structure of the Salair fold-nappe terrane (NW CAOБ) according to magnetotelluric sounding // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2021. V. 12, No. 1. P. 125–138. doi: 10.5800/GT-2021-12-1-0517
- Zhimulev F.I., Pospeeva E.V., Potapov V.V., Novikov I.S., Kotlyarov A.V. Salair–Gornaya Shoria Junction (Northwestern Central Asian Orogenic Belt): Deep Structure and Tectonics from Magnetotelluric Data // *Russian Geology and Geophysics*. 2023. V. 64, No. 5. P. 558–570. doi: 10.2113/RGG20224479

References

- Babin G.A., Gusev N.I., Yur'ev A.A., Uvarov A.N., Dubskiy V.S., Chernykh A.I., Shchigrev A.F., Chusovitina G.D., Korableva T.V., Kosyakova L.N., Lyapunov I.A., Mitrokhin D.V., Bychkov A.I., Nekipelyy V.L., Savina Zh.N., Egorov A.S., Shor G.M., Alekseenko V.D., Bulychev A.V., Radyukevich N.M., Nikolaeva L.S., Bogomolov V.P., Shipov R.V., Suslova S.V., Sazonov V.A., Yur'eva V.V., Khlebnikova T.V., Kondrashova A.K., Tereda N.F. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Altae-Sayanskaya. List N-45 - Novokuznetsk. Ob'yasnitel'naya zapiska* [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Altae-Sayan Series. List N-45 - Novokuznetsk. Explanatory Note]. St. Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2007. 665 p. In Russian
- Vetrova N.I., Vetrov E.V., Letnikova E.F. *Petrologicheskaya model' formirovaniya kislykh vulkanitov pecherkinskoy svity (severo-zapadnaya chast' Salairskogo kryazha)* [Petrological model of the formation of acidic volcanics of the Pechorkinskaya suite (northwestern part of the Salair ridge)] // *Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences* [Bulletin of St. Petersburg University]. 2022. V. 67. No. 4. pp. 591–613. In Russian
- Gornova M.A. *Geokhimiya i petrologiya nadsubduksionnykh peridotitov* [Geochemistry and petrology of suprasubduction peridotites]. Diss. dokt. geol.-min. nauk. 2011. 300 p. In Russian
- Gusev A.I., Kukoeva M.A. *Platina i platioidy v ofiolitakh Salaira, Altaya i Gornoy Shorii* [Platinum and platinoids in ophiolites of Salair, Altai and Mountain Shoria] // *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in modern natural science]. 2011. V. 11. pp. 20–24. In Russian
- Dolgushin S.S., Zhabin V.V., Loskutov I.Yu., Sadur O.G. *Perspektivy sozdaniya bazy khromovogo syr'ya Sibiri* [Prospects for the creation of a chrome raw material base in Siberia]. Novosibirsk: SNIIGIMS, 2019. 239 p. In Russian
- Zonenshayn L.P. *Tektonika litosfernykh plit territorii SSSR* [Tectonics of lithospheric plates in the USSR]. Moscow: Nedra, 1990. 328 p. In Russian
- Zhimulev F.I., Kotlyarov A.V., Travin A.V., Fidler M.A., Khuurak A.A. The Shalap mélange of the Alambay Salair ophiolite zone (north-west of the Central Asian orogenic belt), geological structure and features of the amphibolites and greenstone basalt composition // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2024. T. 15. In Russian
- Konovalova N.A., Prusevich O.G. *Dunit-gartsburgitovye massivy Kuznetskogo Alatau i Salaira (Geologicheskie osobennosti, usloviya formirovaniya, khromitonosnost')* [Dunit-harzburgite massifs of the Kuznetsk Alatau and Salair (Geological features, formation conditions, chromite content)]. Novosibirsk. 1977. 166 p. In Russian
- Loskutov I.Yu. *Al'pinotipnye giperbazity Tsentral'nogo Salaira* [Alpine-type hyperbasites of Central Salair]. Dissertatsiya k.g.-m.n. Novosibirsk. 1993. In Russian

- Pavlov N.V. *Khimicheskiy sostav khromshpinelidov v svyazi s petrograficheskim sostavom porod ul'traosnovnykh intruzivov* [Chemical composition of chrome spinels in relation to the petrographic composition of ultramafic intrusive rocks]. 1949. 88 p. In Russian
- Palandzhan S.A. *Tipizatsiya mantiynykh peridotitov po geodinamicheskim obstanovkam formirovaniya* [Typification of mantle peridotites based on geodynamic formation settings]. Magadan: SVKNII DVO RAN, 1992. 104 p. In Russian
- Pinus G.V., Kuznetsov V.A., Volokhov I.M. *Giperbazity Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti* [Ultrabasites of the Altai-Sayan folded region]. Moscow: Gosgeoltekhizdat. 1958. 295 p. In Russian
- Savel'ev D.E. *Sostav aktsessornykh khromshpinelidov iz ul'trabazitov Yuzhnogo Urala kak otrazhenie geodinamicheskoy obstanovki formirovaniya massivov* [Composition of accessory chromospinelldes from ultrabasites of the Southern Urals as a reflection of the geodynamic environment of massif formation] // *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya* [Perm University Bulletin. Geology]. 2013. V. 1. No.18. pp. 17–25. In Russian
- Savel'ev D.I., Snachev V.I., Savel'eva E.N., Bazhin E.A. *Geologiya, petrogeokhimiya i khromitonosnost' gabbro-giperbazitovykh massivov Yuzhnogo Urala* [Geology, petrogeochemistry and chromite content of gabbro-ultramafic massifs of the Southern Urals]. Ufa: DizaynPoligrafServis, 2008. 320 p. In Russian
- Savel'eva G.N. *Gabbro-ul'trabazitovye komplekсы ofiolitov Urala i ikh analogi v sovremennoy okeanicheskoy kore* [Gabbro-ultramafic complexes of Ural ophiolites and their analogues in the modern oceanic crust]. Moscow: Nauka, 1987. 246 p. In Russian
- Simonov V.A. *Petrogenezis ofiolitov (termobarogeokhimicheskie issledovaniya)* [Petrogenesis of ophiolites (thermobarogeochemical studies)]. Novosibirsk: OIGGM SO RAN, 1993. 247 p. In Russian
- Simonov V.A., Kotlyarov A.V., Kulikova A.V. *Usloviya formirovaniya paleookeanicheskikh kompleksov Altaye-Sayanskoy skladchatoy oblasti*. Novosibirsk: SO RAN, 2024. 309 p. In Russian
- Tokarev V.N., Kurtigeshev V.S., Efremova N.M. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1 : 200 000 (izdanie vtoroe). Seriya Kuzbasskaya. List N-45-XXVI (Tselinnoe): ob'yasnitel'naya zapiska* [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1: 200,000 (second edition). Kuzbass Series. List N-45-XXVI (Tselinnoe): explanatory note]. Moscow: Moskovskiy filial FGBU «VSEGEI», 2019a. 233 p. In Russian
- Tokarev V.N., Shatilova G.A., Kotik O.P. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1:200000. Izdanie vtoroe. Seriya Kuzbasskaya. List N-45-XIV (Gur'evsk). Ob'yasnitel'naya zapiska* [State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:200000. Second Edition. Kuzbass Series. List N-45-XIV (Guryevsk). Explanatory Note]. St. Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI. 2002. 188 p. In Russian
- Tokarev V.N., Yur'ev A.A., Kosyakova L.N., Glaas G.A. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1 : 200 000. Izdanie vtoroe. Seriya Kuzbasskaya. List N-45-XXI (Prokop'evsk): ob'yasnitel'naya zapiska* [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1: 200,000. Second Edition. Kuzbass Series. List N-45-XXI (Prokopyevsk): explanatory note]. St. Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI. 2019b. 210 p. In Russian
- Fomichev V.D., Alekseeva L.E. *Geologicheskii ocherk Salaira* [Geological overview of Salair]. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1961. 218 p. In Russian
- Shokal'skiy S.P., Babin G.A., Vladimirov A.G., Borisov S.M., Gusev N.I., Tokarev V.N., Zybin V.A., Dubskiy V.S., Murzin O.V., Krivchikov V.A., Kruk N.N., Rudnev S.N., Fedoseev G.S., Titov A.V., Sergeev V.P., Likhachev N.N., Mamlin A.N., Kotel'nikov E.I., Kuznetsov S.A., Zeyfert L.L., Yashin V.D., Noskov Yu.S., Uvarov A.N., Fedak S.I., Gusev A.I., Vystavnoy S.A. *Korrelyatsiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov zapadnoy chasti Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti* [Correlation of igneous and metamorphic complexes of the western part of the Altai-Sayan folded region]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, filial «Geo». 2000. 188 p. In Russian
- Arai S. Chemistry of chromian spinel in volcanic rocks as a potential guide to magma chemistry // *Mineral Mag.* 1992. T. 56. pp. 173–184.
- Arai S. Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation // *Chemical Geology*. 1994. T. 113. pp. 191–204.
- Barnes S.J., Roeder P.L. The Range of Spinel Compositions in Terrestrial Mafic and Ultramafic Rocks // *Journal of Petrology*. 2001. T. 42. № 12. pp. 2279–2302. doi: 10.1093/petrology/42.12.2279
- Berzin N.A., Coleman R., Dobretsov N.L., Zonenshain L.P., Xiao X., Chang E.Z. Geodynamic map of the western part of the paleo-Asian ocean // *Russian Geology and Geophysics*. 1994. T. 35. pp. 8–28.
- Bonatti E., Michael P.J. Mantle peridotites from continental rifts to ocean basins to subduction zones // *Earth and Planetary Science Letters*. 1989. T. 91. No. 3–4. pp. 297–311. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(89\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(89)90005-8).
- Buslov M.M. Intrasubduction collision and role in the evolution of an accretionary wedge: The Kurai zone of Gorny Altai // *Russian Geology and Geophysics*. 1996. T. 37. pp. 74–84.
- Chen M., Zheng J., Dai H.-K., Xiong Q., Sun M., Buslov M.M., Zhou X., Liu J. Boninitic melt percolation makes depleted mantle wedges rich in silica // *Geology*. 2023. T. 51. No.8. pp. 791–795. <https://doi.org/10.1130/G51050.1>.
- Condie K.C., Stern R.J. Ophiolites: Identification and tectonic significance in space and time // *Geoscience Frontiers*. 2023. T. 14. № 6. pp. 101680.
- Dick H.J.N., Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1984. T. 86. pp. 54–76.
- Dobretsov N.L., Buslov M.M., Yu U. Fragments of oceanic islands in accretion–collision areas of Gorny Altai and Salair, southern Siberia, Russia: early stages of continental crustal growth of the Siberian continent in Vendian–Early Cambrian time // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2004. T. 23. No. 5. pp. 673–690. doi: 10.1016/S1367-9120(03)00132-9
- Flower M.F.J. Ophiolites, historical contingency, and the Wilson cycle. In: *Ophiolite Concept Evol. Geol. Thought*, 2003. vol. 373, Boulder, Colorado: The Geological Society of America, pp. 111–135. doi: 10.1130/0-8137-2373-6.111
- Kamenetsky V.S., Crawford A.J., Meffre S. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks // *Journal of Petrology*. 2001. T. 42. No. 4. pp. 655–671.
- Lee Y.I. Geotectonic significance of detrital chromian spinel: a review // *Geosciences Journal*. 1999. T. 3. No. 1. pp. 23–29. <https://doi.org/10.1007/BF02910231>.
- Muntener O., Hermann J., Tromsdorff V. Cooling history and exhumation of lower-crustal granulite and upper mantle (Malenco, Eastern Central Alps) // *Journal of Petrology*. 2000. V. 41 (2). pp. 175–200.
- Parkinson I.J., Pearce J.A. Peridotites from the Izu–Bonin–Mariana forearc (ODP leg 125): evidence for mantle melting and melt–mantle interaction in the supra-subduction zone setting // *Journal of Petrology*. 1998. V. 39. pp. 1577–1618.

Pearce J.A., Barker P.F., Edwards S.J., Parkinson I.J., Leat P.T. Geochemistry and tectonic significance of peridotites from the South Sandwich arc-basin system, South Atlantic // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2000. T. 139. No. 1. pp. 36–53. doi: 10.1007/s004100050572

Prichard H.M., Brough C.P. Potential of ophiolite complexes to host PGE deposits. In: . New Dev. Magmat. Ni-Cu PGE Depos. Geological publishing house. ed, Beijing, pp. 277–290.

Safonova I.Yu., Buslov M.M., Iwata K., Kokh D.A. Fragments of Vendian-Early Carboniferous Oceanic Crust of the Paleo-Asian Ocean in Foldbelts of the Altai-Sayan Region of Central Asia: Geochemistry, Biostratigraphy and Structural Setting // Gondwana Research. 2004. T. 7. No. 3. pp. 771–790. doi: 10.1016/S1342-937X(05)71063-7

Simonov V., Vasil'ev Yu.R., Kotlyarov A., Nikolenko E., Alifirova T., Sharygin V., Aulbach S. Physicochemical Parameters of Ultrabasic Magmatic Systems of the Northeastern Siberian Platform (Data on Melt Inclusions in Chromian Spinel) // Russian Geology and Geophysics. 2022. T. 63. pp. 1354–1373. doi: 10.2113/RGG20204313

Simonov V.A., Dobretsov N.L., Buslov M.M. Boninite series in structures of the Paleo-Asian ocean // Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics). 1994. T. 35. No. 7–8. pp. 182–199.

Simonov V.A., Kulikova A.V., Kotlyarov A.V., Kolotilina T.B. Paleogeodynamics of magmatic and metamorphic processes of formation of ultramafic rocks of Chagan-Uzun massif (ophiolites of Gorny Altai) // Geodynamics & Tectonophysics. 2021. T. 12. No. 4. pp. 826–850. doi: 10.5800/GT-2021-12-4-0557

Simonov V.A., Puchkov V.N., Prikhod'ko V.S., Stupakov S.I., Kotlyarov A.V., Karmanov N.S., Stepanov A.S. Physicochemical conditions of crystallization of dunites of the Nizhnii Tagil Pt-bearing massif (Middle Urals) // Russian Geology and Geophysics. 2016. T. 57. No. 6. pp. 868–890.

Sklyarov E.V., Lavrenchuk A.V., Fedorovsky V.S., Pushkarev E.V., Semenova D.V., Starikova A.E. Dismembered Ophiolite of the Olkhon Composite Terrane (Baikal, Russia): Petrology and Emplacement // Minerals. 2020. T. 10. No. 4. pp. 305. doi: 10.3390/min10040305

Stern R.J., Reagan M., Ishizuka O., Ohara Y., Whattam S. To understand subduction initiation, study forearc crust: To understand forearc crust, study ophiolites // Lithosphere. 2012. T. 4. No. 6. pp. 469–483.

Vetrova N.I., Vetrov E.V., Letnikova E.F., Soloshenko N.G. Age of the Kinterep formation of the Northwestern Salair: chemostratigraphy and U-Pb zircon dating // Geodynamics & Tectonophysics. 2022. doi:10.5800/GT-2022-13-2s-0597.

Zhimulev F.I., Pospeeva E.V., Novikov I.S., Potapov V.V. Deep structure of the Salair fold-nappe terrane (NW CAOB) according to magnetotelluric sounding // Geodynamics & Tectonophysics. 2021. T. 12. No. 1. pp. 125–138. doi: 10.5800/GT-2021-12-1-0517

Zhimulev F.I., Pospeeva E.V., Potapov V.V., Novikov I.S., Kotlyarov A.V. Salair–Gornaya Shoria Junction (Northwestern Central Asian Orogenic Belt): Deep Structure and Tectonics from Magnetotelluric Data // Russian Geology and Geophysics. 2023. T. 64. No. 5. pp. 558–570. doi: 10.2113/RGG20224479

Информация об авторах:

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

E-mail: kotlyarov@igm.nsc.ru

Жимулев Ф.И., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: zhimulev@igm.nsc.ru

Хуурак А.А., инженер, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: khuurakaa@igm.nsc.ru

Фидлер М.А., кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: fidler@igm.nsc.ru

Бехтерев Н.А., лаборант, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: n.bekhterev@g.nsu.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

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

E-mail: kotlyarov@igm.nsc.ru

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

E-mail: zhimulev@igm.nsc.ru

Khuurak A.A., Engineer, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: khuurakaa@igm.nsc.ru

Fidler M.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Junior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: fidler@igm.nsc.ru

Bekhterev N.A., Laboratory Assistant, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: n.bekhterev@g.nsu.ru

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

The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 15.04.2024; одобрена после рецензирования 19.02.2025; принята к публикации 29.08.2025

The article was submitted 15.04.2024; approved after reviewing 19.02.2025; accepted for publication 29.08.2025

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Научная статья
УДК 550.4.02, 553.2
doi: 10.17223/25421379/36/7

ВОЛЬФРАМОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЮЖНОГО СКЛАДЧАТОГО ОБРАМЛЕНИЯ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ: ГЕНЕЗИС, ИСТОЧНИКИ РУДООБРАЗУЮЩИХ ФЛЮИДОВ



Михаил Олегович Рампилов¹, Мария Владимировна Рампилова²,
Евгений Иванович Ласточкин³, Виктор Федорович Посохов⁴

^{1, 2, 3, 4} Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия

¹ mrampilov@mail.ru

² mburtseva@mail.ru

³ last@ginst.ru

⁴ vitafl@yandex.ru

Аннотация. В Западном и Восточном Забайкалье широко распространены вольфрамовые месторождения и проявления гидротермального и грейзенового типов. Предлагаемое исследование имело целью решение проблемы источников вещества и флюидов вольфрамовых месторождений путем привлечения изотопных методов исследований. Проведено изучение 15 вольфрамовых месторождений и рудопоявлений.

Ключевые слова: месторождения вольфрама, W-Мо месторождения, вольфрамит, изотопия, Восточная Сибирь

Благодарности: Авторы выражают признательность канд. геол.-минерал. наук [Г.С. Риппу](#) и канд. геол.-минерал. наук [О.К. Смирновой](#) за предоставленные образцы, обсуждение научных вопросов, рассматриваемых в настоящей статье, и конструктивные замечания.

Источник финансирования: Проведенные исследования выполнены в соответствии с государственным заданием Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН (проект АААА-А21-121011390003-9).

Для цитирования: Рампилов М.О., Рампилова М.В., Ласточкин Е.И., Посохов В.Ф. Вольфрамовые месторождения южного складчатого обрамления Сибирской платформы: генезис, источники рудообразующих флюидов // Геосферные исследования. 2025. № 3. С. 120–138. doi: 10.17223/25421379/36/7

Original article
doi: 10.17223/25421379/36/7

TUNGSTEN DEPOSITS OF THE SOUTHERN FOLDED FRAME OF THE SIBERIAN CRATON: GENESIS, SOURCES OF ORE-FORMING FLUIDS

Mikhail O. Rampilov¹, Maria V. Rampilova², Evgeny I. Lastochkin³, Viktor F. Posokhov⁴

^{1, 2, 3, 4} Dobretsov Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia

¹ mrampilov@mail.ru

² mburtseva@mail.ru

³ last@ginst.ru

⁴ vitafl@yandex.ru

Abstract. There are hydrothermal and greisen types of tungsten deposits in West and East Transbaikalia. Tungsten deposits in Eastern Siberia have been studied by many researchers. To date, the sources of ore forming fluids have remained insufficiently studied. The proposed study was aimed at the sources of ore forming fluids in tungsten deposits using isotopic research methods. Tasks contributing to achieving the aim included analyzing the isotopic compositions of stable and radiogenic isotopes and interpreting their genetic nature. The hydrogen and oxygen isotopic composition in the hydroxyl-bearing minerals, and sulfur in sulfides were determined at the Center for Isotope Research of the Far East Science Center of the Russian Academy of Sciences (Vladivostok) using Finnigan MAT 253 mass spectrometer. The oxygen and carbon isotopic compositions were analyzed using facilities of Center for “Geospectr” at the Dobretsov Geological Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude) using Finnigan MAT 253 mass spectrometer. The isotopic composition of Nd and Sr was measured using a Triton multichannel

mass spectrometer in a static regime at the Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, St. Petersburg. 15 tungsten deposits and occurrences were studied. They are molybdenum-wolframite, wolframite, scheelite and scheelite-bearing gold deposits. Most attention was paid to the oxygen isotopic composition in quartz, wolframite, scheelite and mica, which were formed during early, high-temperature stage of deposit formation. There are also presented results of oxygen isotopic analyzes in minor and accessory minerals (apatite, triplite, helvite, scheelite, chlorite), as well as quartz, which were formed mainly at later stages. A large group of major and minor minerals was analyzed to obtain data concerning the evolution of the oxygen isotopic composition and ore formation temperatures. The oxygen isotopic composition values were also used to assess the equilibrium of the formation of mineral associations. Igneous rocks associated with tungsten ores have been studied at the Dzhida deposit. Isotopic data obtained for post-magmatic formations of tungsten deposits indicate the participation of both mantle and crustal components in different proportions. It is shown a mantle-derived source of fluids with the participation of the crust-derived for Mesozoic molybdenite-wolframite and wolframite deposits and the crust-derived source for the Late Paleozoic scheelite deposits. The meteoric water was involved in the ore forming fluid at the later stages of deposit formation.

Keywords: *W deposits, W-Mo deposits, wolframite, isotopy, East Siberia.*

Acknowledgements: The authors express their deep gratitude to Ph.D. [G.S. Ripp](#) and Ph.D. [O.K. Smirnova](#) for providing samples, for discussing the scientific issues considered in this article and their constructive comments.

Source of financing: The research was carried within state assignment of the Dobretsov Geological Institute SB RAS (project AAAA-A21-121011390003-9).

For citation: Rampilov M.O., Rampilova M.V., Lastochkin E.I., Posokhov V.F. (2025) Tungsten deposits of the southern folded frame of the Siberian craton: genesis, sources of ore-forming fluids. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 120–138. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/36/7

Введение

Наиболее крупные рудные районы с вольфрамовой специализацией тяготеют к областям распространения гранитного магматизма. К их числу относятся Восточная Сибирь, включающая южное обрамление Сибирской платформы и Забайкальскую часть Монголо-Охотского складчатого пояса, одной из особенностей которого является приуроченность к области мезозойского рифтогенеза, сопровождавшегося формированием внутриплитных рифтогенных впадин, обширным проявлением базальтового вулканизма, кислого и щелочного магматизма. В этот период сформировался Центрально-Азиатский флюоритоносный пояс [Булнаев, 1981], Западно-Забайкальские карбонатитовая [Рипп и др., 2000] и бериллиеносная [Куприянова и др., 1996] провинции, молибденовые и вольфрамовые месторождения. Временные рамки рифтогенных этапов охватывают интервал 250–120 млн лет [Ярмолук и др., 1998; Ярмолук, Иванов, 2000]. На домезозойском этапе сформировались существенно шеелитовые кварцевожильные и скарновые проявления.

В статье приведена информация о результатах изотопного изучения вольфрамовых проявлений Западного и Восточного Забайкалья гидротермального и грейзенового типов. Они представлены вольфрамитовыми (Антонова Гора, Бом Горхон и др.) и молибденит-вольфрамитовыми (Джидинское рудное поле, Булуктаевское) месторождениями. Изучены также кварц-шеелитовые (Скалистое, Казачья поляна), флюорит-кварц-шеелитовое (Ангокит) и шеелитсодержащее золоторудное месторождение (Ирокинда).

Шеелитоносные скарны при относительной распространенности относятся к мелким проявлениям, на них, как правило, не проводилось оценочных работ и они в основном остались не изученными.

Ассоциация вольфрамового оруденения с кислым магматизмом определила среди исследователей тезис о существенно коровом происхождении рудоформирующих флюидов. Роль мантийного компонента до настоящего времени оценивается весьма неопределенно как в отношении конкретных элементов, так и масштабов привноса их в верхний структурный ярус. В качестве индикаторов в решении этой проблемы в последние годы используют результаты изотопных исследований. Такими исследованиями установлено, что характер связи рудных элементов и магматитов не всегда согласуется с распространенной моделью появления флюидной фазы в результате дистилляции или фракционной кристаллизации расплава. Они показали, что в образовании месторождений, связанных с кислыми магматитами, участвовали флюиды и вещество метаморфического, мантийного и метеорного происхождения, а их количественные соотношения и время смешения на каждом конкретном месторождении сильно варьировали [Ripp et al., 2018; Wang et al., 2018a]. При этом далеко не все гранитные массивы, близкие по петрохимическим особенностям, сопровождаются редкометальным оруденением. Исследователями рассматривается несколько механизмов образования рудоносных комплексов, ассоциирующих с кислым магматизмом. В одних случаях они связываются с глубокой дифференциацией стандартного гранитного расплава [Raimbault et al., 1995; Gomes, Neiva, 2002; Breiter, 2012], в других – с миграцией

элементов в апикальные участки магматической камеры [Коваленко и др., 1984] или особыми условиями плавления и источниками вещества [Siegel et al., 2017; Khoshnoodi et al., 2017]. В качестве альтернативы предлагаются постмагматические процессы, сопровождающиеся перераспределением редких металлов [Беус и др., 1962; Neiva, 2002], а также контаминация кислых магм осадочными породами [Zhang et al., 2017]. Все эти модели предполагают в основном коровые источники вещества и флюидов.

В связи с низкими содержаниями вольфрама в кислых породах было высказано предположение, что рудогенерирующий потенциал гранитных массивов связан в значительной мере с количеством и составом в них летучих компонентов, условиями формирования массивов [Таусон, 1979; Аксюк, 2002; Bonin, 2007; Jiang et al., 2012]. Кроме того, изотопными исследованиями было показано, что магматический очаг может вызывать рециклинг вод из резервуаров различного происхождения, а флюиды на начальной стадии представляли преимущественно магматический источник, в который происходил приток деплетированных дейтерием метеорных вод [Taylor, O'Neil, 1977]. При этом роль последних увеличивалась к завершающей фазе рудообразования. Примеры рециклинга метеорных вод, обусловленного гранитными плутонами, показаны при образовании апокарбонатных нефритов [Бурцева и др., 2015], редкоземельного оруденения в карбонатитовом комплексе [Broom-Fendley et al., 2016], бериллиевого месторождения Спор Маунтин [Johnson, Ripley, 1998], эпitherмальных флюоритовых месторождений [Seal, Rye, 1993; Ласточкин и др., 2018].

Изотопно-геохимическое изучение молибденовых, молибден-вольфрамовых и вольфрамовых месторождений Китая [Zheng et al., 2015, 2017, 2018], Казахстана [Li G. et al., 2016], Канады [Zhang et al., 2016], показало непростой механизм рудообразования и важность более детального изучения этой проблемы.

Необходимо сказать, что публикации результатов комплексных изотопных исследований месторождений в отечественной литературе немногочисленны [Дубинина, 1993; Матвеева и др., 2002]. В числе причин трансформации изотопного состава кислорода в минералах, связываемых с гранитами, указывались падение температур, удаленность от магматического очага, взаимодействие флюидов с вмещающими породами.

Первые данные по изотопному составу кислорода вольфрамовых месторождений Забайкалья приведены в работах [Борщевский и др., 1980]. Детально было изучено Спокойнинское грейзеновое месторождение [Матвеева и др., 2002]. В более поздней работе [Абрамов, Посохов и др., 2021] на примере группы вольфрамовых месторождений Агинской и Аргун-

ской структурно-формационных зон Восточного Забайкалья установлена связь оруденения с гранитами кукульбейского комплекса. На месторождениях Джидинского рудного поля (Западное Забайкалье) был определен изотопный состав некоторых радиогенных элементов (свинец, стронций, неодим) [Чернышев и др., 1986, 1998, 1999], а данные по изотопному составу серы, кислорода и водорода в минералах различных стадий рудообразования приведены в работах [Рипп, 1984; Ripp et al., 2018].

Вольфрамовые месторождения Восточной Сибири изучались многими исследователями. К настоящему времени недостаточно изученными остались источники их вещества и флюидов, и предлагаемое исследование имело целью решение этих проблем путем привлечения изотопных методов исследований. В задачи, способствующие достижению цели, входил анализ изотопных составов стабильных и радиогенных изотопов и интерпретация их генетической природы.

Методы исследований

Изотопный состав кислорода определен в лаборатории стабильных изотопов ДВГИ ДВО РАН (аналитик Т.А. Веливецкая) и в ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (Улан-Удэ). Изотопные составы кислорода и углерода в карбонатах и кислорода в силикатах определены в Геологическом институте им. Н.Л. Добрецова СО РАН В.Ф. Посоховым. Карбонаты были разложены ортофосфорной кислотой с использованием опции «Газбенч» при температуре 60–70 °C в течение 2–4 ч. Измерения проведены на масс-спектрометре Finigan MAT-253 в режиме постоянного потока гелия. Калибровка для карбонатов проведена по стандартам NBS-18, NBS-19. Величины $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB) и $\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW) определены с погрешностью $\pm 0,05$ и $\pm 0,1$ ‰ (1 σ) соответственно.

Кислород из силикатных минералов был выделен методом лазерного фторирования. Калибровка анализов осуществлялась по международным стандартам NBS-28 (кварц), NBS-30 (биотит). Методика анализа силикатных минералов описана в работе [Sharp, 1990]. Погрешность анализа составляла $\pm 0,1$ – $0,3$ ‰ при 95 %-м доверительном уровне.

Изотопный анализ серы сульфидов и водорода в гидроксилсодержащих минералах выполнен в Центре изотопных исследований ДВГИ ДВО РАН. Подготовка образцов для масс-спектрометрического изотопного анализа серы проведена по методике, описанной в статье [Гриненко, 1962]. Сера сульфидов окислялась до SO_2 с использованием оксида меди. Реакция окисления проводилась в вакууме при температуре 900 °C. Полученный SO_2 очищался от остальных продуктов реакции на терморегулируемой криогенной ловушке.

Очищенный SO_2 вымораживался в отдельную ампулу. Измерение изотопных соотношений серы проведено на масс-спектрометре Finnigan MAT 253 (ThermoFinnigan, Германия) с использованием двойной системы напуска. Погрешность определения $\delta^{34}\text{S}$ (1σ) составляет 0,1 %. Анализ изотопного состава водорода выполнен по методу [Vennemann, O'Neil, 1993]. Для удаления сорбированной воды пробы были предварительно нагреты до 200 °С. Конституционная вода выделялась при температуре 1250 °С. Отделение водорода из воды произведено на хrome при температуре 950 °С. Состав его измерен на масс-спектрометре Finnigan MAT 253 относительно лабораторного стандарта, калиброванного по международным стандартам VSMOW, SLAP, GISP. Воспроизводимость определения δD (1σ) составляет 1,5 ‰.

Измерения изотопного состава неодима, стронция и их концентраций проводились в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН (г. Санкт-Петербург) на многоколлекторном твердофазном масс-спектрометре Triton [Саватенков, Мочалов, 2018]. Воспроизводимость определения концентраций Sr, Sm и Nd, вычисленная на основании многократных анализов стандарта BCR-1, соответствует $\pm 0,5$ %. Погрешность определения изотопного отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ составляла 0,01 %.

Микроструктурные особенности, взаимоотношения и однородность минералов изучались на электронном микроскопе LEO-1430 с энергодисперсионным спектрометром Inca Energy-300 (Е.А. Хромова)

(ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ). Для оценки температуры образования сосуществующих минералов использовались изотопные составы кислорода в них.

Краткая геологическая и минералогическая характеристика месторождений

Проведено изучение 15 вольфрамовых месторождений и рудопоявлений (рис. 1). Они включают молибден-вольфрамовые (Джидинское, Булуктаевское), вольфрамитовые (Бом-Горхон, Букука, Шерловая гора, Антонова гора, Байба), шеелитовые (Скалистое, Казачья поляна, Ангокит) и шеелитосодержащее золоторудное (Ирокинда) месторождения. По большинству из них имеются десятки публикаций, в которых приведена характеристика геологического строения, вещественный состав, результаты термобарогеохимических исследований, рассматриваются проблемы генезиса и источников вещества [Повилайтис, 1960; Игнатович, 1975; Батурина, Рипп, 1984; Ходанович и др., 2003]. Изотопные исследования были посвящены анализу состава сульфидной серы [Рипп, 1984], кислорода в вольфрамитах [Борщевский и др., 1980], радиогенных изотопов (Sr, Pb, Sm-Nd) на Джидинском месторождении [Чернышев и др., 1986, 1998]. Состав кислорода и водорода относительно детально изучен на Спокойнинском месторождении [Матвеева и др., 2002].

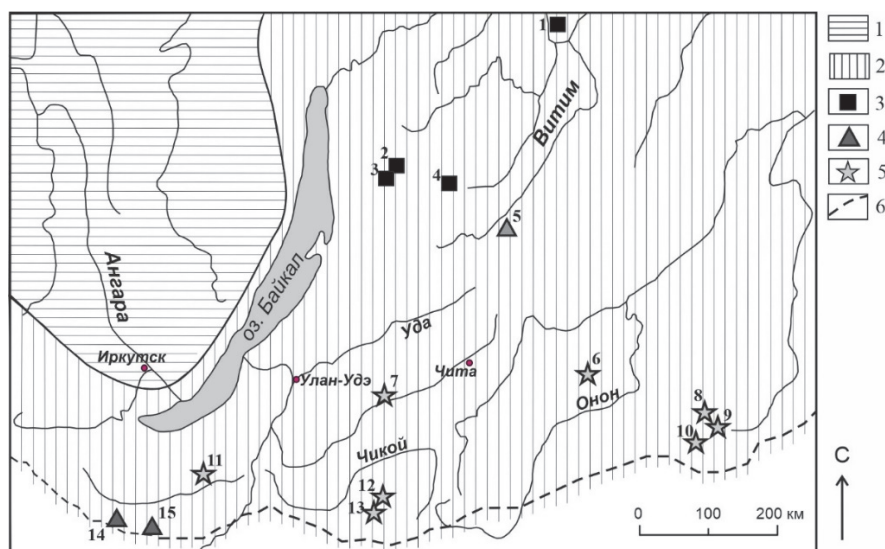


Рис. 1. Расположение изученных вольфрамовых месторождений в Забайкалье

1 – Сибирская платформа, 2 – складчатая область. Месторождения: 3 – шеелитовые; 4 – молибден-вольфрамовые; 5 – вольфрамитовые. 6 – государственная граница России. 1 – Ирокинда, 2 – Казачья Поляна, 3 – Скалистое, 4 – Ангокит, 5 – Нырокское, 6 – Спокойнинское, 7 – Бом-Горхон, 8 – Букука, 9 – Антонова Гора, 10 – Шерловая Гора, 11 – Байба, 12 – Студенческое, 13 – Шумиловское, 14 – Малый-Ойногор, 14 – Джидинское, 15 – Булуктай

Fig. 1. Location of studied W deposits in Transbaikalia

1 – Siberian craton, 2 – folded region. Deposits: 3 – scheelite; 4 – molybdenum-tungsten; 5 – wolframite. 6 – state border. 1 – Irokinda, 2 – Kazachia Polyana, 3 – Skalistoe, 4 – Angokit, 5 – Nyrokskoye, 6 – Spokoininskoye, 7 – Bom-Gorkhon, 8 – Bukuka, 9 – Antonova Gora, 10 – Sherlova Gora, 11 – Baiba, 12 – Studencheskoe, 13 – Shumilovskoye, 14 – Maly-Oinogor, 14 – Dzhida, 15 – Buluktai

На Булуктаевском и Джидинском месторождениях вольфрамовая минерализация проявилась после молибденовой вслед за внедрением межминерализационных даек гранитов и сиенитов. На начальном этапе образовалась молибден-вольфрам-бериллиевая ассоциация (молибденит, вольфрамит, берилл), позднее сформировалась более низкотемпературная минеральная ассоциация, типоморфными минералами которой являются триплит, апатит. Для завершающих стадий характерны кальцит, хлорит, эпидот, шеелит, гельвин.

Для молибден-вольфрамовых и вольфрамовых месторождений характерно повышенное содержание сульфидных минералов. В основном это пирит, в меньших количествах представлены сфалерит, галенит, халькопирит, сульфосоли висмута. В числе редких минералов отмечаются апатит, триплит и карбонаты (родохрозит, анкерит, кальцит, сидерит, доломит), которые часто завершают гидротермальный процесс. Вольфрамит (гюбнерит), берилл, мусковит и калиевый полевой шпат тяготеют к залбандам жил, а сульфиды и карбонаты – к осевым частям. Вольфрамит участками замещен шеелитом, а триплит – апатитом и родохрозитом. Формирование комплексных молибден-вольфрамовых месторождений проходило в течение нескольких гидротермальных этапов, разделенных по времени периодами интрузивного магматизма. Минерализация каждого последующего гидротермального этапа имеет специфическую рудную нагрузку, наследуя в то же время некоторые черты предыдущего. Например, на Джидинском месторождении сначала сформировался молибденовый штокверк (Первомайское месторождение), позже – прожилки с молибден-бериллиевой минерализацией, затем – штокверк гюбнеритсодержащих прожилков (Инкурское месторождение) и кварц-гюбнеритовые жилы (Холтосонское месторождение).

Шеелитовые месторождения имеют упрощенный минеральный состав, для них не характерны флюорит (за исключением Ангокитского месторождения), слюды и калиевый полевой шпат. Минеральные ассоциации руд представлены кварцевожилковыми телами, содержащими шеелит, распространенные среди известняков. Они сформировались в одну или две стадии. В их составе, кроме кварца и шеелита, присутствуют убогая сульфидная минерализация, кальцит, тремолит-актинолит. На Ирокиндинском золоторудном месторождении шеелит слагает в основном вкрапленность, количество шеелита увеличивается с глубиной залегания рудных тел. Сульфиды представлены в основном пиритом.

Образование вольфрамовых месторождений юго-восточного Забайкалья произошло в интервале 148–

131 млн лет [Андреева и др., 1996] и связываются с кукльбейским интрузивным комплексом (J_3). Близкие значения возраста (121–144 млн лет) имеют месторождения Джидинского рудного поля [Платов и др., 2009] и Булуктаевское месторождение [Савченко и др., 2018; Ripp et al., 2018]. Рудоформирующими магматическими породами являются гранит-порфиры и лейкограниты гуджирского интрузивного комплекса (J_3 – K_1). Шеелитовые гидротермальные и скарновые проявления установлены на площади распространения позднепалеозойских гранитов баргузинского комплекса (PZ₃).

Гомогенизация флюидных включений в кварце, сфалерите, флюорите, происходит в интервале 150–400 °C [Повилайтис, 1960; Онтоев, 1974; Иванова и др., 1991].

Результаты исследований и обсуждение

Проведены изотопные исследования минеральных парагенезисов начальных, продуктивных и завершающих стадий образования месторождений. Изучены молибден-вольфрамовые (Джидинский рудный узел, Булуктаевское), вольфрамитовые (Бом Горхон, Антонова Гора, Спокойнинское и др.), флюорит-кварц-шеелитовые (Ангокит), кварц-шеелитовые (Скалистое, Казачья Поляна), шеелитоносные золотокварцевые жилы (Ирокинда). На перечисленных месторождениях выполнено около 140 определений изотопного состава кислорода. Часть из них, выполненная на месторождениях Джидинского рудного поля, приведена в статье [Ripp et al., 2018]. Обобщенные результаты исследований представлены в табл. 1.

Наибольшее внимание было уделено изотопному составу кислорода в кварце, вольфрамитах, шеелитах и слюдах, представляющих в основном ранний наиболее высокотемпературный этап формирования месторождений (кварц-вольфрамит(гюбнерит)-сульфидная, молибденит-шеелитовая стадии). В табл. 2 приведены результаты анализов кислорода второстепенных и акцессорных минералов (apatит, триплит, гельвин, шеелит, хлорит), а также кварца, образовавшихся в основном на поздних стадиях (кварц-карбонатная, кварц-шеелитовая с флюоритом и др.).

Следует отметить, что изотопная изученность магматических пород еще недостаточна. Такие исследования проведены только по гранитам Первомайского штока и дайкам сиенитов Джидинского рудного поля. В них определен состав стабильных и радиогенных изотопов (свинец, стронций, неодим). В кварце и полевом шпате из гранита и валовых пробах даек сиенита проанализирован состав кислорода [Борщевский и др., 1980; Чернышев и др., 1998, 1999; Матвеева и др., 2002; Ripp et al., 2018].

Таблица 1

Изотопный состав кислорода, углерода, серы и водорода в рудообразующих минералах вольфрамовых месторождений южного складчатого обрамления Сибирской платформы

Table 1

Isotopic composition of O, C, S and D in ore forming minerals from W and W-Mo-deposits southern folded frame of the Siberian Craton

№ п/п	Месторождение	δ ¹⁸ O‰ VSMOW					δ ¹³ C‰ VPDB	δ ³⁴ S,‰ VCDT	δ D VSMOW
		Кварц	Вольфрамит	Слюда	Шеелит	Карбонаты		Сульфиды	Слюда
Месторождения мезозойского этапа									
Молибденит-вольфрамитовые									
1	Джидинское	8,10(19)	−1,50(8)	5,20(5)	1,90(1)	8,50(6)	−5,10(6)	0,20(15)	−84,10(2)
2	Булуктаевское	8,60(8)	−2,90(2)	5,60(2)	0,90(1)	7,54(1)	−4,90(1)	0,60(14)	−137,50(2)
3	Нырокское	10,10(1)	1,10(1)	8,20(1)					−105,60(1)
4	31 пикет	8,10(1)	−3,70(1)					1,10(7)	
Вольфрамитовые (гидротермальные, грейзеновые)									
5	Бом-Горхон	9,80(3)	0,60(4)	6,50(1)	0,70(1)			2,50(10)	−143,90(1)
6	Байба	13,30(1)	4,40(1)	9,60(1)				2,30(2)	
7	Антонова гора	12,30(3)	2,80(4)	10,10(1)				−1,50(3)	
8	Шерловая гора	12,60(1)	4,60(2)	10,20(1)					−142,20(1)
9	Бука	10,30(1)	2,80(2)	11,00(1)					
10	Шумиловское		1,10(3)						
11	Спокойнинское	14,20(1)	2,70(3)	11,00(1)					−129,00(8)
12	Студенческое		1,20(1)						
Месторождения позднепалеозойского этапа									
Кварц-шеелитовые									
14	Скалистое	15,80(1)			5,90(3)			7,40(3)	
15	Казачья поляна	16,00(4)			5,70(1)			4,70(1)	
16	Ангокит	17,60(1)			5,60(1)	20,30(1)	−2,40(1)	1,50(1)	
Золото-шеелитовые									
17	Ирокинда	16,60(1)			14,80(2)			1,70(18)	

Примечание. Содержания средние арифметические, в скобках – количество анализов. Анализы 10–12 из [Борщевский и др., 1980; Матвеева и др., 2002].

Note. The contents are average; the number of analyzes is in parentheses. Analyzes 10–12 from [Borshchevsky et al., 1980; Matveeva et al., 2002].

Таблица 2

Изотопные составы кислорода в минералах поздних стадий Джидинского, Булуктаевского и Бом-Горхонского месторождений

Table 2

Isotopic composition of oxygen in latest stage minerals from the Dzhida, Buluktai and Bom Gorkhon deposits

№ п/п	Месторождение	Минерал	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ SMOW
1	Джидинское рудное поле	Кварц	8,70
2		Кварц	9,10
3		Триплит	1,52
4		Триплит	1,11
5		Апатит	2,60
6		Апатит	1,90
7		Шеелит	1,90
8	Булуктаевское	Кварц	8,10
9		Гельвин	3,90
10		Гельвин	4,30
11		Гельвин	4,20
12		Эпидот	4,00
13		Шеелит	0,90
14		Хлорит	0,10
15		Хлорит	2,60
16	Бом-Горхон	Триплит	4,30
17		Апатит	-2,43
18		Шеелит	0,70

Изотопный состав серы.

Среди изученных вольфрамовых месторождений выделяется две группы, несколько отличающихся по изотопному составу сульфидной серы (рис. 2). В группе вольфрамитовых месторождений сера ложится в границы мантийного источника, нередко

имеет отрицательные значения $\delta^{34}\text{S}$. В некоторых месторождениях (Бом-Горхон, Байба) сера изотопно несколько тяжелее.

В группе кварц-шеелитовых месторождений сера изотопно утяжелена и близка к значениям в породах континентальной коры.

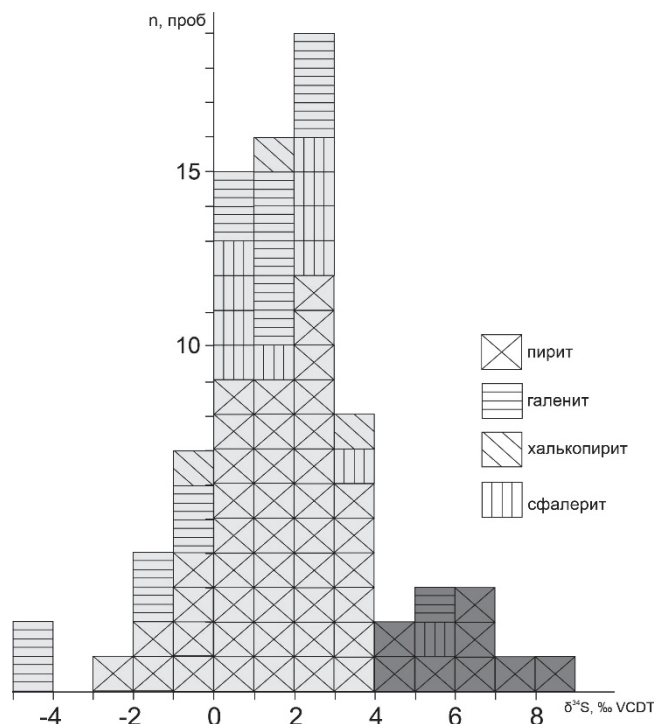


Рис. 2. Две группы изотопных составов сульфидной серы в вольфрамовых месторождениях Забайкалья
Светло-серое поле – вольфрамитовые, темно-серое – шеелитовые месторождения

Fig 2. Two groups of isotope compositions of sulfide sulfur in W deposits of Transbaikalia
Light gray field – wolframite deposits, dark gray – scheelite deposits

Изотопный состав кислорода и углерода.

В изученных месторождениях величины $\delta^{18}\text{O}$ укладываются в интервал значений от вольфрамит-шеелита до кварца ($-3,7 \dots 17,6\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$). В этих границах по степени обогащения тяжелым изотопом расположены апатит, берилл, калиевый полевой шпат, слюды, триплит, гельвин, карбонаты, хлорит. Сопоставление составов кислорода в минералах молибденового и вольфрамового этапов молибден-вольфрамовых месторождений показало на отчетливое обогащение тяжелым изотопом кислорода минералов вольфрамового этапа (табл. 3, рис. 3).

На Булуктаевском месторождении величина $\delta^{18}\text{O}$ в кварце молибденоносных прожилков равна $7,4\text{‰}$, в вольфрамитовых – $8,6\text{‰}$. В молибденитовых рудах Джидинского месторождения эти значения имеют величины, соответственно, $5,9$ и $8,1\text{‰}$.

Кварц и вольфрамовые минералы по составу кислорода концентрируются в четыре группы (рис. 4). Наиболее легкий кислород (в основном ниже 10‰) харак-

терен для кварца и вольфрамитов молибден-вольфрамовых месторождений (Джидинское, Булуктаевское, Нырокское), близкие к ним значения имеют месторождения Бом Горхон и Букука. Изотопно тяжелее кислород на вольфрамитовых месторождениях Байба, Шерловая гора, Антонова Гора, а наиболее тяжелый – в кварц-шеелитовых проявлениях и золото-шеелитовом месторождении.

В минералах рудного этапа наибольшие значения $\delta^{18}\text{O}$ у кварца, меньше они в слюдах и калиевом полево-м шпате, а наименьшие – в вольфрамите, триплите, шеелите и апатите. Различия $\delta^{18}\text{O}$ сосуществующих кварца и вольфрамитов варьируют в интервале $8,0\text{--}9,6\text{‰}$ (табл. 4), в паре кварц-полевой шпат Джидинского месторождения варьирует в пределах $1,2\text{--}2,3\text{‰}$. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в слюдах из молибден-вольфрамовых дистанцированы от таковых из вольфрамитовых месторождений (см. рис. 4). Соотношения составов кислорода в вольфрамитовых, кварце и слюдах согласуются с известной последовательностью равновесного фракционирования [Zheng, 1992, 1993a, b].

Контрастно отличается кислород шеелитов из вольфрамитовых и кварц-шеелитовых месторождений. В первых шеелит является вторичным и образовался по вольфрамиту, унаследовал изотопно легкий кислород. Существенно более тяжелый состав кислорода в шеелитовых месторождениях, а наиболее тяжелый обнаружен на Ирокиндинском золото-шеелитовом месторождении. Расчеты состава кислорода во флюидах, участвовавших в рудообразовании, представлены в табл. 5. В грейзенах он близок к составу магматического источника. Для месторождений Джидинского рудного поля это подтверждается составом водорода из гидроксильной воды мусковита ($\delta D = -84,8$ и $-83,3$ ‰).

Значения температур, полученные по изотопно-кислородному геотермометру в паре вольфрамит-кварц (см. табл. 4), в большинстве своем совпали ($277-380$ °C) с результатами термобарогеохимического изучения газожидких включений. При этом

температуры, рассчитанные по паре кварц-калишпат и из грейзенового парагенезиса (мусковит-берилл-калишпат) Джидинского месторождения, заметно выше ($297-391$ °C) и подтверждают их более раннее образование.

Изотопное изучение карбонатов проведено на трех месторождениях. Составы кислорода и углерода их на Джидинском и Булуктаевском месторождениях ложатся в поле PIC (рис. 5), типоморфное для мантийной углекислоты. При этом родохрозит, образовавшийся раньше анкерита, имеет более легкий углерод по сравнению с последним. Легкий кислород и углерод установлены в кальците (см. рис. 5, № 1), выделившимся на завершающем этапе рудообразования. Кальцит Ангокитского месторождения (рис. 5, № 2) имеет типично коровые значения кислорода ($20,3$ ‰) и углерода ($-2,4$ ‰), обусловленные контаминацией вмещающими осадочными карбонатными породами.

Таблица 3

Изотопные составы кислорода молибденовых и вольфрамовых этапов Джидинского и Булуктаевского месторождений

Table 3

Isotopic composition of oxygen in minerals of the Mo-, and W-stages from the Dzhida and Bom Gorkhon deposits

Месторождение	Этап минералообразования	Минерал	$\delta^{18}O$ ‰ VSMOW
Джидинское	Молибденовый	Кварц	5,30–6,60(5)
		Мусковит	3,90–5,30(3)
	Вольфрамовый	Кварц	7,00–9,10(14)
		Мусковит	4,90–5,50(5)
Булуктаевское	Молибденовый	Кварц	6,70–8,10(4)
	Вольфрамовый		8,10–9,30(4)

Примечание. Содержание от – до, в скобках – количество анализов.

Note. Contents from – to, in brackets – number of analyzes.

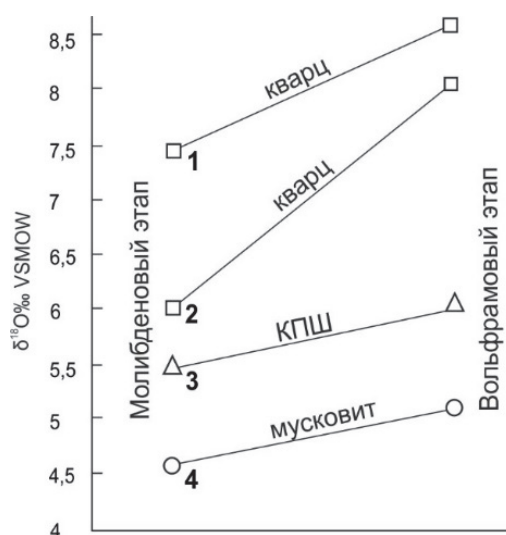


Рис. 3. Эволюция изотопного состава кислорода в минералах от раннего (молибденовый) к позднему (вольфрамовый) этапам

1 – Булуктаевское; 2, 3, 4 – Джидинское месторождения

Fig. 3. Evolution of $\delta^{18}O$ ‰ values in minerals from early (Mo) to late (W) stages

1 – Buluktai; 2, 3, 4 – Dzhida deposits

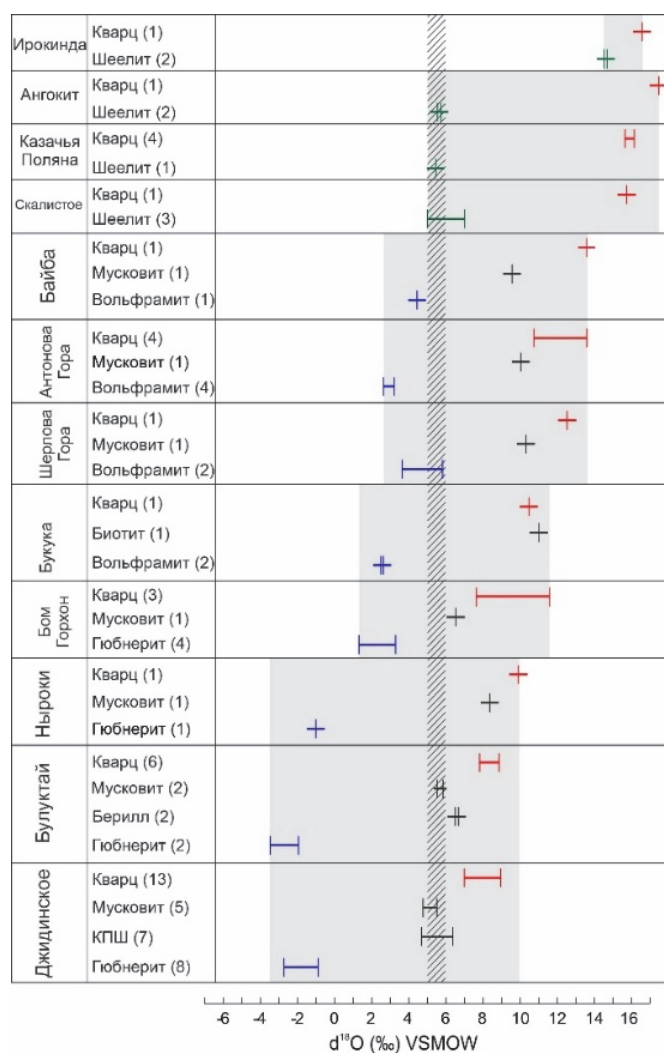


Рис. 4. Изотопные составы кислорода в главных минералах рудных стадий вольфрамовых месторождений
Заштриховано поле мантийного кислорода. Серым цветом выделена область полученных значений $\delta^{18}\text{O}$ (–3,7...17,6) на изученных месторождениях

Fig. 4. Isotopic compositions of oxygen in the main minerals of ore stages of W deposits
The mantle oxygen field is shaded. The range of values (–3,7...17,6) $\delta^{18}\text{O}$ in the studied deposits is highlighted in gray

Таблица 4

Расчеты изотопных температур в парах кварц–вольфрамит и кварц–КПС вольфрамовых месторождений Забайкалья

Table 4

Calculations of isotope temperatures in quartz–wolframite and quartz–KFS from the W deposits of Transbaikalia

№ п/п	Месторождение	$\delta^{18}\text{O}\text{‰ VSMOW}$		Δ	T, °C
		Кварц	Вольфрамит		
1	Байба	13,30	4,42	8,88	319
2	Антонова Гора	10,28	2,70	8,10	359
3		12,80	3,10	9,70	281
4	Шерловая Гора	12,60	3,30	9,30	299
5	Букука	10,30	2,60	7,70	381
6	Бом-Горхон	7,80	–1,20	9,00	314
7		11,30	2,27	9,03	312
8		10,48	2,60	7,88	371
9	Ныроки	10,17	1,08	9,09	309
10	Булуктай	8,90	–2,10	11,00	228
11	Джидинское	8,90	–0,90	9,80	277
12		7,00	–2,50	9,50	290
13		8,50	–1,10	9,60	286
14		8,60	–1,10	9,70	281

№ п/п	Месторождение	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ VSMOW		Δ	T, °C
		Кварц	Вольфрамит		
15		7,40	-3,40	10,80	236
16*		7,20	-1,40	8,60	333
17		8,80	6,40	2,40	313
18		7,70	5,70	2,00	391
19		7,30	5,20	2,10	370

Примечание. * – проба 16 из грейзена, 17–19 – из кварц-калшпатового парагенезиса.

Note. * – sample 16 from greisen, 17–19 – from quartz-k-feldspar paragenesis.

Таблица 5

Изотопные составы кислорода в главных рудообразующих минералах и равновесных с ними флюидах вольфрамовых месторождений

Table 5

Isotopic composition of oxygen in main ore-forming minerals and fluids of W deposits

№ п/п	Месторождение	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ VSMOW					$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ флюид		
		Мусковит	Кварц	Вольфрамит	Шеелит	T °C	Мусковит	Кварц	Вольфрамит
1	Джидинское	5,30	7,80	-1,70		300	5,30	-1,30	-0,20
2	Булуктай	5,60	8,90	-2,10		230	5,60	-1,10	-1,90
3	Ныроки	8,20	10,20	1,10		300	6,70	3,50	2,90
4	Бом-Горхон	6,50	10,48	2,60		310	5,20	5,38	5,10
5	Байба	9,60	13,30	4,42		320	8,50	6,90	6,42
6	Антонова Гора	10,10	12,80	3,10		360	9,60	5,10	4,50
7	Шерловая Гора	10,20	11,70	3,00		300	8,70	5,40	5,10
8	Букука	11,00	10,30	2,70		380	10,80	5,40	5,20
9	Спокойнинское	11,00	14,20	5,50		220	7,30	3,80	5,50
10	Скалистое		15,80		5,70	200		3,70	
11	Ангокит		17,60		5,60	200		5,50	
12	Казачья поляна		16,00		5,70	200		3,90	
13	Ирокинда		15,60		13,20	200		3,50	

Примечание. Значения изотопного состава в минералах и флюидах средние.

Note. The $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ values in minerals and fluids are average.

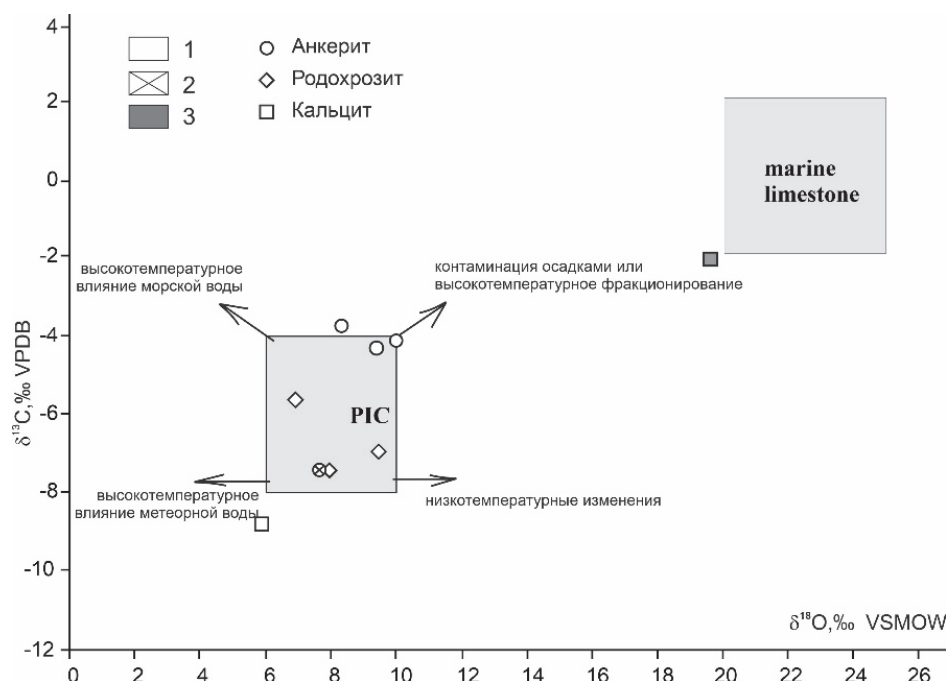


Рис. 5. Изотопные составы кислорода и углерода в карбонатных минералах Джидинского (1), Булуктаевского (2) и Ангокитского (3) месторождений

Поле PIC по [Taylor et al., 1967]

Fig. 5. The $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ and $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ values in carbonate minerals of the Dzhida (1), Buluktai (2) and Angokit (3) deposits
The PIC field according to [Taylor et al., 1967]

Изотопный состав водорода.

Большая часть полученных значений изотопного состава водорода в изученных месторождениях характеризуется деплетированностью дейтерием (табл. 6, рис. 6), свидетельствующей об участии в процессах минералообразования воды метеорного источника. Определения состава водорода, выполненные на Спокойнинском месторождении [Матвеева и др., 2002], также характеризуются деплетированностью дейтерием. И только кристаллизационная вода в слюдах из грейзенов Джидинского рудного поля, фиксирующих начальную стадию рудообразования, лежит в границах мантийного источника ($-78,8 \dots -84,8$ ‰ δD).

Анализы изотопных составов стронция, самария и неодима выполнены для гранита Первомайского массива и двух даек меланократовых сиенитов Джидинского ме-

сторождения. Главной особенностью их являются низкие значения Sr_i в этих породах (0,704–0,705) и величины ϵNd , лежащие на тренде эволюции мантийного источника [Ripp et al., 2018]. В минералах рудных парагенезисов величины Sr_i в шеелитах, флюоритах и карбонатах варьируют в пределах 0,7047–0,7055. В гидротермальных минералах так же, как и в магматических породах, зафиксированы плюсовые значения $\epsilon Nd(T)$ (флюорит от +0,1 до +3,3, вольфрамит, микроклин и кальцит, соответственно, +1,6, +0,4, и +3,9), лежащие на тренде эволюции мантийного источника [Чернышев и др., 1998].

С целью получения данных по эволюции изотопного состава кислорода и температур рудообразования проанализирована большая группа главных и второстепенных минералов. Значения изотопного состава кислорода были использованы и для оценки равновесности формирования минеральных ассоциаций.

Таблица 6

Изотопные составы кислорода и водорода в кристаллизационной воде гидроксилсодержащих минералов вольфрамитовых месторождений

Table 6

The $\delta^{18}O$ ‰ and δD ‰ values in OH-bearing minerals of W deposits

№ п/п	Месторождение	Минерал	$\delta^{18}O$ ‰ VSMOW	$\delta^{18}O$ ‰ Флюид	δD ‰ VSMOW	δD ‰ Флюид	T, °C*
1	Джидинское	Мусковит	7,30	7,30	-78,80	-49,10	400
2	Джидинское	Мусковит	5,30	5,00	-84,80	-55,10	400
3	Джидинское	Мусковит	5,50	5,50	-83,30	-53,60	400
4	Нырокское	Мусковит	8,20	8,20	-105,60	-75,90	400
5	Шерловая гора	Биотит	11,70	13,80	-141,00	-92,40	400
6*	Спокойнинское	Мусковит	11,00	11,00	-129,00	-99,30	400
7	Булуктаевское	Мусковит	5,60	5,60	-144,00	-114,00	400
8	Булуктаевское	Эпидот	4,00	3,00	-130,10	-96,50	300
9	Бом-Горхон	Эпидот	6,50	6,50	-144,00	-114,20	400

Примечание. * данные по [Матвеева и др., 2002]. Расчеты состава кислорода во флюиде [Zheng, 1993], водорода – [Suzuoki, Epstein, 1976; Chako et al., 1999].

Note. * according to [Matveeva et al., 2002]. Calculations of $\delta^{18}O$ ‰ fluid [Zheng, 1993], δD ‰ fluid – [Suzuoki, Epstein, 1976; Chako et al., 1999].

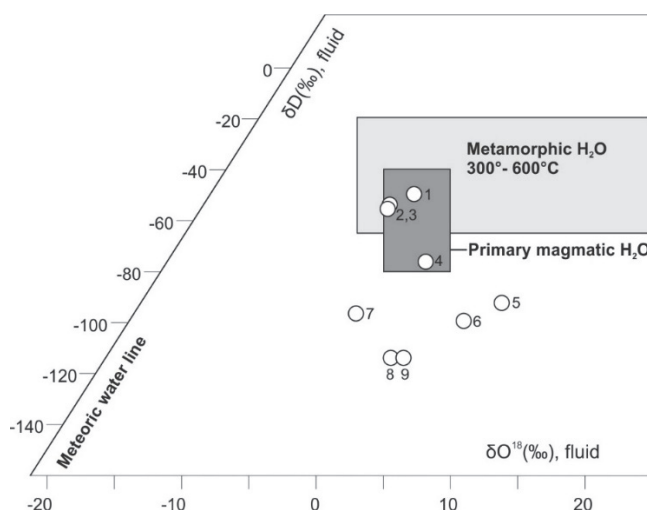


Рис. 6. Изотопные составы кислорода и водорода в водосодержащих минералах вольфрамитовых месторождений Забайкалья (см. табл. 6)

Источники флюидов из различных резервуаров Земли по [Sheppard, 1986]

Fig. 6. The $\delta^{18}O$ ‰ and δD ‰ in OH-bearing minerals of W deposits in Transbaikalia (see table 6)

Sources of fluids from various reservoirs of the Earth according to [Sheppard, 1986]

Изотопные составы стронция и неодима.

Оценка источников компонентов проведена в соответствии с данными работ [Taylor et al., 1967; Sheppard, 1986; Фор, 1989; Hoefs, 2009]. Поле $\delta^{18}\text{O}$ в границах 5,5–6 ‰ соответствует значениям мантийного кислорода, а в случаях ниже 4–5 ‰ и высокой деплетированности дейтерием (менее 100 ‰ δD) предполагается участие метеорной воды. Обеднение $\delta^{18}\text{O}$ и дейтерием магматических вод связывается [Фор, 1989] с процессами обмена с метеорными водами. Источник воды определялся расчетом состава кислорода во флюиде с равновесными минералами. Температуры образования минеральных фаз определены термометрическими методами и приведены в работах [Матвеева и др., 2002]. Расчеты проведены в соответствии с фракционированием в системе минерал–вода, исходя из справочных данных, приведенных в работах [Zheng, 1992, 1993a, 1993b; Chacko et al., 1999]. Вместе с данными по изотопному составу водорода в гидроксилсодержащих минералах они использованы для установления источников рудообразующих флюидов.

Ассоциация вольфрамового оруденения с гранитами определила распространенность тезиса о существовании корового источника его вещества. Это касается магматических пород и рудоносных флюидов. Появление изотопных методов исследований скорректировало эту проблему, что отчетливо зафиксировано в многочисленных зарубежных публикациях, включая вольфрамовые и молибденовые месторождения. На вольфрамовых месторождениях результаты таких исследований ранее были приведены в работах [Борщевский и др., 1980; Матвеева и др., 2002]. Анализ изотопных составов свинца, стронция и неодима в породах и рудах Джидинского рудного поля приведен в работе [Чернышев и др., 1998], а результаты изучения изотопного состава серы – в монографии [Рипп, 1984].

Магматические породы, с которыми ассоциируют вольфрамовые руды, изучены на Джидинском месторождении. Граниты Первомайского массива, предвещающие молибденовое оруденение и дайки меланократовых сиенитов, предшествовавшие формированию вольфрамовых руд, характеризуются обогащенностью легким изотопом кислорода (около 5 и 4 ‰ соответственно), пониженными первичными изотопными отношениями стронция ($\text{Sr}_0 = 0,704\text{--}0,705$) и значениями ϵNd (0,9...–1,1), лежащими на тренде эволюции мантийного источника. Такие граниты по изотопному составу кислорода отнесены [Hoefs, 2009] к малочисленной группе – со значениями $\delta^{18}\text{O}$ ниже 6 ‰. В многочисленных массивах кислых магматитов Западного Забайкалья [Wickham et al., 1996; Litvinovsky et al., 2011] и других регионов [Yang et al.,

2017] значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют в основном в интервале 10–14 ‰. Изотопная облегченность кислорода установлена в гранитах, сопровождающихся молибденовым и вольфрамовым оруденением – Первомайском (3,8–6,7 ‰), Жарчихинском (6,2–6,5 ‰), Тамирском (3,8–5,8 ‰) участках. Облегчение могло быть обусловлено изменением гранитов на постмагматическом этапе в результате воздействия флюидов с участием воды метеорного происхождения. К числу примеров гранитов с легким кислородом, в результате взаимодействия их с метеорными водами, отличающихся одновременно высокой деплетированностью дейтерием, относятся бертрандитовое месторождение Спор Маунтин (–120...–130 ‰) [Johnson, Ripley et al., 1998] и Харитоновский массив (–200...–300 ‰) [Wickham et al., 1996].

В числе возможных причин низких значений $\delta^{18}\text{O}$ в гранитах указывается [Hoefs, 2009] образование их по протолиту, изначально обогащенному легким кислородом (например, базиты, породы, переработанные метеорной водой или участие мантийных источников). Низкие концентрации хрома, никеля, кобальта в гранитах Первомайского массива (Джидинское рудное поле) не поддерживают вариант образования их за счет базитов, а изотопные составы стронция, неодима, свинца [Чернышев и др., 1999] – по породам корового происхождения. Изотопные отношения свинца обосновываются [Чернышев и др., 1998] образованием гранитной магмы в условиях нижней коры из пород деплетированных U и Th и сохранивших примитивные изотопные отношения свинца аналогичные мантийным.

Модель возникновения гранитов при плавлении пород под действием высокотемпературного мантийного флюидного потока рассмотрена в работах [Летников, 2006]. Вариант такой модели для Джидинского месторождения был предложен в работе [Чернышев и др., 1999]. Аналогичный механизм обосновывается для гранитов Казахстана, с которыми связаны молибден-вольфрамовые месторождения Акчатау, Коунрад [Li G. et al., 2016].

Изотопные данные, полученные для постмагматических образований вольфрамовых месторождений, свидетельствуют об участии в разных соотношениях как мантийного, так и корового компонентов. Низкие первичные изотопные стронциевые отношения и положительные значения ϵNd в породах и минералах Джидинского рудного поля предполагают поступление из мантийного резервуара калия, фтора, углекислоты. По данным изотопного состава серы [Рипп, 1984] среди молибденовых и вольфрамовых месторождений установлено две группы (см. рис. 2). У одной из них она имеет значения с вариацией от +5 до 8 ‰ $\delta^{34}\text{S}$, у другой – близка к метеоритному стандарту [Рипп, 1984]. К последним относятся наиболее

крупные месторождения (Булуктаевское, Мало-Ойногорское, Бом-Горхонское, Джидинское), сопровождающиеся повышенными концентрациями сульфидных минералов и флюорита. Такая же сера установлена на молибден-вольфрамовых месторождениях Центрального Казахстана (Коунрад, Караоба, Коктенкуль) [Чухров и др., 1967], Китая [Wang et al., 2018b] и Калгутинском на Алтае [Боровиков и др., 2016].

Величины $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$ в карбонатных минералах (см. рис. 5) также предполагают мантийное происхождение углекислоты. Кислород, близкий к магматическим породам, имеют слюды из грейзенов, а наибольшей обогащенностью легким кислородом характеризуются вольфрамиты. Деплетированность их тяжелым кислородом согласуется с коэффициентами фракционирования. Легкий кислород в триплите (1,11–4,3 ‰), апатите (–2,4–2,6) относительно кварца и калиевого полевого шпата в значительной мере обусловлен коэффициентами их фракционирования.

Об участии мантийного вещества в формировании вольфрамитовых месторождений указывает изотопный состав кислорода в грейзенах и слюдяных метасоматитах (4,2–6,5 ‰ $\delta^{18}\text{O}$), а также значение δD гидроксильной воды в мусковите (–78,8...–84 ‰) Джидинского месторождения. В то же время изотопные составы кислорода флюидов равновесных с другими минералами рудных стадий вместе с данными по изотопному составу водорода свидетельствуют об участии в рудообразовании также воды метеорного источника. На это указывает облегченность изотопного состава кислорода (нередко с отрицательными значениями $\delta^{18}\text{O}$) в воде равновесной с минералами гидротермальных парагенезисов. Наименьшее её количество участвовало на начальном этапе при формировании грейзенов и зон околосредоточных слюдяных метасоматитов. Оно существенно возрастало (от 7–9 до 35–40 %) к завершающим стадиям минералообразования. На метеорное происхождение части флюида (до 30–40 %) в формировании вольфрамовых месторождений Забайкалья ранее указывал [Борщевский и др., 1980], неоднократно обосновывалось и для месторождений Китая [Zhang et al., 2017; Song et al., 2018; Wang et al., 2018a, 2018b], а на завершающем этапе формирования месторождения Дайшан метеорная вода преобладала [Shieh et al., 1991].

Кислород вольфрамового этапа относительно молибденового на молибден-вольфрамовых месторождениях более гетерогенен и обогащен метеорной водой. В вольфрамитовых месторождениях отчетливо фиксируется синхронность изменения состава кислорода в кварцах и вольфрамитах. По [Борщевский и др., 1980] низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ в вольфрамитах связываются с вовлечением в гидротермы метеорных

вод. Расчет состава кислорода во флюидах равновесных с вольфрамитом не противоречит этому.

Сравнение изотопных характеристик изученных месторождений с вольфрамовыми и молибден-вольфрамовыми месторождениями Китая [Zeng et al., 2015; Zhang, 2018; Shieh et al., 1991, Song et al., 2018, Li X. et al., 2016], Казахстана [Li G. et al., 2016], Канады [Zhang et al., 2016] показало, что в ряде случаев они заметно отличаются. Магматические породы, с которыми связывается оруденение, часто менее деплетированы тяжелым кислородом, имеют более высокие первичные стронциевые отношения и отрицательные величины ϵNd [Zhang et al., 2017; Zheng et al., 2017]. Минералы рудных парагенезисов месторождений Китая существенно больше обогащены тяжелым кислородом. Значения $\delta^{18}\text{O}$ их в вольфрамитах варьируют от 4,1 до 6,8 ‰, в шеелитах – 4,2–6,3, кварце 11,1–14 ‰, мусковите 8,4–10 ‰ [Shieh et al., 1991]. Ближе всего к Забайкальским подходят месторождения Акчатау, Восточный Коунрад имеющих низкие первичные стронциевые отношения (0,703–0,705) и положительные величины ϵNd (от –0,5 до +2,8).

Гидротермальные шеелитовые месторождения и проявления Западного Забайкалья так же, как и скарповые, установлены главным образом на площадях распространения позднепалеозойских гранитоидов. Особенностью месторождений является обогащенность кварца и шеелита рудных тел изотопно тяжелым кислородом. Значения $\delta^{18}\text{O}$ пары минералов шеелит–кварц (см. рис. 4) более всего дистанцированы от вольфрамитовых месторождений. Изотопный состав сульфидной серы в пиритах флюорит-шеелитового и золото-шеелитового типа близок к значениям мантийного источника, а кварц-шеелитовых – утяжелен и имеет коровое происхождение.

Проведенные изотопные исследования свидетельствуют о существенном различии источников вещества позднепалеозойских и мезозойских вольфрамсодержащих месторождений. В образовании объектов мезозойского этапа, формировавшихся в рифтогенных обстановках, отчетливо фиксируется участие мантийного источника флюидов. Для позднепалеозойского этапа, сопровождавшегося образованием существенно шеелитовых проявлений, распространенного на площадях развития Ангаро-Витимского батолита, характерно преобладание существенно корового источника вещества и флюидов.

Заключение

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие наиболее важные выводы:

В формировании вольфрамовых месторождений Забайкалья участвовали компоненты глубинного

(мантийного) источника. Это были фтор, сера и углекислота. На поздних стадиях образования месторождений в состав флюидов была вовлечена вода метеорного источника.

Установлено различие источников вещества позднепалеозойских и мезозойских вольфрамсодержащих

месторождений. Группа месторождений, связанных с мезозойским этапом, формировались с участием мантийного источника флюидов, тогда как в позднепалеозойских установлено преобладание существенно корового источника вещества и рудоформирующих флюидов.

Список источников

- Абрамов Б.Н., Посохов В.Ф.** Петрогеохимическая и изотопная характеристика, связь с магматизмом вольфрамовых месторождений Агинской и Аргунской структурно-формационных зон Восточного Забайкалья // Литосфера. 2021. Т. 21, № 2. С. 262–272.
- Аксюк А.М.** Экспериментально-обоснованные геофториметры и режим фтора в гранитных флюидах // Петрология. 2002. Т. 10, № 6. С. 628–642.
- Андреева О.В., Головин В.А., Гольцман Ю.В., Козлова П.С., Сельцов Б.М.** Эволюция мезозойского магматизма и руднометасоматических процессов в Юго-Восточном Забайкалье (Россия) // Геология рудных месторождений. 1996. № 2. С. 115–130.
- Батурина Е.Е., Рипп Г.С.** Молибденовые и вольфрамовые месторождения Западного Забайкалья. М.: Наука, 1984. 152 с.
- Беус А.А., Северов А.С., Ситин А.А., Субботин К.Д.** Альбитизированные и грейзенизированные граниты (апограниты). М.: Издательство АН СССР, 1962. 193 с.
- Боровиков А.А., Говердовский В.А., Борменко А.С., Брянский Н.В., Шабалин С.И.** Состав и металлоносность рудообразующих флюидов Мо-W месторождения Калгутинское (Горный Алтай) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 4. С. 647–662. doi: 10.15372/GiG20160401
- Борщевский Ю.А., Апельцин Ф.Р., Борисова С.Л.** Изотопный состав кислорода вольфрамитов из вольфрамовых месторождений различных формационных и генетических типов // Записки ВМО. 1980. Т. 4, № 109. С. 633–643.
- Булаев К.Б.** Особенности образования и размещения флюоритовых формаций Забайкалья. Эволюция эндогенных процессов и оруденения в Забайкалье. Улан-Удэ: Издательство БФ СО РАН, 1981. С. 101–109.
- Бурцева М.В., Рипп Г.С., Посохов В.Ф., Мурзинцева А.Е.** Нефриты Восточной Сибири: геохимические особенности и проблемы генезиса // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 3. С. 516–527. doi: 10.15372/GiG20150303
- Гриненко В.А.** Приготовление двуокиси серы для изотопного анализа // Неорганическая химия. 1962. № 7. С. 2578–2582.
- Дубинина Е.О.** Поведение стабильных изотопов при редкоземельном рудообразовании на месторождении Акчатау: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 1993. 123 с.
- Иванова Г.Ф., Смирнова О.К., Игнатенко К.И.** Особенности химического состава вольфрамитовой минерализации Джидинского рудного поля // Записки РМО. 1991. № 4. С. 77–88.
- Игнатович В.И.** Основные закономерности кварц-гюбнеритовых жил в Джидинском рудном поле. Минералогия и геохимия вольфрамовых месторождений. Л.: Изд-во ЛГУ, 1975. 111 с.
- Коваленко В.И., Антипин В.С., Коваленко Н.И.** Коэффициенты распределения фтора в магматических породах // Геохимия. 1984. № 3. С. 331–351.
- Куприянова И.И., Шпанов Е.П., Новикова М.И., Журкова З.А.** Бериллий России: состояние, проблемы развития и освоения минерально-сырьевой базы. М.: Геоинформарк, 1996. 40 с.
- Ласточкин Е.И., Рипп Г.С., Цыденова Д.С., Посохов В.Ф., Мурзинцева А.Е.** Результаты изотопного изучения эпитермальных флюоритовых месторождений Западного Забайкалья (Источники вещества и флюидов) // Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. Известия Сиб. отделения Секции наук о Земле РАЕН. 2018. Т. 41, № 2. С. 9–22. doi: 10.21285/2541-9455-2018-41-2-41-53
- Летников Ф.А.** Флюидный режим эндогенных процессов и проблемы рудогенеза // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 12. С. 1296–1308.
- Матвеева С.С., Спасенных М.Ю., Сущевская Т.М., Бочков А.Ю., Игнатьев А.В.** Геохимическая модель формирования Спокойнинского вольфрамового месторождения (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. 2002. Т. 44, № 2. С. 125–147.
- Онтеев Д.О.** Стадийность минерализации и зональность месторождений Забайкалья. М.: Наука, 1974. 244 с.
- Платов В.С., Савченко А.А., Игнатов А.М., Гороховский Д.В., Шор Г.М., Алексеенко В.Д., Мухин В.Н., Суслова С.В., Платова Е.В., Большакова Т.В., Шеломенцева Т.И.** Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение) Алдано-Забайкальская серия. Лист М-48. Улан-Удэ. Объяснительная записка. СПб.: Издательство СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2009. 271 с.
- Повилайтис М.М.** Основные черты минералогии Джидинского Мо-W месторождения // Тр. ИМГРЭ. М.: Издательство АН СССР, 1960. Вып. 24. 167 с.
- Рипп Г.С.** Геохимия эндогенного оруденения и критерии прогноза в складчатых областях. Новосибирск: Наука, 1984. 192 с.
- Рипп Г.С., Кобылкина О.В., Дорошкевич А.Г., Шаракшинов А.О.** Позднемезозойские карбонатиты Западного Забайкалья. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2000. 232 с.
- Саватенков В.М., Мочалов А.Г.** Возраст и источники дунитов массива Кондер Алданского щита // Доклады Академии наук. 2018. Т. 482, № 5. С. 577–582. doi: 10.31857/S086956520003033-9
- Савченко А.А., Рипп Г.С., Избродин И.А., Посохов В.Ф.** Возраст и изотопная характеристика Булуктаевского молибден-вольфрамового месторождения (Республика Бурятия) // Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. Известия Сиб. отделения секции наук о Земле РАЕН. 2018. Т. 41, № 2. С. 9–22. doi: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-7-21
- Таусон Л.В.** Магматизм и рудообразование. М.: Наука, 1979. 36 с.

Фор Г. Основы изотопной геохимии. М. : Мир, 1989. 590 с.

Ходанович П.Ю., Гончаров Д.А., Смирнова О.К. Соотношение даек и Мо-W оруденения Джидинского рудного поля (Западное Забайкалье) по геологическим, изотопным и геохимическим данным. Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза // Материалы II Всероссийской конференции по изотопной геохронологии. СПб. : Изд-во ИГГД РАН, 2003. С. 525–529.

Чернышев И.В., Агапова А.А., Троицкий В.А. Pb-Pb изотопные характеристики и проблема источника крупномасштабного W-Мо оруденения в Джидинском рудном поле (Западное Забайкалье) // Доклады Академии наук. 1999. Т. 366, № 6. С. 819–822.

Чернышев И.В., Гольцман Ю.В., Банрова Э.В., Иванова Г.Ф. Rb-Sr геохронология процессов последовательного формирования гранитов, грейзенизации и гидротермальной минерализации: Джидинское W-Мо месторождение, Западное Забайкалье // Доклады Академии наук. 1998. Т. 360, № 4. С. 537–540.

Чернышев М.В., Журавлев Д.З., Троицкий В.А. Источники вещества редкометалльных (W-Мо) месторождений в свете данных изотопного состава Sr, Nd и Pb // XI Всесоюзный симпозиум по геохимии изотопов : тезисы Докладов. М., 1986. С. 365–367.

Чухров Ф.В., Ермилова Л.П., Виноградов В.И. Изотопный состав и происхождение серы некоторых вольфрамовых месторождений центрального Казахстана. Изотопы серы и вопросы рудообразования. М. : Наука, 1967. С. 46–58.

Ярмолук В.В., Иванов В.Г. Магматизм и геодинамика Западного Забайкалья в позднем мезозое и кайнозое // Геотектоника. 2000. № 2. С. 43–64.

Ярмолук В.В., Иванов В.Г., Коваленко В.И. Источники внутриплитного магматизма Западного Забайкалья в позднем мезозое – кайнозое (на основе геохимических и изотопных данных) // Петрология. 1998. Т. 6, № 2. С. 115–138.

Bonin B. A-type granites and related rocks: evolution of a concept, problems and prospects // Lithos. 2007. V. 97. P. 1–27.

Breiter K. Nearly contemporaneous evolution of the A- and S-type fractionated granites in the Krušné hory/Erzgebirge Mts., Central Europe // Lithos. 2012. V. 151. P. 105–121. doi: 10.1016/j.lithos.2011.09.022

Broom-Fendley S., Heaton T., Wall F., Gunn G. Tracing the fluid source of heavy REE mineralisation in carbonatites using a novel method of oxygen-isotope analysis in apatite: the example of Songwe Hill, Malawi // Chem. Geol. 2016. V. 440. P. 275–287. doi: 10.1016/j.chemgeo.2016.07.023

Chacko T., Riciputi L.R., Cole D.R., Horita J. A new technique for determining equilibrium hydrogen isotope fractionation factors using the ion microprobe: Application to the epidote-water system // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1999. V. 63. P. 1–10.

Gomes M., Neiva A. Petrogenesis of tin-bearing granites from Ervedosa, northern Portugal: The importance of magmatic processes // Chemie der Erde-Geochemistry. 2002. V. 62 (1). P. 47–72.

Hoefs J. Stable isotope geochemistry. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2009. 286 p.

Jiang Y.-H., Liu Z., Jia R.-Y., Liao S.-Y., Zhou Q., Zhao P. Miocene potassic granite-syenite granite-syenite association in western Tibetan Plateau: Implications for shoshonitic and high Ba-Sr granite genesis // Lithos. 2012. V. 134–135. P. 146–162. doi: 10.1016/j.lithos.2011.12.012

Johnson T.M., Ripley E.M. Hydrogen and oxygen isotopic systematic of berillium mineralisation Spor Mountain. Utah Geol. Soc. Am. Abstr. Progr. 1998. V. 30. 127 p.

Khoshnoodi K., Behzadi M., Gannadi-Maragheh M., Yazdi M. Alkali metasomatism and Th-REE mineralization in the Choghart deposit, Bafq district, Central Iran. Geol. Croat. 2017. V. 70. P. 53–69. doi: 10.4154/gc.2017.03

Li G.-M., Cao M., Qin K.-Z., Evans N.J., Hollings P., Seitmuratova E.Y. Geochronology, petrogenesis and tectonic settings of pre- and syn-ore granites from the W-Mo deposits (East Kounrad, Zhanet and Akshatau), Central Kazakhstan // Lithos. 2016. V. 252–253. P. 16–31. doi: 10.1016/j.lithos.2016.01.023

Li X., Huang C., Wang C., Wang L. Genesis of the Huangshaping W-Mo-Cu-Pb-Zn polymetallic deposit in Southeastern Hunan Province, China: Constraints from fluid inclusions, trace elements, and isotopes // Ore Geology Reviews. 2016. V. 79. P. 1–25. doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.04.023

Litvinovsky B.A., Tsygankov A.A., Jahn B.M. Origin and evolution of overlapping calc-alkaline and alkaline magmas: The Late Paleozoic post-collisional igneous province Transbaikalia // Lithos. 2011. V. 125. P. 845–874. doi: 10.1016/j.lithos.2011.04.007

Neiva A. Portuguese granites associated with Sn-W and Au mineralizations // Bulletin-Geological Society of Finland. 2002. V. 74. P. 79–101.

Raimbault L., Cuney M., Azencott C., Duthou J., Joron J.L. Geochemical evidence for a multistage magmatic genesis of Ta-Sn-Li mineralization in the granite at Beauvoir, French Massif Central // Economic Geology. 1995. V. 90. P. 548–576.

Ripp G.S., Smirnova O.K., Izbrodin I.A., Lastochkin E.I., Rampilov M.O., Posokhov V.F. An isotope study of the Dzhdida Mo-W ore field (Western Transbaikalia, Russia) // Minerals. 2018. V. 8 (12). 546. doi: 10.3390/min8120546

Seal R.R., Rye R.O. Stable isotope study of fluid inclusions in fluorite from Idaho: Implications for continental climates during the Eocene // Geology. 1993. V. 21. P. 219–222.

Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // Geochim. Cosmochim. Acta. 1990. V. 54. P. 1353–1357.

Sheppard S.M.F. Characterization and isotope variation in natural waters // Review of mineralogy. 1986. V. 16. P. 165–181.

Shieh Y.-N., Zhang G.-X. Stable isotope studies of quartz-vein type tungsten deposits in Dajishan Mine, Jiangxi Province, Southeast China. Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein. The Geochemical Society, Special Publication. 1991. V. 3. P. 425–435.

Siegel K., Williams-Jones A.E., Van Hinsberg V.J. The amphiboles of the REE-rich A-type peralkaline Strange Lake pluton: Fingerprints of magma evolution // Lithos. 2017. V. 288. P. 156–174. doi: 10.1016/j.lithos.2017.07.012

Song W.-L., Yao J.-M., Chen H.-Y., Sun W.-D., Ding J.-Y., Xiang X.-K., Zuo Q.-S., Lai C.-K. Mineral paragenesis, fluid inclusions, H-O isotopes and ore-forming processes of the giant Dahutang W-Cu-Mo deposit, South China // Ore Geology Reviews. 2018. V. 99. P. 116–150. doi: 10.1016/j.oregeorev.2018.06.002

Suzuoki T., Epstein S. Hydrogen isotope fractionation between OH-bearing minerals and water // Geochim. Cosmochim. Acta. 1976. V. 40. P. 1229–1240.

- Taylor B.E., O'Neil J.R.** Stable isotope studies of metasomatic Ca-Fe-Al-Si-skarns and associated metamorphic and igneous rocks Osgood mountains, Nevada // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1977. V. 63(1). P. 1–50.
- Taylor H.P., Frechen J., Degens E.T.** Oxygen and carbon isotope studies of carbonatites from the Laacher See district, West Germany and the Alno district, Sweden // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1967. V. 31. P. 407–430.
- Vennemann, T.W., O'Neil J.R.** A simple and inexpensive method of hydrogen isotope and water analyses of minerals and rocks based on zinc reagent. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*. 1993. V. 103. P. 227–234.
- Wang Y.-H., Zhang F.-F., Liu J.-J., Xue C.-J., Li B.C., Xian X.C.** Ore genesis and hydrothermal evolution of the Donggebi porphyry Mo deposit, Xinjiang, Northwest China: evidence from isotopes (C, H, O, S, Pb), fluid inclusions, and molybdenite Re-Os dating // *Economic Geology*. 2018a. V. 113 (2). P. 463–488.
- Wang Y.-H., Zhang F.-F., Liu J.-J., Xue C.-J., Zhang Z.-C.** Genesis of the Wurinitu W-Mo deposit, Inner Mongolia, northeast China: Constraints from geology, fluid inclusions and isotope systematics // *Ore Geology Reviews*. 2018b. V. 94. P. 367–382.
- Wickham S.M., Alberts A.D., Zanzvilevich A.N., Litvinovsky B.A., Bindeman J.N., Schanble E.A.** A stable Isotope Study of Anorogenic Magmatism in East Central Asia // *Petrology*. 1996. V. 37 (5). P. 1063–1095.
- Yang J., Barreing J., Siebert C., Futzke J., Stephens E., Halliday A.N.** The molibdenum isotopic compositions of J-S and A-Type granitic suites // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2017. V. 205. P. 168–186. doi: 10.1016/j.gca.2017.01.027
- Zeng Q.-D., Sun Y., Chu S.-X., Duan X.-X., Liu J.** Geochemistry and geochronology of the Dongshanwan porphyry Mo–W deposit, Northeast China: Implications for the Late Jurassic tectonic setting // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2015. V. 97. P. 472–485. doi: 10.1016/j.jseaes.2014.07.027
- Zhang F.-F., Wang Y.-H., Liu J.-J., Wang J.-C.** Ore genesis and hydrothermal evolution of the Wulandele Mo deposit, Inner Mongolia, Northeast China: Evidence from geology, fluid inclusions and H-O-S-Pb isotopes // *Ore Geology Reviews*. 2018. V. 93. P. 181–199. doi: 10.1016/j.oregeorev.2017.12.021
- Zhang W., Lentz D.R., Thorne K.G., McFarlane C.** Geochemical characteristics of biotite from felsic intrusive rocks around the Sisson Brook W–Mo–Cu deposit, west-central New Brunswick: An indicator of halogen and oxygen fugacity of magmatic systems // *Ore Geology Reviews*. 2016. V. 77. P. 82–96. doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.02.004
- Zhang Y., Yang J.-H., Chen J.-Y., Wang H., Xiang Y.-X.** Petrogenesis of Jurassic tungsten-bearing granites in the Nanling Range, South China: Evidence from whole-rock geochemistry and zircon U-Pb and Hf-O isotopes // *Lithos*. 2017. V. 278–281. P. 166–180. doi: 10.1016/j.lithos.2017.01.018
- Zheng W., Mao J.-W., Zhao H.-J., Ouyang H.-G., Zhao C.-S., Yu X.-F.** Geochemistry, Sr-Nd-Pb-Hf isotopes systematics and geochronological constrains on petrogenesis of the Xishan A-type granite and associated W-Sn mineralization in Guangdong province, South China // *Ore Geology Reviews*. 2017. V. 88. P. 739–752.
- Zheng Y., Cai X., Ding, Z., Cawood P.A., Yue S.** Geology, geochronology and isotopic geochemistry of the Xiaoliugou W-Mo ore field in the Qilian Orogen, NW China: Case study of a skarn system formed during continental collision // *Ore Geology Reviews*. 2017. V. 81 (2). P. 575–586.
- Zheng Y.-F.** Oxygen isotope fractionation in wolframite // *European Journal of Mineralogy*. 1992. V. 4. P. 1331–1335.
- Zheng Y.-F.** Calculation of oxygen isotope fractionation in anhydrous silicate minerals // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1993a. V. 57. P. 1079–1091.
- Zheng Y.-F.** Calculation of oxygen isotope fractionation in hydroxyl-bearing silicates // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1993b. V. 120. P. 247–263.

References

- Abramov B.N., Posokhov V.F. Petrogeochemical and isotopic characteristics, connection with magmatism of tungsten deposits of the Aginsk and Argunsk structural-formational zones of Eastern Transbaikalia // *Lithosphere (Russia)*. 2021. V. 21. 2. pp. 262–272.
- Aksyuk A.M. *Ekspperimental'no-obosnovannyye geoflorimetriy i rezhim flora v granitnykh flyuidakh* [Experimentally based geofluorimeters and the fluorine regime in granitic fluids] // *Petrologiya [Petrology]*. 2002. V. 10. No. 6. pp. 628–642. In Russian
- Andreeva O.V., Golovin V.A., Goltsman Y.V., Kozlova P.S., Seltsov B.M. *Evolutsiya mezozoysskogo magmatizma i rudnometasomaticheskikh protsessov v Yugo-Vostochnom Zabaykal'e (Rossiya)* [Evolution of mesozoic magmatism and ore metasomatic processes in the South-Eastern Transbaikalia (Russia)] // *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of ore deposits]*. 1996. No. 2. pp. 115–130. In Russian
- Baturina E.E., Ripp G.S. *Molibdenovye i vol'framovye mestorozhdeniya Zapadnogo Zabaykal'ya* [Mo-W deposits of Western Transbaikalia]. Moscow: Nauka, 1984. 152 p. In Russian
- Beus A.A., Severov A.S., Siten A.A., Subbotin K.D. *Al'bitizirovannyye i greyzenizirovannyye granity (apogranity)* [Albitized and greisenized granites (apogranites)]. Moscow: Izdatel'stvo AN SSSR, 1962. 193 p. In Russian
- Borovikov A.A., Goverdovskiy V.A., Borisenko A.S., Bryanskiy N.V., Shabalin S.I. *Sostav i metallonosnost' rudoobrazuyushchikh flyuidov Mo-W mestorozhdeniya Kalgutinskoe (Gornyy Altay)* [Composition and metal contents of ore-forming fluids of the Kalguty Mo–W(Be) deposit (Gorny Altai)] // *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*. 2016. V. 57. No. 4. pp. 647–662. doi: 10.1016/j.rgg.2016.04.001
- Borshchevsky Y.A., Apeltsin F.R., Borisova S.L. *Izotopnyy sostav kisloroda vol'framitov iz vol'framovykh mestorozhdeniy razlichnykh formatsionnykh i geneticheskikh tipov* [Isotope composition of oxygen of wolframite from tungsten deposits of various formation and genetic types] // *Zapiski VMO*. 1980. V. 4. No. 109. pp. 633–643. In Russian
- Bulnaev K.B. *Osobennosti obrazovaniya i razmeshcheniya flyuritovykh formatsiy Zabaykal'ya. Evolutsiya endogennykh protsessov i orudneniya v Zabaykal'e* [Features of the formation and placement of fluorite formations in Transbaikalia. Evolution of endogenous processes and mineralization in Transbaikalia]. Ulan-Ude: BF SO RAN. 1981. pp. 101–109. In Russian
- Burtseva M.V., Ripp G.S., Posokhov V.F., Murzintseva A.E. *Nefrity Vostochnoy Sibiri: geokhimicheskie osobennosti i problemy genezisa* [Nephrites of East Siberia: Geochemical features and problems of genesis] // *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*. 2015. V. 56. No. 3. pp. 516–527. doi: 10.1016/j.rgg.2015.02.003

- Grinenko V.A. *Prigotovlenie двуокиси серы для изотопного анализа* [Preparation of sulfur dioxide for isotopic analysis] // Неорганическая химия [Inorganic chemistry]. 1962. No. 7. pp. 2578–2582. In Russian
- Dubiniina E.O. *Povedenie stabil'nykh izotopov pri redkozemel'nom rudoobrazovanii na mestorozhdenii Akchatau* [Behavior of stable isotopes during rare earth ore formation at the Akchatau deposit]. Thesis for the degree of cand. geol.-min. sciences. Moscow. 123 p. In Russian
- Ivanova G.F., Smirnova O.K., Ignatenko K.I. *Osobennosti khimicheskogo sostava vol'framitovoy mineralizatsii Dzhidinskogo rudnogo polya* [Chemical composition of the wolframite-mineralization of the Dzhida ore field] // Zapiski RMO. 1991. No. 4. pp. 77–88. In Russian
- Ignatovich V.I. *Osnovnye zakonomernosti kvarts-gyubneritovykh zhil v Dzhidinskom rudnom pole. Mineralogiya i geokhimiya vol'framovykh mestorozhdeniy* [The main patterns of quartz-hubnerite veins in the Dzhida ore field. Mineralogy and geochemistry of tungsten deposits]. Leningrad: Izdatel'stvo LGU, 1975. 111 p. In Russian
- Kovalenko V.I., Antipin V.S., Kovalenko N.I. *Koeffitsienty raspredeleniya flora v magmaticheskikh porodakh* [Fluorine partition coefficients in igneous rocks] // *Geokhimiya* [Geochemistry International]. 1984. No. 3. pp. 331–351. In Russian
- Kupriyanova I.I., Shpanov E.P., Novikova M.I., Zhurkova Z.A. *Berilliy Rossii: sostoyanie, problemy razvitiya i osvoeniya mineral'no-syr'evoy bazy* [Beryllium in Russia: state, problems of development and development of the mineral resource base]. Moscow: Izdatel'stvo Geoinformark, 1996. 40 p. In Russian
- Lastochkin E.I., Ripp G.S., Tsydenova D.S., Posokhov V.F., Murzintseva A.E. *Rezultaty izotopnogo izucheniya epitermal'nykh flyuoritovykh mestorozhdeniy Zapadnogo Zabaykal'ya (Istochniki veshchestva i flyuidov)* [Results of isotopic study of epithermal fluorite deposits of Western Transbaikalia (sources of matter and fluids)] // *Geologiya, poiski i razvedka mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh. Izvestiya Sib. otdeleniya Sektii nauk o Zemle RAEN*. 2018. V. 41. No. 2. pp. 9–22. In Russian. doi: 10.21285/2541-9455-2018-41-2-41-53
- Letnikov F.A. *Flyuidnyy rezhim endogennykh protsessov i problemy rudogeneza* [Fluids in endogenic processes and problems of metallogeny] // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2006. V. 47. No. 12. pp. 1296–1308. In Russian
- Matveeva S.S., Spasennikh M.Y., Sushevskaya T.M., Bochkov A.Y., Ignatiev A.V. *Geokhimicheskaya model' formirovaniya Spokoyinskogo vol'framovogo mestorozhdeniya (Vostochnoe Zabaykal'e, Rossiya)* [Geochemical model of formation of the Spokininsky deposit (East Transbaikalia)] // *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of ore deposits]. 2002. V. 44. No. 2. pp. 125–147. In Russian
- Ontoev D.O. *Stadiynost' mineralizatsii i zonal'nost' mestorozhdeniy Zabaykal'ya* [Stages of Mineralization and Zoning of the Deposits of Transbaikalia]. Moscow: Nauka, 244 p. In Russian
- Platov V.S., Savchenko A.A., Ignatov A.M., Gorokhovskiy D.V., Shor G.M., Alekseenko V.D., Mukhin V.N., Suslova S.V., Platova E.V., Bolshakova T.V., Shelomentseva T.I. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (tret'e pokolenie) Aldan-Zabaykal'skaya seriya. List M-48. Ulan-Ude. Ob'yasnitel'naya zapiska*. [State Geological Map of the Russian Federation; Scale 1: 1000000 (Third Generation) Aldan-Transbaikalian Series; M-48. Ulan-Ude]. St. Petersburg: Izdatel'stvo SPB kartfabriki VSEGEI. 2009. 271 p. In Russian
- Povilaitis M.M. *Osnovnye cherty mineralogii Dzhidinskogo Mo-W mestorozhdeniya* [Main features of the mineralogy of the Dzhida Mo-W deposit]. Tr. IMGRE. Moscow: Izdatel'stvo AN SSSR, 1960. Vyp. 24. 167 p. In Russian
- Ripp G.S. *Geokhimiya endogennoy orudeneniya i kriterii prognoza v skladchatykh oblastyakh* [Geochemistry of endogenous mineralization and forecasting criteria in folded regions]. Novosibirsk: Nauka, 192 p. In Russian
- Ripp G.S., Kobylkina O.V., Doroshkevich A.G., Sharakhinov A.O. *Pozdnemezozoyskie karbonatity Zapadnogo Zabaykal'ya* [Late mesozoic carbonatites of Western Transbaikalia]. Ulan-Ude: Izdatel'stvo BNTs SO RAN, 232 p. In Russian
- Savatenkov V.M., Mochalov A.G. *Vozrast i istochniki dunitov massiva Konder Aldanskogo shchita* [Age and sources of dunites of Konder massive (Aldan shield)] // *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences]. 2018. V. 482. No. 5. pp. 577–582. In Russian. doi: 10.1134/S1028334X18100161
- Savchenko A., Ripp G., Izbrodin I., Posokhov V. *Vozrast i izotopnaya kharakteristika Buluktaevskogo molibden-vol'framovogo mestorozhdeniya (Respublika Buryatiya)* [Age and isotopic characteristics of the Buluktai Mo-W deposit (Republic of Buryatia)] // *Geologiya, poiski i razvedka mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh. Izvestiya Sib. otdeleniya sektii nauk o Zemle RAEN*. 2018. V. 41. No. 2. pp. 9–22. In Russian
- Towson L.V. *Magmatizm i rudoobrazovanie* [Magmatism and mineralization]. Moscow: Nauka, 36 p. In Russian
- Faure G. *Osnovy izotopnoy geokhimii* [Fundamentals of isotope geochemistry]. Moscow: Mir, 590 p. In Russian
- Khodanovich P.Y., Goncharov D.A., Smirnova O.K. *Sootnoshenie daek i Mo-W orudeneniya Dzhidinskogo rudnogo polya (Zapadnoe Zabaykal'e) po geologicheskim, izotopnym i geokhimicheskim dannym. Izotopnaya geokhronologiya v reshenii problem geodinamiki i rudogeneza* [Correlation of dikes and Mo-W mineralization of the Dzhida ore field (Western Transbaikalia) according to geological, isotope and geochemical data. Isotope geochronology in solving problems of geodynamics and ore genesis] // *Materialy II Vserossiyskoy konferentsii po izotopnoy geokhronologii*. St.Petersburg: Izdatel'stvo IGGI RAN. 2003. pp. 525–529. In Russian
- Chernyshev I.V., Agapova A.A., Troitsky V.A. *Pb-Pb izotopnye kharakteristiki i problema istochnika krupnomasshtabnogo W-Mo orudeneniya v Dzhidinskom rudnom pole (Zapadnoe Zabaykal'e)* [Pb-Pb isotope characteristics and problem of the source of large-scale W-Mo mineralization in the Dzhida ore field (Western Transbaikalia)] // *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences]. 1999. V. 366. No. 6. pp. 819–822. In Russian
- Chernyshev I.V., Gol'tsman Y.V., Bairova E.D., Ivanova G.F. *Rb-Sr geokhronologiya protsessov posledovatel'nogo formirovaniya granitov, greizenizatsii i gidrotermal'noy mineralizatsii: Dzhidinskoe W-Mo mestorozhdenie, Zapadnoe Zabaykal'e* [Rb-Sr geochronometry of sequential granite formation, greisenization, and hydrothermal mineralization: Evidence from the Dzhida W-Mo deposit, Western Transbaikalian region] // *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences]. 1998. V. 360. No. 4. pp. 537–540. In Russian
- Chernyshev M.V., Zhuravlev D.Z., Troitsky V.A. *Istochniki veshchestva redkometal'nykh (W-Mo) mestorozhdeniy v svete dannykh izotopnogo sostava Sr, Nd i Pb. XI Vsesoyuznyy simpozium po geokhimii izotopov* [Sources of matter from rare metal (W-Mo) deposits in light of Sr, Nd and Pb isotopic data. XI All-Union Symposium on Geochemistry of Isotopes]. Tezisy Dokladov. Moscow. 1986. pp. 365–367. In Russian
- Chukhrov F.V., Ermilova L.P., Vinogradov V.I. *Izotopnyy sostav i proiskhozhdenie sery nekotorykh vol'framovykh mestorozhdeniy tsentral'nogo Kazakhstana. Izotopy sery i voprosy rudoobrazovaniya* [Isotopic composition and origin of sulfur in some tungsten deposits of central Kazakhstan. Sulfur isotopes and issues of ore formation]. Moscow: Izdatel'stvo «Nauka». 1967. pp. 46–58. In Russian

- Yarmolyuk V.V., Ivanov V.G. *Magmatizm i geodinamika Zapadnogo Zabaykal'ya v pozdnem mezozoe i kaynozoe* [Magmatism and geodynamics of Western Transbaikalia in the late mesozoic and Cenozoic] // *Geotektonika* [Geotectonics]. 2000. No. 2. pp. 43–64. In Russian
- Yarmolyuk V.V., Ivanov V.G., Kovalenko V.I. *Istochniki vnutriplitnogo magmatizma Zapadnogo Zabaykal'ya v pozdnem mezozoe – kaynozoe (na osnove geokhimicheskikh i izotopnykh dannykh)* [The sources of intraplate magmatism of Western Transbaikalia in late mesozoic and cenozoic: evidence from geochemical and isotope-geochemical data] // *Petrologiya* [Petrology]. 1998. V. 6, No. 2. pp. 115–138. In Russian
- Bonin B. A-type granites and related rocks: evolution of a concept, problems and prospects // *Lithos*. 2007. V. 97. pp. 1–27.
- Breiter K. Nearly contemporaneous evolution of the A- and S-type fractionated granites in the Krušné hory/Erzgebirge Mts., Central Europe // *Lithos*. 2012. V. 151. pp. 105–121. doi: 10.1016/j.lithos.2011.09.022
- Broom-Fendley S., Heaton T., Wall F., Gunn G. Tracing the fluid source of heavy REE mineralisation in carbonatites using a novel method of oxygen-isotope analysis in apatite: the example of Songwe Hill, Malawi // *Chem. Geol.* 2016. V. 440. pp. 275–287. doi: 10.1016/j.chemgeo.2016.07.023
- Chacko T., Riciputi L.R., Cole D.R., Horita J. A new technique for determining equilibrium hydrogen isotope fractionation factors using the ion microprobe: Application to the epidote-water system // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1999. V. 63. pp. 1–10.
- Gomes M., Neiva A. Petrogenesis of tin-bearing granites from Ervedosa, northern Portugal: The importance of magmatic processes // *Chemie der Erde-Geochemistry*. 2002. V. 62 (1). pp. 47–72.
- Hoefs J. *Stable isotope geochemistry*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2009. 286 p.
- Jiang Y.-H., Liu Z., Jia R.-Y., Liao S.-Y., Zhou Q., Zhao P. Miocene potassic granite–syenite granite–syenite association in western Tibetan Plateau: Implications for shoshonitic and high Ba–Sr granite genesis // *Lithos*. 2012. V. 134–135. pp. 146–162. doi: 10.1016/j.lithos.2011.12.012
- Johnson T.M., Ripley E.M. Hydrogen and oxygen isotopic systematic of berillium mineralisation Spor Mountain. Utah Geol. Soc. Am. Abstr. Progr. 1998. V. 30. 127 p.
- Khoshnoodi K., Behzadi M., Gannadi-Maragheh M., Yazdi M. Alkali metasomatism and Th-REE mineralization in the Choghart deposit, Bafq district, Central Iran. *Geol. Croat.* 2017. V. 70. pp. 53–69. doi: 10.4154/gc.2017.03
- Li G.-M., Cao M., Qin K.-Z., Evans N.J., Hollings P., Seitmuratova E.Y. Geochronology, petrogenesis and tectonic settings of pre- and syn-ore granites from the W-Mo deposits (East Kounrad, Zhanet and Akshatau), Central Kazakhstan // *Lithos*. 2016. V. 252–253. pp. 16–31. doi: 10.1016/j.lithos.2016.01.023
- Li X., Huang C., Wang C., Wang L. Genesis of the Huangshaping W–Mo–Cu–Pb–Zn polymetallic deposit in Southeastern Hunan Province, China: Constraints from fluid inclusions, trace elements, and isotopes // *Ore Geology Reviews*. 2016. V. 79. pp. 1–25. doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.04.023
- Litvinovsky B.A., Tsygankov A.A., Jahn B.M. Origin and evolution of overlapping calc-alkaline and alkaline magmas: The Late Paleozoic post-collisional igneous province Transbaikalia // *Lithos*. 2011. V. 125. pp. 845–874. doi: 10.1016/j.lithos.2011.04.007
- Neiva A. Portuguese granites associated with Sn-W and Au mineralizations // *Bulletin-Geological Society of Finland*. 2002. V. 74. pp. 79–101.
- Raimbault L., Cuney M., Azencott C., Duthou J., Joron J.L. Geochemical evidence for a multistage magmatic genesis of Ta-Sn-Li mineralization in the granite at Beauvoir, French Massif Central // *Economic Geology*. 1995. V. 90. pp. 548–576.
- Ripp G.S., Smirnova O.K., Izbrodin I.A., Lastochkin E.I., Rampilov M.O., Posokhov V.F. An isotope study of the Dzhida Mo–W ore field (Western Transbaikalia, Russia) // *Minerals*. 2018. V. 8(12). 546. doi: 10.3390/min8120546
- Seal R.R., Rye R.O. Stable isotope study of fluid inclusions in fluorite from Idaho: Implications for continental climates during the Eocene // *Geology*. 1993. V. 21. pp. 219–222.
- Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1990. V. 54. pp. 1353–1357.
- Sheppard S.M.F. Characterization and isotope variation in natural waters // *Review of mineralogy*. 1986. V. 16. pp. 165–181.
- Shieh Y.-N., Zhang G.-X. Stable isotope studies of quartz-vein type tungsten deposits in Dajishan Mine, Jiangxi Province, Southeast China. *Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein*. The Geochemical Society, Special Publication. 1991. V. 3. pp. 425–435.
- Siegel K., Williams-Jones A.E., Van Hinsberg V.J. The amphiboles of the REE-rich A-type peralkaline Strange Lake pluton-Fingerprints of magma evolution // *Lithos*. 2017. V. 288. pp. 156–174. doi: 10.1016/j.lithos.2017.07.012
- Song W.-L., Yao J.-M., Chen H.-Y., Sun W.-D., Ding J.-Y., Xiang X.-K., Zuo Q.-S., Lai C.-K. Mineral paragenesis, fluid inclusions, H-O isotopes and ore-forming processes of the giant Dahutang W-Cu-Mo deposit, South China // *Ore Geology Reviews*. 2018. V. 99. pp. 116–150. doi: 10.1016/j.oregeorev.2018.06.002
- Suzuoki T., Epstein S. Hydrogen isotope fractionation between OH-bearing minerals and water // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1976. V. 40. pp. 1229–1240.
- Taylor B.E., O'Neil J.R. Stable isotope studies of metasomatic Ca-Fe-Al-Si-skarns and associated metamorphic and igneous rocks Osgood mountains, Nevada // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1977. V. 63 (1). pp. 1–50.
- Taylor H.P., Frechen J., Degens E.T. Oxygen and carbon isotope studies of carbonatites from the Laacher See district, West Germany and the Alno district, Sweden // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1967. V. 31. pp. 407–430.
- Vennemann, T.W., O'Neil J.R. A simple and inexpensive method of hydrogen isotope and water analyses of minerals and rocks based on zinc reagent. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*. 1993. V. 103. pp. 227–234.
- Wang Y.-H., Zhang F.-F., Liu J.J., Xue C.-J., Li B.C., Xian X.C. Ore genesis and hydrothermal evolution of the Donggebi porphyry Mo deposit, Xinjiang, Northwest China: evidence from isotopes (C, H, O, S, Pb), fluid inclusions, and molybdenite Re-Os dating // *Economic Geology*. 2018a. V. 113 (2). pp. 463–488.
- Wang Y.-H., Zhang F.-F., Liu J.J., Xue C.-J., Zhang Z.-C. Genesis of the Wurinitu W-Mo deposit, Inner Mongolia, northeast China: Constraints from geology, fluid inclusions and isotope systematics // *Ore Geology Reviews*. 2018b. V. 94. pp. 367–382.
- Wickham S.M., Alberts A.D., Zanzivilevich A.N., Litvinovsky B.A., Bindeman J.N., Schanble E.A. A stable Isotope Study of Anorogenic Magmatism in East Central Asia // *Petrology*. 1996. V. 37 (5). pp. 1063–1095.

Yang J., Barreing J., Siebert C., Futzke J., Stephens E., Halliday A.N. The molibdenium isotopic compositions of J-S and A-Type granitic suites // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2017. V. 205. pp. 168–186. doi: 10.1016/j.gca.2017.01.027

Zeng Q.-D., Sun Y., Chu S.-X., Duan X.-X., Liu J. Geochemistry and geochronology of the Dongshanwan porphyry Mo-W deposit, Northeast China: Implications for the Late Jurassic tectonic setting // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2015. V. 97. pp. 472–485. doi: 10.1016/j.jseaes.2014.07.027

Zhang F.-F., Wang Y.-H., Liu J.-J., Wang J.-C. Ore genesis and hydrothermal evolution of the Wulandele Mo deposit, Inner Mongolia, Northeast China: Evidence from geology, fluid inclusions and H-O-S-Pb isotopes // *Ore Geology Reviews*. 2018. V. 93. pp. 181–199. doi: 10.1016/j.oregeorev.2017.12.021

Zhang W., Lentz D.R., Thorne K.G., McFarlane C. Geochemical characteristics of biotite from felsic intrusive rocks around the Sisson Brook W-Mo-Cu deposit, west-central New Brunswick: An indicator of halogen and oxygen fugacity of magmatic systems // *Ore Geology Reviews*. 2016. V. 77. pp. 82–96. doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.02.004

Zhang Y., Yang J.-H., Chen J.-Y., Wang H., Xiang Y.-X. Petrogenesis of Jurassic tungsten-bearing granites in the Nanling Range, South China: Evidence from whole-rock geochemistry and zircon U-Pb and Hf-O isotopes // *Lithos*. 2017. V. 278–281. pp. 166–180. doi: 10.1016/j.lithos.2017.01.018

Zheng W., Mao J.-W., Zhao H.-J., Ouyang H.-G., Zhao C.-S., Yu X.-F. Geochemistry, Sr-Nd-Pb-Hf isotopes systematics and geochronological constrains on petrogenesis of the Xishan A-type granite and associated W-Sn mineralization in Guangdong province, South China // *Ore Geology Reviews*. 2017. V. 88. pp. 739–752.

Zheng Y., Cai X., Ding, Z., Cawood P.A., Yue S. Geology, geochronology and isotopic geochemistry of the Xiaoliugou W-Mo ore field in the Qilian Orogen, NW China: Case study of a skarn system formed during continental collision // *Ore Geology Reviews*. 2017. V. 81(2). pp. 575–586.

Zheng Y.-F. Oxygen isotope fractionation in wolframite // *European Journal of Mineralogy*. 1992. V. 4. pp. 1331–1335.

Zheng Y.-F. Calculation of oxygen isotope fractionation in anhydrous silicate minerals // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1993a. V. 57. pp. 1079–1091.

Zheng Y.-F. Calculation of oxygen isotope fractionation in hydroxyl-bearing silicates // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1993b. V. 120. pp. 247–263.

Информация об авторах:

Рампилов М.О., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия.

E-mail: mrampilov@mail.ru

Рампилова М.В., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия.

E-mail: mburtseva@mail.ru

Ласточкин Е.И., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия.

E-mail: last@ginst.ru

Посохов В.Ф., старший научный сотрудник, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия.

E-mail: vitafl@yandex.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Rampilov M.O., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Dobretsov Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia.

E-mail: mrampilov@mail.ru

Rampilova M.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Dobretsov Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia.

E-mail: mburtseva@mail.ru

Lastochkin E.I., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Dobretsov Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia.

E-mail: last@ginst.ru

Posokhov V.F., Senior Researcher, Dobretsov Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia.

E-mail: vitafl@yandex.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 04.06.2024; одобрена после рецензирования 25.04.2025; принята к публикации 29.08.2025

The article was submitted 04.06.2024; approved after reviewing 25.04.2025; accepted for publication 29.08.2025

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 551.501.81
doi: 10.17223/25421379/36/8

АНАЛИЗ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ВАРИАТИВНОСТИ И ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТРАЖАЕМОСТИ И ТУРБУЛЕНТНОСТИ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ КУЧЕВО-ДОЖДЕВОЙ ОБЛАЧНОСТИ НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ



Эдуард Анатольевич Болелов¹, Олег Валерьевич Васильев²,
Эльвира Сергеевна Бояренко³, Ксения Игоревна Галаева⁴

^{1, 2, 3, 4} Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия

¹ edbolelov@mail.ru

² vas_ov@mail.ru

³ boyarenko.elvira@mail.ru

⁴ ks.galaeva@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются вероятностные описания географической вариативности статистических характеристик радиолокационной отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии для Тверской, Воронежской и Калининградской областей. В качестве исходного материала использованы данные наблюдений метеорологических радиолокационных комплексов ближней зоны аэродрома для летнего периода 2023 г. Анализируется временная изменчивость статистических характеристик параметров распределения признаков для Верхне-Волжского региона России за период с 2022 по 2023 г.

Ключевые слова: метеорологический радиолокатор, ближняя зона аэродрома, опасные метеорологические явления, классификация метеорологических явлений, статистический анализ данных, межгодовая изменчивость

Источник финансирования: Исследования выполнены в рамках гранта РНФ № 23-29-00450 «Исследование отражательных и турбулентных характеристик атмосферы с использованием нового отечественного метеорологического радиолокационного комплекса ближней зоны “Монокль” в различных климатических зонах в интересах повышения достоверности автоматической классификации опасных метеоявлений».

Для цитирования: Болелов Э.А., Васильев О.В., Бояренко Э.С., Галаева К.И. Анализ географической вариативности и временной изменчивости статистических характеристик отражаемости и турбулентности атмосферы для кучево-дождевой облачности на европейской территории России // Геосферные исследования. 2025. № 3. С. 139–152. doi: 10.17223/25421379/36/8

Original article
doi: 10.17223/25421379/36/8

ANALYSIS OF GEOGRAPHICAL FLEXIBILITY AND TEMPORAL VARIABILITY OF STATISTICAL CHARACTERISTICS OF ATMOSPHERIC REFLECTIVITY AND TURBULENCE FOR CUMULONIMBUS CLOUDS IN THE EUROPEAN ZONE OF RUSSIA

Eduard A. Bolelov¹, Oleg V. Vasiliev², Elvira S. Boyarenko³, Ksenia I. Galaeva⁴

^{1, 2, 3, 4} Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

¹ edbolelov@mail.ru

² vas_ov@mail.ru

³ boyarenko.elvira@mail.ru

⁴ ks.galaeva@mail.ru

Abstract. The climate changes observed in recent years may lead to an increase in the number of hydrometeorological phenomena resulting from the development of convective clouds. For timely detection and further monitoring of dangerous weather events of convective origin, such as heavy rain, thunderstorms and hail, radar methods are used to obtain information on the structure and movement of clouds in real time. The purpose of this paper is to study probabilistic descriptions of the geographical variation of the statistical characteristics of radar reflectivity and specific dissipation rate of turbulent energy for different climatic

zones of the European territory of Russia. Three positions were selected from all operational weather radar WR in the European territory of Russia, located in the following regions: Tver, Voronezh and Kaliningrad. The zones were selected based on the local characteristics of a particular climatic zone, annual precipitation and average number of days with thunderstorms per year. For the analysis of statistical characteristics were used data from meteorological radar stations in the considered zones during the summer period of 2023. The methodology of research on regional changes in parameters obtained in the territory of Kaliningrad region and Voronezh is described. Statistical characteristics were analyzed and empirical distribution laws were established. On the basis of which the trends of changes in the threshold values for each of the selected regions were considered. The study showed that the characteristics of atmospheric reflectivity and turbulence have a pronounced geographical variation of the parameters Zmax and EDRmax. Differences were observed both within the same region and between different regions. In addition, the temporal variability of the statistical characteristics of the parameters of the trait distribution for the Upper-Volga region of Russia was analyzed. The linear trend method was used to assess the variability of characteristics over time. The data for the period from 2021 to 2023 were considered. These insignificant changes in statistical characteristics over time may be caused by changes in climatic conditions in the region under consideration. The obtained results will make it possible to refine the existing parameters of algorithms for the classification of hazardous weather events, in terms of adapting the value of decision thresholds in the classification of hazardous weather events.

Keywords: weather radar, near-airfield zone, dangerous meteorological events, classification of weather phenomena, statistical data analysis, interannual variability.

Source of financing: The study is done on state assignment of RSF "Investigation of the reflective and turbulent characteristics of the atmosphere using the new indigenous Russian near-airfield meteorological radar complex MRLC BZ "Monocle" in various climatic zones in order to increase the reliability of the automatic classification of hazardous weather phenomena".

For citation: Bolelov E.A., Vasiliev O.V., Boyarenko E.S., Galaeva K.I. (2025) Analysis of geographical flexibility and temporal variability of statistical characteristics of atmospheric reflectivity and turbulence for cumulonimbus clouds in the European zone of Russia. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 139–152. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/36/8

Введение

Воздушное пространство является непредсказуемой и изменчивой средой, особенно в вопросах обеспечения безопасности воздушных перевозок, требующих постоянного мониторинга метеорологической обстановки. В силу неоднородности климатических условий по всему миру, пилоты и авиационные специалисты сталкиваются с различными видами метеоявлений, которые могут представлять угрозу для безопасности полетов. Часто встречающиеся на европейской территории России (ЕТР) опасные метеоявления (ОЯ), связанные с кучево-дождевой облачностью (Cb), такие как ливень, гроза и град, могут нанести значительный ущерб воздушному судну и привести к авиационным происшествиям или катастрофам.

Все перечисленные ОЯ Cb представляют серьезную угрозу для авиации и требуют достоверного обнаружения и классификации. Данная задача решается путем использования радиолокационной информации, построения алгоритмов обработки сигналов и правил принятия решений, основанных на вероятностных описаниях признаков классификации. Признаками в предложенном методе являются распределения максимумов значений радиолокационной отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии по амплитуде и высоте [Бояренко и др., 2023; Васильев и др., 2023]. При этом естественным является предположение о вариативности статистических описаний признаков для различных климатических зон.

Кроме того, в последнее время отмечается существенное увеличение количества глобальных осадков над сушей. Летом из-за изменений климата неопределенность оценок трендов интенсивности и частоты осадков в отдельных регионах весьма высока. Пространственные распределения изменений в количестве осадков демонстрируют значительные региональные расхождения и сезонные контрасты. С большой вероятностью по мере повышения глобальной температуры межгодовая изменчивость количества осадков во многих континентальных регионах увеличится¹.

При изучении того или иного метеорологического явления традиционно проводят анализ его характеристик в зависимости от времени года и суток, метеорологических условий и синоптических ситуаций. Такой подход позволяет выявить некоторые закономерности, характеризующие исследуемое явление, его генезис и эволюцию. Изучение географической вариативности и временной изменчивости параметров метеоявлений предполагает анализ его статистических характеристик и установление эмпирических законов распределения [Тихонов, Бакаев, 1978; Айвазян и др., 1983; Дегтярев и др., 2015].

С этой целью в данной работе сравнивались статистические характеристики для трех различных климатических зон европейской территории России. Из всех оперативно работающих на территории ЕТР метеорологических радиолокационных комплексов ближней зоны (МРЛК БЗ) «Монокль» были выбраны три позиции, размещённые в следующих областях:

Тверская, Воронежская и Калининградская. Зоны выбраны исходя из местных особенностей годовых атмосферных осадков и среднего числа дней с грозами в год. Кроме того, для Верхневолжской зоны исследовалась межгодовая изменчивость характеристик во времени, которая может быть связана с изменением климата. Исследования вариативности вероятностных описаний позволят сформировать более корректные и настраиваемые критерии классификации ОЯ Сб в предположении, что статистические параметры признаков варьируются для различных климатических зон и, следовательно, позволят уточнить значения порогов принятия решений при классификации ОЯ.

Разработка методики проведения исследований

Оперативное обнаружение погодных условий требует знания региональных особенностей развития атмосферных процессов с учетом географического положения, близости крупных водоемов, неоднородного рельефа и т.д. В этом случае региональные особенности синоптических процессов рассматриваются в пределах отдельного региона (области, района и т.п.), границы которого выделяются по физико-географическому, метеорологическому, синоптическому или иному признаку, отвечающему целям исследования. Нередко региональные атмосферные процессы изучаются в пределах границ территориальных управлений по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [Хандожко, 1988]. Из этого очевидно, что радиолокационные характеристики облачности в различных районах в определенной степени зависят от местных географических особенностей. Следовательно, критерии классификации ОЯ должны варьироваться для различных климатических зон. Формирование региональных критериев классификации должно быть основано на корректном статистическом анализе выбранных признаков классификации.

В связи с особенностями климата и географическим положением, европейская территория России уязвима к различным опасным метеорологическим явлениям, связанным с кучево-дождевой облачностью. Так, например, на юге ЕТР грозовая активность может быть более частой из-за атмосферных перепадов и влияния рельефа местности. В прибрежных районах, таких как Калининградская область, могут наблюдаться сильные ветры и штормы из-за близости к морю. Эти различия в опасных явлениях разных регионов требуют отдельных исследований, а в последующем адаптации критериев классификации ОЯ для каждого региона [Голицын и др., 2001; Акимов и др., 2009; Kononova, Lupo, 2020].

Для региональных исследований вариативности признаков классификации был проведен анализ су-

ществующих пунктов размещения МРЛК БЗ «Монокль», которые установлены в различных климатических зонах европейской территории России.

Для выбора конкретных пунктов установки МРЛК БЗ использовались карта с климатическими зонами России, карта годовых атмосферных осадков, карта среднего числа дней с грозами в год на территории Российской Федерации.

Из всех оперативно работающих на территории ЕТР МРЛК были выбраны три позиции, размещенные в следующих областях: Тверская, Воронежская и Калининградская (рис. 1).

Указанные позиции выделены исходя из региональных особенностей климата²:

– Центрально-Чернозёмный район (в частности, Воронежская область, г. Воронеж), а также Центральный район (в частности, Тверская область, аэродром Орловка) – относятся к умеренно-континентальному климату. На аэродроме Орловка в год выпадает 850–1150 мм атмосферных осадков, в том числе ливневых, в тёплый период – более 400 мм, и более 30 дней с грозами в год. В Воронеже выпадает 550–700 мм атмосферных осадков в год, в том числе ливневых, наблюдается от 20 до 30 дней с грозами в год.

Установка МРЛК БЗ в Воронеже (51,670° с.ш., 39,250° в.д.) и на аэродроме Орловка (56,142° с.ш., 34,988° в.д.), которые находятся в одной климатической зоне и расположены на расстоянии 560 км друг от друга, обусловлена необходимостью изучения особенностей трансформации воздушных масс, сопровождающихся опасными погодными явлениями, такими как ливень, гроза и град и перемещающихся преимущественно с запада на восток [Лаптиева и др., 2021].

– Северо-Западный федеральный округ, а именно Калининградская область, пос. Донское, обладает изменчивым переменным климатом – от морского до умеренно-континентального. Зимы в среднем мягкие, однако, в некоторые годы могут наблюдаться периоды более холодной погоды. Лето, в свою очередь, в регионе прохладное. В среднем в год выпадает 700–850 мм осадков, включая ливневые осадки. Количество дней с осадками составляет в среднем 185 дней. Также в регионе наблюдается более 30 дней с грозами в год [Федоров и др., 1981; Каушила и др., 1983; Двоеглазова, 2019].

Установка МРЛК БЗ в пос. Донское (54,935° с.ш., 19,983° в.д.) обусловлена изучением опасных явлений погоды в характерной области с местными особенностями бризовой циркуляции атмосферы (в непосредственной близости к Балтийскому морю).

Для указанной задачи была собрана статистически значимая выборка данных об амплитудном и высотном распределении максимальных значений радиолокационной отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии.

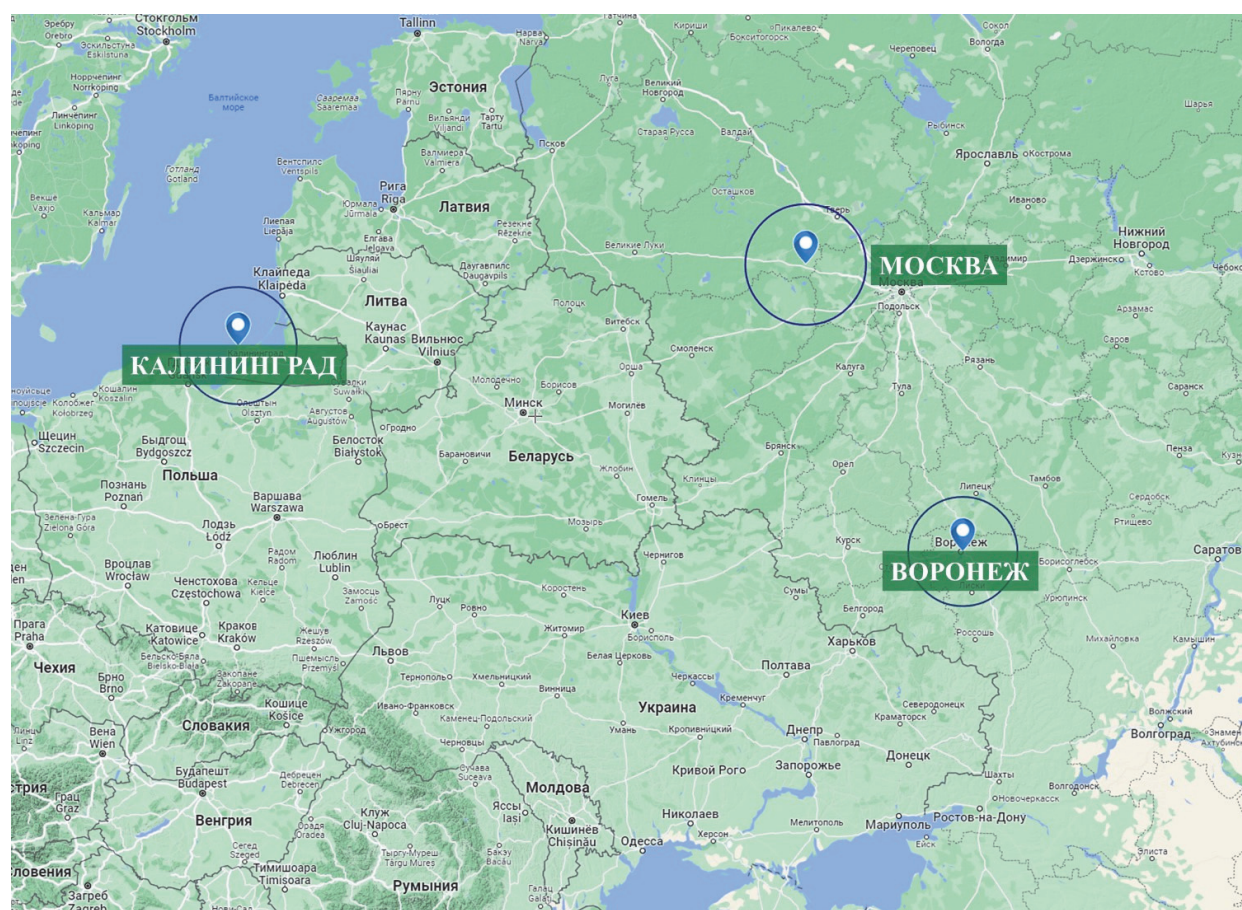


Рис. 1. Схема расположения пунктов размещения МРЛК БЗ «Монокль» на европейской территории России

Fig. 1. The layout of locations of weather radar WR BZ "Monocle" on the European territory of Russia

Была сформулирована программа экспериментального исследования опасных метеоявлений в различных климатических зонах, выделены её этапы [Дегтярев и др., 2015]:

- выбор метеостанций, локаторов ДМРЛ-С и грозопеленгаторов, расположение которых входит в радиус обзора МРЛК БЗ для проведения процедуры валидации данных;

- запись сигналов с МРЛК БЗ с опасными метеорологическими явлениями (ливень–гроза–град);

- сопоставление метеорологических радиолокационных данных МРЛК БЗ с эталонными и дополнительными источниками информации;

- автоматическое формирование горизонтальных сечений метеорологических радиолокационных продуктов в соответствии с выбранной высотой для оправдавшихся по эталонным и дополнительным источникам информации данных МРЛК БЗ;

- поиск максимального значения радиолокационной отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии в облачности на различных высотных уровнях;

- формирование базы данных высотного распределения параметров радиолокационной отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии в облачности;

- статистическая обработка накопленных данных (выбор теоретического распределения, определение выборочных характеристик и проверка гипотезы о виде распределения).

Тверская область, расположенная в северо-западной части ЕТР, отличается умеренно-континентальным климатом с теплой летней погодой и умеренно холодными зимами, характеризующимися устойчивым и продолжительным снежным покровом. Помимо умеренного климата, Тверская область подвержена влиянию различных опасных природных явлений. Среди них выделяются сильные осадки в виде дождей и снегопадов, которые нередко сопровождаются грозами и градом [Дорофеев и др., 1992; Лазарев и др., 2016]. Для более детального изучения характерных особенностей опасных метеорологических явлений Тверской области, в 2022 и 2023 гг. были проведены исследования на аэродроме Орловка. В рамках

этой работы была проведена процедура валидации данных с использованием метеостанций, что позволило получить более точные и достоверные данные об особенностях высотного распределения параметров ОЯ в летний период.

В дополнение к исследованиям, проводимым на территории Тверской области, были проанализированы данные, полученные с Воронежской области. Область характеризуется умеренно-континентальным климатом, наблюдаются опасные климатические явления, среди которых наибольшую угрозу представляют экстремальные температурные условия, засухи, грозы с градобитием и сильными ливнями, шквалистые ветры. Как и Тверская область, Воронежская область также подвержена влиянию смены воздушных масс, что приводит к нестабильности в погодных условиях [Дмитриева, 2001; Акимов, 2013;

Веремей и др., 2013; Акимов, Акимов, 2014; Чернокульский и др., 2022].

К сопоставлению данных о явлениях по данным МРЛК БЗ в 100-километровой зоне (рис. 2) относительно пункта наблюдения, расположенном в Воронеже, были рассмотрены следующие наземные метеостанции (МС):

- 1) 34026: Конь-Колодезь: 52,15° с.ш.; 39,15° в.д.; 138 м н.у.м., удаление от МРЛК БЗ 53 км;
- 2) 34238: Анна: 51,48° с.ш.; 40,42° в.д.; 154 м н.у.м., удаление от МРЛК БЗ 85 км;
- 3) 34231: Лиски: 51,00° с.ш.; 39,50° в.д.; 115 м н.у.м., удаление от МРЛК БЗ 78 км;
- 4) 34116: Старый Оскол: 51,30° с.ш.; 37,88° в.д.; 217 м н.у.м., удаление от МРЛК БЗ 108 км;
- 5) 34123: Воронеж: 51,80° с.ш.; 39,22° в.д.; 147 м н.у.м., удаление от МРЛК БЗ 15 км.

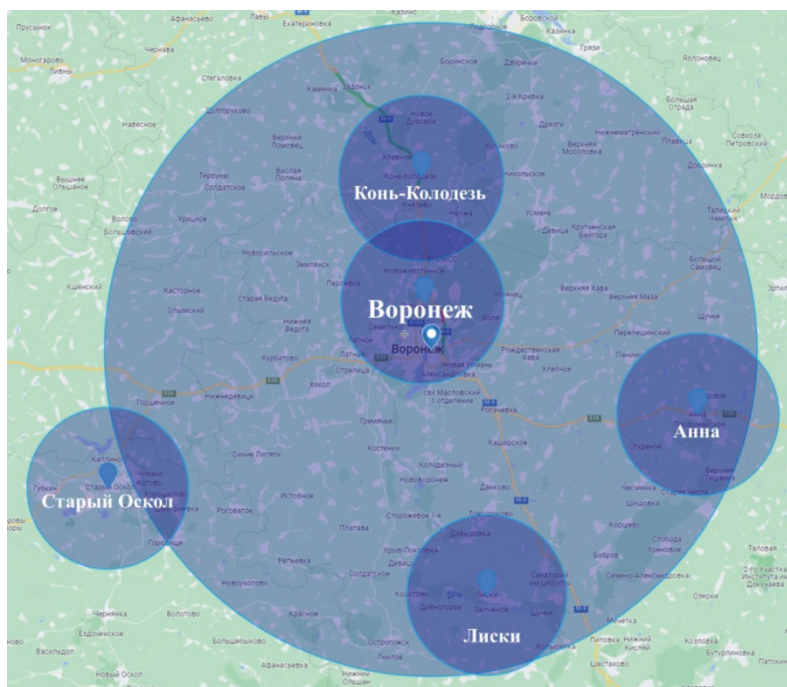


Рис. 2. Схема размещения МС в 100-километровой зоне относительно пункта наблюдения, расположенного в Воронеже

Fig. 2. The layout of locations of weather stations in a 100-kilometer zone relative to the observation point located in Voronezh

Калининград, расположенный на побережье Балтийского моря, имеет уникальный климат, отличающийся от климатов других регионов России. Этот регион находится в зоне влияния западных ветров, что оказывает существенное влияние на его погоду. Климат Калининграда можно охарактеризовать как переходный от морского к умеренно-континентальному. Одной из особенностей климата Калининграда является частое возникновение, развитие и угасание воздушных вихрей, циклонов и антициклонов, которые вовлекают в свои системы воздушные массы не

только умеренных широт, но и арктического и тропического происхождения. Благодаря своему приморскому положению и близости к Атлантическому океану, Калининградская область подвержена влиянию таких погодных явлений, как конвективная облачность, сильные штормовые ветры и туманы. Лето в Калининграде характеризуется усилением термической конвекции и прогревом верхних слоев атмосферы, что приводит к увеличению количества и интенсивности осадков в этом сезоне. Летние осадки часто имеют ливневый характер, сопровождаются

шквалистыми ветрами и грозами. К концу лета контрасты между морскими и континентальными воздушными массами уменьшаются, что приводит к частичному ослаблению активности атмосферных фронтов. Это может снизить интенсивность осадков, но их продолжительность сохраняется, а иногда даже увеличивается. Другим климатообразующим фактором для Калининградской области является Балтийское море, которое оказывает смягчающее воздействие на климат региона, особенно в прибрежных районах. Другим важным фактором является рельеф местности, который влияет на распределение температуры и осадков [Федоров и др., 1981; Двоглазова, 2019].

К сопоставлению информации об опасных метеоявлениях по данным МРЛК БЗ, расположенном в п. Донское в 100-километровой зоне (рис. 3) относительно пункта наблюдения, были рассмотрены следующие МС:

- 1) 26607: Пионерский: 54,95° с.ш.; 20,21 в.д.; 28 м над у.м., удаление от МРЛК БЗ 15 км;
- 2) 26704: Мамоново: 54,47° с.ш.; 19,93 в.д.; 23 м над у.м., удаление от МРЛК БЗ 52 км;
- 3) 26702: Калининград: 54,70° с.ш.; 20,62 в.д.; 21 м над у.м., удаление от МРЛК БЗ 39 км;
- 4) 26708: Низовье: 54,70° с.ш.; 20,77 в.д.; 10 м над у.м., удаление от МРЛК БЗ 55 км.

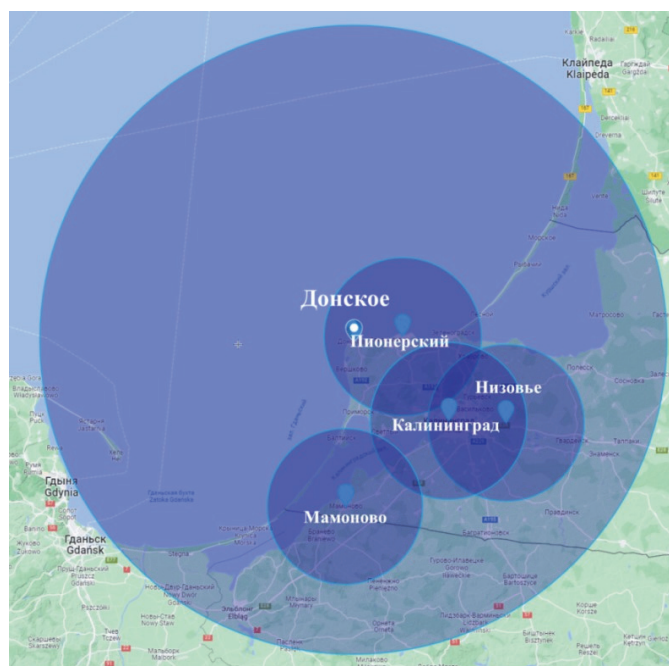


Рис. 3. Схема размещения МС в 100-километровой зоне относительно пункта наблюдения, расположенного в пос. Донское (Калининградская область)

Fig. 3. The layout of locations of weather stations in a 100-kilometer zone relative to the observation point located in the village of Donskoye (Kalininingrad region)

Важно отметить, что климат как Тверской, Воронежской, так и Калининградской областей формируется под воздействием различных факторов: географического положения, рельефа местности, близости к водным объектам и атмосферной циркуляции. Изучение климатических особенностей этих регионов имеет большое значение для прогнозирования погоды, обнаружения и классификации опасных метеоявлений.

Анализ географической вариативности статистических характеристик признаков классификации для различных регионов

Анализ параметров исследуемых метеоявлений начнём с рассмотрения особенностей распространения ОЯ на территории Воронежской области. Для

анализа был выбран летний период июнь–август 2023 г. Выборки ОЯ с ливнем, грозой, градом составили по 25 случаев для каждого метеоявления.

Основные результаты анализа сводятся к следующему. Высота распространения Сб с ливневыми осадками достигает 8 км, грозовые облака достигают высоты 13–14 км, а градовые облака простираются до 15 км. Максимальное значение радиолокационной отражаемости в ливневых облаках наблюдается на высоте 1–3 км и достигает значения 40,52 дБЗ. В свою очередь, максимальное значение удельной скорости диссипации турбулентной энергии в этих облаках достигает значения 0,8352 м²×с⁻³. В грозовых облаках Zmax располагается на высоте 2–4 км и достигает значения 49,83 дБЗ, а максимальное значение

удельной скорости диссипации турбулентной энергии составляет $0,9587 \text{ м}^2 \times \text{с}^{-3}$. Максимальное значение радиолокационной отражаемости в граде наблюдается на высоте 2–5 км и составляет 61,27 дБZ. EDRmax при рассмотрении градового облака составляет $0,9426 \text{ м}^2 \times \text{с}^{-3}$. Также можно отметить, что размеры зоны максимальной отражаемости различны для града, гроз и ливней, как и для турбулентности. «Ядро» радиоэха града имеет большую мощность и значение параметров по сравнению с грозой и, тем более, ливнем.

В работе [Васильев и др., 2023] было отмечено, что проверка различных гипотез о виде распределений радиолокационной отражаемости МРЛК по критерию согласия χ^2 Пирсона для уровня значимости 0,01 показала максимальное соответствие экспериментальных относительных частот обобщенному распределению Рэлея – Райса. Следовательно, в работе были найдены параметры распределения Райса для параметров $H(Z_{\max})$, $H(EDR_{\max})$, $Z_{\max}$ и $EDR_{\max}$ рассматриваемых метеоявлений, что отображено на рис. 4, 5.

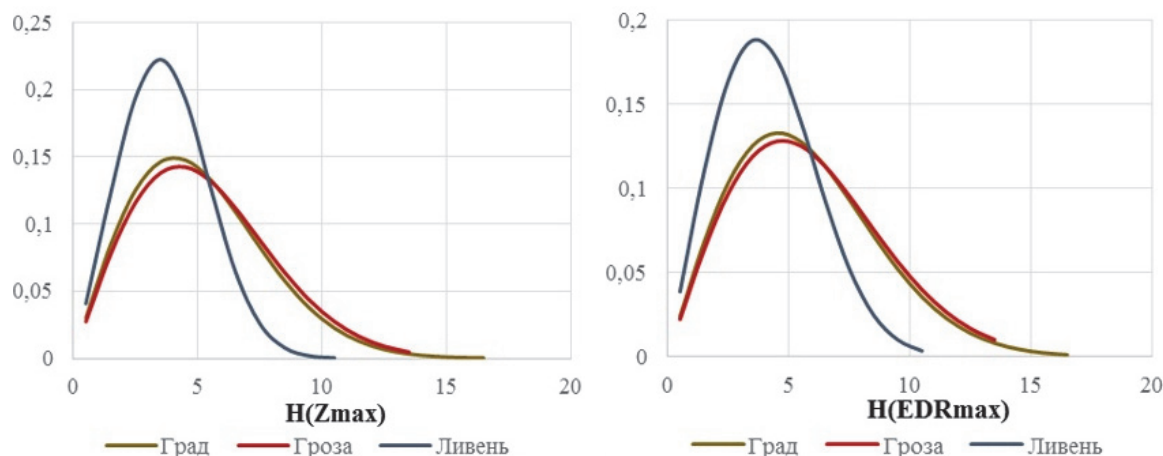


Рис. 4. Плотность распределения вероятности $H(Z_{\max})$ и $H(EDR_{\max})$ для рассматриваемых метеоявлений, Воронежская область

Fig. 4. Density of the probability distribution $Z_{\max}$ and $EDR_{\max}$ by height for the meteorological phenomena under consideration, Voronezh region

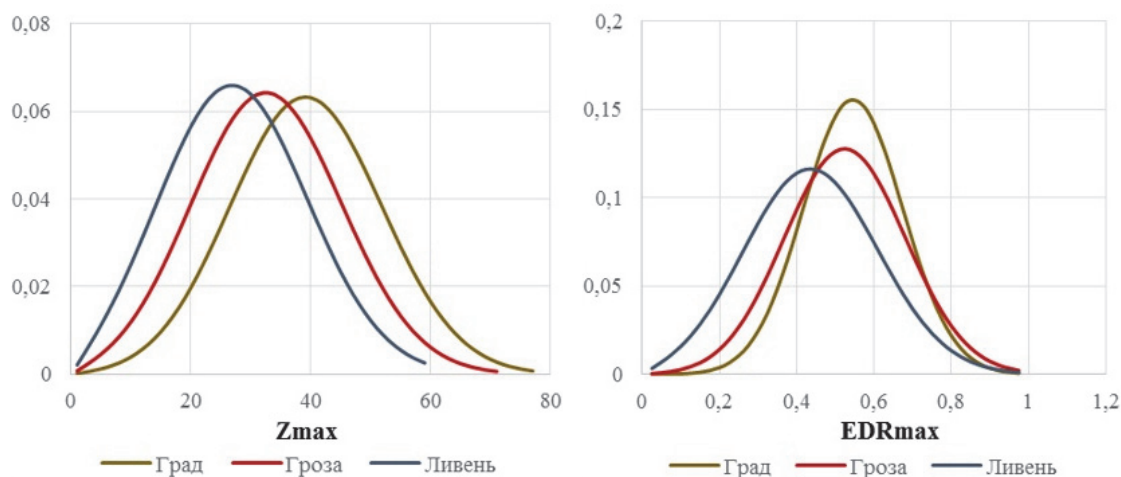


Рис. 5. Плотность распределения вероятности $Z_{\max}$ и $EDR_{\max}$ для рассматриваемых метеоявлений, Воронежская область

Fig.5. Probability distribution density of $Z_{\max}$ and $EDR_{\max}$ by values for the meteorological phenomena under consideration, Voronezh region

Для проведения анализа на территории Калининградской области также был выбран летний период июнь–август 2023 г. Выборки ОЯ с ливнем, грозой,

градом составили по 25 случаев для каждого метеоявления. Максимальное значение отражаемости в граде, равное 57,1 дБZ, наблюдается на высоте 3–

6 км. В свою очередь, градовые облака могут простираться до высоты 13 км. Максимальное значение EDRmax, характерное для данного региона в граде составляет $0,8568 \text{ м}^2 \times \text{с}^{-3}$. В грозе значение Zmax, равное 45,19 дБZ, ниже, чем в кучево-дождевой облачности с градом, и наблюдается на высоте около 3 км. «Ядро» радиоэха грозы занимает меньшую по сравнению с градом площадь и распространяется по вертикали до высоты 12 км. Максимальное значение удельной скорости диссипации турбулентной энергии в грозовом облаке примерно составило $0,9732 \text{ м}^2 \times \text{с}^{-3}$. Кучево-дождевое облако с ливневым дождем имеет меньшую максимальную высоту радиоэха по сравнению с градом и грозой и может рас-

пространяться до 8 км. Максимальные значения отражаемости в ливнях отмечаются на высотах от 1 до 3 км и составляют 46,73 дБZ, в свою очередь EDRmax для данной территории исследования было зафиксировано около $0,6636 \text{ м}^2 \times \text{с}^{-3}$.

Распределения Райса для параметров $H(Z_{\max})$, $H(EDR_{\max})$, $Z_{\max}$ и $EDR_{\max}$ рассматриваемых метеоявлений отображены на рис. 6, 7. Полученные выборочные статистические характеристики по результатам вычислений амплитудного и высотного распределения параметров отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии для ливня, грозы и града в различных географических регионах сравним с данными, характерными для территории Тверской области (табл. 1).

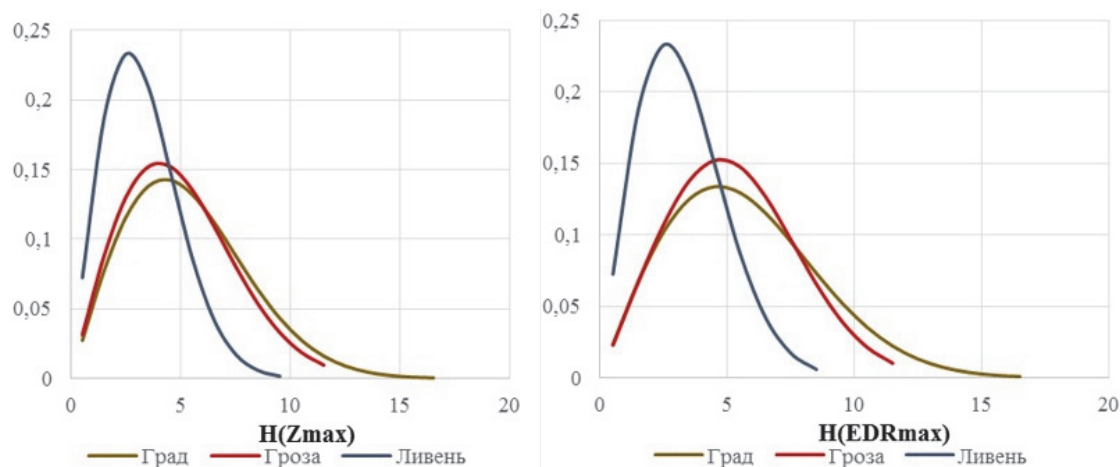


Рис. 6. Плотность распределения вероятности $H(Z_{\max})$ и $H(EDR_{\max})$ для рассматриваемых метеоявлений, Калининградская область

Fig. 6. Density of the probability distribution $Z_{\max}$ and $EDR_{\max}$ by height for the meteorological phenomena under consideration, Kaliningrad region

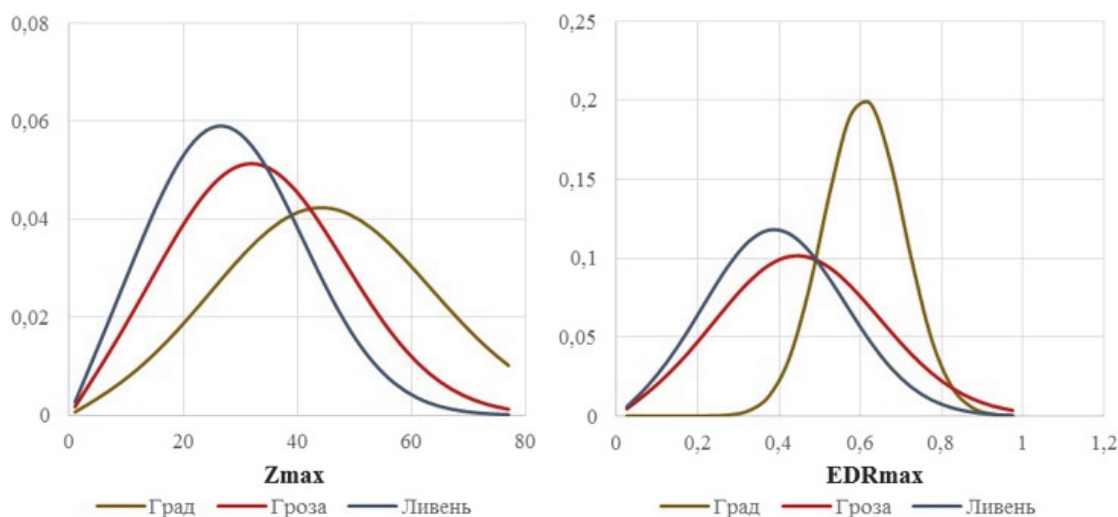


Рис. 7. Плотность распределения вероятности $Z_{\max}$ и $EDR_{\max}$ для рассматриваемых метеоявлений, Калининградская область

Fig. 7. Probability distribution density of $Z_{\max}$ and $EDR_{\max}$ by values for the meteorological phenomena under consideration, Kaliningrad region

Таблица 1

Географическая вариативность статистических характеристик параметров ОЯ, μ – математическое ожидание

Table 1

Geographical variability of statistical characteristics of meteorological phenomena parameters, μ – expected value

Пара-метр	Ливень			Гроза			Град		
	H(Zmax)								
μ	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж
	μ= 1	μ= 2	μ= 3	μ = 2,5	μ = 3.5	μ = 2	μ = 2	μ = 4	μ = 1
H(EDRmax)									
μ	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж
	μ = 2	μ = 2	μ = 3	μ = 4	μ = 3	μ = 2	μ = 3	μ = 4	μ = 1
Zmax									
μ	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж
	μ = 23	μ = 22	μ = 24	μ = 28	μ = 29	μ = 30	μ = 40	μ = 42	μ = 37
EDRmax									
μ	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж
	μ = 0.35	μ = 0.2	μ = 0.4	μ = 0.4	μ = 0.5	μ = 0.5	μ = 0.6	μ = 0.61	μ = 0.53

Таким образом, по результатам полученных статистических характеристик параметров для ливня, грозы, града в разных географических регионах можно выделить следующую закономерность. Высота максимального значения радиолокационной отражаемости ($H(Z_{max})$) имеет самые высокие значения для МРЛК «Орловка» по сравнению с МРЛК «Воронеж» (кроме случаев ливня) и с МРЛК «Донское». По всей видимости, завышенные значения ($H(Z_{max})$) по данным МРЛК «Орловка» по сравнению с МРЛК «Донское» обусловлены большей толщиной воздушных масс с кучево-дождевой облачностью, которые господствовали над пунктом размещения МРЛК «Орловка» по данным приземных синоптических карт.

Значения $H(Z_{max})$ по данным Воронежской МРЛК БЗ меньше, чем значения $H(Z_{max})$, полученные на МРЛК «Орловка» (кроме случаев ливня), причём МРЛК «Воронеж» и МРЛК «Орловка» установлены в одной климатической зоне. Подобная закономерность объясняется тем, что в летний период 2023 г. воздушные массы, господствовавшие в п. Орловка и в п. Воронеж, перемещались преимущественно с северо-западного, северного направлений по данным приземных синоптических карт. Таким образом, воздушные массы с кучево-дождевой облачностью сначала господствовали над п. Орловка, а далее перемещались и трансформировались, постепенно разрушаясь и теряя количество энергии неустойчивости, к п. Воронеж (что подтверждает относительно малая величина Z_{max} для случаев града по данным МРЛК «Воронеж» по сравнению с данными МРЛК «Орловка»). Также косвенным подтверждением диссипации кучево-дождевой облачности к п. Воронеж являются меньшие значения величины высоты максимальной турбулентности $H(EDR_{max})$ (кроме случаев ливня) по сравнению с данным МРЛК

«Орловка». При этом завышенные значения $H(Z_{max})$ и $H(EDR_{max})$ для случаев ливня по данным МРЛК «Воронеж» будут рассмотрены более подробно в динамике вертикальных профилей радиолокационной отражаемости и турбулентности в дальнейших исследованиях.

Значения $H(EDR_{max})$ и значения EDR_{max} по данным МРЛК «Донское» обладают хаотичным характером относительно данных других МРЛК, что объясняется крайне неустойчивым морским климатом умеренных широт, а именно: процессом взаимодействия океан–атмосфера и дальнейшей взаимной перестройкой двух турбулязированных слоев. Эта перестройка охватывает в первую очередь пограничные слои атмосферы и океана, а уже затем посредством вертикальных токов, возникающих в пограничных слоях, передаётся в свободную атмосферу и глубинные слои океана.

Статистические характеристики параметров опасных метеоявлений (ливень, гроза, град) будут уточняться дополнительным сбором статистических данных, также более подробно будет рассмотрена динамика вертикальных профилей радиолокационной отражаемости и турбулентности. Важно отметить, что поиск статистических характеристик параметров опасных метеоявлений является попыткой описать их климатические особенности (с точки зрения метеорологии) того или иного района, где установка МРЛК уже осуществлена или только планируется. Указанная задача является ресурсоёмкой, поскольку к климатообразующим факторам относятся: географическая широта, подстилающая поверхность, циркуляция воздушных масс. Таким образом, авторы, решая поставленную задачу комплексно, с учётом различных факторов и статистических характеристик, умозаключили следующее: изменение статистических

характеристик параметров опасных метеоявлений (ливень–гроза–град) в различных географических регионах объясняется особенностями трансформаций воздушных масс, а также особенностями характеристик самих воздушных масс в разных климатических районах.

На основе критерия максимального правдоподобия были определены пороги принятия решения (Нпор) для одномерных задач (табл. 2).

Установка текущих пороговых значений по экспериментальным данным представлена на рис. 8. При этом в работе [Васильев и др., 2023] были приведены базовые пороги критериев классификации МРЛК для различных метеоявлений п. Орловка, в том числе для ливня, грозы, града; они были установлены в ходе различных испытаний МРЛК и впоследствии были уточнены в работе [Васильев и др., 2023]. Из приве-

денных ниже графиков можно отметить, что для параметра Zmax порог принятия решений ливень/гроза (Нл-гз) в Воронеже сдвинулся на 10,96 %, в свою очередь, для Калининграда данный порог увеличился на 26,1 % по сравнению с полученным пороговым значением в Орловке. Порог принятия решений гроза/град (Нгз-гд) для Воронежа сдвинулся левее на 2,8 %, а для Калининграда увеличился на 13,47 % по сравнению с полученным пороговым значением в Орловке. Тенденция изменения пороговых значений для параметра EDRmax выглядит следующим образом: процентное изменение порогового значения ливень/гроза для Воронежа составляет 16,4 %, а для Калининграда 26,15 %. Пороговое значение гроза/град для Воронежа составляет 37,59 %, в то время как для Калининграда – 53,7 %.

Таблица 2

Географическая вариативность порогов принятия решения ОЯ (Нпор)

Table 2

Geographical variability of decision thresholds for dangerous weather events (Нпор)

Параметр	Ливень/Гроза			Гроза/Град		
	Zmax					
Пункт размещения МРЛК	Орловка	Донское	Воронеж	Орловка	Донское	Воронеж
Нпор	27,36 дБZ	34,49 дБZ	30,36 дБZ	37,18 дБZ	42,19 дБZ	36,14 дБZ
EDRmax						
Пункт размещения МРЛК	Орловка	Донское	Воронеж	Орловка	Донское	Воронеж
Нпор	0,39 м ² ×с ⁻³	0,492 м ² ×с ⁻³	0,454 м ² ×с ⁻³	0,54 м ² ×с ⁻³	0,83 м ² ×с ⁻³	0,743 м ² ×с ⁻³

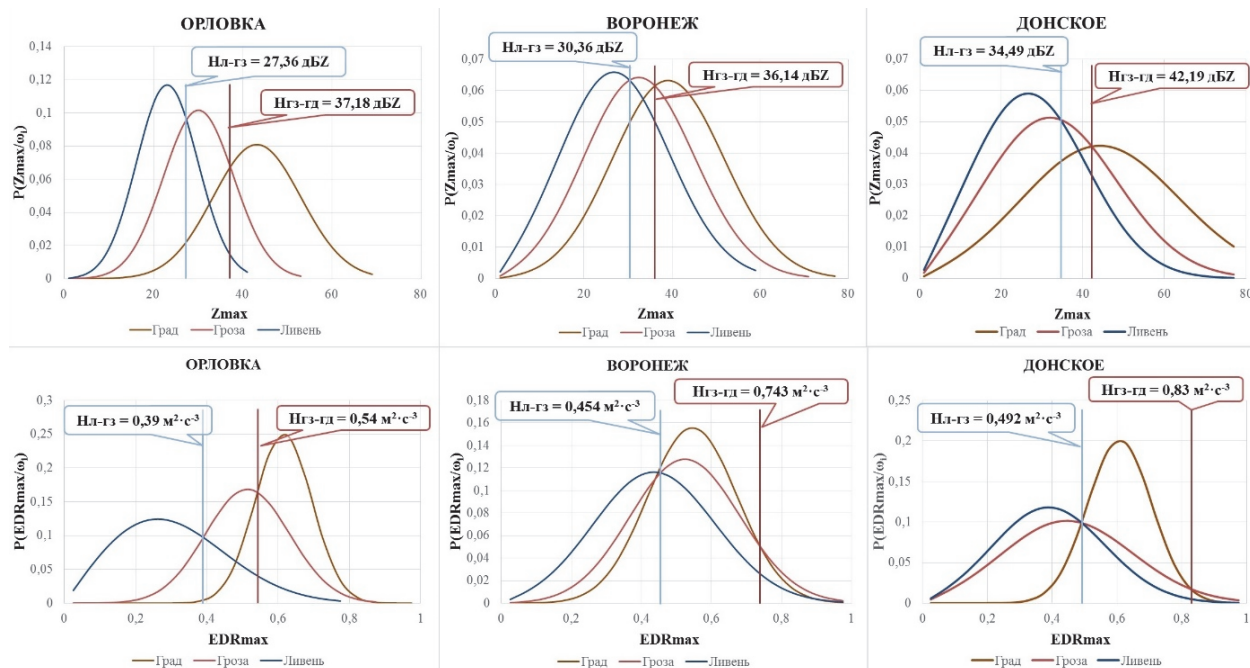


Рис. 8. Тенденции изменения пороговых значений от географического региона

Fig. 8. Trends in threshold values from a geographical region

На основе анализа экспериментальных данных можно отметить, что генезис и эволюция явления, а также пространственно-временная изменчивость его параметров обуславливаются взаимодействием макро- и мезомасштабной циркуляции и географическим фактором.

Анализ межгодовой изменчивости статистических характеристик для Верхне-Волжского региона

На основании экспериментальных данных был проведен сравнительный анализ летнего мониторинга

(июнь–август) за опасными метеоявлениями в 2022 г. и в 2023 г. для Верхне-Волжского региона. В 2022 г. выборки ОЯ с ливнем составили 50 случаев, с грозой – 25, с градом – 25 случаев; в 2023 г. выборки ОЯ с ливнем, грозой, градом составили по 25 случаев для каждого метеоявления.

Годовой ход отчетливо прослеживается по значениям статистических характеристик параметров $H(Z_{\max})$, $H(EDR_{\max})$, $Z_{\max}$ и $EDR_{\max}$, который показал незначительные различия. Данные, характеризующие временную изменчивость параметров, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение статистических характеристик межгодовой изменчивости параметров ОЯ по данным МРЛК «Орловка», μ – математическое ожидание

Table 3

Comparison of statistical characteristics of interannual variability of weather events parameters, μ – expected value

Параметр	Ливень		Гроза		Град	
	H(Zmax)					
μ	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.
	μ = 2	μ = 2	μ = 3.5	μ = 3.5	μ = 4	μ = 4
H(EDRmax)						
μ	2022	2023	2022	2023	2022	2023
	μ = 2	μ = 2	μ = 3	μ = 3	μ = 4	μ = 4
Zmax						
μ	2022	2023	2022	2023	2022	2023
	μ = 22	μ = 24	μ = 29	μ = 30	μ = 42	μ = 41
EDRmax						
μ	2022	2023	2022	2023	2022	2023
	μ = 0.2	μ = 0.35	μ = 0.5	μ = 0.5	μ = 0.61	μ = 0.6

В ходе работы проводились комплексные исследования, направленные на выявление долгосрочных тенденций изменения статистических характеристик.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что в течение нескольких лет высотные параметры $Z_{\max}$ и $EDR_{\max}$ на территории исследования не отличаются от параметров предыдущего года.

При этом данные были собраны за летний период 2022 и 2023 гг., которые значительно отличаются друг от друга по климатическим особенностям. В летний период 2022 г. над рассматриваемой территорией наблюдалась активная циклоническая деятельность с продолжительными осадками, в летний период 2023 г. преобладала антициклональная погода, осадки были редкими, но крайне обильными по данным приземных синоптических карт. Такие тенденции изменения статистических характеристик параметров распределения несут важную информацию о взаимодействии погодных процессов. Они могут послужить основой для разработки эффективных методов адаптации при решении задач корректировки критериев классификации ОЯ Сб для конкретной местности.

Заключение

В рамках инновационного метода классификации ОЯ Сб, основанного на комплексном использовании отражательных и ветровых характеристик атмосферы, была оценена их зависимость от климатической зоны и местных особенностей циркуляции атмосферы по данным МРЛК БЗ, размещённых на аэродроме Орловка (Тверская область), в г. Воронеж (Воронежская область), в пос. Донское (Калининградская область). Проведен статистический анализ экспериментальных данных опасных метеорологических явлений по данным трёх единиц МРЛК БЗ, размещённых в различных условиях местных особенностей циркуляции атмосферы. В статье выявлены тренды изменения параметров $H(Z_{\max})$, $H(EDR_{\max})$, $Z_{\max}$ и $EDR_{\max}$ в зависимости от климатических условий и географического расположения МРЛК БЗ.

Было выявлено, что размеры зоны максимальной отражаемости различны как для града, гроз и ливней, так и для турбулентности. «Ядро» радиоэха града имеет

большую мощность и значение параметров радиолокационной отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии по сравнению с ливнем и грозой.

Полученные значения $H(Z_{\max})$, по данным Воронежской МРЛК БЗ, оказались меньше, чем значения $H(Z_{\max})$, полученные на МРЛК «Орловка» (кроме случаев ливня), что объясняется тем, что в летний период 2023 г. воздушные массы с кучево-дождевой облачностью сначала господствовали над п. Орловка, а далее перемещались и трансформировались, постепенно разрушаясь и теряя количество энергии неустойчивости, к п. Воронеж.

Полученные значения $H(EDR_{\max})$ и значения $EDR_{\max}$, по данным МРЛК «Донское», обладают хаотичным характером относительно данных других МРЛК, что объясняется крайне неустойчивым морским климатом умеренных широт, а именно: процессом взаимодействия океан–атмосфера и дальнейшей взаимной перестройкой двух турбулязированных слоев.

В типовых случаях было показано, насколько (в %) сдвигается порог принятия решения для одномерных задач для критерия максимального правдоподобия. Было установлено, что порог принятия решений для ливней, гроз и града для Калининграда смещался

больше, чем для Воронежа по сравнению с полученным пороговым значением в Орловке, что объясняется расположением пунктов МРЛК «Воронеж» и «Орловка» в одной климатической зоне. В работе показано, что изменение статистических характеристик параметров опасных метеоявлений (ливень–гроза–град) в различных географических регионах объясняется особенностями трансформаций воздушных масс, а также особенностями характеристик самих воздушных масс в разных климатических районах.

Проведенный анализ данных летнего мониторинга на территории аэродрома Орловка в 2022 и 2023 гг. показал незначительные изменения статистических данных. Анализ данных по межгодовой изменчивости выявил, что тенденции изменения характеристик кучево-дождевой облачности с ОЯ связаны с несущественными изменениями климатических условий или метеорологических факторов на рассматриваемой территории.

Полученные значения статистических характеристик изменения радиолокационных характеристик кучево-дождевой облачности с опасными метеоявлениями целесообразно учитывать при разработке методических указаний по формированию критериев классификации ОЯ Сб в конкретном регионе.

Примечания

¹ Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб. : Научное издание, 2022. 124 с.

² Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М., 2022. 104 с.

Список источников

- Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.** Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. М. : Финансы и статистика, 1983. 487 с.
- Акимов В.А., Дурнев Р.А., Соколов Ю.И.** Опасные гидрометеорологические явления на территории России / МЧС России. М. : ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2009. 316 с.
- Акимов Л.М.** Пространственно-временные закономерности распределения климатических характеристик на территории Воронежской области // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология 2013. № 1. С. 192–198.
- Акимов Л.М., Акимов Е.Л.** Характеристика циркуляционного режима территории Воронежской области // Труды Хоперского государственного заповедника : сб. ст. 2014. Вып. 9. С. 3–11.
- Бояренко Э.С., Болелов Э.А., Васильев О.В., Коротков С.С.** Экспериментальный статистический анализ радиолокационных сигналов, отраженных от опасных метеорологических явлений // Научный вестник МГТУ ГА. 2023. № 26 (5). С. 19–29. doi: 10.26467/2079-0619-2023-26-5-19-29
- Васильев О.В., Бояренко Э.С., Галаева К.И.** Обоснование исходных данных параметрических алгоритмов классификации опасных метеоявлений // Научный вестник МГТУ ГА. 2023. № 26 (6). С. 8–21. doi: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-8-21
- Васильев О.В., Коротков С.С., Галаева К.И., Бояренко Э.С.** Критерии принятия решений для классификации метеоявлений в метеорологическом радиолокационном комплексе ближней аэродромной зоны // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2023. Т. 26, № 2. С. 49–60.
- Веремей Н.Е., Довгало Ю.А., Ефимов С.В. и др.** Исследование ливневой и грозовой активности на территории России с использованием численной модели конвективного облака и данных реанализа // Метеорология и гидрология. 2013. № 1. С. 32–43.
- Голицын Г.С., Васильев А.А., Куличков С.Н. и др.** Природные опасности России : В 6 т. / под ред. Г.С. Голицына, А.А. Васильева. Т. 5. М. : КРУК, 2001. 296 с.
- Двоглазова Н.В.** Современное состояние климатической системы Калининградской области на фоне глобального потепления // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2019. № 1. С. 35–45
- Дегтярев А.С., Драбенко В.А., Драбенко В.А.** Статистические методы обработки метеорологической информации : учебник. СПб. : Андреевский издательский дом, 2015. 225 с.

- Дмитриева В.А. Термический режим г. Воронежа на фоне глобального потепления климата // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2001. № 1. С. 129–135.
- Дорофеев А.А., Ткаченко А.А., Щукина А.С. и др. География Тверской области: книга / под ред. А.А. Ткаченко. Тверь : ТГУ, 1992. 290 с.
- Каушила К.А., Буз А.И., Алосявичене Г. и др. Климат Калининграда / под ред. К.А. Каушила, Ц.А. Швер. Л. : Гидрометеиздат, 1983. 143 с.
- Лазарев О.Е., Махрова Е.Д., Петина А.М. Климатическое картографирование территории Тверской области: состояние и перспективы // Вестник ТвГУ. 2016. № 1. С. 56–67.
- Лаптиева О.А., Герасименко Ю.Ю., Чечин Д.И. Климатические и географические условия Воронежской области как фон проявления негативных природных процессов // Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). 2021. № 1 (12). С. 23–29.
- Тихонов В.И., Бакаев Ю.Н. Статистическая теория радиотехнических устройств. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1978. 420 с.
- Федоров Е.Е. и др. Климат Калининградской области // Почвы Калининградской области. М., 1981. С. 159–174.
- Хандожко Л.А. Региональные синоптические процессы : учеб. пособие. Л. : ЛГМИ, 1988. 103 с.
- Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А. и др. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 27–41. doi: 10.52002/0130-2906-2022-5-27-41
- Konopova N.K., Lupo A.R. An Investigation of circulation regime variability and dangerous weather phenomena in Russia in the 21st century // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020. V. 606, No. 1. P. 012023.

References

- Aivazian S.A., Eniukov I.S., Meshalkin L.D. *Prikladnaya statistika: osnovy modelirovaniia i pervichnaia obrabotka dannykh* [Applied statistics: Fundamentals of modeling and primary data processing]. Moscow: Finansy i statistika, 1983. 487 p. In Russian
- Akimov V.A., Durnev R.A., Sokolov Iu.I. *Opasnye gidrometeorologicheskie iavleniia na territorii Rossii* [Dangerous hydrometeorological phenomena in Russia]. MCHS Rossii. Moscow: FGU VNII GOCHS (FTS), 2009. 316 p. In Russian
- Akimov L.M. *Prostranstvenno-vremennyye zakonomernosti raspredeleniya klimaticheskikh kharakteristik na territorii Voronezhskoy oblasti* [Spatiotemporal patterns of distribution of climatic characteristics on the territory of the Voronezh region] // Bulletin of Voronezh State University. 2013. No. 1. pp. 192–198. In Russian
- Akimov L.M., Akimov E.L. *Charakteristika cirkulyacionnogo rezhima territorii Voronezhskoy oblasti* [Characteristics of the circulation regime of the territory of the Voronezh region] // Proceedings of the Khopersky State Reserve. Article in the collection. 2014. Iss. 9. pp. 3–11. In Russian
- Boyarenko E.S., Bolelov E.A., Vasiliev O.V., Korotkov S.S. *Eksperimental'nyi statisticheskii analiz radiolokatsionnykh signalov, otrazhennykh ot opasnykh meteorologicheskikh iavlenii* [Experimental statistical analysis of radar signals reflected from weather hazards]. Civil Aviation High Technologies, 2023. 26(5). pp. 19–29. doi: 10.26467/2079-0619-2023-26-5-19-29. In Russian
- Vasiliev O.V., Boyarenko E.S., Galaeva K.I. *Obosnovanie iskhodnykh dannykh parametricheskikh algoritmov klassifikatsii opasnykh meteoiavlenii* [Substantiation of source data on the parametric algorithms for the classification of weather hazards]. Civil Aviation High Technologies, 2023. 26(6): pp. 8–21. doi: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-8-21. In Russian
- Vasiliev O.V., Korotkov S.S., Galaeva K.I., Boyarenko E.S. Decision criteria for the classification of meteorological phenomena in the weather radar complex of the near-airfield zone // *Nauchnyi vestnik Moscow state technical university of civil aviation*. 2023. T. 26. No. 2. In Russian
- Veremey N.E., Dovgalyuk Yu.A., Efimov S.V. et al. *Issledovanie livnevoj i grozovoj aktivnosti na territorii Rossii s ispol'zovaniem chislennoy modeli konvektivnogo oblaka i dannykh reanaliza* [Study of shower and thunderstorm activity on the territory of Russia using a numerical model of convective cloud and reanalysis data] // *Meteorologiya i gidrologiya* [Russian Meteorology and Hydrology]. 2013. No. 1. pp. 32–43. In Russian
- Golitsyn G.S., Vasil'ev A.A., Kulichkov S.N. *Prirodnye opasnosti Rossii: Monografiia v 6 tomakh* [Natural hazards of Russia: A monograph in 6 volumes]; Ed. G.S. Golitsyna, A.A. Vasil'eva. Tom 5. Moscow: KRUK, 2001. 296 p. In Russian
- Dvoeglazova N.V. *Sovremennoe sostoyanie klimaticheskoy sistemy Kaliningradskoy oblasti na fone global'nogo potepeniya* [The current state of the climate system of the Kaliningrad region against the backdrop of global warming] // *Vestnik (Bulletin) of I. Kant Baltic Federal University*. 2019. No. 1. pp. 35–45. In Russian
- Degtiarev A.S., Drabenko V.A., Drabenko V.A. *Statisticheskie metody obrabotki meteorologicheskoi informatsii. Uchebnik* [Statistical methods of processing meteorological information. Textbook] St. Petersburg: ООО «Andreevskii izdatel'skii dom», 2015. 225 p. In Russian
- Dmitrieva V.A. *Termicheskii rezhim g. Voronezha na fone global'nogo potepeniia klimata* [The thermal regime of Voronezh against the background of global climate warming] // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiia. Geoekologiya*. 2001. No. 1. pp. 129–135. In Russian
- Dorofeev A.A., Tkachenko A.A., Shchukina A.S. et al. *Geografiya Tverskoy oblasti* [The geography of the Tver region] Tver. TGU, 1992. 290 p. In Russian
- Kaushila K.A., Buz A.I., Alosiaviciene G. et al. *Klimat Kaliningrada* [The climate of the Kaliningrad]. Leningrad. Gidrometeizdat, 1983. 143 p. In Russian
- Lazarev O.E., Maxrova E.D., Petina A.M. *Klimaticheskoe kartografirovaniye territorii Tverskoy oblasti: sostoyaniye i perspektivy* [Climatic mapping of the territory of the Tver region: state and prospects] Bulletin of Tver State University. 2016. No. 1. pp. 56–67. In Russian
- Laptieva O.A., Gerasimenko Iu.Iu., Chechin D.I. *Klimaticheskie i geograficheskie usloviia Voronezhskoy oblasti, kak fon proiavleniya negativnykh prirodnnykh protsessov* [Climatic and geographical conditions of the Voronezh region as a background for the manifestation

of negative natural processes] // *Modeli i tekhnologii prirodoobustroistva (regional'nyi aspekt)* [Models and technologies of environmental management (regional aspect)]. 2021. No. 1 (12). pp. 23–29. In Russian

Tikhonov V.I., Bakaev Iu.N. *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh ustroystv* [Statistical theory of radio engineering devices]. Moscow: Izd. VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, 1978. 420 p. In Russian

Fedorov E.E., et al. *Klimat Kaliningradskoi oblasti* [The climate of the Kaliningrad region] // *Pochvy Kaliningradskoi oblasti* [Soils of the Kaliningrad region]. Moscow, 1981. pp. 159–174. In Russian

Khandozhko L.A. *Regional'nye sinopticheskie protsessy: Ucheb. Posobie* [Regional synoptic processes: A textbook]. Leningrad. gidrometeorol. in-t. Leningrad: LGMI, 1988. 103 p. In Russian

Chernokulsky A.V., Eliseev A.V., Kozlov F.A. et al. *Opasny'e atmosferye yavleniya konvektivnogo kharaktera v Rossii: nablyudaemy'e izmeneniya po razlichny'm dannym* [Dangerous atmospheric phenomena of a convective nature in Russia: observed changes according to various data] // *Meteorologiya i gidrologiya* [Russian Meteorology and Hydrology]. 2022. No. 5. pp. 27–41. In Russian. doi: 10.52002/0130-2906-2022-5-27-41

Kononova N.K., Lupo A.R. An Investigation of circulation regime variability and dangerous weather phenomena in Russia in the 21st century. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020. T. 606. No. 1. pp. 012023.

Информация об авторах:

Болелов Э.А., доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия. E-mail: edbolelov@mail.ru

Васильев О.В., доктор технических наук, профессор, кафедра технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия. E-mail: vas_ov@mail.ru

Бояренко Э.С., аспирант, кафедра технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия. E-mail: boyarenko.elvira@mail.ru

Галаева К.И., кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия. E-mail: ks.galaeva@mail.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Bolelov E.A., Dr. Sci. (Technique), Associate Professor, Head of the Air Transport Radio-Electronic Equipment Maintenance Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia. E-mail: edbolelov@mail.ru

Vasiliev O.V., Dr. Sci. (Technique), Professor, Technical Maintenance of Radio Electronic Equipment of Air Transport Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia. E-mail: vas_ov@mail.ru

Boyarenko E.S., Postgraduate of the Technical Maintenance of Radio Electronic Equipment of Air Transport Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia. E-mail: boyarenko.elvira@mail.ru

Galaeva K.I., Cand. Sci. (Technique), Senior Lecturer, Technical Maintenance of Radio Electronic Equipment of Air Transport Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia. E-mail: ks.galaeva@mail.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.04.2024; одобрена после рецензирования 04.10.2024; принята к публикации 29.08.2025

The article was submitted 10.04.2024; approved after reviewing 04.10.2024; accepted for publication 29.08.2025

Научная статья

УДК 551.324+551.501.776

doi: 10.17223/25421379/36/9

ВЕКОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ЮГО-ВОСТОКЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА ТОМСКА

Владимир Вениаминович Севастьянов

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия,
vvs187@mail.ru



Аннотация. Рассмотрены региональные особенности изменения режима температуры приземного воздуха по данным опорной метеорологической станции Томск более чем за 180-летний период инструментальных наблюдений. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в исследуемый период произошли значимые повышения средних месячных и средних годовых температур, особенно в новом климатическом периоде (1990–2020 гг.). Приведена динамика средних месячных и средних годовых температур воздуха по климатическим периодам. Выявлена зависимость между изменениями температуры воздуха и общей циркуляцией атмосферы.

Ключевые слова: изменение климата, температура воздуха, циркуляция атмосферы, климатическая норма, Западная Сибирь

Для цитирования: Севастьянов В.В. Вековые изменения температуры воздуха на юго-востоке Западной Сибири на примере города Томска // Геосферные исследования. 2025. № 3. С. 153–169. doi: 10.17223/25421379/36/9

Original article

doi: 10.17223/25421379/36/9

AGE-OLD CHANGES IN AIR TEMPERATURE IN THE SOUTHEAST OF WESTERN SIBERIA ON THE EXAMPLE OF THE CITY OF TOMSK

Vladimir V. Sevastyanov

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia, vvs187@mail.ru

Abstract. The article presents an overview of regional changes in the surface air temperature regime based on data of the reference meteorological station Tomsk. Meteorological observations at the Tomsk station have been conducted since 1837. The problem of occurring and expected regional and global changes in air temperature has become a topical issue for all people of the community. This may contribute to the emergence of climatic threats and the need for adaptation of mankind. An assessment of trends in the air temperature regime for 1837–2020 is given. The reasons for changes in climatic temperature norms can be very different. The real cause of global climate warming has not been established yet. The meteorological station Tomsk has been conducting observations for more than 180 years. 30 years is taken as a standard climatic period. Such a period allows for stable average climatic characteristics of weather and values of their variability. For the 30-year period it is possible to establish climate changes in time.

At Tomsk station in 1838–1875 there were omissions of air temperature observations. They were restored by the air temperature at Barnaul station. Mean monthly and mean annual air temperatures at Tomsk station were studied for six climatic periods: (1841–1870), (1871–1900), (1901–1930), (1931–1960), (1961–1990), (1991–2020). Mean annual temperatures for these periods were obtained at Tomsk station. It was noted that the highest rates of temperature increase are observed in the last 60 years. In the period from 1991 to 2020, the increase in the average rates of temperature increase is observed in the last 60 years. In the period from 1991 to 2020, an increase in average air temperatures was observed for five months. The average annual temperature increased by 1.0 °C. In some months, average temperatures increased up to 2.7 °C. During the summer months, changes in average air temperatures are minimal. For the period of time from the beginning of meteorological observations in Tomsk up to the present time average annual air temperatures have increased by 2.0 °C. In winter months and in transitional seasons — much more up to 4.7 °C.

Changes in average air temperatures in each climatic period by decades were considered. It was found out that opposite trends of air temperature change can also be observed in neighboring ten-year periods. It is shown that in the anomalously cold winter months, the weather with anticyclones and the eastern (E) form of the general circulation of the atmosphere prevails. In the anomalously warm winter months, cyclones prevail. The western (W) form and the meridional (C) form of circulation are often repeated. Changes in atmospheric circulation play an important role in climate change in Siberia. The main reason for the increase in air temperature in the south of Western Siberia is changes in the general circulation of the atmosphere.

Keywords: climate change, air temperature, atmospheric circulation, climatic norm, Western Siberia

For citation: Sevastyanov V.V. (2025) Age-old changes in air temperature in the southeast of Western Siberia on example of the city of Tomsk. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 153–169. doi: 10.17223/25421379/36/9

Введение

Региональные изменения климатических условий, обусловленные глобальным изменением климата, могут сопровождаться нарастанием изменчивости погодных условий. Это приводит к увеличению числа экстремальных (аномальных) погодных явлений. Отличительной особенностью современной климатической системы является тот факт, что при сравнительно небольших по величине изменениях средних значений часто наблюдается увеличение экстремальных погодных явлений.

В связи с большим разнообразием изменяющихся климатических условий на большой территории нашей страны существует необходимость разработки планов адаптации отраслей национальной экономики, в том числе планов на региональных уровнях субъектов Российской Федерации [Доклад..., 2020].

История изучения климата в Сибири началась с периода проведения Великой Северной экспедиции (1733–1743 гг.) под руководством В. Беринга. По пути следования экспедиции было организовано 12 метеорологических станций, одна из которых была основана в Томске в 1734 г. К сожалению, материалы наблюдений не сохранились, и пользоваться ими для характеристики климата Сибири в XVIII в. невозможно.

Следующий этап исследований климата в Томске начался с 1837 г. Метеорологические наблюдения того времени уже соответствовали определенным требованиям, которые были установлены метеорологической комиссией Русского императорского географического общества. Впоследствии данные наблюдений того периода были включены в климатические справочники. К сожалению, в Томске метеорологические наблюдения того времени по различным причинам неоднократно прерывались вплоть до 1875 г. Только с этого времени перерывов в наблюдениях не было.

Томск стал опорной точкой не только для описания климата Томской губернии, но и Сибири в целом, а также Российской империи [Вознесенский, Шостакович, 1913; Масленников, 1939; Русанов, 1958; Климат Томска, 1982; Задде и др., 2004]. Таким образом, метеорологическая станция Томск является одной из самых длиннорядных станций Западной Сибири. По данным наблюдений на ней судят о вековых долгопериодных изменениях климатических условий на рассматриваемой территории Западной Сибири.

С начала 1900-х гг. в Северной Европе стало более заметным потепление климата, а в 1920–1930-е гг. оно достигло своего максимума. Много работ посвящено этим исследованиям. Последствия потепления

были значительными и разнообразными. Уменьшилась ледовитость в Северном Ледовитом океане, отмечались отступления ледников [Чижов, Тареева, 1969], проникновение в высокие широты рыб из южных морей и многое другое. Уровень воды в реках и озерах, продолжительность вегетационного периода, вероятность засух также связаны с колебаниями климата. Потепление зим, распространившееся на огромные пространства, привлекло внимание многих ученых. Вопрос об изменчивости климата стал одним из важнейших в климатологии. Однако причины колебаний климата, вследствие их сложности и многообразия, а также совместных действий нескольких факторов в разных сочетаниях до сих пор слабо изучены.

Самый важный вопрос состоит в том, что является причиной возникновения и существования этих колебаний, а также какие обстоятельства могут влиять на их проявления, в частности, что является причиной сильного потепления, имевшего место в 1930-х гг. и в современный климатический период.

Существуют различные мнения о причинах рассмотренного колебания температуры воздуха. Одни ученые считают главной причиной колебания солнечной активности [Виллет, 1962; Вительс, 1962], другие – изменения прозрачности атмосферы за счет вулканической пыли [Будыко, 1971; Давитая, 1965], третьи – увеличение содержания углекислого газа в атмосфере [Plass, 1956; Геденов, 1973]. Исследования последних десятилетий показали, что содержание углекислого газа в атмосфере быстро увеличивается в результате производственной деятельности человека. По данным Ф.Ф. Давитая, за последние 50 лет произошло увеличение содержания CO_2 на 10–12 % в результате безвозвратного расходования кислорода на сжигание ископаемого горючего (угля, нефти, газа) нарушающего природное равновесие. Плас [Plass, 1956] полагает, что избыток CO_2 в атмосфере может заставить подняться температуру воздуха уже в текущем столетии, а так как количество сжигаемого топлива постоянно растет, то и температура будет иметь тенденцию к постоянному подъему. Эта тенденция к потеплению будет продолжаться по крайней мере в течение нескольких столетий.

Действительность не подтверждает теории решающего влияния CO_2 . Позднее потепление прекращалось, и наступало похолодание. Вряд ли влияние одного фактора антропогенного происхождения могло сыграть решающую роль в колебаниях глобального климата. Некоторые авторы указывают, что увеличение содержания CO_2 в атмосфере может быть скомпенсировано другими факторами. Например, Коллендер [Callender, 1938] высказал мнение, что океанские водоросли являются массовым потребителем угле-

кислого газа. Меллер [Möller, 1963] показал, что влияние увеличения содержания углекислого газа в атмосфере на 10 % может быть совершенно скомпенсировано изменением содержания водяного пара на 3 % или облачности на 1 %, т.е. изменением этих элементов на такие величины, которые лежат в пределах точности наблюдений.

О незначительности роли углекислого газа свидетельствует, по мнению Е.С. Рубинштейн и П.Г. Полозовой [1966], и разнонаправленность изменения температуры в разные годы и даже в соседние месяцы.

М.И. Будыко [1980] считает, что потепление наступает не столько за счёт избытка CO_2 в атмосфере, сколько в результате непосредственного обогрева её из-за увеличения производства энергии на Земле. Большое внимание М.И. Будыко уделял вопросу нарушения прозрачности атмосферы и его влияния на температуру Земли. Рядом авторов установлено, что после вулканических извержений, когда нижние слои атмосферы заполняются вулканическим пеплом, планетарная величина прямой солнечной радиации в течение нескольких месяцев или даже лет может быть понижена на 10–20 %. После крупных извержений это может привести к понижению температуры воздуха. В ряде исследований высказывалось предположение, что уменьшение прихода солнечной радиации могло произойти в результате загрязнения атмосферы промышленными примесями и пылью, попавшей в атмосферу при испытаниях ядерного оружия.

Результаты многочисленных исследований свидетельствуют о неоднозначном влиянии глобальных и региональных изменений климата на особенности общей циркуляции атмосферы в разных регионах России.

Территория Западной Сибири по характеристикам температуры воздуха существенно отличается от других климатических регионов России [Второй оценочный..., 2014; Харюткина и др., 2019; Третий оценочный..., 2022; Переведенцев, Васильев, 2023]. Поэтому требуется детальное изучение региональных изменений климата, благоприятных или неблагоприятных для тех или иных видов хозяйственной деятельности.

Цель работы заключается в изучении региональных особенностей изменения режима температуры воздуха на примере одной из самых длиннорядных станций в Сибири г. Томск. Важным этапом работы является оценка возможностей корректного восстановления непрерывного ряда средних месячных температур воздуха на станции Томск за период 1837–1875 гг. В начальном периоде регулярных метеорологических наблюдений в г. Томске имеются значительные пропуски в наблюдениях, что не позволяло охарактеризовать изменение температурного режима в Томске в середине XIX в.

Ближайшей к Томску длиннорядной станцией в Сибири является станция Барнаул. Наблюдения на ней начались с 1838 г. и не прерывались. Одной из задач данной работы была оценка возможности и целесообразности восстановить пропущенные ряды температуры в Томске. С учетом восстановленного ряда температуры стало возможным оценить динамику изменений температуры воздуха в Томске более чем за 180 лет инструментальных метеорологических наблюдений.

В работе в качестве стандартного периода для оценки климатических показателей, характеризующих текущий или современный климат, используется период 30 лет. Такая продолжительность климатических периодов была официально принята Всемирной метеорологической организацией (ВМО) со времени проведения Международных метеорологических конференций в Варшаве (1935 г.), Вашингтоне (1957 г.) [Международная..., 1937; Монин, 1982].

Позднее по решению Всемирного метеорологического конгресса (Женева, 2015 г.) уточнено определение климатической стандартной нормы, которая теперь должна относиться к последнему 30-летнему периоду, завершающемуся годом, оканчивающимся нулем (1981–2010, 1991–2020 гг. и т.д.). В Российской Федерации также приняты обновленные нормы основных климатических показателей, отражающих наблюдающееся изменение климата [Приказ Росгидромета..., 2022].

Стандартная продолжительность 30-летнего климатического периода получена из опыта и сравнительно хорошо удовлетворяет двум условиям: он достаточен для получения устойчивых средних климатических характеристик погод и величин их вариаций и в то же время не слишком велик, чтобы можно было своевременно установить происходящие изменения климата от одного периода к другому.

Понимание региональных процессов, происходящих в глобальной климатической системе, позволит оценить соответственные изменения в природной среде и может повысить точность прогнозирования грядущих изменений климатических условий по крайней мере на ближайшее десятилетие с учётом инерционных свойств климатической системы.

Материалы и методы исследований

В качестве исходной информации были использованы массивы средних месячных данных о температуре воздуха за многолетний период на станциях Томск и Барнаул [AISORI-M.METEO.RU; Справочник, 1965; Научно-прикладной..., 1993].

Для оценки влияния общей циркуляции атмосферы на экстремальные показатели приземных средних месячных температур в Томске использовался календарный каталог элементарных синоптических

процессов, разработанный Г.Я. Вангенгеймом [Дмитриев и др., 2018].

На станции Томск были использованы данные о температуре воздуха за многолетний период с 1837 по 2020 г. В работе станции Томск в начальный период происходили длительные перерывы в наблюдениях. В результате количество пропусков наблюдений за период (1837–1874 гг.) составило около 50 % всех месяцев, что не позволяло объективно оценивать температурный режим в этот период времени.

Томская метеорологическая станция за время своего существования не раз меняла свое местоположение, в зависимости или от места работы заведующего станцией или от квартиры последнего. С начала наблюдений по 1843 г. станцией заведовал директор училищ Томской губернии Новотроицкий. С 1843 по 1846 г. был перерыв в работе станции. С 1846 по 1873 г. станция помещается при гимназии, заведует ею преподаватель Эльснер. За это время станция работала с пропусками. С 1873 по 1884 г. станция помещается при духовном училище (ныне переулочек Совпартшкольный) и находится в заведывании смотрителя Буткеева. С 1884 г. заведывание станцией переходит к директору реального училища Г.К. Тюменцеву, и станция переносится в здание реального училища, где остается до 1886 г., когда переносится на квартиру Г.К. Тюменцева по ул. Солдатской, ныне Красноармейской улице № 83. Здесь станция остается в продолжение 50 лет, до 1934 г. [Масленников, 1939]. В 1934 г. станция была перенесена на 3 км южнее на территорию лесопитомника, где находится в настоящее время. Перемещения метеорологической станции в г. Томске не существенно сказались на точности измерения температуры воздуха в прошлые годы. Территория города была небольшая, равнинная, перепад высот небольшой. Поэтому не возникало необходимости введения поправок на температуры в зависимости от смены местоположения.

Метеорологическая станция Томск находится на южной окраине города. Местность холмистая, изрезанная оврагами. Река Томь протекает к западу на расстоянии 1 км. Правый берег её, где расположена станция, образует крутой склон к реке высотой 40 м. Метеорологическая площадка располагается на высоте 139 м н.у.м.

На станции Барнаул метеорологические наблюдения были организованы с 1838 г., и с этого времени они продолжают без перерывов по настоящее время. Обе станции являются самыми длиннорядными в Западной Сибири. Метеорологическая станция Барнаул расположена в южной части Западно-Сибирской равнины. Местность слабо холмистая, степная. Река Обь протекает в 2 км к востоку в направлении с юго-запада на север.

Метеорологическая площадка находится на левом обрывистом берегу, высотой 50–70 м. К югу в 1,5 км в направлении с запада на восток протекает река Барнаул. Метеорологическая площадка располагается на высоте 157 м.

Относительная близость расстояния между станциями Томск и Барнаул, однотипность основных климатообразующих процессов на юго-востоке Западной Сибири позволили восстановить пропущенные значения температуры воздуха в Томске по данным наблюдений в Барнауле. Приведение средних месячных температур воздуха на станции Томск по данным станции Барнаул за периоды пропусков наблюдений проводилось методом регрессии.

Для климатических показателей температуры воздуха характерна устойчивость разностей температур этих станций. Исследования показали, что изменчивость разностей соответствующих температур двух станций можно считать линейной функцией расстояния между ними, по крайней мере для равнинных территорий. Приведение средних месячных температур воздуха целесообразно еще на расстоянии 300–400 км [Алисов и др., 1952; Рубинштейн, Полозова, 1968]. Расстояние между Томском и Барнаулом по прямой составляет около 350 км, что предполагает возможность и целесообразность восстановления рядов средних месячных температур на станции Томск. С целью выявления связи в ходе температур, устойчивости разностей между температурами обеих станций и, наконец, возможности приведения температур в соответствии с методикой [Алисов и др., 1952] были подсчитаны средние квадратические отклонения и коэффициенты корреляции соответствующих рядов температуры, а также определены критерии целесообразности приведения короткого ряда (пропущенных данных) наблюдений станции Томск к длинному ряду станции Барнаул.

Критерий целесообразности приведения определяется по формуле (1):

$$r(a, b) > \frac{0.5\sigma(a)}{\sigma(b)}, \quad (1)$$

где $r(a, b)$ – коэффициент корреляции между наблюдениями на станции a (Томск) и станции b (Барнаул); $\sigma(a)$ – среднее квадратическое отклонение ряда наблюдений на приводимой станции Томск; $\sigma(b)$ – среднее квадратическое отклонение ряда наблюдений на опорной станции Барнаул.

Для вычислений использовались данные параллельных наблюдений на обеих станциях за многолетний (1881–1980 гг.) период. В табл. 1 приведены коэффициенты линейной парной корреляции средних месячных температур воздуха, их средние квадратические отклонения на станциях Томск и Барнаул и результаты расчета критерия целесообразности приведения средних месячных температур воздуха для станции Томск.

Как показали вычисления, во все месяцы года наблюдается высокая, значимая корреляционная зависимость показателей средней месячной температуры воздуха на станциях Томск и Барнаул. Самые низкие коэффициенты корреляции отмечаются в августе (0,84), марте и июле (0,87), а в остальные месяцы он превышает 0,89. Значения коэффициентов корреляции во все месяцы года значительно превышают соотношение показателей мер изменчивости

температур воздуха на станциях. Поэтому приведение средних месячных температур воздуха на станции Томск по данным станции Барнаул считается целесообразным во все месяцы года, так как соответствует критериям, приведённым выше в формуле (1).

Приведение значений средних месячных температур воздуха на станции Томск проводилось по уравнениям регрессии (табл. 2).

Таблица 1

Критерии целесообразности приведения средних месячных температур воздуха на станции Томск по данным станции Барнаул

Table 1

Criteria for the expediency of bringing the average monthly air temperatures at the Tomsk station according to the Barnaul station

Показатель	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$r(a, b)$	0,91	0,91	0,87	0,92	0,92	0,89	0,87	0,84	0,91	0,91	0,90	0,93
$\sigma(a)$ Томск	4,2	3,7	3,1	2,6	2,1	1,7	1,6	1,3	1,5	2,3	3,9	4,9
$\sigma(b)$ Барнаул	4,0	3,8	3,2	2,7	2,0	1,6	1,6	1,4	1,5	2,1	3,7	4,1
$0,5 \sigma(a)/\sigma(b)$	0,53	0,49	0,49	0,48	0,53	0,53	0,50	0,47	0,50	0,55	0,53	0,54

Таблица 2

Уравнения регрессии для приведения средних месячных температур воздуха на станции Томск (y) по станции Барнаул (x)

Table 2

Regression equations for bringing the average monthly air temperatures at Tomsk station (y) to Barnaul station (x)

Месяц	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции и его погрешность	t -критерий Стьюдента	
			$t_{\text{расч}}$	$t_{\text{табл}}$ при $\alpha = 0,05$
Январь	$y = 0,954x - 2,1$	$0,912 \pm 0,018$	20,26	0,211
Февраль	$y = 0,8416x - 2,9$	$0,914 \pm 0,018$	20,52	0,211
Март	$y = 0,8411x - 2,1$	$0,872 \pm 0,026$	16,23	0,211
Апрель	$y = 0,8455x - 1,6$	$0,916 \pm 0,018$	20,80	0,211
Май	$y = 1,017x - 2,7$	$0,924 \pm 0,016$	22,01	0,211
Июнь	$y = 0,9474x - 1,2$	$0,891 \pm 0,022$	17,88	0,211
Июль	$y = 0,9378x - 0,2$	$0,865 \pm 0,027$	15,71	0,211
Август	$y = 0,8721x + 0,5$	$0,839 \pm 0,032$	14,05	0,211
Сентябрь	$y = 0,9577x - 1,0$	$0,909 \pm 0,019$	19,87	0,211
Октябрь	$y = 0,9694x - 1,5$	$0,909 \pm 0,019$	19,87	0,211
Ноябрь	$y = 0,9331x - 2,7$	$0,903 \pm 0,020$	19,15	0,211
Декабрь	$y = 0,9936x - 2,4$	$0,928 \pm 0,015$	22,69	0,211

При определении параметров уравнений регрессии и коэффициентов корреляции следует оценить статистическую значимость коэффициентов корреляции по формуле (2). Статистическая значимость определяется абсолютной величиной коэффициента корреляции и зависит от объема выборки (n). При этом проверяют гипотезу о равенстве нулю оцениваемого коэффициента корреляции с помощью t -критерия Стьюдента.

$$t = \frac{r(a,b) \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r(a,b)^2}} \quad (2)$$

Рассчитанный показатель $t_{\text{расч}}$ сравнивают с табличным значением $t_{\alpha, \nu}$ при заданном уровне значимости α и числе степеней свободы $\nu = n - 2$. Уровень значимости α обычно принимается равным 5 % ($\alpha = 0,05$). Если вычисленный критерий $t_{\text{расч}}$ по абсолютной величине больше или равен табличному, то при заданном α проверяемую гипотезу отклоняют и

принимают, что вычисленный коэффициент корреляции статистически значим [Львовский, 1988]. Таким образом, приведение пропущенных средних месячных температур на станции Томск по данным станции Барнаул оказалось возможным и целесообразным. В результате приведения продолжительность ряда средних месячных и годовых температур воздуха на станции Томск увеличилась и достигла более 180 лет.

Результаты и обсуждение

Приземная температура воздуха является одной из самых главных характеристик климата любой территории. Можно дать много определений климата, но все они сводятся к тому, что это некоторая интегральная характеристика погод данной территории, полученная примерно за 30-летний период наблюдений.

Многолетние средние месячные и годовые температуры в Томске рассчитаны для шести 30-летних периодов (табл. 3).

При рассмотрении режима температуры воздуха нельзя обойтись только какой-либо одной характеристикой, этого будет недостаточно для освещения ее режима. Поэтому будут использованы следующие три характеристики температуры (табл. 4):

1) средняя месячная и средняя годовая температуры, физический смысл которых очевиден;

2) самая низкая температура за каждый месяц текущего климатического периода, характеризующая экстремально холодные погоды этого месяца;

3) самая высокая температура за каждый месяц текущего климатического периода, характеризующая экстремально теплые погоды этого месяца.

Использование этих показателей существенно расширяет описание температурных условий Томска за 180-летний интервал времени.

Таблица 3

Климатические 30-летние периоды. Станция Томск

Table 3

Climatic 30-year periods. Tomsk Station

Показатель	Годы					
	1841–1870	1871–1900	1901–1930	1931–1960	1961–1990	1991–2020
Номер климатического периода	1	2	3	4	5	6

Таблица 4

Многолетние средние месячные и годовые температуры воздуха (°C) на станции Томск (климатические нормы), а также их наименьшие и наибольшие значения

Table 4

Long-term average monthly and annual air temperatures (°C) at Tomsk station (climatic norms), as well as their lowest and highest values

Месяц	Значение	Годы, номер климатического периода						[Справочник, 1965] (1881–1960)	[Научно-прикладной..., 1993] (1881–1980)
		1841–1870	1871–1900	1901–1930	1931–1960	1961–1990	1991–2020		
		1	2	3	4	5	6		
Январь	Среднее	–20,2	–20,3	–18,5	–19,2	–17,8	–17,5	–19,2	–19,1 ± 0,4
	Наименьшее	–28,2	–29,3	–24,5	–27,1	–29,5	–29,4		
	Наибольшее	–13,6	–12,8	–10,8	–12,5	–10,2	–8,0		
Февраль	Среднее	–16,8	–17,4	–16,3	–16,6	–16,9	–14,2	–16,7	–16,9 ± 0,4
	Наименьшее	–22,2	–23,6	–23,0	–25,6	–28,2	–23,3		
	Наибольшее	–10,2	–10,7	–7,9	–10,4	–10,9	–7,7		
Март	Среднее	–11,0	–9,4	–10,6	–10,2	–8,1	–6,3	10,1	–9,9 ± 0,3
	Наименьшее	–18,0	–18,0	–16,6	–15,5	–12,9	–14,7		
	Наибольшее	–5,7	–2,1	–4,1	–4,5	–2,3	–1,3		
Апрель	Среднее	–0,6	–1,2	–0,3	0,6	0,7	2,6	–0,1	0,0 ± 0,3
	Наименьшее	–5,9	–5,9	–5,1	–5,3	–5,1	–3,1		
	Наибольшее	4,1	6,3	3,3	4,5	4,5	8,5		
Май	Среднее	8,1	8,0	8,8	8,9	9,0	10,4	8,6	8,7 ± 0,2
	Наименьшее	4,8	3,1	4,1	6,5	5,9	5,6		
	Наибольшее	11,0	12,4	13,7	12,4	13,2	15,0		
Июнь	Среднее	15,3	15,0	15,3	15,4	15,8	16,5	15,3	15,4 ± 0,1
	Наименьшее	10,5	11,7	11,7	12,6	12,9	11,6		
	Наибольшее	19,1	18,9	18,9	17,8	18,5	21,0		
Июль	Среднее	18,6	18,5	18,0	18,2	18,7	18,8	18,1	18,3 ± 0,2
	Наименьшее	16,6	14,6	14,5	15,4	15,6	15,5		
	Наибольшее	22,7	21,8	21,0	20,9	22,2	21,5		
Август	Среднее	15,5	15,2	15,2	15,1	15,2	15,9	15,2	15,1 ± 0,1

Месяц	Значение	Годы, номер климатического периода						[Справочник, 1965] (1881–1960)	[Научно-прикладной..., 1993] (1881–1980)
		1841–1870	1871–1900	1901–1930	1931–1960	1961–1990	1991–2020		
		1	2	3	4	5	6		
Сентябрь	Наименьшее	13,3	12,8	10,1	12,4	12,6	12,5	9,2	9,3 ± 0,2
	Наибольшее	18,5	17,4	18,4	18,4	17,5	18,4		
	Среднее	8,6	9,3	9,2	9,3	9,2	9,2		
Октябрь	Наименьшее	4,1	6,0	6,6	6,2	5,3	6,1	0,9	0,8 ± 0,2
	Наибольшее	11,0	12,1	11,9	12,0	12,9	12,3		
	Среднее	0,0	0,6	0,5	1,5	0,6	2,0		
Ноябрь	Наименьшее	–4,8	–5,1	–5,8	–2,0	–4,2	–2,4	–10,4	–10,1 ± 0,4
	Наибольшее	5,0	3,5	4,6	5,4	4,7	5,3		
	Среднее	–11,1	–10,6	–9,4	–11,1	–8,9	–8,2		
Декабрь	Наименьшее	–18,7	–20,4	–16,2	–21,2	–17,0	–15,0	–17,8	–17,3 ± 0,4
	Наибольшее	–3,7	–2,0	–4,6	–4,8	–3,6	–1,6		
	Среднее	–17,5	–17,7	–17,5	–17,9	–15,6	–14,9		
Год	Наименьшее	–26,9	–27,5	–27,9	–27,6	–26,1	–25,0	–0,7	–0,5
	Наибольшее	–11,3	–9,5	–8,5	–9,5	–9,3	–6,8		
	Среднее	–0,8	–0,8	–0,4	–0,5	0,1	1,2		
Год	Наименьшее	–3,3	–3,0	–2,1	–2,1	–2,2	–1,4		
	Наибольшее	1,2	1,0	1,0	1,6	2,4	3,6		

По данным табл. 3 можно наглядно представить, какими были в Томске средние температурные условия (климатические нормы) в каждый из этих шести последовательных 30-летних периодов, а также самые высокие и самые низкие средние месячные температуры воздуха за тот же период. Для сравнения приведены многолетние средние месячные и средние годовые значения из [Справочник, 1965; Научно-прикладной..., 1993]. Данные по средним месячным температурам воздуха за период (1881–1980 гг.) содержат величину средней арифметической погрешности.

Изменение средних годовых температур по 30-летним периодам. Анализ 30-летних средних годовых температур приземного воздуха в Томске (рис. 1) в целом показывает постоянное повышение температуры воздуха. В Томске в первоначальный 60-летний период (1841–1900 гг.) наблюдалась самая низкая за 180 лет средняя годовая температура воздуха –0,8 °С (климатическая норма двух периодов). В следующий период (1901–1930 гг.) климатическая норма температуры повысилась на 0,4 °С.

За четвёртый период (1931–1960 гг.) средняя годовая температура незначительно понизилась на 0,1 °С. За следующие 30 лет (пятый период – с 1961 по 1990 г.) температура повысилась на 0,7 °С, а затем за шестой период (1991–2020 гг.) еще возросла на 1,1 °С и достигла максимальной величины за весь период наблюдений 1,2 °С.

За пятый и шестой периоды рост температуры оказался наиболее интенсивным.

Для оценки степени значимости изменения средних годовых температур воздуха в смежные климатические периоды использовался *t*-критерий Стьюдента (табл. 5).

За первые два климатических периода с 1871 по 1900 г. климатические нормы температуры не изменились совсем, хотя в разные десятилетние периоды

колебания температуры наблюдались. В третьем климатическом периоде средняя годовая температура существенно повысилась на 0,4 °С, такое повышение температуры воздуха за 30-летний период оказалось статистически незначимым при уровне значимости 5 % ($\alpha = 0,05$).

В четвёртом климатическом периоде средняя годовая температура имела тенденцию к понижению. Наблюдалось очень небольшое похолодание, тоже статистически незначимое (температура понизилась всего на 0,1 °С).

В пятом климатическом периоде (1961–1990 гг.) средняя годовая температура воздуха повысилась на 0,6 °С. Такое повышение температуры за 30-летний период стало статистически значимым фактом.

Потепление климата продолжалось и в следующем шестом климатическом периоде (1991–2020 гг.). За этот период произошло максимальное повышение температуры воздуха на 1,1 °С. Такое повышение температуры оказалось весьма существенным и статистически значимым.

Можно сделать вывод, что в течение 180 лет инструментальных наблюдений за температурой воздуха на станции Томск на протяжении 120 лет до 1960-х гг. её колебания были относительно небольшими.

Об этом можно судить и по данным климатических справочников [Справочник, 1965; Научно-прикладной..., 1993], приведённых в табл. 4.

Таким образом, в Томске за прошедшие 180 лет средние годовые температуры воздуха с первого 30-летнего периода по шестой повысились с –0,8 до 1,2 °С, т.е. на 2,0 °С. Следует отметить, что за последние 60 лет средняя годовая температура повысилась на 1,8 °С.

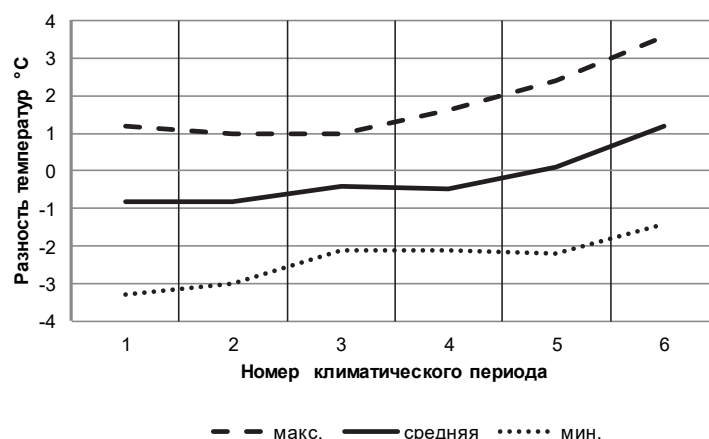


Рис. 1. Разности средних годовых температур воздуха (°C) в смежные климатические периоды. Номера климатических периодов приведены в табл. 3

Fig. 1. Differences in average annual air temperatures (°C) in adjacent climatic periods. The numbers of the climatic periods are given in Table 3

Оценка статистической значимости изменения многолетних средних годовых температур воздуха, г. Томск

Таблица 5

Table 5

Assessment of the statistical significance of changes in long-term average annual air temperatures, Tomsk

Номер 30-летних климатических периодов	Разность средних годовых температур между последующим и предыдущим 30-летием	$t_{\text{расч}}$	$t_{\text{табл}} (\alpha = 0,05)$	Пояснение
2-1	0,0	—	2,04	Без изменения
3-2	+0,4	1,86	2,04	$t_{\text{расч}} < t_{\text{табл}}$ незначимое повышение
4-3	-0,1	0,70	2,04	$t_{\text{расч}} < t_{\text{табл}}$ незначимое понижение
5-4	+0,6	2,11	2,04	$t_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}$ значимое повышение
6-5	+1,1	3,87	2,04	$t_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}$ значимое повышение

Климатические изменения средних месячных температур. Изменение средних месячных температур в различные климатические периоды носят неоднозначный характер. В климатические периоды в разные месяцы наблюдаются различные тенденции изменения температурного режима. Эти изменения носят как разнонаправленный характер, так и различаются по интенсивности потепления или похолодания климата. Для оценки значимости (существенности) изменения температурного режима за отдельные месяцы использовался t -критерий Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$ (Исаев, 1988). Рассчитанные изменения средних месячных и средних годовых температур воздуха (°C) в смежные климатические периоды и их средние арифметические погрешности приведены в табл. 6.

Выделены разности средних месячных и годовых температур воздуха, значения повышения которых являются значимыми по t -критерию Стьюдента (при $\alpha = 0,05$). Расчетное значение t зависит от величины разности температуры и от средней арифметической погрешности средней.

На оценку значимости изменений температуры влияет различная степень естественной изменчивости температуры в различные сезоны года, которая связана с циркуляционными процессами в атмосфере. Максимальные погрешности средних арифметических значений температуры отмечаются в зимний период года, а минимальные — в летний. В зимний период отмечается максимальная изменчивость температурного режима воздуха, и, следовательно, средние квадратические отклонения.

Общее количество месяцев за год с повышением или понижением средних месячных температур воздуха по сравнению с предыдущим климатическим периодом приведено в табл. 7.

На какую величину понизилась или повысилась температура воздуха по сравнению с предыдущим периодом в данном случае не учитывалось. В целом за весь 180-летний период наблюдений в Томске отмечается увеличение числа месяцев с повышением средних месячных температур воздуха и, соответственно, уменьшение их числа с понижением температуры. Особенно заметно усилилось потепление за последние 60 лет.

Таблица 6

**Изменения средних месячных и годовых температур воздуха (климатических норм)
и их средних арифметических погрешностей за различные климатические периоды, г. Томск**

Table 6

**Changes in average monthly and annual air temperatures (climatic norms) and their arithmetic averages
for various climatic periods, Tomsk**

Месяц, год	Годы, номер климатического периода				
	1871–1900– 1841–1870	1901–1930– 1871–1900	1931–1960– 1901–1930	1961–1990– 1931–1960	1991–2020– 1961–1990
	2–1	3–2	4–3	5–4	6–5
Январь	–0,1 ± 0,8	+1,8 ± 0,8	–0,7 ± 0,8	+1,4 ± 0,8	+0,3 ± 0,8
Февраль	–0,6 ± 0,7	+1,1 ± 0,7	–0,3 ± 0,7	–0,3 ± 0,7	+2,7 ± 0,7
Март	+1,6 ± 0,6	–1,2 ± 0,6	+0,4 ± 0,6	+2,1 ± 0,6	+1,8 ± 0,6
Апрель	–1,2 ± 0,5	–0,3 ± 0,5	+0,6 ± 0,5	+0,7 ± 0,5	+2,6 ± 0,5
Май	–0,1 ± 0,4	+0,8 ± 0,4	+0,1 ± 0,4	+0,1 ± 0,4	+1,4 ± 0,4
Июнь	–0,3 ± 0,3	+0,3 ± 0,3	+0,1 ± 0,3	+0,4 ± 0,3	+0,7 ± 0,3
Июль	–0,1 ± 0,3	–0,5 ± 0,3	+0,2 ± 0,3	+0,5 ± 0,3	+0,1 ± 0,3
Август	–0,3 ± 0,2	0,0 ± 0,2	–0,1 ± 0,2	+0,1 ± 0,2	+0,7 ± 0,2
Сентябрь	+0,7 ± 0,3	–0,1 ± 0,3	+0,1 ± 0,3	–0,1 ± 0,3	0,0 ± 0,3
Октябрь	+0,6 ± 0,4	–0,1 ± 0,4	+1,0 ± 0,4	–0,9 ± 0,4	+1,4 ± 0,4
Ноябрь	+0,5 ± 0,7	+1,2 ± 0,7	–1,7 ± 0,7	+2,2 ± 0,7	–0,7 ± 0,7
Декабрь	–0,2 ± 0,8	+0,2 ± 0,8	–0,4 ± 0,8	+2,3 ± 0,8	+0,7 ± 0,8
Год	0,0 ± 0,2	+0,4 ± 0,2	–0,1 ± 0,2	+0,7 ± 0,2	+1,0 ± 0,2

Примечание. Различие климатических норм определялось как разность температур между последующим и предыдущим периодом. Знак «плюс» означает повышение температуры, «минус» – понижение. Статистически значимые разности выделены жирным шрифтом.

Note. The difference in climatic norms was defined as the temperature difference between the following and the previous period. A plus sign means an increase in temperature, a minus sign means a decrease. Statistically significant differences are highlighted in bold font.

Таблица 7

**Количество месяцев за год с относительным понижением или повышением средних температур воздуха
по сравнению с предшествующим климатическим периодом, г. Томск**

Table 7

**The number of months per year with a relative decrease or increase in average air temperatures compared
to the previous climatic period, Tomsk**

Изменение температуры	Годы, номер климатического периода				
	(1841–1870) – (1871–1900)	(1871–1900) – (1901–1930)	(1901–1930) – (1931–1960)	(1931–1960) – (1961–1990)	(1961–1990) – (1991–2020)
	2–1	3–2	4–3	5–4	6–5
Повышение и без изменения	4	7	7	9	11
Понижение	8	5	5	3	1

Анализ изменений климатических изменений температуры воздуха в Томске (см. табл. 7) показал, что 120 лет до 1980 г. [Научно-прикладной..., 1993] температурный режим оставался достаточно устойчивым. Только средние годовые температуры за период (1901–1930 гг.) оказались выше, чем в предшествующие периоды. Потепление произошло за счёт повышения температур в месяцы холодного периода, хотя и статистически незначимых.

В целом в Западной Сибири, да и в других регионах, отмечается более интенсивный темп повышения температур воздуха в холодный период года. В летние месяцы температурный режим практически не меняется.

Например, в Томске максимально высокие июльские температуры воздуха в новом климатическом периоде (1991–2020 гг.) лишь на 0,2 °C превышают температуру воздуха в первый период (1841–1870 гг.).

Для сравнения на рис. 2 приведён вековой ход январских средних месячных температур воздуха по климатическим периодам.

Изменение средних многолетних июльских температур воздуха в различные климатические периоды приведены на рис. 3.

По данным табл. 4 следует, что за пятый период (1961–1990 гг.) особенно повысились средние температуры за март и ноябрь.

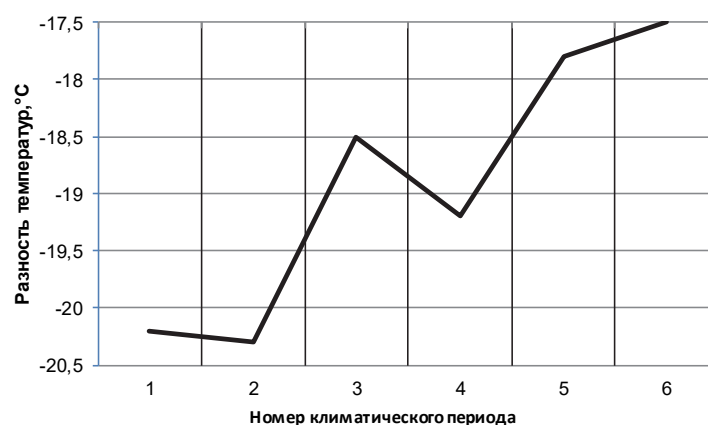


Рис. 2. Вековой ход средних месячных температур воздуха в январе в различные климатические периоды, г. Томск

Fig. 2. The secular course of average monthly air temperatures in January and July in various climatic periods, Tomsk



Рис. 3. Вековой ход средних месячных температур воздуха в июле в различные климатические периоды, г. Томск

Fig. 3. The secular course of average monthly air temperatures in July in various climatic periods, Tomsk

За шестой период (1991–2020 гг.) существенно повысились температуры уже за пять месяцев из 12 (с февраля по май и за октябрь). В новом климатическом периоде только в ноябре средняя температура оказалась ниже, чем в предшествующий климатический период. В этот же климатический период наблюдались самые высокие наименьшие и наибольшие значения средних годовых температур воздуха. Отметим, что в новом климатическом периоде в летние месяцы и в сентябре не происходило статистически значимых изменений температуры. Не было значимых изменений температуры воздуха в декабре и январе. Отсюда можно сделать вывод о том, что основные изменения в термическом режиме наблюдались главным образом в переходные сезоны года. Важно отметить, что небольшие статистически незначимые повышения температуры (тенденции) за

различные 30-летние периоды, продолжающиеся более длительное время, могут постепенно приводить к статистически значимым их изменениям за более длительные периоды. Так, например, сравнение норм температуры воздуха за первый период (1841–1870 гг.) с климатическими нормами шестого периода (1991–2020 гг.) показало, что они в большинстве месяцев и за год в целом значительно повысились. Изменение средних месячных температур в Томске с первого периода (1841–1870 гг.) по шестой (1990–2020 гг.) приведено в табл. 8.

Основной вклад в повышение температуры воздуха произошло в холодный и переходные сезоны года. С ноября по март средние температуры воздуха повысились в разные месяцы на 2,6–4,7 °C. Особенно следует отметить, что значения средних месячных температур воздуха за июль, август и сентябрь за весь

180-летний период статистически значимо не изменились.

Изменение средних годовых температур по десятилетним периодам. Представляет определённый интерес более подробная динамика температурных условий в выделенных климатических периодах отдельно по десятилетиям. В табл. 9 показаны средние годовые температуры воздуха в Томске за каждое десятилетие в климатических периодах.

Как было ранее отмечено, в первые два периода (с 1841 по 1900 г.) средние годовые температуры воздуха не менялись и составляли $-0,8^{\circ}\text{C}$. Тем не менее за десятилетия колебания средних годовых температур воздуха отмечались.

Анализ изменчивости средних годовых значений температуры за 10-летние периоды показал, что ее наибольшие статистически значимые повышения в

Томске происходили в следующие 10-летние периоды: 1851–1860 гг., 1891–1900 гг., 1981–1990 гг. и 2011–2020 гг. Самые значительные похолодания за весь 180-летний период отмечены лишь в период 1861–1870 гг. и 1931–1940 гг.

Анализ динамики средних годовых температур воздуха в Томске по десятилетиям показал особенности её временной изменчивости. В одни климатические периоды может наблюдаться как тенденция повышения температуры, так и тенденция её понижения.

Разнонаправленные тенденции изменения температуры проявляются на протяжении всего 180-летнего периода. Всё это говорит о сложных взаимодействиях главных климатообразующих процессов, происходящих в равнинных условиях южной части Западной Сибири.

Таблица 8

Изменение климатических норм средних месячных температур воздуха ($^{\circ}\text{C}$) от шестого (1991–2020 гг.) периода к первому (1841–1870 гг.), г. Томск

Table 8

Change in climatic norms of average monthly air temperatures ($^{\circ}\text{C}$) from the sixth (1991–2020) period to the first (1841–1870), Tomsk

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
+2,7	+2,6	+4,7	+3,2	+2,3	+1,2	+0,2	+0,4	+0,6	+2,0	+2,9	+2,6	+2,0

Таблица 9

Средние годовые температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) по климатическим периодам, десятилетиям и их разности (в скобках), г. Томск

Table 9

Average annual air temperatures ($^{\circ}\text{C}$) by climatic periods, decades, their differences (in parentheses), Tomsk

30-летний климатический период, годы	Десятилетние периоды, годы		
	Первое 10-летие	Второе 10-летие	Третье 10-летие
1841–1870 (период 1) $-0,8$	1841–1850 $-1,0$	1851–1860 $-0,4 (+0,6)$	1861–1870 $-0,9 (-0,5)$
1871–1900 (период 2) $-0,8$	1871–1880 $-0,9 (0,0)$	1881–1890 $-1,1 (-0,2)$	1891–1900 $-0,5 (+0,6)$
1901–1930 (период 3) $-0,4$	1901–1910 $-0,6 (-0,1)$	1911–1920 $-0,5 (+0,1)$	1921–1930 $-0,2 (+0,3)$
1931–1960 (период 4) $-0,5$	1931–1940 $-0,5 (-0,3)$	1941–1950 $-0,4 (+0,1)$	1951–1960 $-0,5 (-0,1)$
1961–1990 (период 5) $0,1$	1961–1970 $-0,1 (+0,4)$	1971–1980 $-0,1 (0,0)$	1981–1990 $0,7 (+0,8)$
1991–2020 (период 6) $1,2$	1991–2000 $1,0 (+0,3)$	2001–2010 $0,9 (-0,1)$	2011–2020 $1,7 (+0,8)$

В связи с тем, что в настоящий период времени наблюдается устойчивое потепление климата как в Западной Сибири, так и в других регионах, и это явление связано главным образом с повышением температуры воздуха в холодный период года, было проведено исследование зависимости повышения климатической

нормы температуры воздуха от повторяемости месяцев с аномально высокими температурами воздуха.

Для оценки влияния циркуляционного фактора на повышение температуры были выделены аномально теплые месяцы в холодный период года (с ноября по март) во всех климатических периодах. Критерием

для выделения аномально теплых месяцев служило превышение средней месячной температуры на величину её среднего квадратического отклонения в соответствующем месяце.

Фактическое количество аномально теплых месяцев в холодный период года в каждом климатическом периоде и их среднее число за сезон приведены в табл. 10.

Т а б л и ц а 10

Количество аномально теплых зимних месяцев в различные климатические периоды, г. Томск

Table 10

The number of abnormally warm winter months in different climatic periods, Tomsk

Показатель	Годы, номер климатического периода						% от общей суммы
	1841–1870	1871–1900	1901–1930	1931–1960	1961–1990	1991–2020	
	1	2	3	4	5	6	
Ноябрь	4	6	9	4	12	12	26
Декабрь	6	3	3	3	7	11	18
Январь	5	6	6	7	12	14	28
Февраль	5	3	2	7	5	14	19
Март	5	10	8	4	15	21	35
% от общей суммы	17	19	19	17	34	48	

За весь 180-летний период в Томске в 30-летних периодах количество аномально теплых месяцев в холодный период изменялось от 4 до 21 месяца. В климатические периоды (с первого по четвертый) с мало меняющимися средними температурами воздуха число аномально теплых месяцев изменялось от 17 до 19 % от общего числа месяцев в климатическом периоде. Анализ числа аномально теплых месяцев показал, что если их среднее количество равно 5–6 случаям за месяц, то изменения температуры не превышают в среднем 0,1–0,4 °C, что не является статистически значимым.

Увеличение числа месяцев с аномально высокими температурами воздуха в зимний период более 30 % уже приводит к существенному повышению норм средних месячных температур воздуха. В новом климатическом периоде число месяцев с аномально высокими температурами в холодный период достигло 48 % всех случаев.

По данным табл. 10 можно сделать обобщённые выводы, что наиболее сильное влияние на изменение температурного режима в Томске оказывают зимние месяцы и переходные сезоны года. Положительные аномалии средних месячных температур возникали в марте в 35 % случаев. В январе положительные аномалии температуры возникали в 28 % случаев. На положительные аномалии в ноябре приходится 26 % случаев. На декабрь и февраль соответственно приходится 18 и 19 % положительных аномалий температуры.

Влияние атмосферной циркуляции на температурный режим воздуха. Влияние атмосферной циркуляции над Западной Сибирью рассматривалось в достаточно большом количестве работ [Зубович и др., 1979; Коженкова, Рутковская, 1961; Лучицкая и др., 2014].

Синоптические процессы над Томской областью тесно связаны с процессами над всем Северным полушарием. Большое разнообразие синоптических процессы разные авторы объединили в три основных типа циркуляции: западный или зональный (W), восточный (E) и меридиональный (C). Преобладающим в умеренных широтах является западный тип циркуляции. Влияние восточного типа циркуляции также достаточно велико, особенно в холодное полугодие. Роль меридионального типа циркуляции усиливается весной и в первую половину лета [Дмитриев и др., 2018].

В зависимости от преобладания типа того или иного типа циркуляции могут наблюдаться аномалии температурных условий в отдельные сезоны года. Так, например, при хорошо развитом западном (W) переносе зимой усиливается циклоническая деятельность на юге Западной Сибири. Гребень Сибирского антициклона смещается к юго-востоку или в Восточную Сибирь. В центральных районах Западной Сибири отмечаются заметные потепления. Вероятность положительной аномалии температуры при западном переносе достигает 80 % [Коженкова, Рутковская, 1961; Зубович и др., 1979; Харюткина и др., 2019].

При циркуляции восточного типа (E) усиливается влияние сибирского антициклона на погоду в Томской области, возрастает вероятность отрицательных аномалий температуры зимой [Климат Томска, 1982].

Большая изменчивость средних месячных температур воздуха в январе затрудняет анализ соответствия повторяемости типов циркуляции и температуры воздуха.

Для оценки влияния типов циркуляции на формирование температурного режима в условиях Западной Сибири были выбраны по 10 аномально холодных (табл. 11) и аномально тёплых январей (табл. 12).

В приведённые anomalно холодные январь были выбраны повторяемости различных типов циркуляции W, C, E [Дмитриев и др., 2018] и число дней в соответствующем январе с циклонами и антициклонами [Лучицкая и др., 2014].

В случаях anomalно холодных январей преобладает повторяемость восточного типа циркуляции (E), изменяется от 21 до 31 дня за месяц. При этом западный тип циркуляции (W) был редко и не превышал семь дней.

Anomalно холодные зимы в Сибири бывают при устойчивых антициклонах над Азиатской частью

России, блокирующих проникновение в Сибирь тёплых воздушных масс с прохождением атмосферных фронтов, связанных с циклоническими образованиями. В anomalно холодные зимние месяцы повторяемость дней с циклонами – минимальная.

В случаях с anomalно тёплыми январями получены следующие выводы. В anomalно тёплые январь преобладающей формой циркуляции является западная форма (W). Довольно значительная часть дней наблюдается меридиональная форма циркуляции, приносящая тёплый воздух из южных районов.

Таблица 11

Типы циркуляции атмосферы, число дней с циклонами и антициклонами, г. Томск.
Январь. Anomalно холодные месяцы

Table 11

Types of atmospheric circulation, the number of days with cyclones and anticyclones, Tomsk.
January. Abnormally cold months

Год	Средняя месячная температура воздуха, январь, °C	Тип циркуляции, дни			Число дней с циклоном	Число дней с антициклоном
		W	E	C		
1893	–29,3	2	29	0	–	–
1900	–28,9	0	31	0	–	–
1933	–25,1	5	26	0	–	–
1940	–27,1	4	23	4	–	–
1947	–26,4	0	21	10	–	–
1969	–29,5	3	28	0	6	25
1977	–25,5	0	31	0	7	24
1979	–26,0	4	25	2	2	29
2006	–29,4	7	22	2	9	22
2010	–26,8	0	23	8	5	23
Среднее		2,5	25,9	2,6	5,8	24,6

Таблица 12

Типы циркуляции атмосферы, число дней с циклонами и антициклонами, г. Томск.
Январь. Anomalно теплые месяцы

Table 12

Types of atmospheric circulation, the number of days with cyclones and anticyclones, Tomsk.
January. Abnormally warm months

Год	Средняя месячная температура воздуха, январь, °C	Тип циркуляции, дни			Число дней с циклоном	Число дней с антициклоном
		W	E	C		
1914	–11,6	17	0	14	–	–
1925	–10,8	25	0	6	–	–
1949	–12,5	23	0	8	27	4
1964	–10,2	15	0	16	24	7
1975	–12,8	19	12	0	22	9
1983	–10,8	15	12	4	23	8
1991	–12,4	15	0	16	14	17
1992	–10,0	11	0	20	24	7
2002	–8,0	21	0	10	18	13
2007	–9,4	20	0	11	21	10
Средние		18,1	2,4	10,5	21,6	9,4

Восточная форма циркуляции (C) отмечается редко (в двух случаях из 10). Относительно высокие средние январские температуры воздуха объясняются явным преимуществом циклональной формы циркуляции над Западной Сибирью и связанной с ней повышенной повторяемостью прохождения теплых воздушных масс.

Заключение

В результате исследования температурного режима в г. Томске за 180-летний период инструментальных наблюдений можно сделать следующие выводы.

1. Одним из важнейших интегрированных показателей изменения термического режима являются

средние годовые температуры воздуха. Анализ изменений средних годовых температур в Томске по 30-летним периодам показал, что наблюдается тенденция их повышения с середины XIX в. по настоящее время. В Томске за 60-летний период (1841–1900 гг.) наблюдалась самая низкая $-0,8^{\circ}\text{C}$ средняя годовая температура воздуха. На фоне повышения средних годовых температур воздуха в Томске в период 1931–1960 гг. наблюдалось её незначительное понижение на $0,1^{\circ}\text{C}$. В следующие периоды средние годовые температуры продолжали повышаться. За период с 1961 по 1990 г. средняя годовая температура повысилась на $0,7^{\circ}\text{C}$, а затем за период 1991–2020 гг. еще возросла на $1,1^{\circ}\text{C}$. Таким образом, за 180 лет средние годовые температуры в Томске повысились с $-0,8^{\circ}\text{C}$ до $1,2^{\circ}\text{C}$, т.е. на 2°C , причем только за последние 60 лет она повысилась на $1,8^{\circ}\text{C}$. Эти последние повышения температуры стали статистически значимыми.

2. Изменения средних месячных температур в разные 30-летние климатические периоды показали различную направленность их тенденций. Одинаковые средние годовые температуры воздуха между вторым и первым климатическим периодами обусловлена была тем, что статистически незначимые похолодания были в зимние, весенние и летние месяцы (восемь месяцев), а потепление проявилось в марте и осенью (четыре месяца).

Между третьим и вторым климатическим периодом статистически значимое повышение средней годовой температуры составило $0,4^{\circ}\text{C}$. Повышение температуры определилось в связи с тем, что в течение шести месяцев наблюдался рост температуры и столько же месяцев была тенденция к её понижению, однако относительно более высокие темпы роста температуры наблюдались в холодный период года.

Наибольшее повышение температуры между пятым и четвертым, а также шестым и пятым климатическими периодами характеризовалось значительно большей повторяемостью месяцев с повышением температуры.

3. Наибольшие темпы повышения температуры воздуха отмечаются в зимний период и в переходные месяцы года. Это объясняется тем, что в условиях Западной Сибири в различные климатические периоды могут преобладать различные типы циркуляции атмосферы. При западном переносе воздушных масс сюда поступает относительно теплый воздух с Атлантики или при меридиональном переносе приходит воздух из южных районов. В летние месяцы во все климатические периоды тенденции повышения температуры являются незначимыми.

4. Исследование температуры воздуха внутри климатических периодов показало, что её изменчивость может иметь противоположные тенденции по десятилетиям. Внутри каждого 30-летнего периода есть 10-летние периоды с различными тенденциями температуры. Это говорит о большой степени случайности в проявлении различных особенностей общей циркуляции атмосферы. Отметим, что даже в самый тёплый климатический период 1991–2020 гг. десятилетие 2001–2010 гг. оказалось прохладнее, чем предыдущее десятилетие.

5. При современных условиях потепления климата следует учитывать возможности появления экстремальных режимов температуры воздуха. В зимние месяцы могут наблюдаться экстремально низкие значения температуры воздуха, такие как в прошлые более холодные климатические периоды. Например, на станции Томск в январе в пятом и шестом теплых климатических периодах наблюдались самые высокие средние месячные температуры воздуха $-17,8^{\circ}\text{C}$ и $-17,5^{\circ}\text{C}$ соответственно. В то же время наименьшие средние месячные температуры в эти периоды были равны $-29,5^{\circ}\text{C}$ в январе 1969 г. и $-29,4^{\circ}\text{C}$ в январе 2006 г. Эти минимальные температуры оказались ниже, чем в предшествующие более холодные климатические периоды.

6. Основной причиной современного изменения температурного режима в Сибири, вероятно, следует считать изменения в повторяемости различных форм циркуляции атмосферы. Интенсивное повышение средних месячных и годовых температур последних периодов времени подтверждается значительным увеличением аномально тёплых месяцев в зимние и переходные периоды за последние десятилетия. Повышения средних месячных температур воздуха зимой на $3-5^{\circ}\text{C}$ могут быть вызваны только приходом относительно теплых воздушных масс при западном переносе и уменьшением влияния восточного и меридионального переноса воздушных масс из Арктики.

Несомненно, на современные изменения климата влияет очень большое количество различных факторов, в том числе и антропогенные, которые очень сложно учесть. Результаты исследований свидетельствуют о неоднозначном влиянии на глобальные изменения климата особенностей общей циркуляции атмосферы в разных регионах России и, в частности, в Сибири. Есть все основания считать, что особенности изменения термического режима могут существенно отличаться в арктических и в горных районах Сибири. В связи с этим требуется детальное изучение региональных изменений режима температуры воздуха с целью разработки методов её прогнозирования.

Список источников

- Алисов Б.П., Дроздов О.А., Рубинштейн Е.С. Курс климатологии. Л. : Гидрометеиздат, 1952. 487 с.
Будыко М.И. Климат и жизнь. Л. : Гидрометеиздат, 1971. 472 с.

- Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем. Л. : Гидрометеиздат, 1980. 351 с.
- Виллет Х.К. Характер связи солнечных и климатических явлений / Солнечная активность и изменения климата. Л. : Гидрометеиздат, 1962. С. 15–25.
- Вителъ Л.А. Аномалии циклического хода солнечной активности и тенденция современных колебаний климата // Труды ГГО. 1962. Вып. 133. С. 35–55.
- Вознесенский А.В., Шостакович В.Б. Основные данные для изучения климата Восточной Сибири. Иркутск : Типо-литография П.И. Макушина и В.М. Посохина, 1913. 222 с.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М. : Планета, 2014. 58 с.
- Геденов А.Д. Изменения температуры воздуха на северном полушарии за 90 лет. Л. : Гидрометеиздат, 1973. 146 с.
- Гирс А.А., Кондратович К.В. Методы долгосрочных прогнозов погоды. Л. : Гидрометеиздат, 1978. 342 с.
- Давитая Ф.Ф. О возможности влияния запыленности атмосферы на уменьшение ледников и потепление климата // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1965. № 2. С. 3–23.
- Дмитриев А.А., Дубравин В.Ф., Белязо В.А. Атмосферные процессы Северного полушария (1891–2018 гг.), их классификация и использование. СПб. : СУПЕР Издательство, 2018. 306 с.
- Доклад о научно-методических основах для разработки стратегии адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенций Росгидромета). Санкт-Петербург ; Саратов : Амирит, 2020. 120 с.
- Заде Г.О., Русанов В.И., Севастьянова Л.М., Севастьянов В.В. Современные тенденции климатических изменений в Томске // Актуальные проблемы биологии, медицины и экологии. 2004. Т. 3, № 4. С. 41–42.
- Зубович М.Г., Тарасенко В.Д., Токарев В.Г., Шкапоид М.А., Ягудин Р.А. Синоптические условия формирования крупных аномалий средней месячной температуры воздуха в Западной Сибири // Тр. ЗСРНИГМИ. 1979. Вып. 42. С. 24–36.
- Исаев А.А. Статистика в метеорологии и климатологии. М. : Изд-во МГУ, 1988. 288 с.
- Климат Томска. Л. : Гидрометеиздат, 1982. 176 с.
- Коженкова З.П., Рутковская Н.В. Климат Томской области и его формирование // Вопросы географии Сибири. 1961. Вып. 6. С. 3–39.
- Лучицкая И.О., Белая Н.И., Арбузов С.А. Климат Новосибирска и его изменения. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2014. 224 с.
- Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М. : Высшая школа, 1988. 239 с.
- Масленников Н.И. Климат Томска // Тр. Томского гос. ун-та. Т. 95: География. Томск : Красное Знамя, 1939. С. 31–75.
- Международная конференция директоров метеорологических служб. Варшава / Главное упр. Гидрометеорол. службы СССР при СНК СССР. Л. ; М. : Гидрометеорол. изд., Типо-лит Гидрометеиздат, 1937.
- Монин А.С. Введение в теорию климата. Л. : Гидрометеиздат, 1982. 247 с.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Вып. 20, ч. 1–6. СПб. : Гидрометеиздат, 1993. 717 с.
- Переведенцев Ю.П., Васильев А.А. Изменение климата и его влияние на сельское хозяйство // Метеорология и гидрология. 2023. № 9. С. 5–13.
- Приказ Росгидромета «О внедрении актуализированных климатических норм в оперативно-производственную практику подведомственных учреждений Росгидромета» от 18.02.2022 г. № 64.
- Рубинштейн Е.С., Полозова Л.Г. Современное изменение климата. Л. : Гидрометеиздат, 1966. 268 с.
- Русанов В.И. Многолетний ход температуры воздуха в Томске // Природа. 1958. № 8. С. 28–35.
- Справочник по климату СССР : В 34 вып., в 5 ч. Л. : Гидрометеиздат, 1965. Вып. 20, ч. 2: Температура воздуха и почвы. 396 с.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. СПб. : Научное издание, 2022. 676 с.
- Харюткина Е.В., Логинов С.В., Усова Е.И. Тенденции изменения экстремальности климата Западной Сибири в конце XX – начале XXI веков // Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН. Томск, 2019. URL: http://downloads.igce.ru/journals/FAC/FAC_2019/FAC_2019_2/Kharyutkina_E_V_et_al_FAC_2019_2.pdf (дата обращения: 15.05.2023).
- Чижов О.П., Тареева А.М. Возможности оценки ледовитости Арктического бассейна и его изменений // Материалы гляциологических исследований. 1969. Вып. 15. С. 57–73.
- AISORI-M.METEO.RU – профессиональный интернет портал метеорологических данных. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/> (дата обращения: 15.05.2023).
- Callender G.S. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1938. V. 64, No. 27. P. 223–240.
- Möller F. On the influence of changes in the CO₂ concentration in air on the radiation balance on the Earth's surface and on the climate // Journ. Geophys. Res. 1963. V. 68, No. 13. P. 3877–3896.
- Plass G.H. Carbon dioxide theory of climatic change // Tellus. 1956. V. 8, No. 2. P. 140–154.

References

- Alisov B.P., Drozdov O.A., Rubinshteyn E.S. *Kurs klimatologii* [Climatology course]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1952. 487 p. In Russian
- Budyko M.I. *Klimat i zhizn'* [Climate and life]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971. 472 p. In Russian
- Budyko M.I. *Klimat v proshlom i budushchem* [Climate in the past and future]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980. 351 p. In Russian
- Villet Kh.K. *Kharakter svyazi solnechnykh i klimaticheskikh yavleniy* [The nature of the relationship between solar and climatic phenomena] / *Solnechnaya aktivnost' i izmeneniya klimata* [Solar activity and climate change]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1962. pp. 15–25. In Russian
- Vitel's L.A. *Anomalii tsiklicheskogo khoda solnechnoy aktivnosti i tendentsiya sovremennykh kolebaniy klimata* [Anomalies of the cyclical course of solar activity and the trend of modern climate fluctuations] // *Trudy GGO*. 1962. Vyp. 133. pp. 35–55. In Russian

- Voznesenskiy A.V., Shostakovich V.B. *Osnovnye dannye dlya izucheniya klimata Vostochnoy Sibiri* [Basic data for studying the climate of Eastern Siberia]. Irkutsk: Tipo-litografiya P.I. Makushina i V.M. Posokhina, 1913. 222 p. In Russian
- Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Obshchee rezyume [The Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation. General Summary]. 2014. Moscow: FGBU NITs «Planeta». 58 p. In Russian
- Gedeonov A.D. *Izmeneniya temperatury vozdukh na severnom polusharii za 90 let* [Changes in air temperature in the northern hemisphere over 90 years]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973. 146 p. In Russian
- Girs A.A., Kondratovich K.V. *Metody dolgosrochnykh prognozov pogody* [Methods of long-term weather forecasts]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. 342 p. In Russian
- Davitaya F.F. *O vozmozhnosti vliyaniya zaplyennosti atmosfery na umen'shenie lednikov i poteplenie klimata* [On the Possibility of Atmospheric Dust Influence on the Reduction of Glaciers and Global Warming]. // *Izv. AN SSSR. Ser., geogr.* 1965. No. 2. pp. 3–23. In Russian
- Dmitriev A.A., Dubravina V.F., Belyazov V.A. *Atmosfernye protsessy Severnogo polushariya (1891–2018 gg.), ikh klassifikatsiya i ispol'zovanie* [Atmospheric processes of the Northern Hemisphere (1891–2018), their classification and use]. St.Petersburg: SUPER Izdatel'stvo, 2018. 306 p. In Russian
- Doklad o nauchno-metodicheskikh osnovakh dlya razrabotki strategii adaptatsii k izmeneniyam klimata v Rossiyskoy Federatsii (v oblasti kompetentsiy Rosgidrometa)* [Report on the scientific and methodological basis for developing a strategy for adaptation to climate change in the Russian Federation (within the competence of Roshydromet)] St. Petersburg; Saratov: Amirit, 2020. 120 p. In Russian
- Zadde G.O., Rusanov V.I., Sevast'yanova L.M., Sevast'yanov V.V. *Sovremennye tendentsii klimaticheskikh izmeneniy v Tomske* [Current trends of climate change in Tomsk] // *Aktual'nye problemy biologii, meditsiny i ekologii* [Current issues in biology, medicine and ecology], 2004. T. 3, No. 4. pp. 41–42. In Russian
- Zubovich M.G., Tarasenko V.D., Tokarev V.G., Shkapoid M.A., Yagudin R.A. *Sinopticheskie usloviya formirovaniya krupnykh anomalii sredney mesyachnoy temperatury vozdukh v Zapadnoy Sibiri* [Synoptic conditions for the formation of large anomalies of average monthly air temperature in Western Siberia] // *Tr. ZSRNIGMI*. 1979. Vyp. 42. 1979. pp. 24–36. In Russian
- Isaev A.A. *Statistika v meteorologii i klimatologii* [Statistics in meteorology and climatology]. Moscow: Izd-vo MGU, 1988. 288 p. In Russian
- Klimat Tomska* [Climate of Tomsk]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982. 176 p. In Russian
- Kozhenkova Z.P., Rutkovskaya N.V. *Klimat Tomskey oblasti i ego formirovaniye* [Climate of Tomsk region and its formation] // *Voprosy geografii Sibiri* [Questions of the geography of Siberia]. 1961. Vyp. 6. pp. 3–39. In Russian
- Luchitskaya I.O., Belaya N.I., Arbuzov S.A. *Klimat Novosibirskaya i ego izmeneniya* [Climate of Novosibirsk and its changes]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2014. 224 p. In Russian
- L'vovskiy E.N. *Statisticheskie metody postroyeniya empiricheskikh formul* [Statistical methods for constructing empirical formulas]. Moscow : Vysshaya shkola, 1988. 239 p. In Russian
- Maslennikov N.I. *Klimat Tomska* [Climate of Tomsk] // *Tr. Tomskogo gos. un-ta. Tom 95, Geografiya*. Tomsk: Izd-vo «Krasnoe Znamya», 1939. pp. 31–75. In Russian
- Mezhdunarodnaya konferentsiya direktorov meteorologicheskikh sluzhb* [International Conference of Directors of Meteorological Services]. Varshava. / Glavnoe upr. Gidrometeorol. sluzhby SSSR pri SNK SSSR. Leningrad: Moscow : Gidrometeorol. Izd., Tipo-lit Gidrometeoizdat, 1937. In Russian
- Monin A.S. *Vvedenie v teoriyu klimata* [Introduction to Climate Theory]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982. 247 p. In Russian
- Nauchno-prikladnyy spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletnie dannye* [Scientific and Applied Handbook on the Climate of the USSR. Series 3. Long-term data]. Vyp. 20, ch. 1–6. St. Petersburg.: Gidrometeoizdat, 1993. 717 p. In Russian
- Perevedentsev Yu.P., Vasil'ev A.A. *Izmenenie klimata i ego vliyanie na sel'skoe khozyaystvo* [Climate change and its impact on agriculture] // *Meteorologiya i gidrologiya* [Russian Meteorology and Hydrology]. 2023. No. 9. pp. 5–13. In Russian
- Prikaz Rosgidrometa «O vnedrenii aktualizirovannykh klimaticheskikh norm v operativno-proizvodstvennuyu praktiku podvedomstvennykh uchrezhdeniy Rosgidrometa» ot 18.02.2022 g. [Order of Roshydromet "On the implementation of updated climate standards in the operational and production practices of subordinate institutions of Roshydromet" dated 18.02.2022] № 64. In Russian
- Rubinshteyn E.S., Polozova L.G. *Sovremennoe izmenenie klimata* [Modern climate change]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1966. 268 p. In Russian
- Rusanov V.I. *Mnogoletniy khod temperatury vozdukh v Tomske* [Long-term air temperature variation in Tomsk] // *Priroda*. 1958. No. 8. pp. 28–35. In Russian
- Spravochnik po klimatu SSSR* [Handbook of the climate of the USSR]: V 34 vyp., v 5 ch. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1965. Vyp. 20, ch. 2: *Temperatura vozdukh i pochvy*. 396 p. In Russian
- Tretiy otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii* [The Third Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation] / pod red. V. M. Kattsova; Rosgidromet. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2022. 676 p. In Russian
- Kharyutkina E.V., Loginov S.V., Usova E.I. *Tendentsii izmeneniya ekstremal'nosti klimata Zapadnoy Sibiri v kontse XX – nachale XXI vekov* [Trends in Changes in Climate Extremeness in Western Siberia in the Late 20th – Early 21st Centuries] // Institut monitoringa klimaticheskikh i ekologicheskikh sistem SO RAN. Tomsk, 2019. Electronic resource URL: http://downloads.igce.ru/journals/FAC/FAC_2019/FAC_2019_2/Kharyutkina_E_V_et_al_FAC_2019_2.pdf (Date of accessed 15.05.2023). In Russian
- Chizhov O.P., Tareeva A.M. *Vozmozhnosti otsenki ledovitosti Arkticheskogo basseyna i ego izmeneniy* [Possibilities of assessing the ice cover of the Arctic basin and its changes] // *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy* [Materials of glaciological studies]. 1969. Vyp. 15. pp. 57–73. In Russian
- AIORI-M.METEO.RU – professional'nyy internet portal meteorologicheskikh dannykh [professional internet portal of meteorological data]. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/> (Date of accessed: 15.05.2023). In Russian

Callender G.S. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1938. V. 64. No. 27. pp. 223–240.

Möller F. On the influence of changes in the CO₂ concentration in air on the radiation balance on the Earth's surface and on the climate // Journ. Geophys. Res. 1963. V. 68. No. 13. pp. 3877–3896.

Plass G.H. Carbon dioxide theory of climatic change. Tellus. 1956. V. 8. No. 2. pp. 140–154.

Информация об авторе:

Севастьянов В.В., доктор географических наук, профессор кафедры метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: vvs187@mail.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Author information:

Sevastyanov V.V., Dr. Sci. (Geography), Professor, Department of Meteorology and Climatology, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: vvs187@mail.ru

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.01.2024; одобрена после рецензирования 05.06.2024; принята к публикации 29.08.2025

The article was submitted 26.01.2024; approved after reviewing 05.06.2024; accepted for publication 29.08.2025

Научная статья

УДК 551.583.:581 (571.12)

doi: 10.17223/25421379/36/10

КЛИМАТИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СРЕДНЕГОДОВОГО ПРИРОСТА ОСНОВНЫХ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ПОРОД ПОДТАЙГИ ЮГО-ВОСТОКА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ



Лариса Борисовна Филандышева¹, Татьяна Владимировна Ромашова²,
Нина Степановна Евсеева³

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

¹ filandysheva@yandex.ru

² romtvtom@rambler.ru

Аннотация. Рассмотрено влияние гидротермических факторов на рост лесобразующих рассеянно-сосудистых пород (березы, осины) деревьев подтаежных ландшафтов юго-востока Западной Сибири. Установлены тенденции их ежегодных приростов, а также показателей термического режима и увлажнения на уровне среднесуточных, среднемесячных, сезонных и среднегодовых значений. Выявлены ведущие климатические показатели, определяющие как благоприятные, так и неблагоприятные условия развития мелколиственных пород, а также их отклик на изменения современного климата.

Ключевые слова: изменение климата, сезоны года, среднегодовой прирост, береза, осина, рассеянно-сосудистые породы, подтайга, Западная Сибирь

Для цитирования: Филандышева Л.Б., Ромашова Т.В., Евсеева Н.С. Климатически обусловленная изменчивость среднегодового прироста основных лесобразующих пород подтайги юго-востока Западной Сибири // Геосферные исследования. 2025. № 3. С. 170–181. doi: 10.17223/25421379/36/10

Original article

doi: 10.17223/25421379/36/10

CLIMATICALLY-DRIVEN VARIABILITY IN ANNUAL GROWTH OF DIFFUSE-POROUS TREE SPECIES IN THE SUBTAIGA OF SOUTHEAST WESTERN SIBERIA

Larisa B. Filandysheva¹, Tatiana V. Romashova², Nina S. Evseeva³

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

¹ filandysheva@yandex.ru

² romtvtom@rambler.ru

Abstract. Amidst regional climate changes as a consequence of global fluctuations, research focusing on the impact of these changes on the growth of forest-forming species is increasingly relevant. In Russia, forests are a crucial renewable natural resource, playing a leading role in the economy and holding national ecological, economic, and social significance.

Trees in temperate zones annually accumulate wood during the growing season, forming annual layers (growth rings). The dynamics of trees' annual growth is largely determined by the weather conditions of a particular year. Dendrochronological analysis, which aims to identify the response of different tree species to climatic events, especially anomalies, is used for their assessment.

This article examines the influence of hydrothermal factors on the growth of forest-forming small-leaved species (birch, aspen) in the subtaiga landscapes of Southeast Western Siberia, against the backdrop of regional climate peculiarities. The research area is the basin of the Basandayka River, on the outskirts of Tomsk, where trees were cut down at two key sites. The age of the sampled trees was 9–10 years (15 samples). For analysis, 6 tree cuts of comparable age were used, as their planting years were known: – for birch, 10 years (2008–2017), and for aspen, 9 years (2009–2017).

Meteorological data (temperature and precipitation) of average daily data from the VNIIGMI-MCD database for the period 2008–2017 at the Tomsk weather station served as the basis for studying regional climate changes and their impact on the growth of birch and aspen.

Climate changes were analysed according to calendar dates and natural seasons. The boundaries and structure of natural seasons were established using a complex-genetic method applied to studying the seasonal rhythms of the climate.

The study revealed trends in the annual growth of the tree species examined, as well as the indicators of thermal regime and moisture at monthly, annual, and seasonal levels. Leading climatic indicators that determine both favourable and unfavourable conditions for the development of small-leaved species and their response to climate change were identified.

Our research indicated that the dominant importance of each climatic indicator for tree growth in the subtaiga is mainly due to the phase of the vegetative period and the natural season of the year, as other geographical growth conditions are identical. An increase in the duration of the vegetative part of the annual cycle, combined with a decrease in the duration of the cold-snowy part and an increase in cold season temperatures, can be viewed as regional climatic changes positively affecting the growing conditions of birch. It was also found that the most significant climatic response in this small-leaved species is associated with summer temperatures, while for aspen, it is with winter temperatures. Aspen shows a high positive correlation with precipitation during the phases of 'late summer' and 'early autumn' (August–September), and a significant negative dependency on central summer precipitation.

Thus, the ongoing regional climate changes towards warming and increased moisture, overall, positively influence the growth conditions of small-leaved species."

Keywords: *climate change, seasons of the year, birch, aspen, sub-boreal forest, Western Siberia*

For citation: Filandysheva L.B., Romashova T.V., Yevseyeva N.S. (2025) Climatically-driven variability in annual growth of diffuse-porous tree species in the subtaiga of southeast Western Siberia. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 170–181. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/36/10

Введение

В последние десятилетия на нашей планете наблюдается глобальное изменение климата. Эксперты считают, что начиная с 1976 г. отмечается период наиболее интенсивного потепления, которое продолжается и в настоящее время. Средние темпы потепления приземного воздуха в глобальном масштабе в течение 1976–2020 гг. составили 0,18 °C/10 лет, т.е. за этот период глобальная температура выросла на 0,8 °C [Третий оценочный доклад..., 2022]. Темпы потепления на территории России в этот же период примерно в 2,5 раза выше средне-глобальных, так как скорость роста осредненной по России среднегодовой температуры (линейный тренд) составила +0,49 °C/10 лет [Доклад об особенностях климата..., 2023]. При этом наиболее быстрое потепление наблюдается в азиатской части России: 0,71 °C/10 лет, причём во все сезоны года [Третий оценочный доклад..., 2022].

На фоне повышения температуры воздуха отмечается увеличение количества глобальных осадков над сушей, причем его темпы растут. Этот прирост оценивается в 5–10 мм/год за десятилетие на фоне значительных межгодовой изменчивости и региональной неоднородности [Третий оценочный доклад..., 2022]. Наиболее чутким индикатором изменения климата является растительность, в том числе лесная. Однако из-за стремительного глобального изменения климата в последние десятилетия природные системы, в том числе леса, не имеют времени плавно эволюционировать, как это происходило в геологическом прошлом Земли [Can we make..., 2014]. В связи с этим изучение эволюции природной среды и способов адаптации её к изменениям климата относится к одному из важнейших фундаментальных направлений научных исследований [Программа..., 2020; Адаптация..., 2023; Бореальные леса..., 2023].

Леса в России являются одним из важнейших видов возобновляемых природных ресурсов и играют

одну из ведущих ролей в развитии экономики, в улучшении окружающей среды, повышении благосостояния населения, т.е. имеют общегосударственное экологическое, экономическое и социальное значение.

Деревья умеренного пояса ежегодно наращивают древесину в течение вегетационного периода, формируя годовичные слои (годовичные кольца). Динамика годовичного прироста деревьев определяется их биологическими особенностями и экологическими факторами (абиотическими и биотическими). Биотические факторы связаны с влиянием живых организмов и могут быть фитогенными, зоогенными и антропогенными. К абиотическим факторам, т.е. факторам экотопа, относятся климатические (тепло, вода, свет), эдафические (почва), орографические (рельеф) и химические [Таксация леса, 2012]. От климатических условий зависит производительность лесов и разнообразие лесной флоры и фауны; направленность и динамика нежелательных сукцессий; гидрологический режим лесов и рек; устойчивость лесных биогеоценозов к разрушающим природным и антропогенным факторам [Доклад о климатических рисках..., 2017; Константинов, Матвеев, 2020]. Таким образом, в значительной мере «здоровье» и эволюция лесных экосистем определяются погодными условиями конкретного года и климата в целом.

Одним из самых точных индикаторов изменения окружающей среды и колебания климата является дендрохронологический метод или метод древесно-кольцевой индикации [Дьяконов, Бочкарев, 2010; Шиятов, 2020], позволяющий получить количественные и качественные данные о годовичных кольцах. Важнейший этап дендрохронологического анализа – выявление климатического отклика той или иной породы деревьев исследуемого региона [Мацковский, 2013; Ботыгин и др., 2015].

В подтаёжной подзоне Западной Сибири, протянувшейся узкой полосой между 57° и 56° с.ш., наиболее широко распространёнными из рассеянно-сосудистых пород являются берёза повислая (*Betula pendula* Roth.) и осина (*Populus tremula* L.). Они же

здесь являются основными лесообразующими породами, коренными для данной экосистемы (а не вторичными, как в других регионах Евразии) [Хромых, Гуськова, 2015; Юрковская, Сафонова, 2019; Шишкин и др., 2019].

Анализ литературных источников по оценке влияния климата на годовой прирост деревьев показал, что исследования учёных [Магда, 2003; Малышева, Быков, 2011; Дьяконов, Бочкарев, 2010; Koprowski et al., 2012; Тайник и др., 2015; Долгова и др., 2019; Рыгалова, Харламова, 2021] проводились в основном для хвойных пород. Изменчивость прироста мягколиственных древесных пород под влиянием колебаний метеорологических параметров до последнего времени вообще оставалась почти не исследованной [Хамидуллина, 2008; Шишкин и др., 2019; Фонти, Прокушкина, 2021], а для осины такие данные очень редки и единичны [Воробьева, Румянцев, 2023].

Цель данной работы – выявление ведущих климатических факторов, определяющих прирост древесины, и анализ отклика основных лесообразующих пород деревьев (береза, осина) на колебания климата в подтайге Западной Сибири в пределах городского округа Томск.

Материал, методы и методика исследования

Объектами исследования послужили типичные представители рассеянно-сосудистых мелколиственных древесных пород – береза и осина. Район исследования – территория бассейна реки Басандайка на окраине г. Томска, где производились спилы деревьев на двух ключевых участках. Первый участок – поверхность водораздельной равнины Томи и Басандайки с абсолютными высотами 100–110 м – ранее использовалась как пашня. Уклоны поверхности в пределах 1–3°, почвенный покров представлен серыми лесными почвами, сформированными на лёссовидных суглинках. В 2008 г. на этом участке образовался густой молодой березняк высотой 3–5 м.

Второй ключевой участок находился на междуречье Томи и Басандайки, вдоль трассы Томск–Аэропорт между сёлами Лоскутово и Богашёво. Слабо наклонная поверхность крутизной 1–3° представлена насыщенными грунтами (в основном лёссовидных суглинков, супесей с примесью песка, гравия и гальки). Высота березок – 3 м.

Отбор дендрохронологического материала произведён посредством спила на высоте 0,3 м от поверхности земли. Анализ ширины годичных колец и прироста древесины на образцах древесины проводился с помощью программно-измерительного полуавтоматического комплекса LINTAB-6 (Германия) с точностью измерения 0,01 мм. Известно, что в пределах зон

умеренного и холодного климата, где выражена смена сезонов года, у древесных растений наблюдается периодическая активность камбиального слоя. В этих районах у деревьев, как правило, появляется один слой прироста за вегетационный период. На поперечных срезах эти слои хорошо заметны в виде колец [Тишин, Чижикова, 2018]. Возраст учтенных деревьев составил 9–10 лет; всего – 35 проб. Для анализа нами были использованы 26 образцов спилов деревьев, возраст которых был сопоставимым, так как известны годы их посадок – у берёз 10 лет (с 2008 по 2017 г.), у осины – 9 лет (с 2009 по 2017 г.).

Материалом для исследования региональных особенностей изменения климата послужили данные по температуре приземного слоя воздуха и осадкам среднесуточного, среднемесячного и среднегодового разрешения из базы данных ВНИИГМИ-МЦД за период с 2008 по 2017 г. по метеостанции Томск.

Климатические изменения анализировались по календарным и естественным сезонам года. Выделение естественных сезонов года осуществлялось с помощью комплексно-генетического метода, применяемого нами к изучению сезонных ритмов климата [Филандышева и др., 2021]. Суть метода состоит в том, что при установлении сезонной структуры года для каждой конкретной территории с относительно однородными условиями климата, необходим одновременный учёт хронологического хода всех факторов климатообразования (солнечной радиации, циркуляции атмосферы, характера подстилающей поверхности) и явлений природы, с ними связанных [Галахов, 1959]. В качестве критериев для отграничения сезонов года и их фаз для Томска используются показатели, обоснованные в работах Н.В. Рутковской [1979], с учётом уточнений Т.В. Ромашовой [2004].

Естественный год, как и календарный, состоит из четырёх сезонов года. В каждом сезоне выделяется по три структурные единицы – фазы. Весна делится на три фазы: «снеготаяние», «послезимье» и «предлетье». Начало фазы «снеготаяние» знаменует прекращение устойчивых морозов и достижение максимальных запасов воды в снеге, а её конец (или начало фазы «послезимье») – датой разрушения устойчивого снежного покрова. Вторая фаза весны («послезимье») от третьей («предлетье») отделяется по дате окончательного схода снежного покрова.

В течение летнего сезона выделяются такие фазы, как «умеренно-прохладное лето», «умеренно-тёплое лето», «спад лета». С началом лета (фаза «умеренно-прохладное лето») в жизни живой природы происходят существенные изменения, поскольку минимальная температура воздуха переходит через 5° (термический минимум ассимиляции), т.е. с этого времени жизнедеятельность растений становится активной и

бесперебойной [Степанов, 1957]. Вторая фаза лета охватывает время с температурами, устойчиво превышающими $+15^{\circ}\text{C}$.

Конец фазы «спад лета» (дата устойчивого перепада среднесуточной температуры ниже $+10^{\circ}\text{C}$) знаменует начало первой фазы осени – «становление осени», конец которой соответствует переходу средней суточной температуры воздуха и влажности, соответственно, через $+5^{\circ}\text{C}$ и 6 гПа на кривой спад их значений. Центральную фазу осени называют «поздняя осень». От третьей фазы этого сезона («предзимье») она отделяется по дате появления неустойчивого снежного покрова, конец фазы «предзимье» знаменует дата начала устойчивых морозов [Рутковская, 1979].

Зима состоит из следующих фаз: «умеренно-морозная зима», «значительно-морозная зима», «предвесенье». Критерии начала первой и последней из них были указаны выше, так как это, соответственно, показатель конца фазы «предзимье» и начала фазы «снеготаяние». Холодное ядро зимы – «значительно-морозная зима» – охватывает отрезок времени со средней суточной температурой воздуха ниже -16°C [Ромашова, 2004].

Для каждого сезона и их структурных единиц (фаз) нами были рассчитаны временные характеристики (даты начала, конца, продолжительность) и гидротермические показатели (суммы температур и осадков, их средние значения).

Закономерности изменений климатических характеристик изучались методами математической статистики: проводилась оценка нормы и изменчивости статистических рядов, применялся корреляционный метод и тренд-анализ. Коэффициент корреляции позволяет количественно оценить линейную связь между переменными рядами [Козлов и др., 2021]. Значение коэффициента корреляции Пирсона говорит о тесноте связи: слабой (0 до $\pm 0,24$), средней ($\pm 0,25$ до $\pm 0,49$), высокой ($\pm 0,50$ до $\pm 0,74$) и очень высокой ($\pm 0,75$ до ± 1). Линейные тренды рассчитываются методом наименьших квадратов и характеризуют тенденции (среднюю скорость) изменений рассматриваемых величин за определенный период.

Среди показателей балансового подхода для оценки тепло- и влагообеспеченности территории используют разнообразные характеристики, среди которых можно отметить гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова [Вериги, Разумова, 1963], который рассчитывается по формуле

$$\text{ГТК} = 10R_{>10^{\circ}} / \Sigma T_{>10^{\circ}},$$

где $R_{>10^{\circ}}$ – сумма осадков (мм) за период со среднесуточной температурой воздуха выше $+10^{\circ}\text{C}$; $\Sigma T_{>10^{\circ}}$ – сумма температур ($^{\circ}\text{C}$) за тот же период.

Между ГТК и ежегодным приростом древесины также нами рассчитывались коэффициенты корреляции, из которых были выбраны наиболее значимые

(по абсолютной величине от 0,4 и выше). Линейные тренды прироста древесины выражаются в миллиметрах за десятилетие (мм/10 лет). Значимость линейных трендов устанавливалась по величине коэффициента детерминации (R^2), показывающего вклад линейного тренда в общую изменчивость исследуемой переменной.

Систематизация и анализ полученных данных, требующие синтеза времени и пространства в едином целом, соизмерения естественных ритмов климата с закономерностями развития природной среды, проводились на основе геосистемного подхода [Сочава, 1963; Demek, 1974; Коновалова, 2019].

Результаты исследования и обсуждение

Исследование полученного дендроматериала показало, что средний общий радиальный прирост древесины у разных мелколиственных пород деревьев отличается. Средняя многолетняя величина прироста за указанные периоды у березы оказалась больше, чем у осины, и составила 1,6 и 1,2 мм соответственно.

Минимальные и максимальные значения радиального прироста у этих пород отличаются также по значениям и наблюдаются в разные годы (рис. 1, а, б). Узкие кольца у осины сформировались в 2011, 2014, 2016 гг., составив в 2011 г. всего 0,2 мм. У березы наименьший прирост зафиксирован в 2008, 2017 и 2014 гг. с минимумом в 2008 г. – 0,31 мм. Наибольшие приросты древесины также отмечались в разные годы у осины (2012, 2015, 2017 гг.) и берёзы (2009, 2013, 2016 гг.), достигая максимума у осины 2 мм (2015 г.) и у берёзы 2,65 мм (2009 г.).

Оказалось, что большей временной изменчивостью значений годового прироста древесины характеризуется осина (коэффициент вариации 0,5) по сравнению с берёзой (коэффициент вариации 0,37). Скорость годового прироста у осины оказалась почти в 5,6 раз выше, чем у березы (коэффициент линейного тренда у осины – $+1,56\text{ мм/10 лет}$, у березы – $+0,28\text{ мм/10 лет}$).

Исследование региональных особенностей изменения климата мы начали с расчёта и сравнительного анализа среднегодовых, среднемесячных и среднесуточных температур приземного слоя воздуха по календарным сезонам года.

Для территории региона характерен умеренно-континентальный климат с умеренно холодной зимой, умеренно теплым летом. Среднегодовое количество осадков – 580 мм. Диапазон изменения средних месячных температур воздуха в Томске составляет от $-18,4$ (январь) до $+18,8^{\circ}\text{C}$ (июль) в течение года, при средней годовой температуре $+1,1^{\circ}\text{C}$, которая в пе-

риод с 1881 по 2019 г. повысилась на 2,68 °C [Филандышева и др., 2021]. Особенно заметен рост значений показателей гидротермического режима (хотя и с разной интенсивностью) с 1970-х гг. В период с 2008 по 2017 г. этот тренд продолжался, т.е. коэффициенты линейного тренда имеют положительные значения как у среднегодовых температур, так и сумм осадков (рис. 1, *c*, *d*).

Изменения среднегодовых значений температур приземного слоя воздуха даёт общее представление

об их временной динамике, но не отражает особенности изменений внутри года. Для анализа такой динамики были рассчитаны средние многолетние значения температуры за каждый месяц.

Анализ межгодовой и внутригодовой динамики термического режима в г. Томске, а также средних многолетних среднесуточных показателей температуры воздуха показал, что в подтайге юго-восточной части Западно-Сибирской равнины наблюдается изменение климата в сторону потепления.

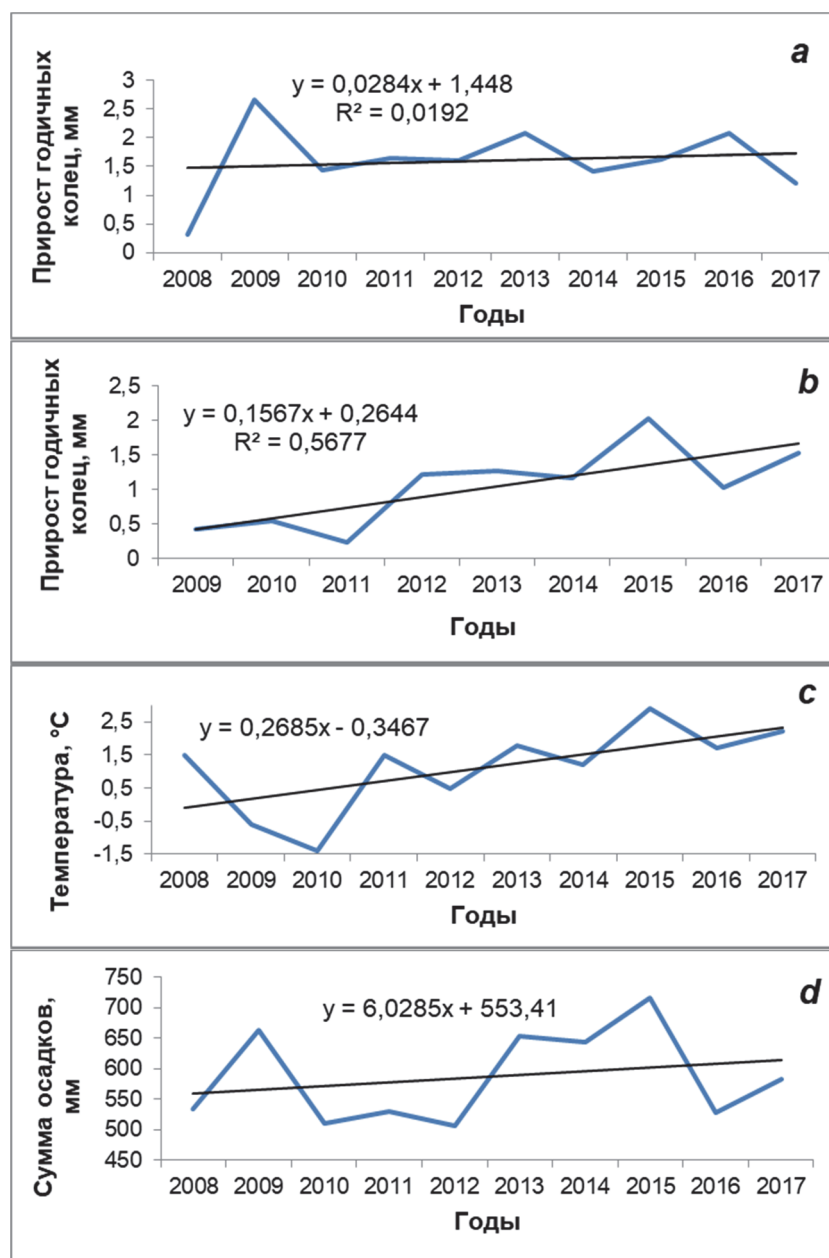


Рис. 1. Динамика ежегодного радиального прироста древесины березы (*a*) и осины (*b*), среднегодовых температур (*c*) и сумм осадков (*d*) за период с 2008 г. по 2017 г. (по данным метеостанции Томск)

— — линейный тренд

Fig. 1. Dynamics of annual radial growth of wooden birch (*a*) and aspen (*b*) wood, average annual temperatures (*c*) and precipitation amounts (*d*) for the period from 2008 to 2017 (according to the Tomsk weather station)

— — linear trend

Причем если с 1970-х гг. происходило потепление, главным образом, зимних сезонов, то в последние десятилетия повышение температур характерно для всех сезонов года. Наиболее значительно повысились температуры воздуха в ноябре, декабре, марте и августе. Зима по-прежнему осталась основным сезоном годового цикла, хотя её продолжительность уменьшилась за 80 лет со 144 до 130 дней (на 10 %) и еще больше (на 15 %) сократилась продолжительность её центральной фазы (холодного ядра). Соответственно, увеличилась продолжительность летнего сезона (со 114 до 126 дней), как и его центральной фазы (с 62 до 81 дня). В связи с этим доля вегетационной части годового цикла (ВЧГЦ) увеличилась с 48,5 до 53,2 %, а холодно-снежной (ХСЧГЦ), соответственно, уменьшилась. Амплитуда колебания между экстремальными значениями температур в среднем за зимние месяцы уменьшилась на 0,9 °C (с 9,1 до 8,2 °C), что говорит о смягчении в той или иной степени в регионе климата в холодное время года [Филандышева и др., 2021].

Ранее [Рудский, 2012] установлена отчетливая реакция природной среды на современное изменение климата, проявляющаяся в изменении сроков наступления фенологических явлений на территории подтаежной зоны Томской области. Наиболее интенсивно проявляется изменение местного климата в переходные сезоны года [Филандышева и др., 2021] – весной и осенью, в частности, определено смещение фенологических рубежей весеннего сезона в сторону более ранних сроков [Лукашева, 2021], а осеннего сезона – в сторону более поздних сроков.

Для более детального исследования влияния климатических условий на изменение ширины годичных колец разных мелколиственных пород деревьев нами были рассчитаны коэффициенты корреляции между годовыми значениями прироста древесины и показателями гидротермического режима (среднемесячными значениями температуры приземного слоя воздуха и среднемесячными суммами осадков), результаты которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции величин годичного радиального прироста березы и осины со среднемесячными и среднегодовыми климатическими показателями за период с 2008 по 2017 г. по данным метеостанции Томск

Table 1

Correlation coefficients of annual radial growth values of birch and aspen with average monthly and average annual hydrothermal indicators for the period from 2008 to 2017 (according to the Tomsk weather station)

Порода деревьев	Коэффициент корреляции прироста деревьев по месяцам												Средний годовой коэффи- циент
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	
Со среднемесячной температурой воздуха													
Береза	0,19	−0,22	−0,62	0,49	−0,29	−0,25	0,55	0,29	−0,37	−0,33	−0,41	0,44	0,25
Осина	0,73	0,53	0,45	0,06	0,33	0,28	0,01	0,49	0,4	−0,34	0,00	0,53	0,62
Со среднемесячной суммой осадков													
Береза	0	−0,05	−0,1	−0,28	0,46	−0,31	0,36	0,02	−0,09	0,23	0,00	0,44	0,36
Осина	0,7	0,35	0,36	0,18	0,13	−0,14	−0,5	0,68	0,58	0,31	−0,47	0,10	0,48

Примечание: Здесь и в табл. 2 жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты корреляции.

Note: Here and in the Table 2 statistically significant correlation coefficients are highlighted in bold.

Выяснилось, что на рост березы наибольшее влияние оказывают температуры весенних месяцев – марта (коэффициент корреляции равен $-0,62$), апреля ($+0,49$) и центрального месяца лета (июль, $+0,55$), тогда как у осины – зимних, особенно января ($+0,73$). Причем с мартовскими температурами у березы связь отрицательная, т.е. более низкий уровень мартовских температур, как выяснилось, оказывает более благоприятное влияние на развитие березы в дальнейшем.

С величиной среднемесячных осадков годовой радиальный прирост у березы имеет слабую корреляцию (см. табл. 1). Самые высокие значения коэффи-

циента корреляции между этими показателями характерны для мая ($+0,45$) и декабря ($+0,44$). Значительно выше зависимость прироста от осадков прослеживается у осины, а именно осадков января ($+0,7$), августа ($+0,68$) и сентября ($+0,58$). Однако большое количество осадков в некоторые месяцы может оказать и негативное влияние на состояние осины, в частности, отрицательная корреляция прослеживается с осадками ноября ($-0,47$) и июля ($-0,5$). В целом корреляционная зависимость годового прироста древесины со среднегодовыми показателями температуры воздуха и осадков положительная, причём она особенно

значима у осины (от среднегодовой температуры коэффициент корреляции составил +0,62).

Полученные нами результаты уточняют исследования других авторов [St. George, 2014; Дюкарев и др., 2020], которые считают, что ширина колец всех деревьев, растущих во внетропических районах Северного полушария, зависит от температурных особенностей зимы, летних осадков или летней температуры. Оказалось, что даже такие «родственные» породы деревьев, как берёза и осина, имеют как общие, так и индивидуальные экологические требования к произрастанию [Чижов и др., 2013]. Так, по расположению сосудов в древесине берёзы и осины относятся к рассеянно-сосудистым [Древесиноведение, 2011] листовым породам, у которых годичные слои имеют однородное строение, но границы между ними плохо заметны. В то же время по макроскопическому строению древесины и её внешнему виду берёза относится к заболонным, а осина – к спелодревесным породам. Отличаются породы и по плотности древесины: осина имеет низкую плотность (495 кг/м³), берёза – среднюю плотность (570 кг/м³) [Михайлов, 1985; Уголев, 2007]. Последняя характеристика влияет на теплопроводность: с повышением плотности древесины теплопроводность увеличивается, поскольку древесинное вещество обладает значительно большей теплопроводностью по сравнению с воздухом, объем которого в древесине с повышением её плотности уменьшается. Важным фактором, влияющим на теплопроводность древесины, является температура воздуха: при увеличении температуры теплопроводность повышается [Матвеев, 2013]. В связи с этим более объективным подходом для выявления изменчивости прироста этих древесных пород от влияния колебаний метеопараметров может стать корреляционный анализ по естественным (не календарным) сезонам года.

Анализ полученных результатов за зимний сезон показал, что на состояние березы оказывают слабое влияние погодные условия этого времени года.

В то же время у осины получилась значимая связь между радиальным приростом и средней суточной температурой за сезон в целом (+0,65), а также суммой температур за это время (+0,5). Это согласуется с оценкой тесноты связи годового прироста со среднемесячными температурами, приведенной выше.

У берёзы оказалась наиболее тесная связь радиального прироста с климатическими характеристиками весеннего сезона года и его структурных единиц, а именно: с продолжительностью фазы снеготаяния (–0,54), с суммой температур (+0,51) и суммой осадков (–0,51) за эту же фазу, а также со средней температурой за весь сезон (+0,59). У осины значимая связь отмечается с меньшим количеством климатических показателей весны по сравнению с берёзой – с датой начала весеннего сезона (–0,57) и со средней температурой фазы снеготаяния (–0,51).

Из климатических характеристик летнего сезона, оказывающих влияние на прирост древесины, можно назвать следующие: для березы – сумма осадков за фазу умеренно-теплое лето (+0,63) и спад лета (–0,4); у осины – сумма температур за центральную фазу лета (+0,41) и сумма температур за лето в целом (+0,55).

Роль погодных условий осени в величине радиального прироста древесины оказалась более значима по сравнению с летним сезоном. Для березы в их число вошли продолжительность осени (–0,63, при этом у осины +0,43), сумма среднесуточных температур (–0,59) и их средний уровень (–0,48); для осины – сумма осадков за сезон (+0,7, при этом у березы корреляция отрицательная –0,29).

Далее нами были рассчитаны за каждый год исследуемого периода по всем структурным единицам летнего сезона (периода наибольшей активности биоты) значения ГТК Г.Т. Селянинова – универсального показателя уровня влагообеспеченности территории. Затем между ГТК и величинами ежегодного прироста березы и осины были определены коэффициенты корреляционной зависимости (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты корреляции величин годичного радиального прироста березы и осины с показателями гидротермического режима летнего сезона и его структурных единиц (фаз) за период с 2008 по 2017 г.

Table 2

Correlation coefficients of annual radial growth values of birch and aspen with indicators of the hydrothermal regime of the summer season and its structural units (phases) for the period from 2008 to 2017 (according to the Tomsk weather station)

Порода деревьев	Коэффициенты корреляции по структурным единицам (фазам) летнего сезона											
	Умеренно-прохладное лето (1-я фаза)			Умеренно-тёплое лето (2-я фаза)			Спад лета (3-я фаза)			Летний сезон в целом		
	$\sum t^{\circ}\text{C}$	$\sum \text{ос}$	ГТК	$\sum t^{\circ}\text{C}$	$\sum \text{ос}$	ГТК	$\sum t^{\circ}\text{C}$	$\sum \text{ос}$	ГТК	$\sum t^{\circ}\text{C}$	$\sum \text{ос}$	ГТК
Берёза	−0,18	−0,05	−0,57	0,22	0,63	−0,36	0,03	−0,4	0,4	0,03	0,31	−0,24
Осина	−0,14	−0,22	−0,7	0,41	−0,14	0,25	−0,02	0,18	0,18	0,19	−0,17	0,2

Примечание. $\sum t^{\circ}\text{C}$ – сумма среднесуточных температур за фазу; $\sum \text{ос}$, мм – сумма осадков за фазу; ГТК – гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова.

Note: $\sum t^{\circ}\text{C}$ – sum of average daily temperatures per phase; $\sum \text{precipitation}$, mm – amount of precipitation per phase; ГТК – Selyaninov hydrothermal humidification coefficient.

Анализ данных табл. 2 показывает, что у берёзы и осины радиальный прирост древесины имеет значимую отрицательную связь с ГТК первой фазы лета ($-0,57$ и $-0,7$ соответственно), а с ГТК в целом за сезон у обеих пород она незначительна, но имеет разный знак.

Для более глубокого анализа также были выбраны годы с максимальным и минимальным приростом у каждой породы. У берёзы максимальные значения прироста были зафиксированы в 2009, 2013 и 2016 гг. В эти годы во все структурные единицы летнего сезона ГТК соответствовал слабо-засушливым условиям или недостаточно увлажненным (от 0,59 до 0,8). В 2013 и 2016 гг. фаза умеренно-прохладного лета выпадала, но сезоны в целом (соответственно, 97 и 112 дней) и их центральные фазы (соответственно, 84 и 87 дней) были длинными, т.е. лето в эти годы было теплым, достаточно продолжительным и благоприятным для развития берёзы. Другими исследователями [Скорость роста берёзы..., 2023] указывается, что низкие температуры и короткое лето оказывают негативное воздействие на рост дерева, что согласуется с полученными нами результатами.

Для осины максимальный прирост наблюдался в 2015, 2017 и 2013 гг. В эти годы зимние сезоны 2014/15 и 2016/17 были теплее нормы, а по структуре – безъядерные или с неустойчивым термическим режимом. Летние сезоны этих лет начинались рано (5 и 8 мая соответственно) при среднемноголетней дате начала лета 28 мая.

Известно, что узкие слои прироста древесины образуются в неблагоприятных условиях (сильное затенение, объедание листьев насекомыми, пожары). Наши дендрообразцы за непродолжительный период произрастания избежали этих воздействия и главным фактором, определяющим их развитие в течение рассматриваемых лет, был климатический (температура воздуха, характер увлажнения, соотношение в тепле и влаге, продолжительность и структура сезонов и др.). Как выяснилось, для обеих пород одновременно был неблагоприятным 2014 г. (низкий прирост древесины: у осины – 1,2 мм, а у берёзы – 1,4 мм). Зима этого года была короткая по продолжительности, но с двукратным превышением осадков; весна тёплая, длинная и очень влажная, лето теплое и сухое, а предыдущая осень – холодная и с осадками выше нормы. Скорее всего, лимитирующим фактором в

этот год стало избыточное увлажнение. В другие годы формирование узких колец почти в 100 % случаев связано с недостаточным увлажнением и средне-засушливыми условиями в первую фазу лета («умеренно-прохладное лето»).

Заключение

В настоящее время дендроклиматические исследования роста основных лесообразующих пород приобрели особую актуальность в связи с глобальным потеплением климата и прогнозированием реакции лесов на этот процесс. Каждая древесная порода имеет свой адаптивный потенциал, который может быть определен как её способность компенсаторно реагировать на изменение внешней среды [Швиденко, 2017; Константинов, Матвеев, 2020; Липка и др., 2021].

Доминирующее значение каждого из метеорологических элементов для роста деревьев в умеренной зоне обусловлено в основном фазой вегетационного периода и естественного сезона года, так как географические и прочие условия произрастания одинаковы. Увеличение продолжительности вегетационной части года при уменьшении продолжительности и повышении уровня температур воздуха холодно-снежной части годового цикла можно рассматривать как региональные климатические изменения в сторону их улучшения для условий произрастания берёзы. Оказалось, что наиболее значимый климатический отклик у берёзы приходится на летние температуры, а у осины – на зимние. На осадки более отзывчива осина: у неё высокая положительная корреляционная связь с осадками фаз «спад лета» и «становление осени» (август-сентябрь), а также высокая отрицательная зависимость с осадками центральной фазы лета.

Таким образом, происходящие региональные изменения климата в сторону потепления и роста увлажнения в целом оказывают положительное влияние на условия произрастания рассеянно-сосудистых пород деревьев в сибирских условиях. Проведённый анализ региональной изменчивости природно-климатических процессов необходим, по мнению ряда исследователей [Глобальные..., 2019; Чередыко и др., 2020], как основа для принятия научно обоснованных эффективных решений на разных уровнях управления и, тем самым, способствует рационализации природопользования.

Список источников

- Адаптация** к изменению климата. URL: <https://www.un.org/ru/climatechange/climate-adaptation> (дата обращения: 09.09.2023).
Бореальные леса и изменение климата – от воздействия до адаптации. Аналитическая записка. Женева : ЕЭК ООН, 2023. 22 с.
Ботыгин И.А., Волков Ю.В., Попов В.Н., Тартаковский В.А., Ботыгин И.А. Методы и алгоритмы восстановления климатологической информации на основе дендрохроноиндикаторов. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2015. 185 с.

- Вериго С.А., Разумова Л.А.** Почвенная влага и её значение в сельскохозяйственном производстве. Л. : Гидрометеиздат, 1963. 289 с.
- Воробьева Н.С., Румянцев Д.Е.** Специфика проявления климатического сигнала в хронологиях осины для древостоев из разных частей Русской равнины // Лесохозяйственная информация. 2023. № 1. С. 5–16.
- Галахов Н.Н.** Изучение структуры климатических сезонов года. М. : Изд-во АН СССР, 1959. 213 с.
- Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (г. Воронеж, 3–5 октября 2019г.) / под общ. ред. С.А. Куролапа, Л.М. Акимова, В.А. Дмитриевой.** Воронеж : Цифровая полиграфия, 2019. Т. 1. 532 с.
- Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации.** СПб. : Росгидромет, 2017. 106 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год.** М. : Росгидромет, 2023. 104 с.
- Долгова Е.А., Соломина О.Н., Мацковский В.В., Добрянский А.С., Семеняк Н.А., Шпунт С.С.** Пространственная изменчивость прироста сосны на Соловецких островах // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019 (2). С. 41–50. doi: 10.31857/S2587-55662019241-50
- Древесиноведение с основами лесного товароведения / сост. Э.Э. Пауль.** Минск : Белорусский государственный технологический университет, 2011. 42 с.
- Дьяконов К.Н., Бочкарев Ю.Н.** Геофизические факторы динамики радиального прироста деревьев в ландшафтах Западно-Сибирской равнины и Приэльбрусья // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2010. № 4. С. 3–9.
- Дюкарев Е.А., Воропай Н.Н.** Многолетняя динамика условий засушливости в период современных климатических изменений // Экспертно-аналитический доклад по тематике и результатам исследований научной школы «Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата». Ханты-Мансийск : Югорский государственный университет, Институт нефти и газа, 2020. 115 с.
- Козлов А.Ю., Мхитарян В.С., Шишов В.Ф.** Статистический анализ данных в MS Excel. М. : Инфра-М, 2021. 320 с.
- Коновалова Т. И.** Научные основы геосистемного картографирования // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2019. Т. 29. С. 85–100.
- Константинов А.В., Матвеев С.М.** Методический подход к оценке адаптационного потенциала лесных экосистем Российской Федерации // Тр. Санкт-Петербург. науч.-исслед. ин-та лесного хозяйства. 2020. № 2. С. 14–33.
- Липка О.Н., Корзухина М.Д., Замолотчикова Д.Г., Добролюбова Н.Ю., Крыленко С.В., Богдановича А.Ю., Семенова С.М.** Роль лесов в адаптации природных систем к изменениям климата // Лесоведение. 2021. № 5. С. 531–546.
- Лукашева М.А.** Динамика наступления фаз у березы *Betula pendula* Roth (b. *Verrucosa* ehrh.) в Алтайском государственном заповеднике // Климатические изменения и сезонная динамика ландшафтов : материалы Всерос. науч.-практ. конф., 22–24 апреля 2021 г. Екатеринбург : УФУ, 2021. С. 346–350.
- Магда В.Н.** Радиальный прирост древесных растений как показатель увлажнения на юге Сибири : дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, 2003. 188 с.
- Малышева Н.В., Быков Н.И.** Дендрохронологические исследования ленточных боров юга Западной Сибири. Барнаул : АЗБУКА, 2011. 125 с.
- Матвеев С.М.** Дендрохронология. Методика дендрохронологического анализа : метод. указания к лабораторным работам для студентов по направлению подготовки 250100 Лесное дело. Воронеж : ВГЛТА, 2013. 43 с.
- Мацковский В.В.** Климатический сигнал в ширине годовых колец хвойных деревьев на севере и центре Европейской территории России. М. : ГЕОС, 2013. 147 с.
- Михайлов Л.Е.** Осина. М. : Агропромиздат, 1985. 72 с.
- Программа фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы).** Направление 1,5 – Науки о Земле. Утверждена Правительством РФ 31.12.2020 № 3684-Р.
- Ромашова Т.В.** Сезонные ритмы климата и их влияние на развитие эрозии почв (на примере юга Томской области) : дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 2004. 239 с.
- Рудский В.Г.** Экскурсии в природу. Томск глазами фенолога. Томск : Печатная мануфактура, 2012. 44 с.
- Рутковская Н.В.** Климатическая характеристика сезонов года Томской области. Томск : Изд-во ТГУ, 1979. 116 с.
- Рыгалова Н.В., Харламова Н.Ф.** Пространственно-временной анализ формирования узких годовых колец сосны ленточных боров степной зоны Западной Сибири // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2021. Т. 85, № 1. С. 109–119.
- Скорость роста берёзы в год.** URL: <https://xn--38-6kcaakvzsqni5c5b.xn--p1ai/fakty/skorost-rosta-berezy-v-god> (дата обращения: 25.09.2023).
- Сочава В.Б.** Определение некоторых понятий и терминов физической географии // Доклады Института географии Сибири и Дальнего Востока. 1963. № 3. С. 50–59.
- Степанов В.Н.** Биологическая классификация сельскохозяйственных растений полевой культуры // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 1957. Вып. 2. С. 5–29.
- Тайник А.В., Мыглан В.С., Бариннов В.В., Ойдунаа О.Ч., Назаров А.Н.** Прирост лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) на верхней границе леса в республике Тыва // География и природные ресурсы. 2015. № 2. С. 91–99.
- Таксация леса.** Курс лекций : учеб. пособие / Д.А. Поздеев, А.А. Петров. Ижевск : ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2012. 161 с.
- Тишин Д.В., Чижикина Н.А.** Дендрохронология. Казань : Казанский университет, 2018. 34 с.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации.** Общее резюме. СПб. : Научное издание, 2022. 124 с.
- Уголев Б.Н.** Древесиноведение и лесное товароведение : учебник. М. : Изд-во МГУ, 2007. 351 с.
- Филандышева Л.Б., Ромашова Т.В., Юркова К.Д.** Географические особенности г. Томска и динамика сезонных ритмов в условиях глобального изменения климата. Томск : Издательство Томского государственного университета, 2021. 254 с.
- Фонти М.В., Прокушкина А.С.** Климатически обусловленная изменчивость радиального прироста березы пушистой в криолитозоне Средней Сибири // Лесоведение. 2021. № 5. С. 460–471.

Хамидулина М.И. Взаимосвязь годичного прироста берёзы повислой (*Betula pendula* Roth.) с гидротермическими условиями, предшествующими вспышке массового размножения непарного шелкопряда (*Lymantria dispar* L.) в лесах Свердловской области // Аграрный вестник Урала. 2008. № 9 (51). С. 70–72.

Хромых В.С., Гуськова Т.А. Проблема зональных границ юго-востока Западно-Сибирской равнины // Козыбаевские чтения – 2015: Перспективы развития науки и образования : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Петропавловск, 2015. Т. 3. С. 213–218.

Чердыко Н.Н., Тартаковский В.А., Волков Ю.В., Крутиков В.А. Трансформация пространственной структуры поля приземной температуры Северного полушария // Известия РАН. Серия географическая. 2020. № 1. С. 47–55.

Чижов Б.Е., Санников С.Н., Казанцева М.Н., Глухарева М.В., Номеровских А.В., Аверьянов Д.В. Ценотическая роль осины в лесах Западной Сибири // Лесоведение. 2013. № 2. С. 3–8.

Шишкин А.М., Кулясова О.А., Иванова Р.И. Флористические особенности типов березовых лесов северной лесостепи Западной Сибири // Лесохозяйственная информация. 2019. № 2. С. 55–68.

Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Кракснер Ф., Онучин А.А. Переход к устойчивому управлению лесами России: теоретико-методические предпосылки // Сибирский лесной журнал. 2017. № 6. С. 3–25.

Шнятов С.Г. Фотомониторинг древесной и кустарниковой растительности в высокогорьях Южного Урала за последние 100 лет. Екатеринбург : УГЛТУ, 2020. 190 с.

Юрковская Т.К., Сафонова И.Н. Зональное деление растительного покрова Западной Сибири // Ботанический журнал. 2019. Т. 104, № 1. С. 3–11.

Can we make better graphs of global temperature history? URL: <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2014/03/can-we-make-better-graphs-of-global-temperature-history/> (дата обращения: 13.04.2014).

Demek J. Systémová teorie a studium krajiny. Brno : CSAV, 1974. 198 p.

Koprowski M., Przybylak R., Zielski A., Pospieszynska A. Tree rings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as a source of information about past climate in northern Poland // Int. J. of Biometeorology. 2012. V. 56 (1). P. 1–10.

St. George S. An overview of tree-ringwidth records across the Northern Hemisphere // Quaternary Science Reviews. 2014. V. 95. P. 132–150.

References

Adaptatsiya k izmeneniyu klimata [Adaptation to climate change] Electronic resource. URL: <https://www.un.org/ru/climatechange/climate-adaptation>. (Date of accessed: 09.09.2023). In Russian

Boreal'nye lesa i izmenenie klimata – ot vozdeystviya do adaptatsii. Analiticheskaya zapiska [Boreal Forests and Climate Change – From Impacts to Adaptation. Policy Brief]. [Elektronnyy resurs]. Geneva: EEK OON, 2023. 22 p. In Russian

Botygin I.A., Volkov Yu. V., Popov V.N., Tartakovskiy V.A., Botygin I.A. *Metody i algoritmy vosstanovleniya klimatoekologicheskoy informatsii na osnove dendrokronoindikatorov: monografiya* [Methods and algorithms for restoring climate-ecological information based on dendrochronological indicators: monograph] Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2015. 185 p. In Russian

Verigo S.A., Razumova L.A. *Pochvennaya vlaga i ee znachenie v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve* [Soil moisture and its importance in agricultural production]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1963. 289 p. In Russian

Vorob'eva N.S., Rummyantsev D.E. *Spetsifika proyavleniya klimaticheskogo signala v khronologiyakh osiny dlya drevostoev iz raznykh chastey Russkoy ravniny* [Specificity of manifestation of the climate signal in aspen chronologies for stands from different parts of the Russian Plain] // *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information]. 2003. No. 1. pp. 5–16. In Russian

Galakhov N.N. *Izucheniye struktury klimaticheskikh sezonov goda* [Study of the structure of the climatic seasons of the year]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1959. 213 p. In Russian

Global'nye klimaticheskie izmeneniya: regional'nye efekty, modeli, prognozy; Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (g. Voronezh, 3–5 oktyabrya 2019g.). [Global climate change: regional effects, models, forecasts; Proceedings of international scientific and practical conference (Voronezh, October 3–5, 2019).] Voronezh: Izdatel'stvo «Tsifrovaya poligrafia», 2019. V. 1. 532 p. In Russian

Doklad o klimaticheskikh riskakh na territorii Rossiyskoy Federatsii [Report on climate risks in the Russian Federation]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2017. 106 p. In Russian

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2022 god [Report on climate features in the Russian Federation for 2022]. Moscow: Gidrometeoizdat, 2023. 104 p. In Russian

Dolgova E.A., Solomina O.N., Matskovsky V.V., Dobryansky A.S., Semenyak N.A., Shpunt S.S. Spatial Variation of Pine Tree-Ring Growth in the Solovetsky Islands // *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2019; (2): pp. 41–50. doi: 10.31857/S2587-55662019241-5. In Russian

Drevesinovedenie s osnovami lesnogo tovarovedeniya [Wood science with the basics of forest commodity science] / Sost. Paul' E.E. (2011). Minsk: Belorusskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet. 42 p. In Russian

D'yakonov K.N., Bochkarev Yu.N. Geophysical factors influencing the diameter increment of trees in the landscapes of the West-Siberian plain and the Elbrus region // *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5, Geografia*. 2010. No. 4. pp. 3–9. In Russian

Dyukarev E.A., Voropay N.N. Mnogoletnyaya dinamika usloviy zasushlivosti v period sovremennykh klimaticheskikh izmeneniy // *Ekspertno-analiticheskii doklad po tematike i rezul'tatam issledovaniy nauchnoy shkoly «Dinamika okruzhayushchey sredy i global'nye izmeneniya klimata»*. Khanty-Mansiysk: FGBOU VO «Yugorskiy gosudarstvennyy universitet», Institut nefi i gaza, 2020. 115 p. In Russian

Kozlov A.Yu., Mkhitarian V.S., Shishov V.F. *Statisticheskii analiz dannykh v MS Excel* [Statistical data analysis in MS Excel] Moscow: Infra-M, 2021. 320 p. In Russian

Konovalova T.I. *Nauchnye osnovy geosistemnogo kartografirovaniya* [Scientific foundations of geosystem mapping] // *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle*. 2019. V. 29. pp. 85–100. In Russian

- Konstantinov A.V., Matveev S.M. *Metodicheskiy podkhod k otsenke adaptatsionnogo potentsiala lesnykh ekosistem Rossiyskoy Federatsii* [Methodological approach to assessing the adaptive potential of forest ecosystems of the Russian Federation] // Tr. Sankt-Peterburg. nauch.-issled. in-ta lesnogo khozyaystva. 2020. No. 2. pp. 14–33. In Russian
- Lipka O.N., Korzukhina M.D., Zamolodchikova D. G., Dobrolyubova N.Yu., Krylenko S.V., Bogdanovicha A.Yu., Semenova S.M. *Rol' lesov v adaptatsii prirodnnykh sistem k izmeneniyam klimata* [The role of forests in the adaptation of natural systems to climate change] // Lesovedenie [Russian Journal of Forest Science]. 2021. No. 5. pp. 531–546. In Russian
- Lukasheva M.A. *Dinamika nastupleniya fenofaz u berezy betula pendula roth (b. Verrucosa ehrh.) v Altayskom gosudarstvennom zapovednike* [Dynamics of the onset of phenophases in the birch *Betula pendula* roth (b. *Verrucosa* erh.) in the Altai State Nature Reserve] // Klimaticheskie izmeneniya i sezonnaya dinamika landshaftov : materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 22–24 aprelya 2021 g.]. Yekaterinburg: Ural'skiy gosudarstvennyy pedagogicheskiy universitet. 2021. pp. 346–350. In Russian
- Magda V.N. *Radial'nyy prirost drevesnykh rasteniy kak pokazatel' uvlazhneniya na yuge Sibiri: dis. ... kand. biol. nauk.* [Radial growth of woody plants as an indicator of moisture in the south of Siberia: diss. ... Cand. of Biological Sciences] Krasnoyarsk. 2003. 188 p. In Russian
- Malysheva N.V., Bykov N.I. *Dendrokronologicheskie issledovaniya lentoknykh borov yuga Zapadnoy Sibiri: monografiya.* [Dendrochronological studies of ribbon pine forests in the south of Western Siberia: monograph]. Barnaul: AZBUKA, 2011. 125 p. In Russian
- Matveev S.M. *Dendrokronologiya. Metodika dendrokronologicheskogo analiza: metodicheskie ukazaniya k laboratornym rabotam dlya studentov po napravleniyu podgotovki 250100 Lesnoe delo* [Dendrochronology. Methods of dendrochronological analysis: guidelines for laboratory work for students in the field of training 250100 Forestry]. Voronezh: «VGLTA». 2013. 43 p. In Russian
- Matskovskiy V.V. *Klimaticheskiy signal v shirine godichnykh kolets khvoynnykh derev'ev na severe i tsentre Evropeyskoy territorii Rossii: monografiya* [Climate signal in the width of annual rings of coniferous trees in the north and center of European Russia: a monograph]. Moscow: GEOS. 2013. 147 p. In Russian
- Mikhaylov L. E. Osina [Aspen]. Moscow: Agropromizdat, 1985. 72 p. In Russian
- Programma fundamental'nykh nauchnykh issledovaniy v Rossiyskoy Federatsii na dolgosrochnny period (2021–2030 gody)* [Program of fundamental scientific research in the Russian Federation for the long-term period (2021–2030)]. Napravlenie 1,5 – Nauki o Zemle. Uтверждена Правительством РФ 31.12.2020 № 3684-Р. In Russian
- Romashova T.V. *Sezonnye ritmy klimata i ikh vliyaniye na razvitiye ero-zii pochv (na primere yuga Tomskoy oblasti): dis. ... kand. geogr. Nauk* [Seasonal rhythms of climate and their influence on the development of soil erosion (on the example of the south of Tomsk region): diss. ... Cand. Geogr. Sciences]. Tomsk, 2004. 239 p. In Russian
- Rudskiy V.G. *Ekskursii v prirodu. Tomsk glazami fenologa* [Nature excursions. Tomsk through the eyes of a phenologist]. Tomsk: Izd-vo «Pechatnaya manufaktura». 2012. 44 p. In Russian
- Rutkovskaya N.V. *Klimaticheskaya kharakteristika sezonov goda Tomskoy oblasti* [Climate characteristics of the seasons of the year in Tomsk region]. Tomsk: Izd-vo TGU, 1979. 116 p. In Russian
- Rygalova N.V., Kharlamova N.F. Spatiotemporal Analysis of the Formation of Narrow Tree-Rings of Pine Belt Forests in the Steppe Zone of Western Siberia // *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2021; 85 (1): pp. 109–119. doi: 10.31857/S2587556621010131. In Russian
- Skorost' rosta berezy v god* [Birch growth rate per year]. Electronic resource. URL: <https://xn--38-6kcaakvzsqni5c5b.xn--plai/fakty/skorost-rosta-berezy-v-god> (Date of accessed: 25.09.2023). In Russian
- Sochava V.B. *Opreделение nekotorykh ponyatiy i terminov fizicheskoy geografii* [Definition of some concepts and terms of physical geography] // *Doklady Instituta geografii Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 1963. No. 3. pp. 50–59. In Russian
- Stepanov V.N. *Biologicheskaya klassifikatsiya sel'skokhozyaystvennykh rasteniy polevoy kul'tury* [Biological classification of agricultural plants of field crops] // *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 1957. Vyp. 2. pp. 5–29. In Russian
- Taynik A.V., Myglan V.S., Barinov V.V., Oydupaa O.Ch., Nazarov A.N. *Prirost listvenitsy sibirskoy (Larix sibirica ledeb/) na verkhney granitse lesa v respublike Tyva* [Growth of Siberian larch (*Larix sibirica* ledeb/) at the upper forest line in the Republic of Tyva] // *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources]. 2015. No. 2. pp. 91–99. In Russian
- Taksatsiya lesa. Kurs lektsiy: ucheb. posobie* [Forest taxation. Lecture course: study guide] / D.A. Pozdeev, A.A. Petrov. Izhevsk: Izhevskaya GSKhA. 2012. 161 pp. In Russian
- Tishin D.V., Chizhikova N.A. *Dendrokronologiya* [Dendrochronology]. Kazan: Kazanskiy universitet. 2018. 34 p. In Russian
- Tretiy otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Obshchee rezhyume.* [Third Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation. General Summary] Electronic resource. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii. 2022. 124 p. In Russian
- Ugolev B.N. *Drevesinovedenie i lesnoe tovarovedenie: Uchebnik* [Wood Science and Forest Commodity Science: Textbook]. Moscow: Izd-vo MGU, 2007. 351 p. In Russian
- Filandysheva L.B., Romashova T.V., Yurkova K.D. *Geograficheskie osobennosti g. Tomsk i dinamika sezonnykh ritmov v usloviyakh global'nogo izmeneniya klimata* [Geographical features of Tomsk and the dynamics of seasonal rhythms in the context of global climate change]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo gosudarstvennogo universitet, 2021. 254 p. In Russian
- Fonti M.V., Prokushkina A.S. *Klimaticheskiy obuslovlennaya izmenchivost' radial'nogo prirosta berezy pushistoy v kriolitozone Sredney Sibiri* [Climate-induced variability of radial growth of downy birch in the permafrost zone of Central Siberia] // *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Sciences]. 2021. No. 5. pp. 460–471. In Russian
- Khamidullina M.I. *Vzaimosvyaz' godichnogo prirosta berezy povisloy (Betula pendula roth.) s gidrotermicheskimi usloviyami, predshestvuyushchimi vspyshe massovogo razmnzheniya neparnogo shelkopryada (lymantria dispar l.) v lesakh Sverdlovskoy oblasti* [The relationship between the annual growth of silver birch (*Betula pendula* roth.) and hydrothermal conditions preceding the outbreak of mass reproduction of the gypsy moth (*lymantria dispar* l.) in the forests of the Sverdlovsk region] // *Agrarnyy vestnik Urals* [Agrarian Bulletin of the Urals]. 2008. No. 9 (51). pp. 70–72. In Russian
- Khromykh V.S., Gus'kova T.A. *Problema zonal'nykh granits yugo-vostoka Zapadno-Sibirskoy ravniny* [The problem of zonal boundaries of the south-east of the West Siberian Plain] // *Kozybaevskie chteniya – 2015: Perspektivy razvitiya nauki i obrazovaniya: mat. Mezhd. nauch.-prakt. konf. Kazakhstan. Petropavlovsk*. 2015. V. 3. pp. 213–218. In Russian

Cheredko N.N., Tartakovsky V.A., Volkov Y.V., Krutikov V.A. Transformation of Spatial Structure of the Surface Temperature Field in the Northern Hemisphere. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2020; (1): pp. 47–55. In Russian <https://doi.org/10.31857/S2587556620010057>. In Russian

Chizhov B.E., Sannikov S.N., Kazantseva M.N., Glukhareva M.V., Nomerovskikh A.V., Aver'yanov D.V. *Tsenoticheskaya rol' osiny v lesakh Zapadnoy Sibiri* [The cenotic role of aspen in the forests of Western Siberia] // *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Sciences]. 2013. No. 2, pp. 3–8. In Russian

Shishkin A.M., Kulyasova O.A., Ivanova R.I. *Floristicheskie osobennosti tipov berezovykh lesov severnoy lesostepi Zapadnoy Sibiri* [Floristic features of birch forest types in the northern forest-steppe of Western Siberia] // *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information]. 2019. No. 2. pp. 55–68. In Russian

Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Kraksner F., Onuchin A.A. *Perekhod k ustoychivomu upravleniyu lesami Rossii: teoretiko-metodicheskie predposylki* [Transition to Sustainable Forest Management in Russia: Theoretical and Methodological Prerequisites] // *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science]. 2017. No. 6. pp. 3–25. In Russian

Shiyatov S.G. Fotomonitoring drevesnoy i kustarnikovoy rastitel'nosti v vysokogor'yakh Yuzhnogo Urala za poslednie 100 let: monografiya. Yekaterinburg: Izd-vo UGLTU, 2020 190 p. In Russian

Yurkovskaya T.K., Safonova I.N. *Zonal'noe delenie rastitel'nogo pokrova Zapadnoy Sibiri* [Zonal division of vegetation cover of Western Siberia] // *Botanicheskiy zhurnal* [Botanical Journal]. 2019. V. 104. No. 1. pp. 3–11. In Russian

Can we make better graphs of global temperature history? [Electronic resource]. URL: <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2014/03/can-we-make-better-graphs-of-global-temperature-history> (Date of accessed: 13.03.2014).

Demek J. *Systémová teorie a studium krajiny*. Brno: ČSAV, 1974. 198 p.

Koprowski M., Przybylak R., Zielski A., Pospieszynska A. Tree rings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as a source of information about past climate in northern Poland. *J. of Biometeorology*. 2012. V. 56 (1). pp. 1–10.

St. George S. An overview of tree-ringwidth records across the Northern Hemisphere // *J.Quaternary Science Reviews*. 2014. V. 95. pp. 132–150.

Информация об авторах:

Филандышева Л.Б., кандидат географических наук, доцент, кафедра краеведения и туризма, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: filandysheva@yandex.ru

Ромашова Т.В., кандидат географических наук, доцент, кафедра географии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: romvtom@rambler.ru

Евсеева Н.С., доктор географических наук, профессор, кафедра географии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Filandysheva L.B., Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Department of Local history and Tourism, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: filandysheva@yandex.ru

Romashova T.V., Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Department of Geography, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: romvtom@rambler.ru

Evseeva N.S., Dr. Sci. (Geography), Professor, Head at the Department of Geography, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

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

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.12.2023; одобрена после рецензирования 02.05.2024; принята к публикации 29.08.2025

The article was submitted 01.12.2023; approved after reviewing 02.05.2024; accepted for publication 29.08.2025

Original article

doi: 10.17223/25421379/36/11

A GEOSPATIAL ANALYSIS OF LAND SURFACE TEMPERATURE AND THE SURFACE URBAN HEAT ISLAND IN TOMSK CITY: A STUDY BASED ON LANDSAT 8 SATELLITE IMAGERY



Clyde Marimira

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia, marimira.clyde@gmail.com

Abstract. An urban heat island defines a specific microclimate, where urban areas experience higher temperatures relative to surrounding rural or suburban areas. This phenomenon is linked to reduced wind speeds, alterations in wind direction, reduced urban ventilation and the accumulation of air pollutants within cities, resulting in negative health outcomes to urban residents. In recent years, advancements in thermal remote sensing technologies and the implementation of open data initiatives have prompted numerous investigations into the surface urban heat island.

This study aims to investigate the geospatial distribution of land surface temperature and the surface urban heat island over Tomsk City, during the summer season of 2023. To achieve this, the research utilizes remote sensing imagery obtained from the Thermal Infrared Sensor 1 (TIRS1) and the Operational Land Imager (OLI), both instruments onboard the Landsat 8 Satellite. By applying geospatial analysis and modern satellite remote sensing techniques, including the surface urban heat island index method and zonal statistics, the study aims to: quantify the intensity and spatial extent of surface urban heat island; identify urban hotspots of land surface temperature anomalies and their spatial distribution over land cover and land use classes.

The findings indicate a significant variation in land surface temperature and the surface urban heat island across the research area, with higher land surface temperature and more pronounced surface urban heat island effect predominantly observed in densely built-up areas. Specifically, 83 % of the urban hot spots exhibiting high land surfaces temperature anomalies were observed in densely built-up areas that is urban areas and 16% on bare soil surfaces. Notably, no surface urban heat island was observed in 54 % of the study area, wherein the corresponding major land use and land cover class was vegetation. The mean surface urban heat island intensity, herein the difference between the averages of land surface temperatures between urban and suburban areas ranged between 2°C to 3 °C.

The findings of the study provide valuable insights into the dynamics of land surface temperature and the surface urban heat island effect in Tomsk City. The observed relationships between land surface temperature and surface urban heat island with specific land use and land covers emphasises that vegetation and water surfaces are crucial for reducing urban temperatures and creating favourable microclimate conditions which may consequently increase thermal comfort, and decrease energy consumption.

Keywords: land surface temperature, surface urban heat island, urban heat island, Landsat 8, urban climate, land use and land cover

For citation: Marimira C. (2025). A geospatial analysis of land surface temperature and surface urban heat island in Tomsk City: a study based on Landsat 8 satellite imagery. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 182–196. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/36/11

Научная статья

УДК 551.584.2: 551.501.86

doi: 10.17223/25421379/36/11

ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ И ПОВЕРХНОСТНОГО ГОРОДСКОГО ОСТРОВА ТЕПЛА В ГОРОДЕ ТОМСКЕ: ИССЛЕДОВАНИЕ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ LANDSAT 8

Клайд Маримира

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия, marimira.clyde@gmail.com

Аннотация. Городской остров тепла определяет особый микроклимат, при котором в городских районах наблюдается более высокая температура по сравнению с окружающими сельскими или пригородными районами. Данное явление связано с уменьшением скорости ветра, изменением направления ветра, уменьшением вентиляции в городах и накоплением загрязняющих веществ в воздухе, что приводит к негативным последствиям для здоровья городских жителей. В последние годы развитие технологий дистанционного теплового зондирования и реализация инициатив по предоставлению открытых данных привели к многочисленным исследованиям поверхностных городских островов тепла.

Цель данного исследования заключается в том, чтобы исследовать геопространственное распределение температуры поверхности земли и поверхностного городского острова тепла над городом Томском в летний сезон 2023 г. Для достижения этой цели в исследовании используются снимки дистанционного зондирования, полученные с использованием

приборов теплового инфракрасного датчика 1 (TIRS1) и оперативного наземного имиджера (OLI), оба из которых находятся на борту спутника Landsat 8. Применяя Геопространственный анализ и современные спутниковые методы дистанционного зондирования, включая метод индекса поверхностного городского острова тепла и зональную статистику, исследование направлено на количественную оценку интенсивности и пространственной протяженности поверхностного городского острова тепла; выявление городских горячих точек, демонстрирующих высокие аномалии температуры поверхности земли, и их пространственное распределение по классам земного покрова и землепользования.

Полученные данные свидетельствуют о значительном изменении температуры поверхности земли и поверхностного городского острова тепла на всей территории исследования, причем более высокая температура поверхности земли и более выраженный эффект поверхностного городского острова тепла наблюдаются преимущественно в районах плотной застройки. В частности, 83 % городских «горячих точек» аномалий температуры поверхности земли наблюдались над плотно застроенными территориями, т.е. над городскими районами, а 16 % – на голой поверхности почвы. Примечательно, что на 54 % исследуемой территории не наблюдалось поверхностного городского острова тепла, где соответствующим основным классом землепользования и растительного покрова была растительность. Измеренная интенсивность поверхностного городского острова тепла, т.е. средняя температура поверхности городской земли и средняя температура поверхности городской земли в пригороде, составляла от 2 до 3 °С.

Результаты исследования предоставляют ценные сведения о динамике температуры поверхности земли и приземных городских островов тепла в городе Томске. Наблюдаемая взаимосвязь между температурой поверхности земли и поверхностным городским островом тепла с конкретными видами землепользования и растительного покрова говорит о том, что растительность и водные поверхности имеют решающее значение для снижения городских температур и создания благоприятных условий микроклимата, что, в свою очередь, может повысить тепловой комфорт и снизить потребление энергии.

Ключевые слова: температура поверхности земли, поверхностный городской остров тепла, городской остров тепла, Landsat 8, городской климат

Для цитирования: Marimira C. A geospatial analysis of land surface temperature and surface urban heat island in Tomsk City: a study based on Landsat 8 satellite imagery // Геосферные исследования. 2025. № 3. С. 182–196. doi: 10.17223/25421379/36/11

Introduction

Urbanization is significantly altering natural landscapes often inadvertently creating an unfavourable microclimate [Crum, Jenerette, 2017; Badugu et al., 2023]. The most notable manifestation of this alteration is the urban heat island (UHI), which has been linked to challenges ranging from public health, energy resources and urban planning [Zhang et al., 2023; Diem et al., 2024].

An urban heat island (UHI) was first observed by a British manufacturing chemist and an amateur meteorologist, Luke Howard, in the early 1833 [Chapman et al., 2017; Zhang et al., 2023]. It defines a specific microclimate, that is characterized by significantly higher temperatures as compared to surrounding rural or suburban areas [Hidalgo-García, Arco-Díaz, 2022; Badugu et al., 2023; Le, Bakaeva, 2023; Diem et al., 2024]. UHI has become a focal point of research and policy discussions due to its many-sided impacts on urban environments and society at large [Liou et al., 2024].

Studies have shown that high temperatures in the urban core centres can intensify the prevalence of heat related deaths and illness especially during heatwaves [Hidalgo-García, Arco-Díaz, 2022; Cleland et al., 2023]. In the United States of America (USA) alone, it is estimated that deaths due to heat exposure ,1500 annually, are more than deaths due dangerous weather phenomena [Hsu et al., 2021].

UHI increases the risk of vulnerable populations, such as the elderly and children, to heat-related health

outcomes [Hsu et al., 2021]. These include heat-related illnesses like heat exhaustion, heatstroke and recently more chronic outcomes such as cardiovascular diseases [Hsu et al., 2021; Hidalgo-García, Arco-Díaz, 2022]. Chronic temperature-related diseases, such as comorbid respiratory diseases, cardiovascular diseases, and lung function are most prevalent in high to extreme UHI conditions. An urban heat island is also associated with decreased thermal comfort, and increased energy consumption [Santamouris et al., 2015] for sustaining comfortable temperature particularly in summer or during warmer months [Almeida de et al., 2021; Le, Bakaeva, 2023; Diem et al., 2024]. Therefore, characterising the dynamics of UHI is key for developing effective mitigation strategies and improving urban living conditions.

There are two main types of an urban heat island: the surface urban heat island (SUHI/UHI_{Surface}) and the atmospheric urban heat island (UHI) [Badugu et al., 2023; Liou, Tran, Nguyen, 2024]. The atmospheric UHI is often further divided into two forms: the canopy layer urban heat island (CLHI/UHI_{CL}) and the boundary layer urban heat island (BLHI/UHI_{BL}) [Badugu et al., 2023; Diem et al., 2024; Liou et al., 2024].

The (atmospheric) UHI is measured based on in-situ air temperature (Ta) observations from fixed meteorological stations [Badugu et al., 2023; Liou et al., 2024]. This direct measurement approach provides the best indicator of human experience, but the sparse distribution of monitoring stations can result in insufficient spatial and temporal detail for applied

purposes such as urban planning, public health, energy resources planning and general policy making [Almeida de et al., 2021; Badugu et al., 2023].

In contrast, the Surface UHI (SUHI/UHI_{surface}) is based on LST measurements, which are derived from thermal infrared sensors onboard satellites (e.g., Landsat 8/9, Terra, Aqua, and Sentinel 3) aircraft, or drones (Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)) [Khorrami, Gunduz, 2020; Almeida de et al., 2021; Zhang et al., 2023]. Consequently, SUHI can provide a spatially continuous representation of LST patterns across urban and rural areas, and across different land covers and land uses, hence can produce sufficient spatial and temporal detail for fundamental and applied purposes [Badugu et al., 2023; Liou et al., 2024].

Advances in thermal remote sensing technology, such as the TIRS1 and TIRS2 instruments on Landsat 8/9, MODIS on Terra and Aqua, and SLSTR on Sentinel 3, combined with open data policies, have facilitated many studies on UHI surface in recent decades [Almeida de et al., 2021; Zhang et al., 2023]. Diem et al. [2024] found 753 publications with the name SUHI/UHI_{surface} in the Web of Science (WoS), Scopus and Google Scholar, more than half of the 753 publications were in the last four years. Additionally, 60.27 % of the 753 studies used Landsat satellite images as primary data sets, an indication that Landsat satellite sensors are well established in SUHI studies.

Previous researches who demonstrated the use of TIRS1 and OLI instruments onboard Landsat 8 satellites in surface urban heat island studies include: Hidalgo-García, Arco-Díaz [2022], who focused on evolution of the surface urban heat island (SUHI) and its driving forces over Granada, Spain. Likewise, in Turkey, Khorrami, Gunduz [2020] studied the seasonal spatial-temporal relations of the Istanbul SUHI with spectral indicators such as, normalized vegetation index (NDVI), tasselled cap wetness (TCW), and surface albedo. In Yerevan, Armenia, researchers investigated the link between land cover and SUHI, methods used to derive land cover and SUHI from Landsat Images included Machine Learning algorithms and the Urban Thermal Field Variance Index (UTFVI), respectively [Tepanosyan et al., 2021].

Equally, in the Russian Federation: Le, Bakaeva [2023] assessed SUHI in Moscow, using Landsat 8 TIRS1 imagery, cloud computing and the UTFVI method to determine the location of urban heat islands, while Korniyenko, Dikareva [2022] identified the UHI surface in the City of Volgograd in summer period using Landsat 8 data and the UHI index method and in the city of Novosibirsk, Gazimov, Kuzhevskaya [2021] estimated the summer surface urban heat island and its drivers using Band 10 of the Landsat 8 TIRS1 and Bands 4 and 5 of

OLI instrument. However, the SUHI studies are mainly established in metropolitans and large urbanised cities as compared to smaller cities.

Tomsk city is a relatively small city which is almost 300 km². It is the administrative capital of Tomsk region, located in the east of Western Siberia, in the Russian Federation [Official Portal of «The city of Tomsk», 2024].

Seemingly, earlier research implemented in Tomsk City have primarily focused on the (atmospheric) UHI and rather than SUHI [Svarovsky, Starchenko, 2021a, 2021b]. Through the Weather Research and Forecasting model, researchers investigated the UHI in Tomsk City, and the temperature difference between the city and the suburbs was shown to reach 1–3 °C and 1–2 °C respectively.

Previous studies have not (sufficiently) characterised the SUHI/UHI_{surface}, more so in light of the fact that absorption of short-wavelength radiation by the urban surfaces contributes significantly to UHI, accounting for 40–50 % of UHI in summer and 5–15 % in winter [Dudorova, Belan, 2016].

Consequently, this study is realised in an effort to fill this research gap, by analysing the geospatial variation of LST and characterising the UHI_{surface} in Tomsk City, during the summer season of 2023, using imagery from the Thermal Infrared Sensor 1 (TIRS1) (Band 10) and Operational Land Imager (OLI) onboard Landsat 8 Satellite. Additionally, geospatial techniques, that is, the urban heat island index method (UHI index), and zonal statistics are used to; characterise the intensity and spatial extent and of SUHIs; and identify ‘urban hot spots’ of LST anomalies respectively.

Research Method and Materials

Study Area. The study area is Tomsk City, located at geographical coordinates 56°20'00" N, 56°42'30"N and 84°19'30"E, 84°45'00"E, [see Fig. 1]. As of the latest data, the population of Tomsk City is approximately 568.5 thousand [Rakhmanova et al., 2021]. The territory is located on the banks of the Tom River, and is the administrative capital of the Tomsk region, located in the east of Western Siberia, in the Russian Federation [Official Portal of «The city of Tomsk», 2024].

According to the Köppen classification system, Tomsk city predominantly exhibits a Dfb climate. This classification is characterized by significant temperature variations, very cold winters and warm summers with consistent precipitation throughout the year. Summers are short [June to August] nonetheless can be fairly warm, with average temperatures in July reaching 19 °C to 22 °C. Infrequently, summer temperatures can exceed 30 °C [Official Portal of «The city of Tomsk», 2024].

Methodology

The method for calculating land surface temperature (LST) were derived from the US Geological Survey website: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product>.

The overall methods used in this study are depicted in Fig. 2.

Datasets

The primary data for this research is acquired from the Landsat 8 Satellite instruments; that is the thermal infrared sensor (TIRS) and the Operational Land Imager (OLI) instrument (see Table 1). Data is attained from the United States Geological Survey (USGS) Earth Explorer web portal <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

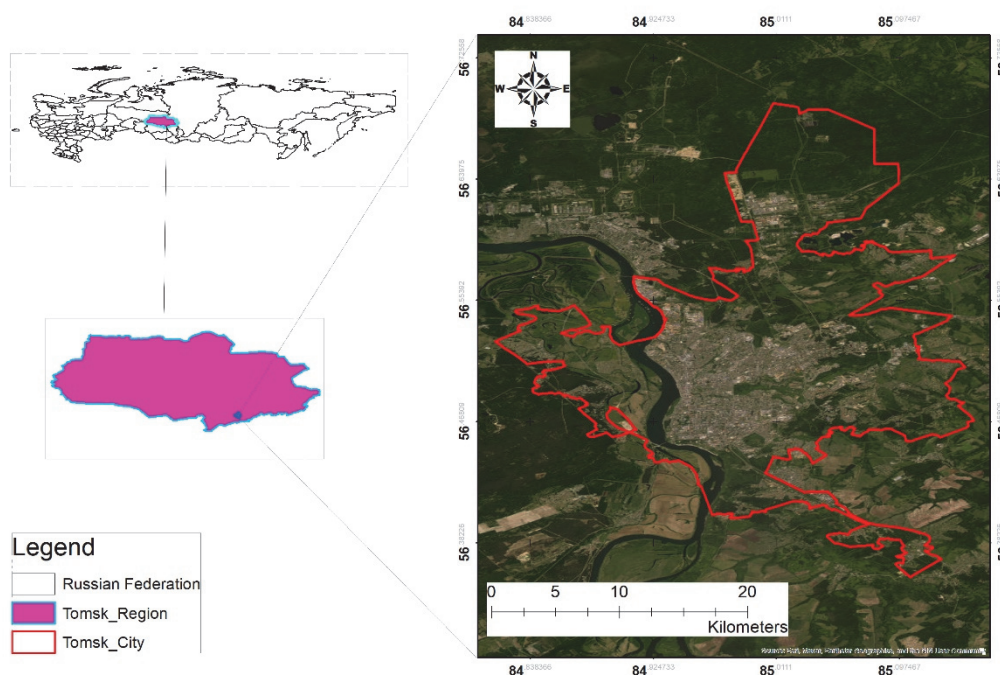


Fig. 1. Study area – Tomsk City

Рис. 1. Район исследования – г. Томск

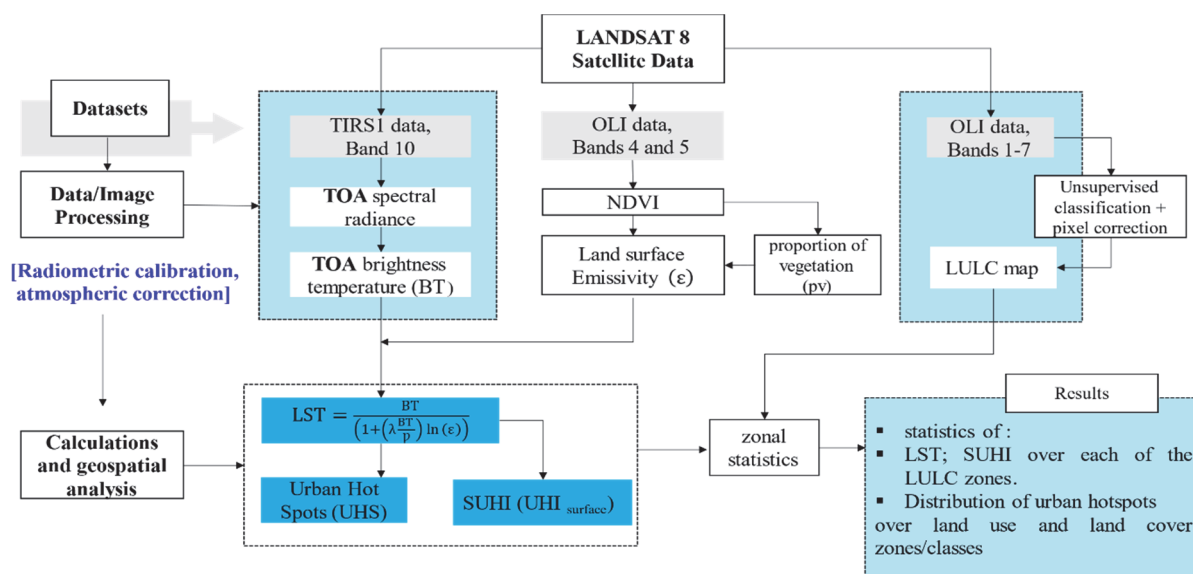


Fig. 2. Research Method

Рис. 2. Метод исследования

Table 1

Description of the Landsat datasets used in this study

Таблица 1

Описание наборов данных Landsat, использованных в данном исследовании

Satellite	Sensor	Cloud cover	Acquisition date and time	Path/row	Spatial resolution
Landsat 8	OLI/TIRS	2.05 %	July 19, 2023; 1030 AM, UTC	147/21	30 m

Calculating the land surface temperature based on Landsat 8 imagery

The first step is to convert TIRS₁ Band 10 stored as digital numbers (DNs) to Top of the Atmosphere spectral radiance (ToA spectral radiance) using the formular:

$$L_{\lambda} = M_L \times Q_{cal} + A_L \quad (1)$$

where L_{λ} = ToA spectral radiance [Watts/(m²*srad*μm)]; M_L = Band-specific multiplicative rescaling factor from the metadata (MTL.txt); Q_{cal} = DNs: Band 10 image; A_L = Band-specific additive rescaling factor from the metadata.

The second step is calculating the Top of the Atmosphere brightness temperature (ToA brightness temperature). This involves utilizing the thermal constants provided in the MTL.txt. file.

Equation (2) was used for conversion for the conversion.

$$BT = \left[\frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1 \right)} \right] - 273.15, \quad (2)$$

where BT = ToA brightness temperature in Degrees Celsius; L_{λ} = ToA spectral radiance (Watts/(m²*srad*μm)) calculated in (1); K_1 and K_2 stand for the band-specific thermal conversion constants from the metadata (Table 3).

The third and fourth step is calculating the Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) and proportion of vegetation (PV) respectively. To calculate NDVI (3) is used:

$$NDVI = \frac{NIR(\text{Band } 5) - Red(\text{Band } 4)}{NIR(\text{Band } 5) + Red(\text{Band } 4)} \quad (3)$$

Wherein, Band 5 is the near-infrared band (NIR) from Landsat 8 OLI and Band 4 is the Red band from Landsat 8 OLI. Both NDVI and PV are related to land surface emissivity. In-order to calculate PV, equation (4) was used:

$$PV = \left[\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right]^2, \quad (4)$$

where $NDVI_{min}$ and $NDVI_{max}$ = the minimum and maximum values of the NDVI image, respectively.

Table 2

Metadata; Landsat 8 TIRS (Band 10) Image; M_L and A_L values

Таблица 2

Метаданные; снимок Landsat 8 TIRS (Band 10); значения M_L и A_L

Variable	Description	Value
M_L	Band-specific multiplicative rescaling factor	3.342×10^{-4}
A_L	Band-specific additive rescaling factor	0.100

Source: Metadata file of Landsat 8 OLI/TIRS [USGS Earth Explorer, 2023].

Table 3

 K_1 and K_2 values from the Metadata File of the Landsat 8 Image (TIRS1 Band10)

Table 3

 K_1 и K_2 значения из файла метаданных снимка Landsat 8 (TIRS1 Band10)

Variable	Description	Value
K_1	Thermal constant	774.8853
K_2	Thermal constant	1321.0789

Source: Metadata file of Landsat 8 OLI/TIRS [USGS Earth Explorer, 2023].

The fifth step is the calculation of the land surface emissivity (ϵ) a factor that helps in estimating Land

Surface Temperature (LST) by scaling the emitted radiance from the Earth's surface. This scaling factor

allows us to measure how thermal energy is transmitted from the surface into the atmosphere [Young et al., 2017; Zahir, 2020; Hidalgo-García, Arco-Díaz, 2022]. ε is calculated using equation (5):

$$\varepsilon = 0.004 \times P_v + 0.986, \quad (5)$$

where ε = land surface emissivity; P_v = proportion of vegetation calculated in equation (4).

Lastly, the Land surface temperature (LST) can be calculated according to Hidalgo-García, Arco-Díaz [2022] the balanced equation for calculating LST [Young et al., 2017; Almeida de et al., 2021; Gazimov, Kuzhevskaya, 2021] is equation (6).

$$LST = \frac{BT}{\left(1 + \left(\lambda \frac{BT}{p}\right) \ln(\varepsilon)\right)}, \quad (6)$$

where

$$p = \frac{hc}{f}, \quad (7)$$

where BT is ToA brightness temperature calculated in equation [2]; ε is corrected land surface emissivity calculated in equation (5); λ = the emitted radiance (λ is 10.895); $p = hc/f = 1.438 \times 10^{-2}$ m K, and h = Planck's constant (6.626×10^{-34} Js); c = speed of light in vacuum (2998×10^8 m/s); f = Boltzmann's constant (1.38×10^{-23} J/K).

Preparation of a remote sensing-based land use land cover map

Further to that, a remote sensing-based land use and land cover (LULC) map is created according to the method illustrated in Fig. 3.

1. Unsupervised classification based on the ISO Cluster algorithm in QGIS was done, automatically grouping similar pixels into one spectral class.

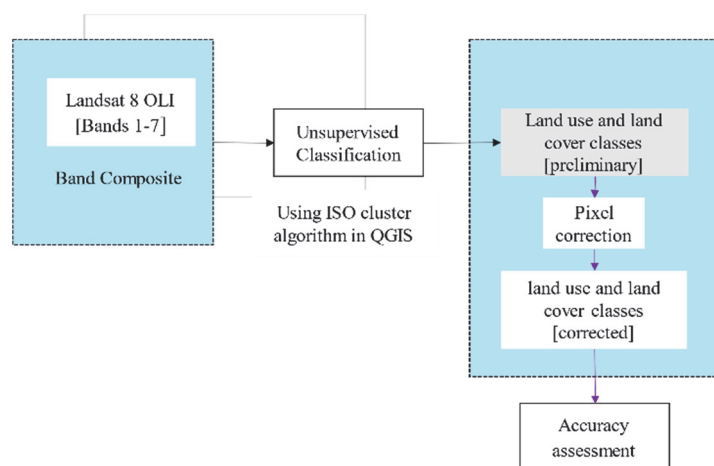


Fig. 3. Land cover land use classification method [Gore et al., 2020; ThanushKodi, Babykalpana, 2010]

Рис. 3. Метод классификации землепользования и земельного покрова

SUHI zones

Table 4

Зоны SUHI

Таблица 4

SUHI zone	1 (no SUHI)	2	3	4	5	6
SUHI index	< 0 °C	0.0–0.5 °C	0.5–1.0 °C	1.0–2.0 °C	2.0–3.0 °C	> 3.0 °C

2. Secondly, pixel-level correction was done, while manually correcting any spectral mixing or or misclassifications. This hybrid method is flexible and can lead to more accurate LULC maps compared to using either approach alone [Gore et al., 2020; ThanushKodi, Babykalpana, 2010; Peacock, 2014].

Characterising the surface urban heat island (SUHI/UHI_{surface})

The surface urban heat island effect (SUHI) over the city of Tomsk was calculated following equation (8) following Siswanto et al. [2023]

$$SUHI = \frac{LST_i - LST_{mean}}{SD} \quad (8)$$

where LST_i = land surface temperature in each pixel of the study area (6); LST_{mean} = is the mean LST of the study area; SD = LST standard deviation of the study area.

In further characterising the surface urban heat islands (SUHI) the following steps are taken:

1. Calculating the predominant land use and land cover types within each SUHI zone.

This information is crucial for identifying which land cover types are prevalent in high SUHI zones versus lower ones [Liu et al., 2023; Moharram, Sundaram, 2023]. Firstly, the SUHI over Tomsk City, calculated in (8) is divided into six classes see Table 4. Area of each class, is calculated in km^2 .

Using the zonal statistics overlays majority analysis tool in a QGIS, the SUHI zones in Table 4 [in vector format] are overlaid with a remote sensing based

LULC map [in raster format], the results will identify the most frequent pixels of land covers in each of the SUHI classes.

2. Calculating the SUHI intensity based on equation (9) [Siswanto et al., 2023; Liou et al., 2024] and methods as illustrated in Fig. 4.

$$SUHI = LST_{urban} - LST_{rural} \quad (9)$$

In the first method (a), based on SUHI thresholds; LST_{urban} is referenced from the zonal mean LST in the class where $[SUHI > 1]$; and LST_{rural} = zonal mean LST in the class where $[0 \leq SUHI < 1]$.

The second method (b) is based on LULC map; LST_{urban} and LST_{rural} are referenced from the zonal mean LST in the densely built-up area and the suburban / sparsely built-up area respectively.

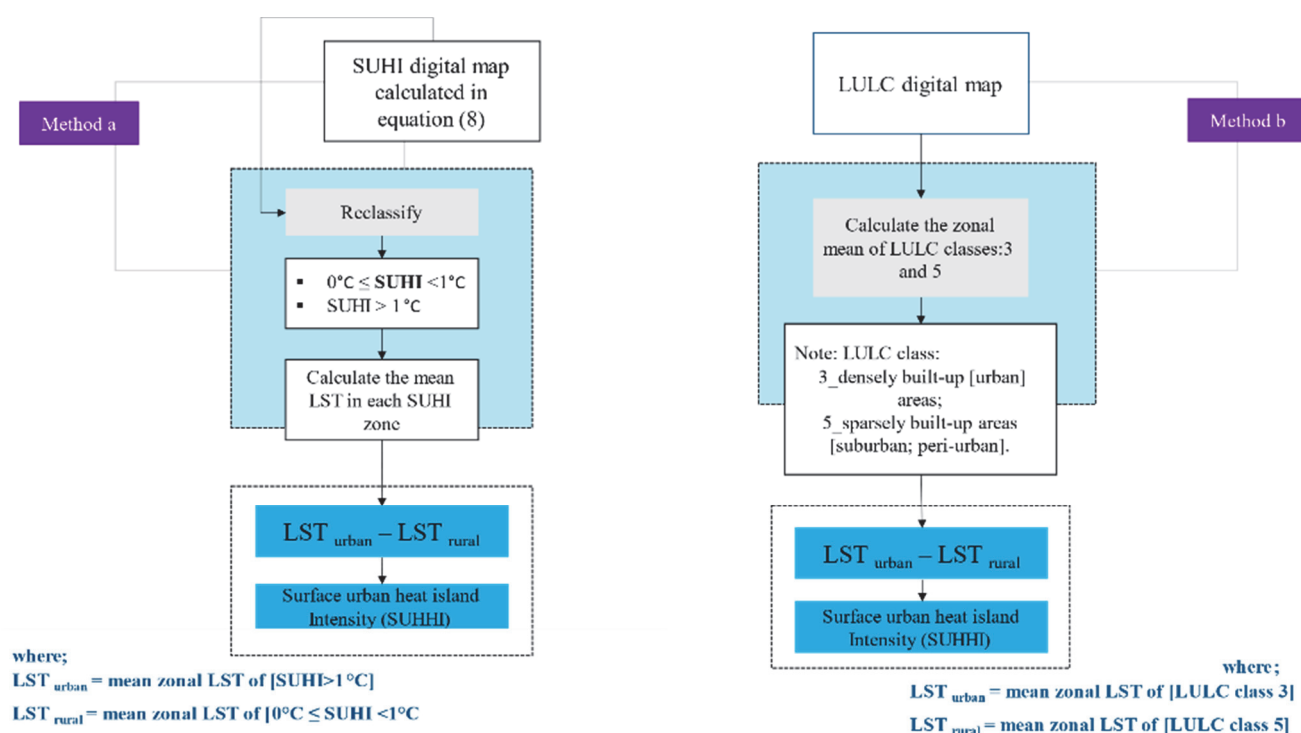


Fig. 4. Methods used to estimate the range of SUHI over the study area

Рис. 4. Методы, используемые для оценки распространения СУИИ на исследуемой территории

The Geospatial distribution of urban hotspots (UHS) of LST anomalies

1. Firstly, UHS exhibiting high LST anomalies are calculated from an LST map, based on equation (10) which was derived from [Hidalgo-García, Arco-Díaz, 2022]. The method is illustrated in Fig. 5.

$$LST > \mu + 2 * \sigma, \quad (10)$$

where LST is the land surface temperature in degrees Celsius; μ is the mean (average) LST of the study area, and σ is the standard deviation.

2. Secondly using the zonal statistics overlays tool in a QGIS, the UHS identified in (10) [in vector format] are overlaid with a remote sensing based LULC map [in raster format], the results will show how UHS are spatially distributed over the land use and land covers.

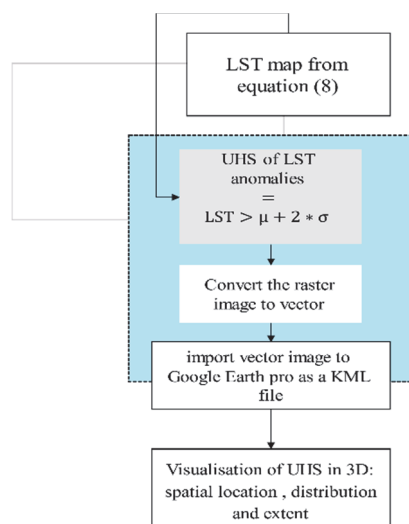


Fig. 5. Method used for estimating the geospatial distribution of UHS [Hidalgo-García, Arco-Díaz, 2022]

Рис. 5. Метод, используемый для оценки геопространственного распределения UHS

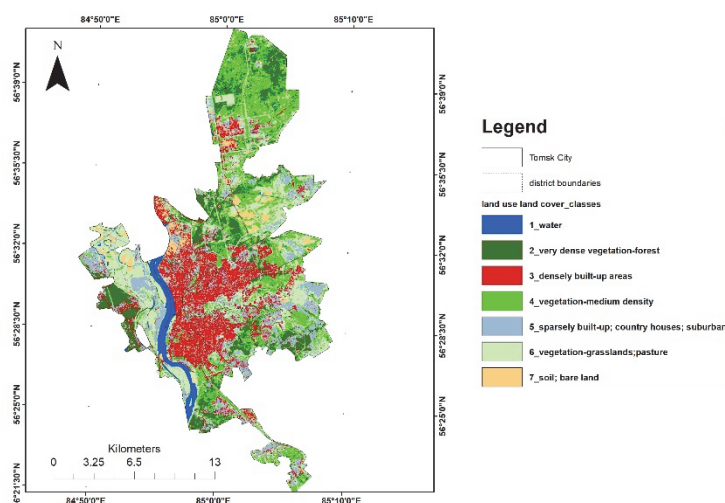


Fig. 6. The land use and land cover map of Tomsk City, created by the author using QGIS software (July 2023)

Рис. 6. Карта землепользования и покрова города Томска, создана автором с помощью программного обеспечения QGIS (июль 2023 г.)

Table 5

Confusion matrix, detailing accuracy assessment of LULC, created by author using QGIS

Таблица 5

Матрица ошибок, подробно описывающая оценку точности LULC, создано автором с использованием QGIS

LULC Class	1	2	3	4	5	6	7	Total	U_Accuracy	Kappa
1	10	0	0	0	0	0	0	10	1	0
2	0	7	2	0	0	1	0	10	0.7	0
3	0	0	9	0	0	0	1	10	0.9	0
4	0	0	0	9	0	0	2	11	0.82	0
5	0	0	0	0	9	1	0	10	0.9	0
6	0	0	0	0	0	10	1	11	0.91	0
7	0	0	1	0	0	0	9	10	0.9	0
Total	10	7	12	9	9	12	13	72	0	0
P_Accuracy	1	1	0.8	1	0.8	0.8	0.7	0	0.88	0
Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.85

Note: 1 – water; 2 – very dense vegetation, forest; 3 – densely built-up areas; 4 – vegetation medium-density; 5 – sparsely built-up, suburban, country houses; 6 – vegetation-grassland, pasture; 7 – soil / bare land; P_Accuracy – Producer accuracy. U_Accuracy – User accuracy

Примечание: 1 – вода; 2 – очень густая растительность, лес; 3 – густо застроенные районы; 4 – растительность средней плотности; 5 – редкая застройка, пригород, сельские дом; 6 – растительность – луга; пастбища; 7 – почва / голая земля; P_Accuracy – точность производителя; U_Accuracy – точность пользователя.

Results

Land use and land cover classification

The accuracy assessment of the land use and land cover classification is detailed by the confusion matrix in Table 5.

Variation of land surface temperature (LST) over the study area

LST ranged from a minimum of 14.8 °C to a maximum 39.6 °C. The average LST was 25.60 °C and

the standard deviation of 2.78 and significantly varied in the urban space (see Fig. 7 Variation of LST in Tomsk City).

The Table 8 presents data on the LST across different Land Use/Land Cover (LULC) classes in Tomsk City. It includes the minimum, maximum, mean, and standard deviation of LST for seven distinct LULC classes.

The highest mean LST (29.14 °C) and maximum LST (39.64 °C) are observed in the LULC class 3 [densely built-up areas].

While the lowest mean LST (22.34) is observed over LULC class 1 [water].

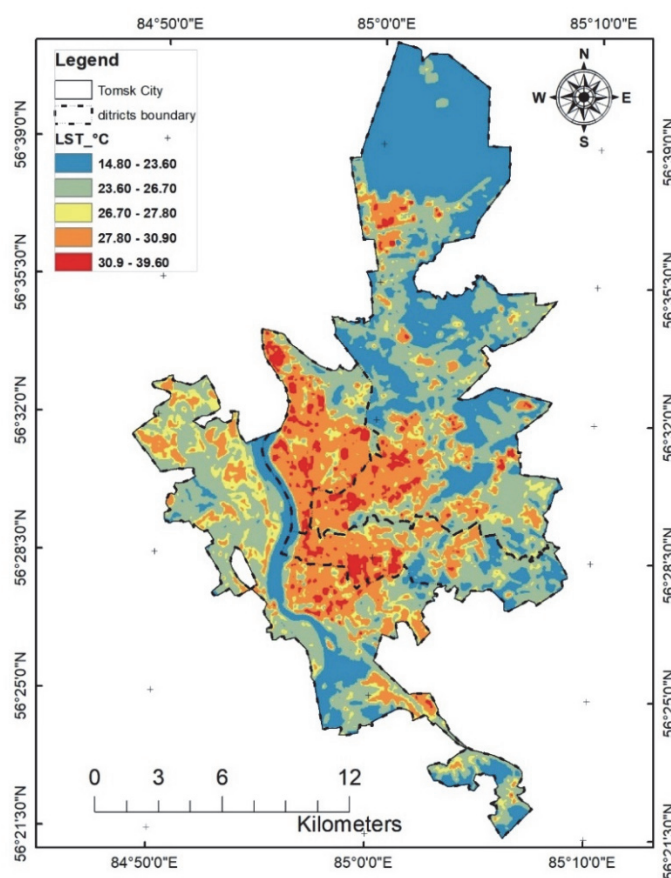


Fig. 7. Variation of LST in Tomsk City

Рис. 7. Изменение LST в городе Томске

Geospatial distribution of LST in LULC classes, created by author using QGIS software

Table 6

Геопространственное распределение LST в классах LULC, создана автором с помощью программного обеспечения QGIS

Таблица 6

LULC Class	1	2	3	4	5	6	7
Min LST °C	21.08	21.4	21.41	21.26	21.9	21.3	21.73
Max LST °C	35.87	34.37	39.64	31.98	34.78	33.03	38.46
Mean LST °C	22.34	23.65	29.14	23.4	27.2	24.75	28.59
Standard deviation	1.34	1.57	1.93	1.46	1.61	1.60	2.07

Note. LULC class 1 – water; 2 – very dense vegetation, forest; 3 – densely built-up areas; 4 – vegetation medium-density; 5 – sparsely built-up, suburban, country houses; 6 – vegetation-grassland, pasture; 7 – soil / bare land.

Примечание. Класс LULC 1 – вода; 2 – очень густая растительность, лес; 3 – густо застроенные территории; 4 – растительность средней плотности; 5 – редко застроенные территории, пригородные, сельские дома; 6 – растительность – луга, пастбища; 7 – почва / голая земля.

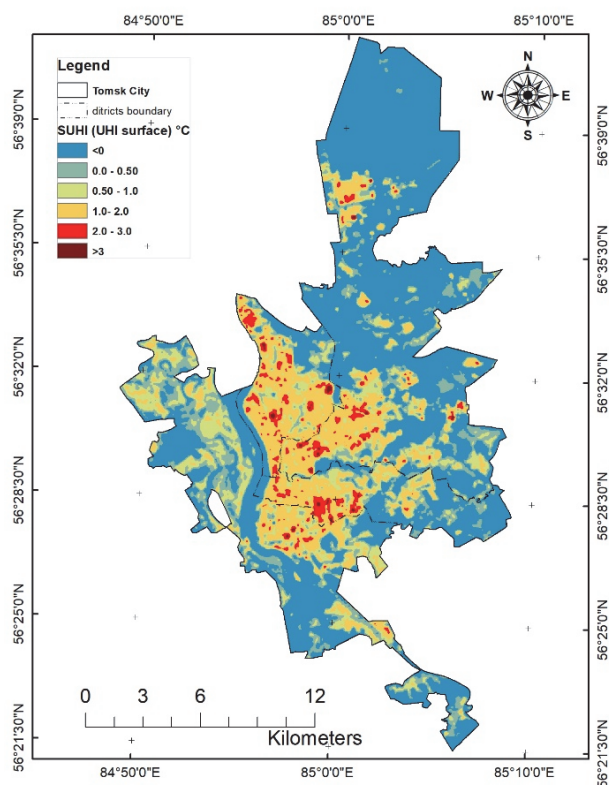
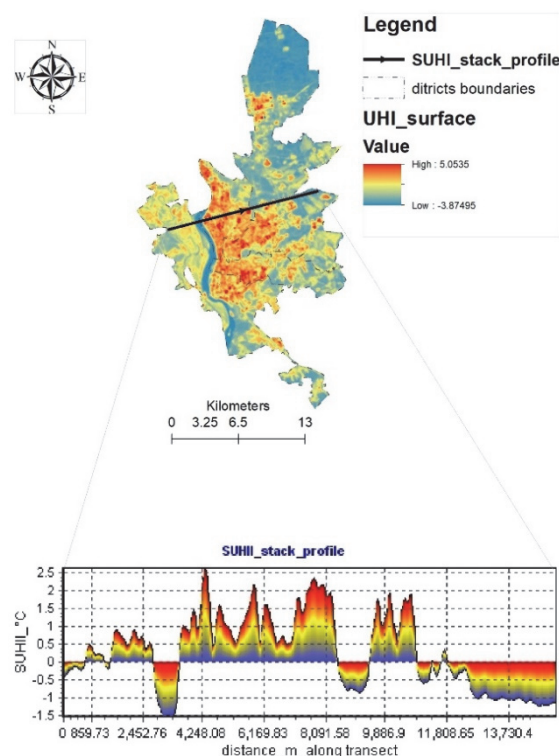
Fig. 8. Spatial variation of SUHI/ UHI_{surface}Рис. 8. Пространственное изменение SUHI/ UHI_{surface}

Fig. 9. Surface urban heat island profile along a transect, Tomsk City

Рис. 9. Профиль городского острова тепла на поверхности вдоль транскты, г. Томск

Table 7

Spatial extent and distribution of SUHI over different land cover types

Таблица 7

Пространственная протяженность и распределение SUHI по различным типам покрова

SUHI index (°C)	<0 [no SUHI]	0.0–0.5	0.5–1.0	1.0–2.0	2.0–3.0	> 3.0 °C
LULC [majority class]	4 vegetation	5 suburban	5 suburban	3 urban	3 urban	3 urban
Extent km ²	160.3953	42.8481	36.0711	48.3687	7.5429	0.4995
% Of study area	54.237	14.489	12.19749	16.35594	2.550	0.168

Spatial distribution of the surface urban heat island (SUHI)

Table 7, provides quantitative data on the extent and distribution of SUHI across various LULC classes. This table highlights quantitatively, how different land cover types contribute to the intensity of the SUHI effect.

While Fig. 9, below complements Table 7 by providing a spatial perspective on how SUHI manifests across the urban landscape not only by land use type but also across geographic locations within Tomsk.

The transect reveals peaks in SUHI corresponding to land covers identified in Table 7 as having high SUHI values, such as urban areas or densely built-up areas.

Fig. 9 also shows a significant temperature decrease at specific points along the transect, this can be correlated

with low values from Table 7, that correspond to specific LULC class (e.g., water).

The SUHI profile along an east-to-west transect typically starts with low values in rural areas at both ends, peaks in the densely built-up urban core, and gradually declines back toward rural zones.

The Fig. 10 presents data on the Mean Surface Urban Heat Island (SUHI) effect and its standard deviation across different Land Use/Land Cover (LULC) classes in Tomsk City. Densely Built Areas (Class 3) exhibit the highest mean SUHI value of 1.27°C, Conversely, Water (Class 1) and Dense Vegetation (Class 2) show negative mean SUHI values of -1.12°C and -0.71°C, indicating a cooling effect. The standard deviation values reflect the variability of the SUHI effect within each LULC class.

Surface urban heat island intensity

Based on methods a and b as described Fig. 4; the surface urban heat island intensity (SUHI intensity) calculated as mean LST differences between urban and suburban areas ranged between 2.0 °C to 3.0°C (see Table 8).

Urban hot spots of LST anomalies (UHS)

Fig. 12, shows that, urban hot spots exhibiting LST anomalies (UHS) were not observed over LULC class 1 (water), LULC class 2 (very dense vegetation/forest)

and LULC class 6 (grassland; pastures; agricultural land).

Complimentary data, from Fig. 13 below indicates that the largest area of UHS is found in Class 3 (densely built-up class), covering approximately 7.24 km², which constitutes 83.12 % of the total UHS identified in this study. The identity of the urban hot spots (UHS) of high LST anomalies include, shopping malls and industrial sites, the Tomsk Cable Plant and Tomsk Concrete mixing Plant, wherein the highest LST of 39.6 °C (see Fig. 14).

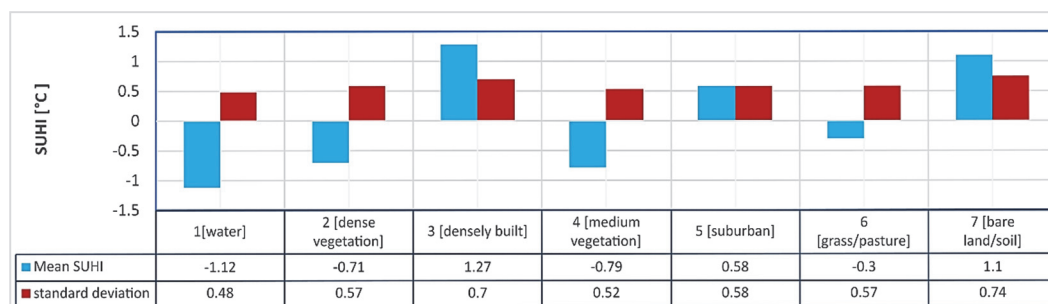


Fig. 10. Distribution of SUHI over land use covers

Рис. 10. Распределение SUHI по землепользованию

Table 8

SUHI intensity

Таблица 8

Интенсивность SUHI

SUHI threshold [method a] from Table 7	Zonal average LST °C	Land use land cover map [method b]	Zonal average LST °C
SUHI > 1 [urban]	29.90	Densely built-up areas	29.14
0 ≤ SUHI < 1 [suburban]	26.91	Sparsely built-up / suburban	27.20
mean LST difference (SUHII)	3.0	Mean LST difference (SUHII)	2.0

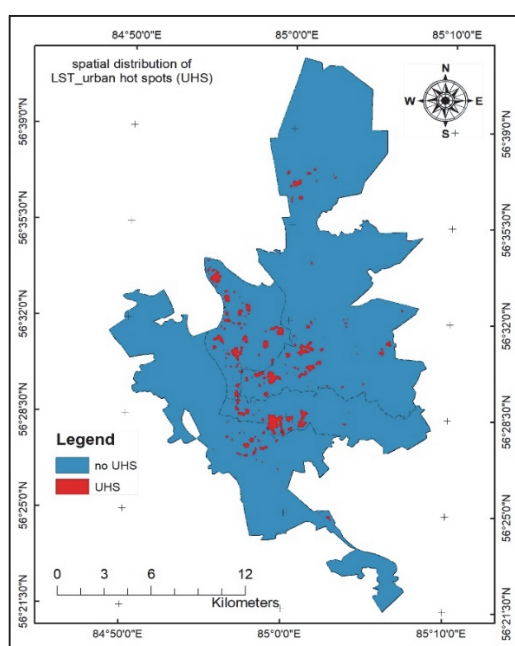


Fig. 11. Geospatial distribution of UHS

Рис. 11. Геопространственное распределение UHS

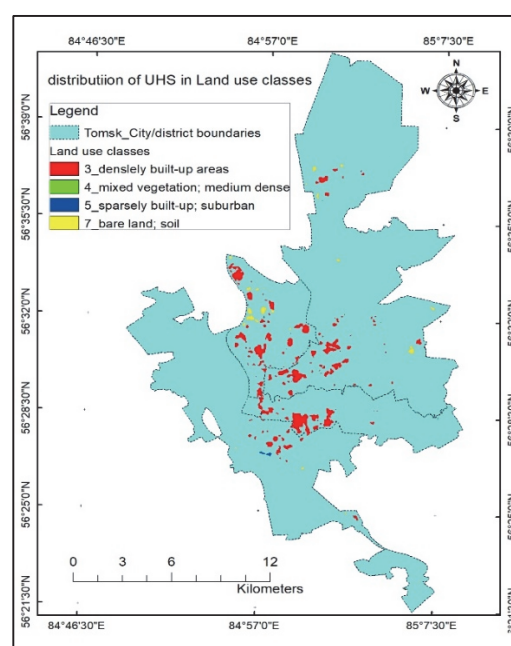


Fig. 12. Spatial distribution of UHS over LULC classes

Рис. 12. Пространственное распределение UHS по классам LULC

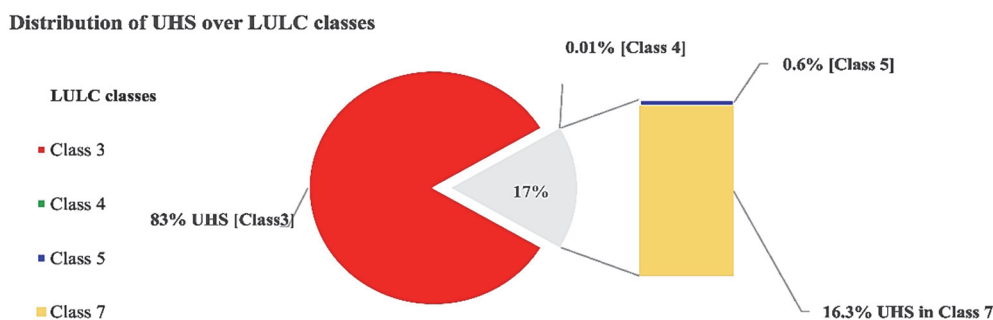


Fig. 13. Distribution of UHS over land use and land cover classes

LULC class 1 – water; 2 – very dense vegetation, forest; 3 – densely built-up areas; 4 – vegetation medium-density; 5 – sparsely built-up, suburban, country houses; 6 – vegetation-grassland, pasture; 7 – soil / bare land

Рис. 13. Распределение UHS по классам землепользования и покрова

Классы LULC: 1 – вода; 2 – очень густая растительность, лес; 3 – густо застроенные районы; 4 – растительность средней плотности; 5 – редкая застройка, пригород, сельские дом; 6 – растительность – луга; пастбища; 7 – почва / голая земля

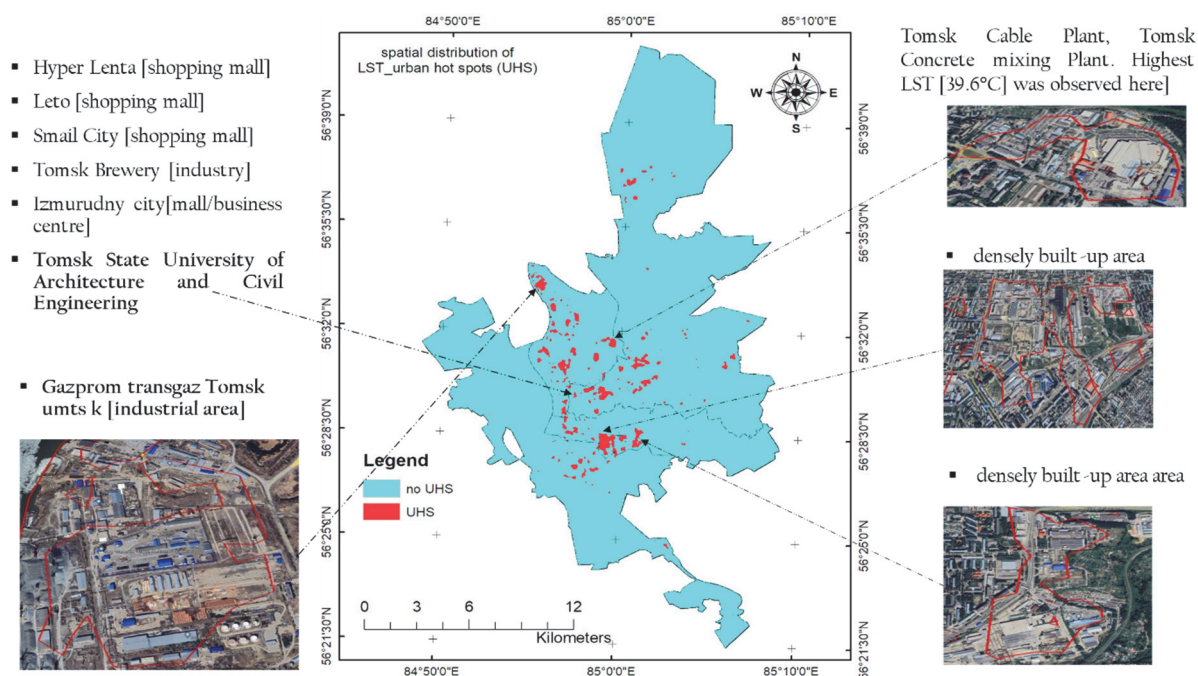


Fig. 14. Urban Hot Spots of land surface temperature anomalies, created by the author using QGIS software

Рис. 14. Городские горячие точки аномалий температуры поверхности земли, создана автором с помощью программного обеспечения QGIS

Discussion

Land surface temperature (LST) distribution

The current study reveals a significant spatial heterogeneity in LST over the study area, wherein higher land surface temperatures were predominantly observed in densely built-up areas and lower land surface temperatures in vegetated and water surfaces [see Table 6 and Fig. 7]. This trend is consistent with previous research [Crum, Jenerette, 2017; Almeida de et al., 2021;

Tepanosyan et al., 2021; Karyati et al., 2022; Korniyenko, Dikareva, 2022; Badugu et al., 2023; García et al., 2023].

The high LSTs in densely built-up areas can be attributed to their thermal properties. Urban surfaces are characterized by a higher proportion of dark and impervious material such as asphalt, concrete, and buildings, which absorb and retain more solar radiation leading to increased surface temperatures [Dudorova, Belan, 2016; Li et al., 2023; Diem et al., 2024; Thammaboribal, 2024]. Conversely, vegetated and water surfaces have a higher capacity to reflect and dissipate

heat efficiently through processes such as evapotranspiration, resulting in lower LST values [Zahir, 2020; Kuzhevskaya, 2021; Costanzini et al., 2022; Gazimov, Hidalgo-García, Arco-Díaz, 2022; Korniyenko, Dikareva, 2022; Le, Bakaeva, 2023; Zhang et al., 2023; Liou et al., 2024].

Significance of findings: high LSTs in densely built-up areas can have public health implications [Cleland et al., 2023; Le, Bakaeva, 2023]. For instance, intensifying the prevalence of heat related deaths and illness (heatstroke, dehydration and cardiovascular diseases) [Hsu et al., 2021]. The lower LST observations in vegetated areas suggest the crucial role that green spaces or vegetation plays in moderating urban temperatures; this suggests incorporating vegetation into urban design can help mitigate the warming effects of impervious surfaces and consequently reduce energy consumption in the urban centres of Tomsk during summer months [Zhou et al., 2019; Almeida de, Teodoro, Gonçalves, 2021].

Surface urban heat island effect and its distribution (SUHI)

The study demonstrates the presence of a surface urban heat island effect (SUHI) [see Fig. 8, Fig. 9 and Table 7] in Tomsk city. The SUHI effect covers a spatial extent of 47.8% of the city, with built-up areas comprising the majority of the pixels [see Table 7]. In contrast, 54.2 % of the city shows no SUHI effect and is dominated by vegetation as the majority land cover type [see Table 7]. This implies that vegetation cover reduces SUHI effect. Densely built-up areas and bare soil or bare land surfaces had the highest mean SUHI effect [see Fig. 10], whereas land covers of vegetation and water had a negative SUHI effect, highlighting the decisive role that vegetation and water surfaces play in moderating urban temperatures.

These geospatial distribution of SUHI observed in this study are consistent with previous studies conducted in various urban settings, such as Moscow, Russia [Le, Bakaeva, 2023], Yerevan, Armenia [Tepanosyan et al., 2021], and Novosibirsk, Russia [Gazimov, Kuzhevskaya, 2021].

The SUHI intensity observed in this study [see Table 8] aligns with observations made by Svarovsky, Starchenko, [2021b], who found a 1–3 °C difference between the urban and suburban areas of Tomsk city in summer season.

The implications of these observations are significant to public health, land use planning and energy consumption. Higher temperatures due to the SUHI effect in the urban setup can lead to decreased thermal comfort, increased energy demand for cooling, especially during the summer months, impacting on both economic costs

and environmental sustainability [Badugu et al., 2023; Cleland et al., 2023; Diem et al., 2024].

Identification of UHS distribution in relation to LULC

The study's findings, as illustrated in Fig. 11 and Fig. 12, indicate Urban Hot Spots (UHS) of LST anomalies in Tomsk city. UHS were predominantly observed over specific land use and land covers (LULC). For instance, 83 % of UHS were observed in densely built-up areas/urbanized areas and 16.3 % in bare soil/ bare land (see Fig. 12, Fig. 13). Furthermore, an absence of UHS over land use classes associated with water bodies and vegetation was noted. This observation aligns with previous research conducted by Hidalgo-García, Arco-Díaz [2022].

Significance and implications of the observations: the comparatively high percentage of UHS found in bare land areas (16.29 %) suggests that even non-urbanized areas can contribute to local heat retention, indicating a need for careful management of these spaces to prevent exacerbating heat effects.

Conclusions

Application of Landsat 8 and Geospatial Techniques for Urban Heat Analysis: the study demonstrates the application of Landsat 8 satellite imagery and geospatial techniques for analysing the geospatial variation of LST and characterising the SUHI effect in Tomsk City, during the summer season of 2023. The research highlights critical insights into how different types of land use and land cover influence urban heat dynamics, which has significant implications for public health and urban planning.

Key findings on LST and SUHI distribution include the fact, that higher LSTs and SUHI effect are predominantly observed in densely built-up or urbanized areas. In contrast, no SUHI effect was observed in 54 % of Tomsk's area, where vegetation dominated the land cover [see Table 6, Fig. 7].

This finding underscores the critical role that green spaces (such as parks, forests, and vegetated areas) and water bodies play in regulating temperature distribution. These natural features help mitigate urban heat by reducing surface temperatures. Hence, by prioritizing green spaces and sustainable land use practices, Tomsk can enhance its resilience against rising temperatures and improve overall quality of life for its residents.

Surface urban heat island (SUHI) Intensity

The observed Surface Urban Heat Island (SUHI) intensity in Tomsk city during the summer reveals a temperature difference of 2–3 °C between urban and

suburban areas [see Table 8]. This indicates a substantial SUHI effect which can have adverse impacts on human health, energy consumption, and the environment. These results can inform on urban planning and decision-making processes for mitigation.

Geospatial distribution of urban hot spots (UHS) displaying high LST anomalies

The study identifies specific areas within Tomsk city that are more vulnerable to heat stress, which can have adverse impacts on human health, energy consumption, and the environment.

The correlation between UHS locations and specific LULC classes underscores a critical urban environmental

issue: densely built-up areas and bare soil areas often lack green spaces or water bodies that could otherwise mitigate heat through processes such as evapotranspiration.

The identification of UHS within Tomsk city, particularly their association with specific LULC types, is crucial for developing effective mitigation strategies aimed at reducing urban heat effects.

Overall, the predominant presence of UHS in densely built-up areas and their absence in vegetation and water surfaces can be applied in urban planning interventions, through incorporating green spaces and water bodies to alleviate heat stress in localities where UHS were most observed.

References

- Almeida C.R. de, Teodoro A.C., Gonçalves A. Study of the urban heat island (Uhi) using remote sensing data/techniques: A systematic review // *Environments* - MDPI. 2021. V. 8, No. 10. doi: 10.3390/environments8100105
- Badugu A. et al. Spatial and temporal analysis of urban heat island effect over Tiruchirappalli city using geospatial techniques // *Geod Geodyn*. 2023. V. 14. No. 3. pp. 275–291. doi: 10.1016/j.geog.2022.10.004
- Chapman S. et al. The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review // *Landsc Ecol*. 2017. V. 32, No. 10. C. doi: 1921–1935. doi: 10.1007/s10980-017-0561-4
- Cleland S.E. et al. Urban heat island impacts on heat-related cardiovascular morbidity: A time series analysis of older adults in US metropolitan areas // *Environ Int*. 2023. V. 178. pp. 108005. doi: 10.1016/j.envint.2023.108005
- Costanzini S. et al. Identification of SUHI in Urban Areas by Remote Sensing Data and Mitigation Hypothesis through Solar Reflective Materials // *Atmosphere* (Basel). 2022. V. 13. 1. doi: 10.1175/JAMC-D-17-
- Crum S.M., Jenerette G.D. Microclimate Variation among Urban Land Covers: The Importance of Vertical and Horizontal Structure in Air and Land Surface Temperature Relationships // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2017. V. 56, No. 9. pp. 2531–2543. doi: 10.1175/JAMC-D-17-
- Diem P.K. et al. Remote sensing for urban heat island research: Progress, current issues, and perspectives // *Remote Sens Appl*. 2024. V. 33. doi: 10.1016/j.rsase.2023.101081
- Dudorova N.V., Belan B.D. *Ocenka faktorov, opredel'jajushih formirovanie gorodskogo ostrova tepla v Tomske* [Estimation of factors determining formation of the urban heat island in Tomsk] // *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and ocean optics]. 2016. V. 29, No. 5. pp. 426–436. In Russian. doi: 10.15372/AOO20160510
- García D.H., Riza M., Díaz J. A. Land Surface Temperature Relationship with the Land Use/Land Cover Indices Leading to Thermal Field Variation in the Turkish Republic of Northern Cyprus // *Earth Systems and Environment*. 2023. V. 7, No. 2. pp. 561–580. doi: 10.1007/s41748-023-00341-5
- Gazimov T.F., Kuzhevskaya I. V. *Ocenka letnego poverhnostnogo gorodskogo ostrova tepla goroda Novosibirsk po dannym Landsat 8* [Assessment of the summer surface urban heat island of the city of Novosibirsk according to Landsat 8 data] // *Geograficheskij vestnik* [Geographical Bulletin]. 2021. V. 4, No. 59. pp. 84–98. In Russian. doi: 10.17072/2079-7877-2021-4-84-98
- Gore R.W. et al. *Analiz zemlepol'zovaniya s ispol'zovaniem nekontroliruemoy klassifikacii* [LULC-Analysis of land-use with the help of unsupervised classification] // *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2020. No. 3. pp. 184–192. In Russian. doi: 10.18522/2311-3103-2020-3-184-192
- Hidalgo-García D., Arco-Díaz J. Modeling the Surface Urban Heat Island (SUHI) to study of its relationship with variations in the thermal field and with the indices of land use in the metropolitan area of Granada (Spain) // *Sustain Cities Soc*. 2022. V. 87. doi: 10.1016/j.scs.2022.104166
- Hsu A. et al. Disproportionate exposure to urban heat island intensity across major US cities // *Nature Communications* 2021 12:1. 2021. V. 12, No. 1. pp. 1–11. doi: 10.1038/s41467-021-22799-5
- Karyati N.E. et al. Application of Landsat-8 OLI/TIRS to assess the Urban Heat Island (UHI) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.: Institute of Physics, 2022. doi: 10.1088/1755-1315/1109/1/012069
- Khorrami B., Gunduz O. Spatio-temporal interactions of surface urban heat island and its spectral indicators: a case study from Istanbul metropolitan area, Turkey // *Environ Monit Assess*. 2020. V. 192, No. 6. doi: 10.1007/s10661-020-08322-1
- Korniyenko S., Dikareva E. Optical Remote Sensing for Urban Heat Islands Identification; 2022; Construction of Unique Buildings and Structures // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022. V. 104. No. 10404. doi: 10.4123/CUBS.104.4
- Le M.T., Bakaeva N.A. Technique for Generating Preliminary Satellite Data to Evaluate SUHI Using Cloud Computing: A Case Study in Moscow, Russia // *Remote Sens* (Basel). 2023. V. 15, No. 13. doi: 10.3390/rs15133294
- Li X., Chakraborty T.C., Wang G. Comparing land surface temperature and mean radiant temperature for urban heat mapping in Philadelphia // *Urban Clim*. 2023. V. 51. doi: 10.1016/j.uclim.2023.101615
- Liou Y.A., Tran D.P., Nguyen K.A. Spatio-temporal patterns and driving forces of surface urban heat island in Taiwan // *Urban Clim*. 2024. V. 53. pp. 101806. doi: 10.1109/TGRS.2023.3285912
- Liu S. et al. Land Use and Land Cover Mapping in China Using Multimodal Fine-Grained Dual Network // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2023. V. 61. pp. 1–19. doi: 10.1109/TGRS.2023.3285912

Moharram M., Sundaram D. Land Use and Land Cover Classification with Hyperspectral Data: A comprehensive review of methods, challenges and future directions // Neurocomputing. 2023. V. 536.

Official Portal of «The city of Tomsk» <http://en.admin.tomsk.ru/> [Electronic resource]. URL: <http://en.admin.tomsk.ru/> (Date of accessed: 01.06.2024).

Peacock R. Accuracy assessment of supervised and unsupervised classification using Landsat imagery of little rock, Arkansas a thesis presented to the department of humanities and social sciences in candidacy for the degree of Master of Science, 2014.

Rakhmanova L. et al. Perspectives of climate change: A comparison of scientific understanding and local interpretations by different Western Siberian communities // Ambio. 2021. V. 50. No. 11. pp. 2072–2089. doi: 10.1007/s13280

Santamouris M. et al. On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings – A review // Energy Build. 2015. V. 98. pp. 119–124.

Siswanto S. et al. Spatio-temporal characteristics of urban heat Island of Jakarta metropolitan // Remote Sens Appl. 2023. V. 32. doi: 10.1016/j.rsase.2023.101062

Svarovsky A.I., Starchenko A.V. Application of a Weather Research and Forecasting model to study the urban heat island in Tomsk // Journal of Physics: Conference Series.: IOP Publishing Ltd, 2021b.

Svarovsky A.I., Starchenko A.V. *Primenenie modeli weather research and forecasting dlya issledovaniya yavleniya «ostrov tepla» dlya usloviy goroda Tomsk* [Application of the Weather Research and Forecasting model to study the “heat island” phenomenon for the conditions of the city of Tomsk] // *xviii mezhdunarodnaja konferenciya studentov, aspirantov i molodyh uchenyh «perspektivy razvitiya fundamental'nyh nauk»* [the XVIII International Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists]: *Nacional'nyy issledovatel'skiy Tomskiy politehnicheskij universitet* [National Research Tomsk Polytechnic University]. 2021a. V. 3. pp. 76–78. In Russian

Tepanosyan G. et al. Studying spatial-temporal changes and relationship of land cover and surface Urban Heat Island derived through remote sensing in Yerevan, Armenia // Build Environ. 2021.

Thammaboribal P. Investigating Land Surface Temperature Variation and Land Use Land Cover Changes in Pathumthani, Thailand (1997–2023) using Landsat Satellite Imagery: A Comprehensive Analysis of LST and Urban Hot Spots (UHS) // International Journal of Geoinformatics. 2024. V. 20. No. 2. pp. 27–41.

ThanushKodi K., Babykalpana Y. Supervised/ Unsupervised Classification of LULC using remotely Sensed Data for Coimbatore city, India, 2010. 975–8887 p.

U.S. Geological Survey. Landsat 8 metadata [Электронный ресурс]. 2023. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (Date of accessed: 14.03.2024).

Young N. E. et al. A survival guide to Landsat pre-processing // Ecology. 2017. V. 98. No. 4. pp. 920–932.

Zahir I. L. M. Application of Geo-informatics Technology to Access the Surface Temperature Using LANDSAT 8 OLI/TIRS Satellite Data: A Case Study in Ampara District in Sri Lanka. 2020.

Zhang J., Tu L., Shi B. Spatiotemporal Patterns of the Application of Surface Urban Heat Island Intensity Calculation Methods // Atmosphere (Basel). 2023. V. 14. No. 10.

Information about the author:

Marimira C., Master's student, Department of Meteorology and Climatology, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: marimira.clyde@gmail.com

The author declares no conflicts of interests.

Информация об автора:

Маримира К., магистрант, кафедра метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: marimira.clyde@gmail.com

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 23.10.2024; одобрена после рецензирования 17.01.2025; принята к публикации 29.08.2025

The article was submitted 23.10.2024; approved after reviewing 17.01.2025; accepted for publication 29.08.2025

Научный журнал

ГЕОСФЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

GEOSPHERE RESEARCH

2025. № 3

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 26.09.2025 г. Формат 60×84¹/₈.
Гарнитура Times. Печ. л. 15,2; усл. печ. л. 14,1.
Тираж 50 экз. Заказ № 6475. Цена свободная.

Дата выхода в свет 10.11.2025 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