

5 (1) 2025

ISSN 2541-9641



ГЕОЛОГИЯ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА



ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Геология и
окружающая
среда

Том 5
№ 1
2025

Geology and
Environment

Преемник Вестника кафедры географии Восточно-Сибирской государственной академии образования

Год основания 2010 г.

Научный электронный журнал

Выходит четыре раза в год

Главный редактор: Примина С.П., канд. геол.-минерал. наук, доцент
Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

Заместители главного редактора: Рассказов С.В., доктор геол.-минерал. наук, профессор
Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия; Сасим С.А., канд. геол.-минерал.
наук, Иркутский государственный университет, доцент, Иркутск, Россия

Ответственный секретарь: Коваленко С.Н., канд. геол.-минерал. наук, Иркутский
государственный университет, Иркутск, Россия

Редакционная коллегия: Акулова В.В., – кандидат геол.-минерал. наук, Институт земной коры СО
РАН, Иркутск, Россия; Баженова О.И. – доктор геогр. наук, профессор, Институт географии СО РАН,
Иркутск, Россия; Бат Б. – доктор философии, профессор, Национальный университет Монголии,
Улан-Батор, Монголия; Борняков С.А. – канд. геол.-минерал. наук, Институт земной коры СО РАН,
Иркутск, Россия; Бычинский В.А. – кандидат геол.-минерал. наук, доцент, Иркутский
государственный университет, Иркутск, Россия; Горячев Н.А. – член-корр. РАН, доктор геол.-
минерал. наук, профессор, Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт
ДВО РАН, Магадан, Россия; Давыденко А.Ю. – доктор физ.-мат. наук, профессор, Иркутский
государственный университет, Иркутск, Россия; Дэмбэрэл С. – доктор геол.-минерал. наук,
академик Монгольской академии наук, Улан-Батор, Монголия; Исаев В.П. – доктор геол.-минерал.
наук, профессор, Иркутский государственный университет, Иркутск; Кононов Е.Е. – кандидат геол.-
минерал. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Иркутск, Россия; Корольков А.Т. – доктор геол.-минерал. наук, доцент, Иркутский государственный
университет, Иркутск, Россия; Никишин А.М. – доктор геол.-минерал. наук, профессор,
геологический факультет МГУ, Москва, Россия; Роговская Н.В. – кандидат геогр. наук, доцент,
Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия; Саньков В.А. – кандидат геол.-минерал.
наук, доцент, Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия; Сие Чжэньхуа – доктор
наук, профессор, Институт вулканов и минеральных источников Академии наук провинции
Хэйлуцзян, Удаляньчи, Китай; Тверитинова Т.Ю. – кандидат геол.-минерал. наук, МГУ; Чувашова
И.С. – кандидат геол.-минерал. наук, Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Адрес редакции:

664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1

Тел.: (3952)243278

Email: kaf-dinamgeol@mail.ru

Сайт: <http://geoenvir.ru>

Сетевое издание «Геология и окружающая среда»

PDF-номер журнала выходит четыре раза в год. Сроки приема статей в:

№ 1 до 1 марта, № 2 до 1 июня, № 3 до 1 сентября, № 4 до 1 декабря

Сроки выхода номеров: № 1 – 31 марта, № 2 – 30 июня, № 3 – 30 сентября,
№ 4 – 31 декабря

Учредитель-издатель: ФГБОУВО «Иркутский государственный университет»

Гл. редактор: С.П. Примина

Регистрирующий орган: Федеральная служба по надзору в сфере

связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Регистрационный номер: ЭЛ № ФС 77-82002, от 24.09.2021

ISSN: 2541-9641

12+

В журнале Геология и окружающая среда публикуются материалы научно-образовательного направления, отражающие теоретические, методические и практические результаты научной деятельности молодых ученых, преподавателей, аспирантов, магистров и бакалавров. Кроме научных статей, в журнале помещаются рецензии и отзывы на монографии, учебники, материалы конференций, тематические обзоры и дается информация о событиях научной и учебной жизни по профилю издания

На первой странице обложки

Ледяной грот в современной конечной морене ледника Ячевского. 09.08.2024. Рисунок из ст. Китова А.Д., Бадминова П.С. Летняя научно-исследовательская экспедиция клуба Портулан в район Пика Топографов

СОДЕРЖАНИЕ

От редколлегии журнала	5
ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ	7
<u>С.В. Снопков, Н.М. Максимов, С.С. Токарева</u> Статистическая физико-геологическая модель Солнцевского угольного месторождения (о. Сахалин) по данным геофизических исследований скважин	7
ЛИТОЛОГИЯ	23
<u>С.В. Рассказов, Т.А. Ясныгина, И.С. Чувашова, А.П. Папаев, С.В. Снопков, Д.И. Парфенов, К.О. Иванов, И.В. Полежаева, М.Е. Калинович</u> Геохимические характеристики лессов Тункинской долины и Окинской впадины, юг Восточной Сибири: сопоставление с геохимическими характеристиками лессов сопредельной Азии	23
ГЕОЭКОЛОГИЯ.....	61
<u>Е.П. Чебыкин, Н.Н. Куликова, А.Н. Сутурин</u> Влияние водных источников на р. Похабаху и прилегающую литораль оз. Байкал	61
МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ.....	100
<u>С.В. Снопков, А.А. Куроленко</u> О влиянии уровня воды в озере Байкал на сейсмическую активность Прибайкалья.....	100
<u>С.В. Рассказов, И.А. Асламов, С.В. Снопков, В.И. Архипенко, А.М. Ильясова, Е.П. Чебыкин</u> Мониторинг подземных вод берега Байкала в режиме реального времени: основной контролирующий фактор возмущений ОВП магнитными бурями в начале 2025 г.....	114
НЕОТЕКТОНИКА, ГЕОМОРФОЛОГИЯ.....	129
<u>С.В. Рассказов, А.М. Ильясова, Е.П. Чебыкин, О.С. Гутарева, С.В. Снопков</u> Современное вовлечение в деформации края Сибирского палеоконтинента в Байкальской рифтовой системе: данные U-N-O-систематики подземных вод.....	129
<u>С.Н. Коваленко</u> Гляциальные морфоскульптуры пика Черского (хр. Хамар-Дабан). Статья 1: введение в проблему	159
УЧЕНЫЕ-ПЕРВОПРОХОДЦЫ.....	183
<u>С.В. Снопков</u> Вклад Ленинградского горного института в развитие геологического образования и изучение геологии Сибири во время Великой Отечественной войны ..	183
<u>С.В. Рассказов</u> От изобретения нового микрофона к фундаментальным разработкам в радиоизотопной геологии: человек науки Сергей Борисович Брандт (к 110-летию со дня его рождения)	196
ЭКСПЕДИЦИИ	217
<u>А.Д. Китов, П.С. Бадминов</u> Летняя научно-исследовательская экспедиция клуба Портулан в район Пика Топографов	217
Правила для авторов	242

© ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»

© Геология и окружающая среда, 2025, Т. 5, № 1

C O N T E N T S

From the editorial board of the journal	5
MINERAL RESOURCES.....	7
<u>S.V. Snopkov, N.M. Maksimov, S.S. Tokareva</u> Statistical Physico-geological Model of the Solntsevo Coal Deposit (Island Sakhalin) According to the Data of Geophysical Well Surveys	7
LITHOLOGY	23
<u>S.V. Rasskazov, T.A. Yasnygina, I.S. Chuvashova, A.P. Papaev, S.V. Snopkov, D.I. Parfenov, K.O. Ivanov, I.V. Polezhaeva, M.E. Kalinovich</u> Geochemical Signatures of Loesses from the Tunka Valley and Oka Basin, South of Eastern Siberia: Comparison with Geochemical Signatures of Loesses from Adjacent Asia	23
GEOECOLOGY.....	61
<u>E.P. Chebykin, N.N. Kulikova, A.N. Suturin</u> The Influence of Water Sources onto the Pokhabikha River and onto the Adjacent littoral of Lake Baikal	62
MONITORING OF NATURAL PROCESSES	100
<u>S.V. Snopkov, A.A. Kurolenko</u> On the Influence of the Water Level in Lake Baikal on Seismic Activity in the Pribaikalye Region	100
<u>S.V. Rasskazov, I.A. Aslamov, S.V. Snopkov, V.I. Arkhipenko, A.M. Ilyasova, E.P. Chebykin</u> Real-Time Monitoring of Redox Potential in Groundwater from the Baikal Coast: The Main Controlling Factor of ORP Disturbances by Magnetic Storms in Early 2025	114
NEOTECTONICS, GEOMORPHOLOGY	129
<u>S.V. Rasskazov, A.M. Ilyasova, E.P. Chebykin, O.S. Gutareva, S.V. Snopkov</u> Present-Day Involvement in Deformations of the Siberian Paleocontinent Margin in the Baikal Rift System: evidence from U-H-O-isotope Systematics of Groundwater	130
<u>S.N. Kovalenko</u> Glacial Morphosculptures of Chersky Peak (Khamar-Daban Ridge). Article 1: Introduction to the Problem.....	159
PIONEERING SCIENTISTS.....	183
<u>S.V. Snopkov</u> The Contribution of the Leningrad Mining Institute to the Development of Geological Education and the Study of the Geology of Siberia during the Great Patriotic War	183
<u>S.V. Rasskazov</u> From New Microphone Invention to Fundamental Developments in Radiogenic Isotope Geology: Man of Science Sergei Borisovich Brandt (to the 110th Anniversary of His Birth).....	196
EXPEDITIONS	217
<u>А.Д. Китов, П.С. Бадминов</u> Summer Research Expedition of the Portulan Club to the Area of the Peak of Topographers.....	217
Rules for authors	242

От редколлегии журнала

В современные университетские образовательные стандарты в качестве важнейшей составляющей учебного процесса включены научные исследования с участием студентов. Чтобы квалификационные бакалаврские и магистерские исследования содержали новые факты и гипотезы, проводится научно-исследовательская практика, организуются молодежные конференции. Работы, выполненные со студенческим азартом, часто представляют интерес для всей геологической науки, но, к сожалению, так и остаются в забвении. Бумажная версия квалификационной бакалаврской и магистерской работы хранится на выпускающей кафедре 5 лет после окончания вуза студентом. Рационально все же закреплять основные достижения и выводы до выхода на защиту квалификационной работы в публикациях, уровень которых должен служить критерием для оценки квалификационной работы рецензентом и аттестационной комиссией.

Публикации студенческих и аспирантских работ в материалах специальных молодежных конференций и школ в России имеют приниженный статус и фактически не решают проблемы подготовки квалификационных работ. Пробриться с самостоятельной публикацией в журнал студенту не реально. Необходимо инициировать и поддерживать взаимодействие между преподавателями и студентами для выявления среди них способных к науке, для развития и закрепления понятий и подходов в организации и проведении научных исследований. Не секрет, что наука в России постарела. На научных конференциях часто присутствуют только пожилые научные работники и преподаватели. Система образования, развитая в западных университетах, позволяет организовывать форумы, в которых участвуют преимущественно аспиранты и студенты бакалаврской, магистерской подготовки. Генеральная ассамблея Европейского союза геологических наук (EGU) ежегодно собирает в Вене около 10-11 тыс. докладов, большинство из которых произносится молодыми людьми, начинающими свой путь в науке.

Издание журнала Геология и окружающая среда – эффективная форма создания условия для повышения качества подготовки специалистов высшей школы. Основное требование для опубликования научной статьи в журнале – авторство или соавторство студента, аспиранта или молодого научного сотрудника. В журнале публикуются материалы научно-образовательного направления, отражающие теоретические, практические результаты и методические разработки молодых геологов и географов – научных сотрудников, преподавателей, аспирантов, студентов магистерской и бакалаврской подготовки. Наряду с исследовательскими статьями, вводится раздел «События».

Исследования геологии и окружающей среды рассматриваются в настоящее время как приоритетные. В университетах разных стран созданы факультеты, имеющие конкретную тематическую направленность на изучение геологии окружающей среды. Издаются международные журналы *Environmental Earth Sciences* (Университет Питсбурга, штат Пенсильвания, США) и *Geology, Geophysics and Environment* (AGH Научно-технический университет им. Станислава Сташица, Краков, Польша). Журнал Геология и окружающая среда (*Geology and Environment*) ориентирован, прежде всего, на освещение вопросов, касающихся этой тематики в Байкало-Монгольском регионе и в сопредельных районах Азии.

Геологический факультет Иркутского госуниверситета как базовый для издания журнала Геология и окружающая среда многие годы проводит учебные, производные и научно-исследовательские практики в южной части Сибирской платформы и в сопредельном Хамардабанском террейне, который был аккрегирован к краю платформы в раннем палеозое. Студентам демонстрируются разновозрастные комплексы осадочных, магматических и метаморфических пород от раннеархейского до позднекайнозойского возраста, породы Слюдянского метаморфического субтеррейна, содержащего множество уникальных минералов, карьеры и шахты месторождений угля и соли, молодые вулканы и минеральные источники. Непосредственно на обнажениях освещаются вопросы новейшей геодинамики и тектоники Байкальской рифтовой системы, в которой ярко проявился процесс континентального рифтогенеза,

частично в сочетании с орогенезом. Демонстрируются сейсмодислокации, оставшиеся после сильных землетрясений. Проводится серия маршрутов по выходам венд-кембрийских пород, служащих в качестве вмещающей среды для газоконденсатных месторождений Сибирской платформы. Организуются наблюдения выходов нефти и газа из позднекайнозойского осадочного заполнения Южно-Байкальской рифтовой впадины. Многогранный природный учебный полигон Прибайкалья создает все необходимые условия для наглядного преподавания геологических дисциплин в сочетании с развитием студенческих и аспирантских исследований геологии и окружающей среды.

В рамках решения задач опубликования материалов квалификационных исследований, связанных с изданием журнала Геология и окружающая среда, редколлегия приглашает к сотрудничеству профессоров и преподавателей из университетов Байкало-Монгольского региона и из других российских и зарубежных организаций. В качестве одного из учредителей журнала выступает Китайско-Российский исследовательский центр Удаляньчи–Байкал по новейшему вулканизму и окружающей среде (сайт: <http://www.crust.irk.ru/crc/>). Издание осуществляется на русском языке.

ТЕМАТИКА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ СТАТЕЙ

- Региональная геология
- Полезные ископаемые
- Минералогия, петрология
- Геология нефти и газа
- Литология
- Вулканизм, новейшая геодинамика
- Неотектоника, геоморфология
- Гидрогеология, инженерная геология
- Экологическая геофизика
- Геоэкология
- Физическая и экономическая география
- Мониторинг природных процессов
- Безопасность жизнедеятельности
- Ученые-первопроходцы
- Научная, профессиональная, учебная и педагогическая практика
- Обзоры

ТЕМАТИКА СОБЫТИЙНЫХ СТАТЕЙ

- Рецензии
- Экспедиции
- Полевые практики
- Конференции
- Юбилеи

ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ

УДК 553.94; 550.8.04: 550.832

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2025.1.7>EDN: [BLSTPQ](#)**Статистическая физико-геологическая модель Солнцевского угольного месторождения (о. Сахалин) по данным геофизических исследований скважин**С.В. Снопков^{1,2}, Н.М. Максимов¹, С.С. Токарева¹¹*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*²*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

Аннотация. Геофизические исследования скважин являются основным методом выделения угольных пластов при изучении геологического разреза. На примере Солнцевского угольного месторождения показана эффективность использования статистического анализа при интерпретации данных ГИС. Проведенная статистическая обработка данных позволила более корректно выделить петрофизические комплексы, представленные в геологическом разрезе. Сформированная статистическая физико-геологическая модель геологического разреза месторождения позволила рекомендовать дополнительные способы интерпретации геофизических данных.

Ключевые слова: угольные месторождения, геофизические исследования скважин, статистический анализ, петрофизический комплекс, физико-геологическая модель, статистические методы интерпретации геофизических данных

Statistical Physico-geological Model of the Solntsevo Coal Deposit (Island Sakhalin) According to the Data of Geophysical Well SurveysS.V. Snopkov^{1,2}, N.M. Maksimov¹, S.S. Tokareva¹¹*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*²*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

Abstract. Geophysical studies of wells are the main method of extracting coal seams when studying a geological section. Using the example of the Solntsevsky coal deposit, the effectiveness of using statistical analysis in interpreting geophysical data is shown. The statistical processing of the data made it possible to more correctly identify the petrophysical complexes represented in the geological section. The formed statistical physico-geological model of the geological section of the deposit allowed us to recommend additional ways of interpreting the geophysical data.

Keywords: coal deposits, geophysical studies of wells, statistical analysis, petrophysical complex, physico-geological model, statistical methods of interpretation of geophysical data

Статья получена: 23.01.2025; исправлена: 12.02.2025; принята: 14.02.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Снопков С.В., Максимов Н.М., Токарева С.С. Статистическая физико-геологическая модель Солнцевского угольного месторождения (о. Сахалин) по данным геофизических исследований скважин // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 1. С. 7–22. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.7. EDN: [BLSTPQ](#)

Article received: 23.01.2025; corrected: 12.02.2025; accepted: 14.02.2025.

FOR CITATION: Snopkov S.V., Maksimov N.M., Tokareva S.S. Statistical physico-geological model of the Solntsevo coal deposit (Island Sakhalin) according to the data of geophysical well surveys // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 7–22. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.7. EDN: [BLSTPQ](#)

Введение

Одними из важнейших методов изучения геологического разреза являются геофизические исследования скважин (ГИС), которые

позволяют проводить детальное литологическое расчленение разреза, выявлять и изучать интервалы полезных ископаемых.

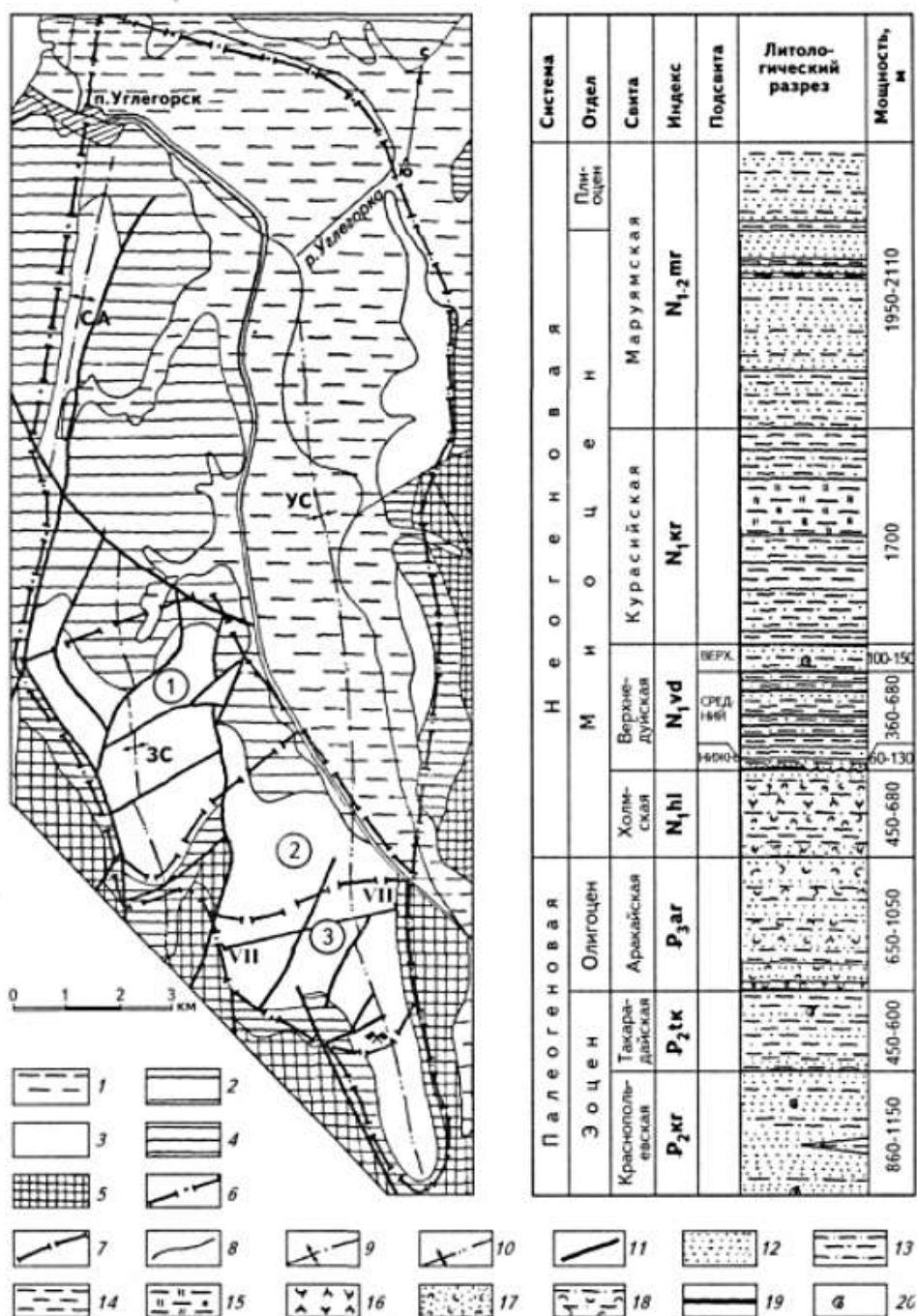


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Солнцевского месторождения. (1) – участок «Центральный»; (2) – вторая очередь участка «Южный»; (3) – первая очередь участка «Южный». Отложения: 1 – современные (Q_{VI}); 2 – кураийской свиты (N_{1kr}); 3 – верхнедуйской свиты (N_{1vd}); 4 – холмской свиты (N_{1hl}); 5 – аракайской свиты (P_{3ar}); 6 – граница месторождения; 7 – граница участка; 8 – границы свит; 9 – оси антиклиналей; 10 – оси синклиналей; 11 – разрывные нарушения. К стратиграфической колонке: 12 – песчаники; 13 – алевролиты; 14 – аргиллиты; 15 – опоконидные алевролиты; 16 – туффиты; 17 – туфогенные песчаники; 18 – туфогенные алевролиты; 19 –

пласты угля; 20 – фаунистические остатки. Структуры: СА – Соболевская антиклиналь; УС – Углегорская синклиналь; ЗС – Западная синклиналь (Угольные..., 1999).

Fig. 1. Schematic geological map of the Solntsevo deposit. (1) – the Central section; (2) – the second stage of the Southern section; (3) – the first stage of the Southern section. Deposits: 1 – modern (Q_{VI}); 2 – Kurasi formation (N_{1kr}); 3 – Verkhneduy formation (N_{1vd}); 4 – Kholm formation (N_{1hl}); 5 – Arakai formation (P_{2ag}); 6 – deposit boundary; 7 – site boundary; 8 – formation boundaries; 9 – axes anticlines; 10 – axes of synclines; 11 – discontinuous faults. Stratigraphic column: 12 – sandstones; 13 – siltstones; 14 – mudstones; 15 – buttock-shaped siltstones; 16 – tuffites; 17 – tuffogenic sandstones; 18 – tuffogenic siltstones; 19 – coal beds; 20 – faunal remains. Structures: СА – Sobolevskaya anticline; УС – Uglegorsk syncline; ЗС – Western syncline (Coal..., 1999).

Несмотря на то, что существуют типовые комплексы методов ГИС для изучения различных типов полезных ископаемых, а также стандартизированные подходы к интерпретации результатов, каждый геологический объект имеет свои особенности и, следовательно, требует корректировки методики геологической интерпретации данных ГИС.

Месторождение приурочено к Углегорской синклинали, осложненной складками второго порядка — Восточной и Западной

синклиналями, разделенными Центральным антиклинальным поднятием. Антиклинальное поднятие разделяет участки «Центральный» и «Южный». Восточная синклиналь в пределах участка «Южный» имеет длину около 6 км, ширину от 1.2 до 3 км. Западное крыло складки залегает относительно полого ($20-40^\circ$), восточное крыло — круто ($70-80^\circ$). Днище складки пологое и осложнено разрывными нарушениями (рис. 2).

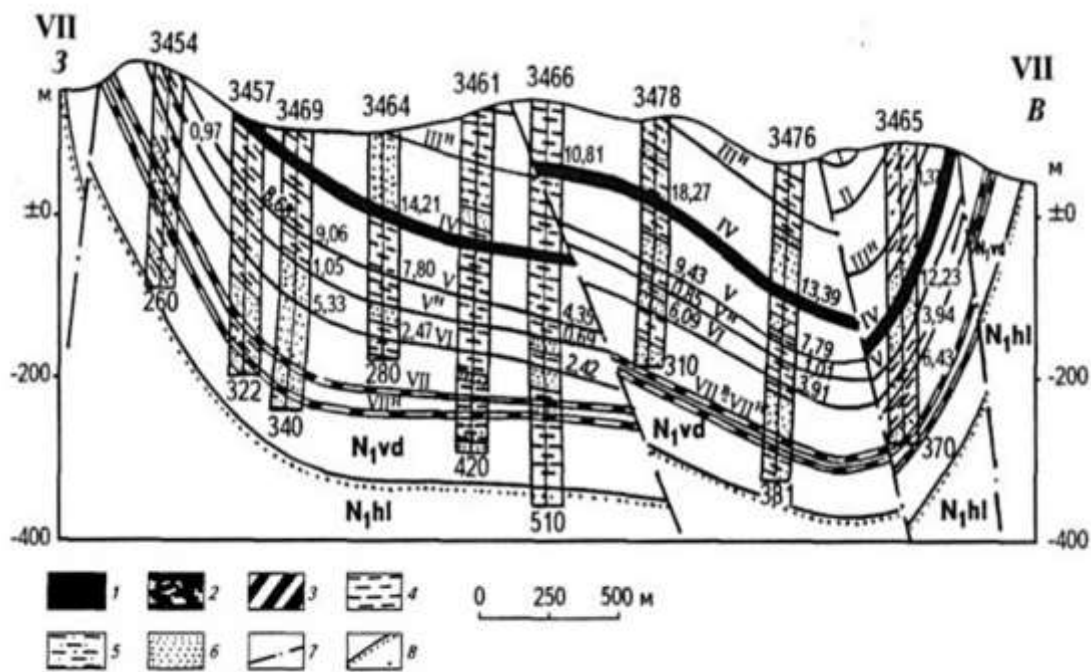


Рис. 2. Схематический геологический разрез Восточной синклинальной складки по линии VII–VII (участок Южный II Солнцевского месторождения). 1 – угли; 2 – зольные угли; 3 – углистые аргиллиты; 4 – аргиллиты; 5 – алевролиты; 6 – песчаники; 7 – тектонические разрывы; 8 – стратиграфические контакты. Положение линии разреза показано на рис. 1 (Угольные..., 1999).

Fig. 2. Schematic geological section of the Eastern synclinal fold along line VII–VII (Yuzhny II site of the Solntsevo deposit). 1 – coals; 2 – ash coals; 3 – carbonaceous mudstones; 4 – mudstones; 5 – siltstones; 6 – sandstones; 7 – tectonic faults; 8 – stratigraphic contacts. The position of the cut line is shown in Fig. 1 (Coal..., 1999).

Залежи бурых углей были открыты в 30-е годы XX столетия японскими геологами во

время крупномасштабных геологических съемок. Впервые площадь месторождения

оконтурена в результате специализированной съемки в 1949 г., начиная с 1975 года на месторождении велись целенаправленные поисковые и разведочные работы. По результатам этих работ были детально изучены и расчленены палеогеновые и неогеновые отложения района.

В геологическом строении месторождения участвуют осадочные и вулканогенно-осадочные отложения палеогенового, неогенового и четвертичного возрастов. Угли залегают в верхнедуйской свите миоцена (N_{1vd}), которая представлена пресноводно-континентальными отложениями, сменяющимися вверх по разрезу прибрежно-морскими. Угленосная свита сложена песчаниками, алевролитами и аргиллитами; содержит 12 пластов угля, 8 из которых имеют промышленное значение. Мощность пластов изменяется от 1.60 до 17.90 м (Угольные..., 1999).

Ископаемые угли Солнцевского месторождения относятся к группе гумолитов, образовавшихся из продуктов преобразования отмерших высших растений в условиях автохтонного их накопления. Угли всех угольных пластов полублестящие, блестящие, полуматовые. Угли бурые, переходные к каменным; характеризуются следующими показателями качества: зольность – 3.5–30.5 %, плотность – от 1.42 до 1.63 г/см³, влага аналитическая – 1.4–15.4%, выход летучих веществ – 40.1–56.6 %, содержание серы – 0.12–1.84 %, теплотворная способность – 6027–7442 ккал/кг (Угольные..., 1999).

Запасы угля на месторождении превышают 300 млн т. На Центральном участке отработка угля велась шахтным способом с 1928 по 1948 гг. С 1982 г., начата добыча угля карьерным способом разрезом «Никольский» ЗАО «Углегорскуголь». С ноября 1997 г. отработка угля на месторождении производится Солнцевским углеразрезом АО «Угольная корпорация Сахалина». Месторождение имеет большие перспективы для эксплуатации как шахтным, так и карьерным способом (Угольные..., 1999).

В настоящее время идет активная разведка месторождения. Бурение скважин сопровождается комплексными каротажными исследованиями.

Комплекс ГИС, применяемый на месторождении

Геофизические исследования скважин решают следующие геологические задачи: 1) литологическое расчленение разреза; 2) выявление интервалов углей и углистых пород; 3) оценка зольности углей.

Типовой комплекс ГИС включает: каротаж сопротивлений (КС), с применением последовательного градиент-зонда (А 1.0 М 0.1 N); боковой токовый каротаж (БТК); каротаж потенциала собственной поляризации (ПС), с применением градиент-зонда (М 0.1 N); гамма-каротаж (ГК); гамма-гамма каротаж плотностной (ГГКп); гамма-гамма каротаж селективный (ГГКс).

Электрический каротаж выполняется с помощью регистратора «ВУЛКАН V3», который позволяет измерять и преобразовывать в цифровую форму сигналы, принимаемые от скважинной геофизической аппаратуры и наземных датчиков контроля спускоподъемных операций. Радиоактивный каротаж выполняется с помощью аппаратуры «Кура 2М».

Метод КС не применяется для исследований в «сухих» скважинах, но поскольку на Солнцевском месторождении уровень подземных вод высокий, то метод, в комплексе с БТК, используется для определения удельного электрического сопротивления горных пород (УЭС). Бурые угли выделяются более высокими значениями УЭС по сравнению с глинами, глинистыми породами и песками, насыщенными водой.

Боковой токовый каротаж специально разработан для углеразведочных скважин, как для сухих, так и заполненных буровым раствором либо водой. Зонд БТК состоит из центрального измерительного электрода A_0 (длиной 2 см), и 2-х экранных электродов $A_{Э1}$ и $A_{Э2}$, (длиной 75 см каждый). Все электроды разделены изоляционными промежутками, шириной 2 см. Регистрирующий прибор измеряет силу тока, протекающего через измерительный электрод A_0 . Так как все электроды соединены последовательно, то их электрический потенциал одинаков и ток с электрода A_0 вынужден растекаться перпендикулярно оси скважины. Диаграммы БТК расчленяют разрез скважин по величине УЭС

и позволяют выделять угольные слои мощностью от 3–5 см и более. Определение УЭС в методе КС отличается от БТК тем, что в первом случае ток течёт поперек пласта (параллельно оси скважины), во-втором – вдоль (перпендикулярно оси скважины). Совместная интерпретация КС и БТК позволяет более уверенно дифференцировать разрез по УЭС.

Метод ПС основан на изучении естественных электрических полей, возникающих на границе горных пород и бурового раствора. Возникновение естественных электрических полей в скважине, связано либо с процессами фильтрации и диффузии флюидов по поровому пространству горных пород, либо с окислительно-восстановительными реакциями, протекающими в электронных проводниках. Аномалии ПС напротив угольных пластов вызваны окислительно-восстановительными реакциями. Пористые водонасыщенные породы создают фильтрационно-диффузионные потенциалы, выражающиеся в виде слабых знакопеременных аномалий.

Гамма-каротаж измеряет естественную радиоактивность исследуемых горных пород. В геологическом разрезе Солнцевского месторождения наиболее высокими значениями интенсивности гамма-квантов (J_γ) обладают глинистые породы (аргиллиты). Угли имеют самые низкие значения J_γ и достаточно уверенно выделяются в разрезе по ГК.

Плотностной гамма-гамма-каротаж основан на изучении комптоновского рассеяния γ -квантов в горных породах и позволяет определять плотность горных пород. Так как уголь обладает гораздо более низкой плотностью по сравнению с вмещающими породами, то ГГКп может рассматриваться как прямой метод выделения угольных интервалов. Плотность углей составляет 1.15–1.75 г/см³, что значительно ниже плотности песчано-глинистых вмещающих пород – 2.5–2.7 г/см³. Интенсивность потока вторичных гамма-квантов ($J_{\gamma\gamma}$) обратно пропорциональна плотности, поэтому менее плотные породы выделяются повышением значений $J_{\gamma\gamma}$.

Селективный гамма-гамма-каротаж основан на изучении эффекта фотопоглощения γ -квантов в горных породах. На угольных

месторождениях ГГКс применяется для определения зольности углей. Чистый уголь имеет $Z_{эф} \approx 6$ ($Z_{эф}$ – эффективный порядковый номер). Негорючий остаток углей (зола) состоит, в основном, из кремнезема и глинозема с примесью окислов железа, и имеет $Z_{эф}$ равный 12–13 единиц.

Пример каротажной диаграммы комплекса методов ГИС и геологической интерпретации каротажных данных показан на рис. 3.

Важным элементом для определения последовательности и характера интерпретационных процедур является построение физико-геологической модели (ФГМ) объекта геофизических исследований. Методология построения ФГМ была предложена Г.С. Вахромеевым и развита в трудах А.Ю. Давыденко (Вахромеев и др., 1987; Вахромеев и др., 1989).

На рис. 3, фактически, показана ФГМ геологического разреза. Интервалы углей и углистых пород выделяют по понижению значений ГК и повышению значений ГГКп и ГГКс. Угли отличаются от углистых пород повышенными значениями УЭС и понижением регистрируемого тока по КС и БТК, соответственно. На диаграммах ПС (градиент-зонд) угольные и углистые пласты выделяются знакопеременной аномалией, экстремумы которой находятся в районе границ толщи. На диаграммах КС (градиент-зонд) более четко определяются границы угольного пласта по экстремумам аномалии УЭС. Литологическое расчленение вмещающих пород – разделение толщ аргиллитов и алевролитов – производится, в основном, по ГК. Оценка зольности углей осуществляется по данным ГГКс.

Статистическая геологическая геологического разреза

физико- модель

Одним из способов представления объекта исследования являются статистические ФГМ, которые используются в том случае, когда горные породы слабо дифференцируются по физическим свойствам или в физических полях. Последовательность процедур при формировании статистической ФГМ включает: 1) разделение геологического

пространства на ряд геологических объектов; 2) выбор эталонных участков (интервалов скважины) для каждого из выделенных объектов; 3) расчет статистических характеристик физических полей по выбранным

эталонным участкам для каждого геологического объекта; 4) анализ полученных статистических характеристик и формирование ФГМ (Вахромеев и др., 1989, с. 38–39).

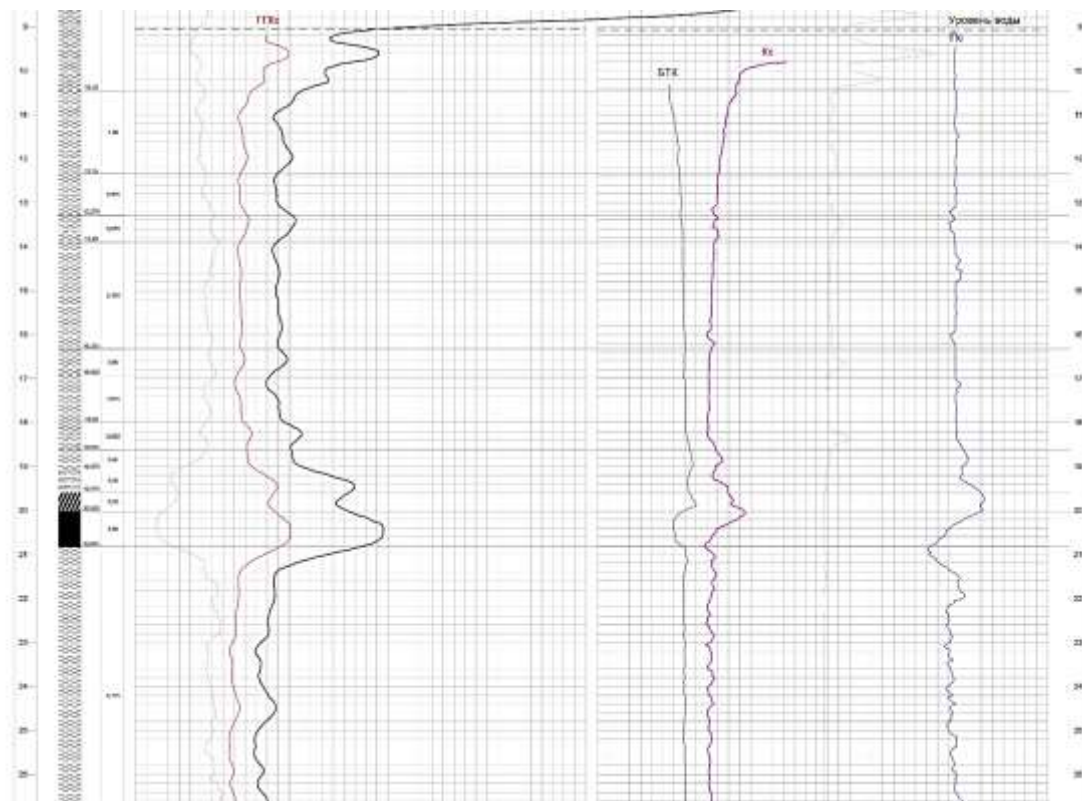


Рис. 3. Фрагмент диаграммы геофизических исследований и геологической интерпретации данных по скв. 25–37 (участок Южный II, Солнцевское месторождение). Масштаб 1:200. Каротажные кривые слева направо: ГК; ГГКс; ГГКп; БТК; КС; ПС.

Fig. 3. Fragment of the diagram of geophysical studies and geological interpretation of data for sq. 25–37 (Yuzhny II site, Solntsevskoye field). Scale 1:200. Logging curves from left to right: GL; GGLs; GGLd; SCL; LR; SEP.

Как показано выше, в рамках детерминированной ФГМ геологического разреза Солнцевского месторождения, по данным ГИС уверенно выделяются только угли, а вот дифференциация углистых, глинистых и песчаных пород происходит неоднозначно. Чтобы повысить эффективность решения геологических задач с помощью комплекса ГИС авторами был проведен статистический анализ каротажных данных и сформирована статистическая ФГМ геологического разреза.

Для анализа были использованы результаты ГИС по двум скважинам: № 25–37 (диаметр – 89 мм, глубина 41 м) и № 25–79 (диаметр – 89 мм, глубина 50 м). Каротажные работы были выполнены в марте 2024 года.

Данные были собраны во время производственной практики магистрантом ИГУ Максимовым Н.М.

Этапы построения статистической ФГМ включали:

- определение литологических типов, встречающихся в разрезе месторождения;
- выделение интервалов скважин, представленных каждым литологическим типом;
- выбор значений геофизических параметров для интервалов, представленных определенным типом горных пород;
- оценка характера распределения геофизических параметров и выявление петрофизических таксонов (ПФТ) по выборкам для каждого литологического типа (ПФТ –

совокупность горных пород одного литологического типа, имеющая квазиоднородные физические свойства);

- выделение групп горных пород квазиоднородных по физическим свойствам – петрофизических комплексов (ПФК), и расчет статистических характеристик геофизических параметров для них; (Вахромеев Г.С. и Давыденко А.Ю. предложили подобные совокупности пород называть структурно-вещественными комплексами (СВК) (Вахромеев и др., 1989, с. 16), однако, по мнению авторов, название «петрофизический комплекс» более корректно отражает смысл этих совокупностей);
- построение ФГМ и определение последовательности интерпретационных процедур.

Формирование выборок данных по комплексу ГИС для различных типов горных пород

По геологическому описанию разрез представлен пятью типами горных пород: алевролиты, аргиллиты, углистые аргиллиты, уголь зольный, уголь. По документации скважин 25–37 и 25–79 были выбраны интервалы глубин, которые по описанию керна соответствуют перечисленным типам горных пород.

Для каждого типа горных пород по интервалам были выбраны значения геофизических параметров. Из всего комплекса ГИС (ГК, ГГКп, ГГКс, КС, БТК, ПС) для анализа были использованы только 3 метода: ГК, ГГКп и БТК. Данные ГГКс были исключены, так как кривые этого метода полностью дублируют кривые ГГКп – коэффициент корреляции равен 1(!). Также не использовались данные КС и ПС, поскольку измерения в этих методах выполнялись градиент-зондами, которые более контрастно выделяют участки резкого изменения физических свойств разреза. Аномалии КС и ПС градиент-зондами

для пластов дают знакопеременные аномалии, что не позволяет четко определять характерные значения физических параметров для определенного литологического типа.

Выборки значений физических параметров методов ГК, ГГКп и БТК составляли от 30 до 370 значений (аргиллиты – 370, алевролиты – 163, углистые аргиллиты – 30, зольные угли – 35, угли – 41). Разный размер выборок связан с неравномерностью присутствия в разрезе разных типов горных пород. Наименьший размер имеет выборка значений по углям и углистым породам.

Выявление петрофизических таксонов

Для корректного расчета статистических характеристик необходимо оценить характер распределения данных в выборке. Характер распределения значений физических параметров, полученных по ГИС, оценивался путем построения гистограмм (Дэвис Дж., 1977). Диапазон изменения физического параметра брался совокупно для всех типов горных пород и разбивался на одинаковые интервалы. Затем подсчитывалась частота попаданий значений в каждый интервал.

На рис. 4, 5, 6 показаны гистограммы геофизических параметров по ГК, ГГКп и БТК (соответственно) отдельно для различных литологических типов и суммарно для всех.

Оценка соответствия выборки геофизического параметра нормальному распределению была выполнена с помощью метода Е.И. Пустыльника, который заключается в расчете показателей асимметрии (A) и эксцесса (E) для каждой выборки, и сравнении их с критическими значениями. Если модуль эмпирических величин A и E не превышает критического значения, то выборка не противоречит нормальному распределению значений параметра (Пустыльник, 1968, с. 152–155).

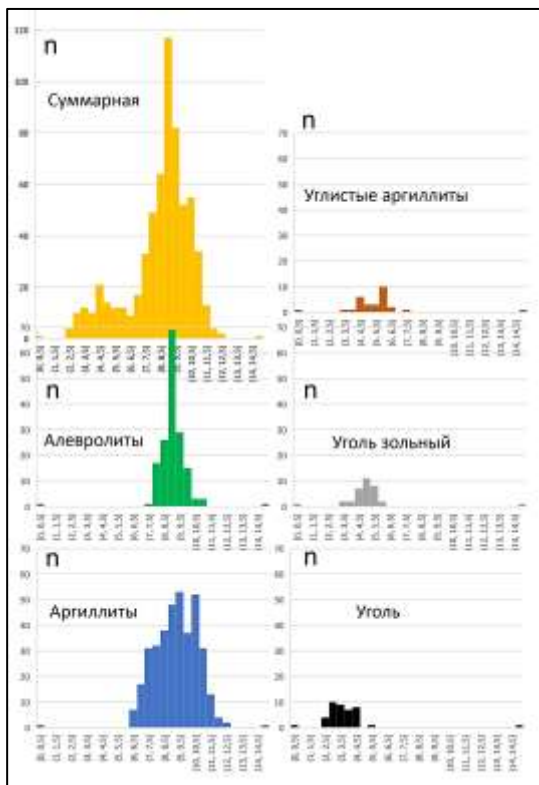


Рис. 4. Гистограммы интегральной радиоактивности (ГК) для различных литотипов.

Fig. 4. Histograms of integral radioactivity (GL) for various lithotypes.

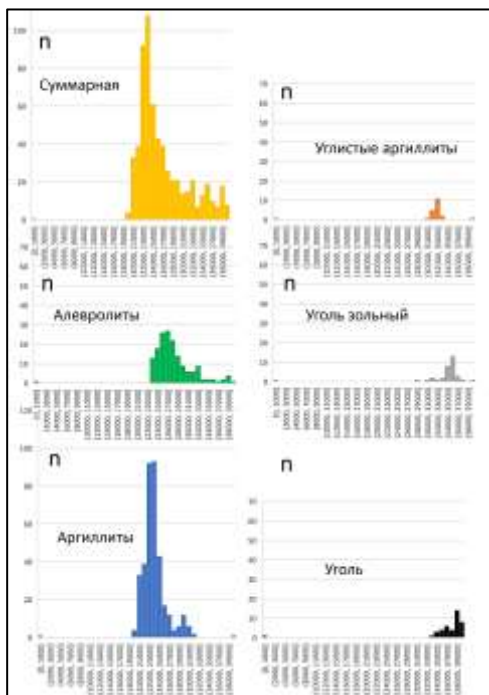


Рис. 5. Гистограммы интенсивности вторичных гамма-квантов (ГГКп) для различных литотипов.

Fig. 5. Histograms of integral radioactivity (GGLd) for various lithotypes.

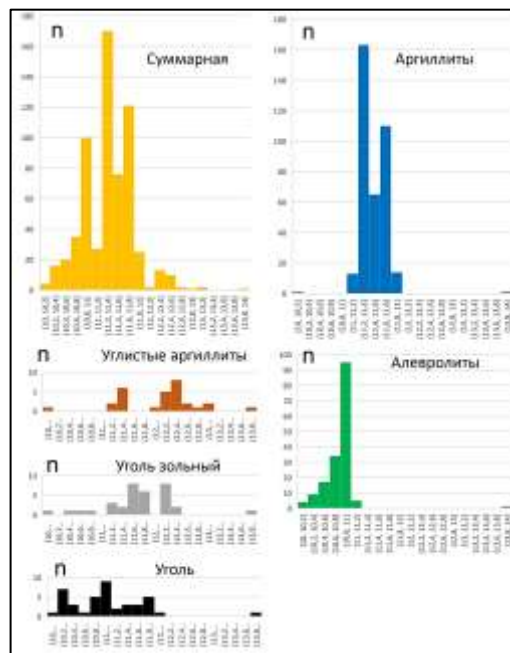


Рис. 6. Гистограммы силы тока (БТК) для различных литотипов.

Fig. 6. Histograms of integral radioactivity (SCL) for various lithotypes.

Характер гистограмм (рис. 4) показал, что для всех литотипов характерно распределения величин не противоречит нормальному только у ГК. Для ГГКп наблюдается более сложный характер распределения: у аргиллитов двухмодальное распределение; у алевритов, аргиллитов, углистых аргиллитов и зольных углей выборки не соответствуют нормальному распределению. По данным БТК также имеет место более сложное распределение изучаемого параметра (чем разделение на 5 литотипов). Аргиллиты, углистые аргиллиты, зольный уголь имеют двухмодальное распределение, а угли – трехмодальное.

Анализ гистограмм (по модальным интервалам) позволяет выделить 5 ПФТ по ГК; 6 по ГГКп; 10 по БТК. Это свидетельствует о том, что разрез представлен большим количеством петрофизических таксонов, по сравнению с числом выделенных литотипов. То есть, в рамках одного типа горных пород могут выделяться 2–3 петрофизических таксона. При этом таксоны, выделяемые по

одному геофизическому параметру, могут не соответствовать ПФТ по другому каротажному методу. Также нельзя исключать того, что сложность распределения геофизических данных предопределена неточностью описания керна и его привязки по глубине. В этом случае, горные породы с физическими свойствами, характерными для одного ПФТ, могут попасть в выборку другого таксона.

Таким образом, проведенный анализ показал, что первоначально сформированные по литологическим признакам группы пород не соответствуют совокупностям, выделенным по геофизическим данным. При этом, в случае двух- (и более) модальных распределений разделить выборку на отдельные ПФТ достаточно проблематично.

Таблица 1

Эмпирические значения асимметрии (A) и эксцесса (E) для выборок различных литотипов по ГК, ГГКп и БТК

Table 1

Empirical values of asymmetry (A) and kurtosis (E) for samples of various lithotypes according to GL, GGLd and SCL

Статистики	Алевриты	Аргиллиты	Углистые аргиллиты	Зольный уголь	Уголь	Все горные породы
ГК						
Кол-во значений (n)	163	370	30	35	41	639
Асимметрия (A)	0.40	-0.08	0.06	-0.58	0.37	0.61
Эксцесс (E)	0.26	-0.78	-0.05	-0.23	-0.57	-1.05
ГГКп						
Кол-во значений (n)	163	370	30	35	41	639
Асимметрия (A)	1.24	2.06	1.55	-1.47	-0.83	1.09
Эксцесс (E)	1.32	1.33	1.46	2.28	-0.12	0.18
БТК						
Кол-во значений (n)	163	370	30	35	41	639
Асимметрия (A)	-1.35	0.26	-0.38	-0.92	0.11	0.21
Эксцесс (E)	1.38	-1.29	-1.07	0.94	-1.04	0.85

* Желтым фоном выделены значения, превышающие критические.

Выделение петрофизических комплексов

Для выделения ПФК был проведен анализ распределения геофизических параметров каротажных методов по парно (рис. 7, 8, 9).

По ГК и ГГКп все горные породы образуют три ПФК: угли, углистые аргиллиты и вмещающие породы (аргиллиты и алевриты) (рис. 7). На диаграмме видна зависимость радиоактивности от плотности – чем выше плотность горных пород (ниже поток вторичных гамма-квантов), тем выше

радиоактивность. По диаграмме ГГКп – БТК достаточно уверенно выделяется шесть петрофизических комплексов: ПФК-1 – угли; ПФК-2 – «зольные» угли; ПФК-3 – углистые породы; ПФК-4 – аргиллиты; ПФК-5 – алевритистые аргиллиты; ПФК-6 – алевриты (рис. 8). Диаграмма БТК – ГК в целом дублирует распределение литотипов на диаграмме ГГКп – БТК (рис. 9) – также выделяется шесть ПФК.

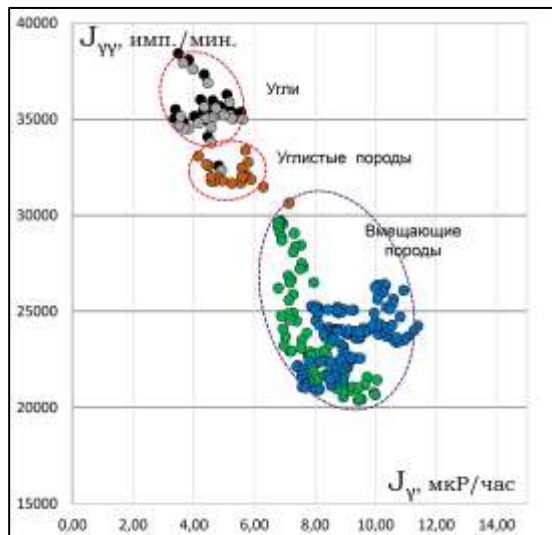


Рис. 7. Диаграмма значений интенсивности потока вторичных гамма-квантов ($J_{\gamma\gamma}$) по ГККп и интегральной интенсивности гамма-квантов (J_{γ}) по ГК для горных пород эталонных выборок. Цвет точек: черный – угли, серый – зольные угли, оранжевый – углистые аргиллиты, синий – аргиллиты, зеленый – алевролиты. Области, выделенные пунктирными линиями, показывают петрофизические комплексы.

Fig. 7. Diagram of the values of the intensity of the flux of secondary gamma rays ($J_{\gamma\gamma}$) according to GGLd and the integral intensity of gamma rays (J_{γ}) according to GL for rocks of reference samples. The color of the dots: black – coals, gray – ash coals, orange – carbonaceous mudstones, blue – mudstones, green – siltstones. The areas highlighted by dotted lines show petro-physical complexes.

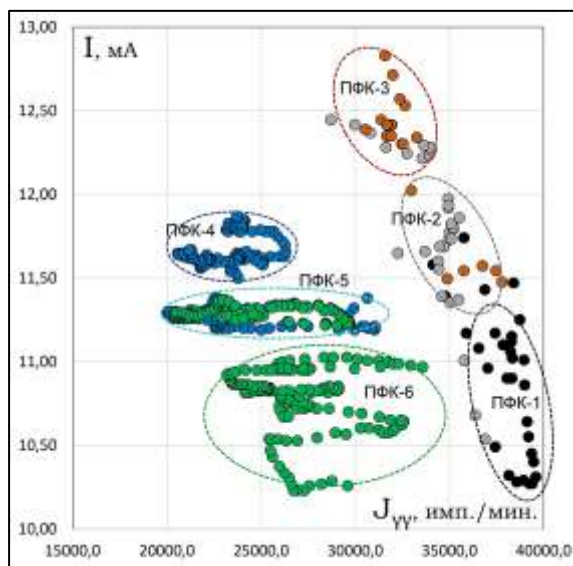


Рис. 8. Диаграмма значений силы тока (I) по БТК и интенсивности потока вторичных гамма-квантов ($J_{\gamma\gamma}$) по ГККп для горных

пород эталонных выборок. Обозначения те же, что на рис. 7.

Fig. 8. Diagram of the values of the current strength (I) according to SCL and the intensity of the flux of secondary gamma rays ($J_{\gamma\gamma}$) according to GGLd for rocks of reference samples. The designations are the same as in Fig. 7.

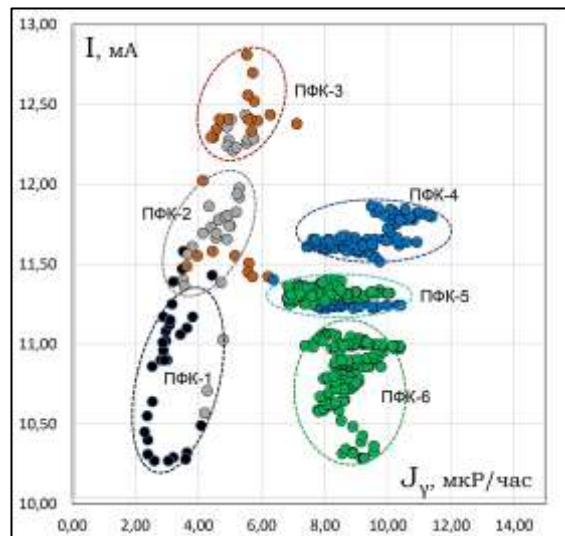


Рис. 9. Диаграмма значений силы тока (I) по БТК и интегральной интенсивности гамма-квантов (J_{γ}) по ГК для горных пород эталонных выборок. Обозначения те же, что на рис. 7.

Fig. 9. Diagram of the values of the current strength (I) according to SCL and the integral intensity of gamma rays (J_{γ}) according to GL for rocks of reference samples. The designations are the same as in Fig. 7.

Из анализа диаграмм можно сделать следующие выводы о петрофизической характеристике геологического разреза:

1. Угли, зольные угли, углистые породы образуют единую последовательность, у которой в зависимости от количества углистого материала меняются физические свойства – с увеличением углистости происходит плавное повышение УЭС, уменьшение плотности и радиоактивности. Кроме того, на диаграмме видно, что ряд интервалов скважин, которые были отнесены к определенным типам углей и углистых пород, по геофизическим данным не подтверждаются. Так, например, горные породы, определяемые как углистые аргиллиты и зольные угли, попадают в один петрофизический комплекс (ПФК-3), при этом в другом комплексе (ПФК-2), также

включающем углистые аргиллиты и зольные угли, попадают интервалы углей.

Разделение на ПФК этих пород относительно условно. Вся совокупность углей и углистых пород, как видно на рис. 8, была разделена на три ПФК: угли; «зольные» угли (чтобы не путать с литотипом название ПФК взято в кавычки); углистые породы (по своим свойствам значимо отличающиеся от аргиллитов).

2. Для вмещающих пород наблюдается уменьшение плотности и увеличение УЭС от аргиллитов к алевролитам. По радиоактивности значимого различия между этими горными породами, вопреки ожидаемому, не наблюдается. На диаграмме БТК – ГГКп (рис. 8) видно, что вмещающие породы разделяются на три ПФК. Кроме аргиллитов и алевролитов, выделяется ещё один промежуточный комплекс – алевритистые аргиллиты.

Последний литотип геологи не выделяют при описании керна – относя эти породы то к алевролитам, то к аргиллитам. Однако, по электрическому сопротивлению этот комплекс определяется достаточно четко.

Статистическая физико-геологическая модель

После анализа данных и выделения ПФК, были заново сформированы выборки значений, соответствующих этим комплексам. При этом были исключены участки контактов разных типов горных пород, так как для них характерны переходные значения геофизических параметров, которые некорректно отражают свойства горных пород. В таблице 2 представлена статистическая ФГМ геологического разреза Солнцевского угольного месторождения в числовом виде.

Таблица 2

Статистическая ФГМ геологического разреза

Table 2

Statistical PGM of the geological section

Статистические показатели	ПФК					
	ПФК-1 уголь	ПФК-2 «зольный» уголь	ПФК-3 углистая порода	ПФК-4 аргиллит	ПФК-5 алеврити- стый аргил- лит	ПФК-6 алевролит
Число значений в выборке	28	38	29	120	201	150
J_{γ}, мкР/час (ГК)						
Среднее значение (χ)	3.14	4.28	5.21	8.86	8.18	9.29
Стандартное отклонение (S)	0.62	0.64	0.66	0.61	0.96	1.02
Медиана (Me)	2.99	4.32	5.17	8.79	8.16	9.16
Минимальное значение (X_{min})	2.3	3.16	4.02	7.73	6.29	7.42
Максимальное значение (X_{max})	4.7	5.56	7.15	10.55	10.58	11.61
Асимметрия (A)	0.76	0.04	0.64	0.53	0.32	0.19
Экссесс (E)	0.01	-0.91	1.26	0.28	-0.73	-0.79
$J_{\gamma\gamma}$, имп./мин. (ГГКп)						
Среднее значение (χ)	38208	35767	32409	23425	24065	27024
Стандартное отклонение (S)	1015	1314	1271	1464	3242	2492
Медиана (Me)	38313	35526	32231	23725	22892	26547
Минимальное значение (X_{min})	35905	32569	28807	20618	20059	23000
Максимальное значение (X_{max})	39589	38739	34445	26367	31131	32875
Асимметрия (A)	-0.64	0.34	-0.60	-0.14	0.68	0.61
Экссесс (E)	-0.37	0.64	1.19	-0.71	-0.83	-0.26
I, мА (БТК)						

Среднее значение (\bar{x})	10.74	11.68	12.46	11.66	11.28	10.76
Стандартное отклонение (S)	0.33	0.21	0.23	0.09	0.05	0.2
Медиана (Me)	10.88	11.69	12.42	11.63	11.28	10.82
Минимальное значение (X_{min})	10.27	11.25	12.04	11.50	11.19	10.19
Максимальное значение (X_{max})	11.17	12.16	13.05	11.87	11.38	11.02
Асимметрия (A)	-0.21	-0.04	1.34	0.98	0.05	-1.25
Экцесс (E)	-1.62	-0.63	2.05	-0.28	-0.5	1.13
Коэффициенты корреляции						
$R_{ГК-ГТКп}$	-0.64	-0.25	-0.11	0.51	-0.61	-0.55
$R_{ГК-БТК}$	0.12	0.48	0.19	0.64	-0.17	0.15
$R_{БТК-ГТКп}$	-0.54	-0.33	-0.33	0.23	-0.22	-0.17
$R_{крит. (95\%)}$	0.38	0.33	0.38	0.19	0.19	0.19

* Желтым фоном выделены значения, превышающие критические.

На рис. 10, 11, 12, 13 статистическая ФГМ представлена в графическом виде.

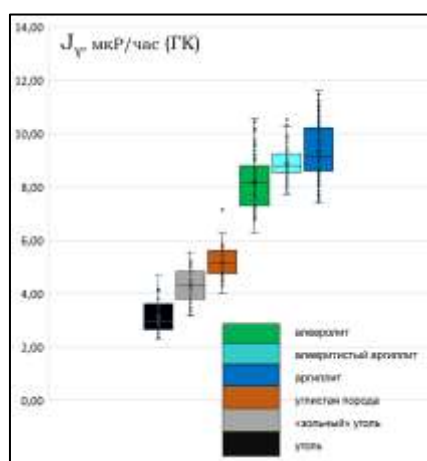


Рис. 10. Статистическая ФГМ по ГК. Обозначения: горизонтальная линия – медиана; наклонный крестик – среднее значение; вертикальная линия – диапазон изменения значений в выборке; закрашенный прямоугольник – область, в которую попадают 50 % значений выборки.

Fig. 10. Statistical PGM for GL. Designations: horizontal line – median; slanted cross – average value; vertical line – range of values in the sample; filled rectangle – area where 50 % of the sample values fall.

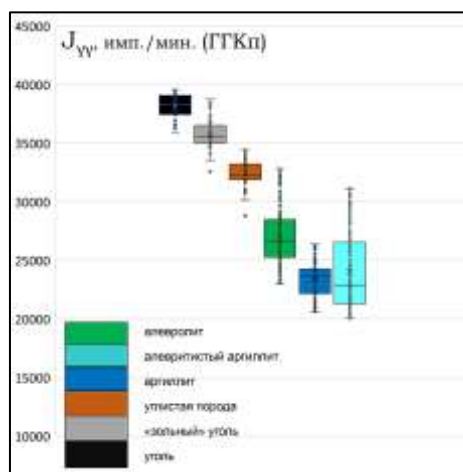


Рис. 11. Статистическая ФГМ по ГТКп. Обозначения см. рис. 10.

Fig. 11. Statistical PGM for the GGLd. The designations are shown in Fig. 10.

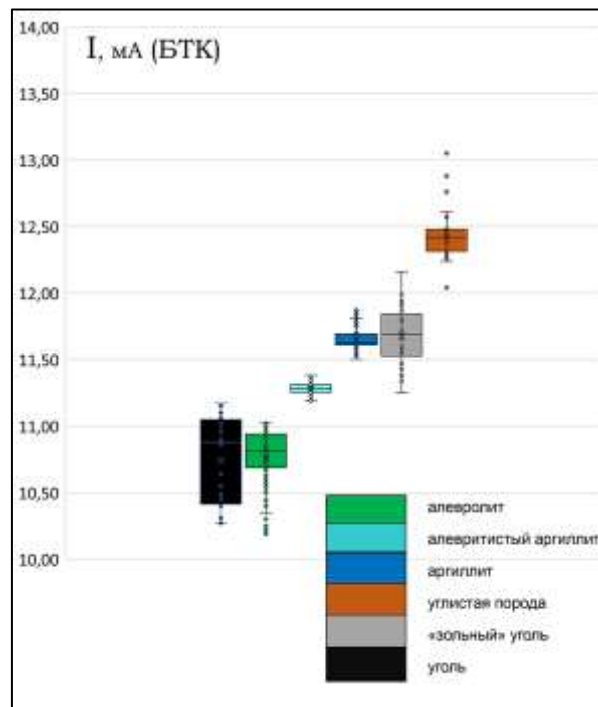


Рис. 12. Статистическая ФГМ по БТК. Обозначения см. рис. 10.

Fig. 12. Statistical PGM for the SCL. The designations are shown in Fig. 10.

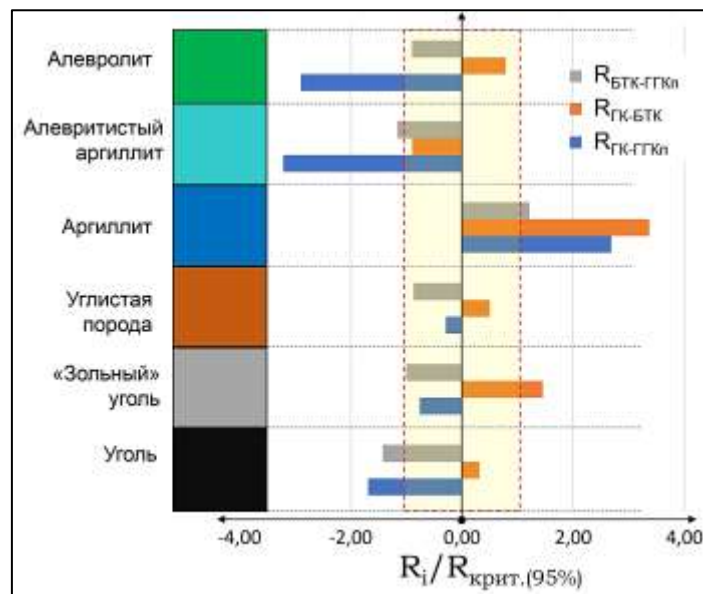


Рис. 13. Статистическая ФГМ, отражающая корреляционные связи между геофизическими параметрами. По горизонтальной оси отложены величины коэффициентов корреляции, нормированные на критическое значение для данной выборки при 95-% вероятности. Желтым цветом выделена область значений R_{XY} , не превышающих $R_{крит}$ (95 %).

Fig. 13. Statistical PGM reflecting correlations between geophysical parameters. The values of the correlation coefficients are plotted along the horizontal axis, normalized to a critical value for a given sample with a 95 % probability. The range of R_{XY} values not exceeding $R_{крит}$ is highlighted in yellow (95 %).

Представленная в числовом и графическом виде комплексная статистическая ФГМ показывает характер различия геофизических параметров для каждого из выделенных

ПФК. Значения A и E для сформированных ПФК (табл. 2) показывают, что все полученные выборки не противоречат нормальному распределению величин, а значит использование для описания выборок таких статистических характеристик как среднее значение (χ) и стандартное отклонение (S) вполне корректно.

Широкий разброс значений геофизических параметров для выделенных ПФК показывает, что ни один каротажный метод не может однозначно решить задачу по литологическому расчленению разреза. Эта задача может быть решена лишь путем комплексной интерпретации.

Особый интерес заслуживают выявленные корреляционные связи между результатами ГК, ГГКп и БТК. Для разных ПФК они имеют различный характер. Так, например, у углей наблюдается значимая обратная зависимость данных ГГКп от ГК и БТК; у зольных углей – значимая прямая зависимость БТК и ГК; а у углистых пород корреляция геофизических данных отсутствует. Резко различаются корреляционные зависимости алевролитов и аргиллитов: у первых наблюдается значимая прямая зависимость радиоактивности от плотности, у вторых – обратная. Кроме того, аргиллиты имеют прямую корреляцию данных БТК с ГК и ГГКп. Интересно, что алевристые аргиллиты по своей корреляционной характеристике значительно ближе к алевролитам, чем аргиллитам.

Интерпретация данных ГИС на основе статистической ФГМ

По результатам данного исследования можно рекомендовать дополнить методику интерпретации результатов ГИС расчетом и анализом статистических характеристик геофизических данных.

На основе созданной статистической ФГМ интерпретацию данных можно осуществлять следующими способами:

1) сравнивать полученные значения в процессе выполнения ГИС с характеристиками

выделенных ПФК, и определять к какому из них может относиться данный интервал разреза;

2) рассчитывать статистические параметры в «скользящем окне»: χ или (и) Me ; S , $R_{\chi y}$; размер «окна» выбирать исходя из мощности изучаемых пластов геологического разреза; рассчитанные характеристики сравнивать с эталонными выборками для каждого типа ПФК и определять их тождество.

И тот и другой подход будут более эффективными при комплексном анализе геофизических данных. При таком подходе использование статистической ФГМ позволяет:

1) более надежно разделять «вмещающие» и «углистые» породы путем совместного анализа ГГКп и ГК;

2) выполнять литологическое расчленение «вмещающих» пород на алевролиты, алевристые аргиллиты и аргиллиты преимущественно по данным БТК, при этом совместный анализ БТК с ГГКп и ГК увеличивает эффективность интерпретации.

3) осуществлять разделение углистых пород, «зольных» и низкозольных углей по комплексу методов ГГКп, ГК и БТК, в том числе, с использованием корреляционных зависимостей геофизических данных.

Для более точного разделения углей и углистых пород можно использовать зависимость УЭС (БТК), плотности (ГГКп) и радиоактивности (ГК) от качества углей – чем больше угля в горной породе, тем выше удельное электрическое сопротивление, ниже плотность, соответственно, ниже ток (БТК) и выше поток вторичных гамма-квантов (ГГКп). На рис. 14 приведена взаимозависимость значений ГГКп и БТК ($R_{\text{БТК-ГГКп}} = -0.88$). Фактически, эти два параметра связаны линейной зависимостью. На диаграмме выделены области, относящиеся к различным петрофизическим комплексам. Для любого участка разреза по значениям ГК, ГГКп, БТК можно качественно оценить степень углистости пород.

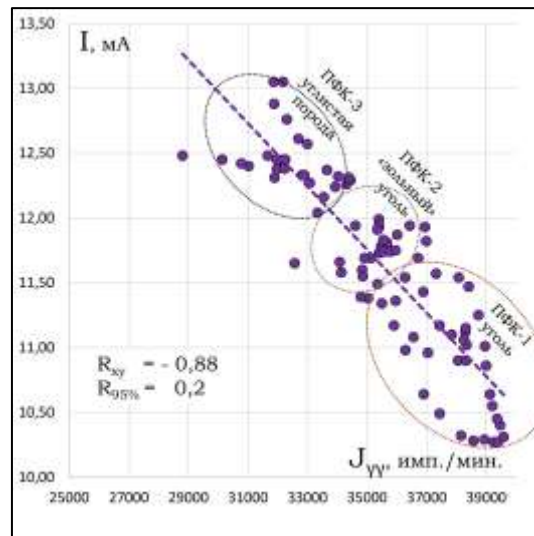


Рис. 14. Диаграмма зависимости силы тока (I) по БТК и интенсивности потока вторичных гамма-квантов ($J_{\gamma\gamma}$) по ГГКп для углей и углистых пород. Области, выделенные пунктирной линией, показывают различные ПФК.

Fig. 14. Diagram of the dependence of the current strength (I) according to SCL and the intensity of the flux of secondary gamma rays ($J_{\gamma\gamma}$) according to GGLd for coals and carbonaceous rocks. The areas highlighted by the dotted line show different PPC.

Заключение

В результате проведенного статистического анализа геологической и каротажной информации было выявлено, что петрофизические группы не совпадают с литологическими типами, определенными по керну, а значит интерпретация данных ГИС не во всех случаях является корректной.

В ходе статистической обработки было выделено 6 петрофизических комплексов, соответствующих алевролитам, алевролитистым аргиллитам, аргиллитам, углистым породам, «зольным» и низкозольным углям. Для каждого ПФК были рассчитаны статистические характеристики и определены диапазоны изменения физических параметров, по которым была построена статистическая ФГМ геологического разреза. Широкий разброс значений геофизических параметров для выделенных ПФК показывает, что ни один каротажный метод не может однозначно решать задачу по литологическому расчленению разреза. Это может быть сделано лишь путем комплексной интерпретации данных.

На основе созданной статистической ФГМ была скорректирована методика интерпретации каротажных данных, которая включает последовательные этапы: 1) разделение

вмещающих и углистых пород; 2) литологическое расчленение вмещающих пород; 3) разделение углистых пород по содержанию углистого материала. Причем эти интерпретационные процедуры необходимо выполнять путем анализа данных комплекса ГИС, в том числе, изучения корреляционных связей геофизических параметров.

На месторождении угли залегают на двух глубинных уровнях 20–40 м и 195–200 м. Описанная статистическая ФГМ была построена для поиска малоглубинных пластов. Для глубокозалегающих пластов данная модель требует уточнения, так как на более глубоких горизонтах физические свойства горных пород изменяются.

На примере Солнцевского угольного месторождения показано, что применение статистического анализа каротажных данных повышает эффективность интерпретации при решении геологических задач методами ГИС.

Литература

Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Комплексование геофизических методов и физико-геологические модели: учеб. пособие. Иркутск: ИПИ, 1989. 88 с.

Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике. М.: Недра, 1987. 192 с.

Дэвис Дж. Статистика и анализ геологических данных. М.: Мир, 1977. 572 с.

Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М.: Наука, 1968. 288 с.

Угольные бассейны и месторождения Дальнего Востока России (Республика Саха, Северо-Восток, о. Сахалин, п-ов Камчатка) // Угольная база России. Том V. Книга 2. М.: ООО «Геоинформмарк», 1999. 638 с.

References

Vakhromeev G.S. Integration of geophysical methods and physico-geological models: Training

Снопков Сергей Викторович,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,

664003, Россия, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Иркутский государственный университет,

доцент,

664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 91, Сибирская школа геонаук, Иркутский национальный исследовательский технический университет,

научный сотрудник,

email: snopkov_serg@mail.ru.

Snopkov Sergey Viktorovich,

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor,

Karl Marx st., 1, Irkutsk, 664003, Russia,

Irkutsk State University,

Associate Professor,

91 Lermontov st., Irkutsk, 664033, Russia,

Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University,

Researcher,

email: snopkov_serg@mail.ru

manual / Vakhromeev G.S., Davydenko A.Yu. Irkutsk: IPI, 1989. 88 p.

Vakhromeev G.S. Modeling in exploration geophysics / Vakhromeev G.S., Davydenko A.Yu. Moscow: Nedra, 1987. 192 p.

Davis J. Statistics and analysis of geological data. Moscow: Mir Publ., 1977. 572 p.

Pustynnik E.I. Statistical methods of analysis and processing of observations. Pustynnik E.I. Moscow: Nauka Publ., 1968. 288 p.

Coal basins and deposits of the Russian Far East (Republic of Sakha, Northeast, Sakhalin Island, Kamchatka Peninsula) // Coal Base of Russia. Volume V. Book 2. Moscow: Geoinformmark LLC, 1999. 638 p.

Максимов Никита Михайлович,

выпускник магистратуры ИГУ,

664003, Россия, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Иркутский государственный университет,

email: nikitajr01@mail.ru

Maksimov Nikita Mikhailovich,

graduate of the ISU Master's degree program,

Karl Marx st., 1, Irkutsk, 664003, Russia,

Irkutsk State University,

email: nikitajr01@mail.ru

Токарева Светлана Сергеевна,

664003, Россия, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Иркутский государственный университет,

старший преподаватель,

email: tokareva_ss@mail.ru

Tokareva Svetlana Sergeevna,

Karl Marx st., 1, Irkutsk, 664003, Russia,

Irkutsk State University,

Senior lecturer,

email: tokareva_ss@mail.ru

ЛИТОЛОГИЯ

УДК 550.42.14+551.21+552.333+(51)
<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2025.1.23>

EDN: [CSHFGK](#)

Геохимические характеристики лессов Тункинской долины и Окинской впадины, юг Восточной Сибири: сопоставление с геохимическими характеристиками лессов сопредельной Азии

С.В. Рассказов^{1,2}, Т.А. Ясныгина¹, И.С. Чувашова¹, А.П. Папаев³, С.В. Снопков^{2,4}, Д.И. Парфенов², К.О. Иванов², И.В. Полежаева¹, М.Е. Калинович²

¹Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

³Орликская средняя школа, пос. Орлик, Россия

⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Выполнены сравнительные геохимические исследования лессов Окинской впадины и Тункинской долины. Сделан вывод об определяющей роли лессов, подстилающих и перекрывающих Усть-Жом-Болокский лавовый покров в Окинской впадине, для датирования извержения этого покрова поздним плейстоценом. Определен более широкий диапазон составов лессов Окинской впадины, чем Тункинской долины, и выявлено общее отличие состава этих лессов, как представительных для юга Восточной Сибири, от лессов Китая и Якутии.

Ключевые слова: лессы, аллювий, базальты, голоцен, поздний плейстоцен, Восточные Саяны, Тункинская долина, Китай, Якутия

Geochemical Signatures of Loesses from the Tunka Valley and Oka Basin, South of Eastern Siberia: Comparison with Geochemical Signatures of Loesses from Adjacent Asia

S.V. Rasskazov^{1,2}, T.A. Yasnygina¹, I.S. Chuvashova¹, A.P. Papaev³, S.V. Snopkov^{2,4}, D.I. Parfenov², K.O. Ivanov², I.V. Polezhaeva², M.E. Kalinovich²

¹Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

³Orlik Secondary School, Orlik, Russia

⁴Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Статья получена: 10.03.2025; исправлена: 20.03.2025; принята: 21.03.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С., Папаев А.П., Снопков С.В., Парфенов Д.И., Иванов К.О., Полежаева И.В., Калинович М.Е. Геохимические характеристики лессов Тункинской долины и Окинской впадины, юг Восточной Сибири: сопоставление с геохимическими характеристиками лессов сопредельной Азии // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 1. С. 23–60 DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.23. EDN: [CSHFGK](#)

Article received: 10.03.2025; corrected: 20.03.2025; accepted: 21.03.2025.

FOR CITATION: Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Chuvashova I.S., Papaev A.P., Snopkov S.V., Parfenov D.I., Ivanov K.O., Polezhaeva I.V., Kalinovich M.E. Geochemical Signatures of Loesses from the Tunka Valley and Oka Basin, South of Eastern Siberia: Comparison with Geochemical Signatures of Loesses from Adjacent Asia // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 23-60. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.23. EDN: [CSHFGK](#)

Аннотация. We present results of comparative geochemical studies of loesses in the Oka Basin and in the Tunka Valley. We infer that those, underlying and covering the Ust-Zhom-Bolok lava cover in the Oka Basin, are critical for dating its eruption in the late Pleistocene. We determine a wider range of loess compositions for the Oka Basin than for the Tunka Valley and emphasize a general compositional difference of these loesses, representative for the south of Eastern Siberia, compared to those from China and Yakutia.

Ключевые слова: loess, alluvium, basalts, Holocene, late Pleistocene, Eastern Sayans, Tunka Valley, China, Yakutia

Введение

Лессы представляют собой эоловый пылеватый осадок с различным содержанием песчаной и глинистой фракций, обладающий пористостью и способностью удерживать вертикальные стенки. Для инженерной геологии имеет значение особое свойство лессовых грунтов – проседание. Содержание пылеватых частичек со своеобразной рыхлой текстурой в составе лессов превышает 50 %. В лессы входят солесодержащие частицы. Состав лессов близок к составу почвы. В лесово-почвенных комплексах часто развивается карбонатизация вследствие процессов педолитогенеза. Нередко накопления лессов при площадном залегании образуют большие мощности (более сотни м). Главные источники пыли – песчаные пустыни, крупные высохшие либо пересыхающие водоемы и материал, образованный ледниками. Лессы широко распространены на всей территории Евразии (рис. 1).



Рис. 1. Лессы Евразии. Для территории за пределами СНГ использована схема из работ (Muhs et al., 2014; Muhs, 2018). Для территории СНГ показаны ареалы распространения лессов по работам (Лессовые породы..., 1986;

Поморцев, Попов, 2021). Штрих-пунктирной линией обозначена граница СНГ.

Fig. 1. Loesses of Eurasia. For the territory outside the Former Soviet Union, the scheme from (Muhs et al., 2014; Muhs, 2018) is used. For the territory of the Former Soviet Union, the loess distribution areas are shown after (Loess rocks..., 1986; Pomortsev, Popov, 2021). The border of the Former Soviet Union is indicated by the dashed line.

В инженерной геологии принята терминология, отличающаяся от классической терминологии литологии. Подчеркивается отличие пород от настоящих лессов использованием термина «лессовидные породы», если в каких-либо породах свойства лессов проявляются не полностью. На юге Восточной Сибири часть пород, внешне похожих на лессы, может содержать менее 50 % пылеватых частиц. В состав таких пород входит мелкопесчаная фракция. Нередко они связаны с развитием мерзлых пород. Мощность таких (по определению, лессовидных) отложений в среднем составляет 2–3 м, редко возрастает до десятков метров. Солесодержащие частицы в них либо отсутствуют, либо имеются в небольшом количестве.

Определение процентного соотношения пылеватых частиц с более крупным обломочным материалом требует проведения специального трудоемкого анализа. Для литологического определения лессовой природы породы достаточно выявления ее существенного наполнения пылеватым материалом. Хотя можно различать разновидности пород образовавшихся в переходных эолово-субаквальных условиях, для характеристики эоловой толщи отложений в целом термин «лессовидная порода» часто представляется не точным, поскольку не сопровождается результатами специальных анализов.

На юге Восточной Сибири пылеватые отложения Тункинской долины отнесены к лессовидным. Отмечалось сходство между

параметрами микроструктуры и структурной моделью лессовых почв Приангарья и Северо-Западного Китая, а также между почвами Забайкалья и Западной Монголии (Рященко и др., 2007, 2014; Ryashchenko et al., 2008).

Геохимические исследования отложений этого типа проводились в последние годы в Тункинской долине связи с определением состава содержащихся в них глинистых минералов (Алокла и др., 2022; Алокла, 2023). В 2024 г. пылеватые отложения были

обнаружены в Окинской впадине Восточных Саян стратиграфически ниже и выше «долинного» Усть-Жом-Болокского лавового покрова (Рассказов и др., 2024а). Окинская впадина простирается субширотно, вдоль Жом-Болокского разлома, и соотносится с высоким Окинским (Кропоткинским) хребтом так же, как рифтовая Тункинская долина соотносится с высоким Тункинским хребтом (рис. 2). В настоящей работе лессы и лессовидные отложения этих территорий рассматриваются в целом как лессы.

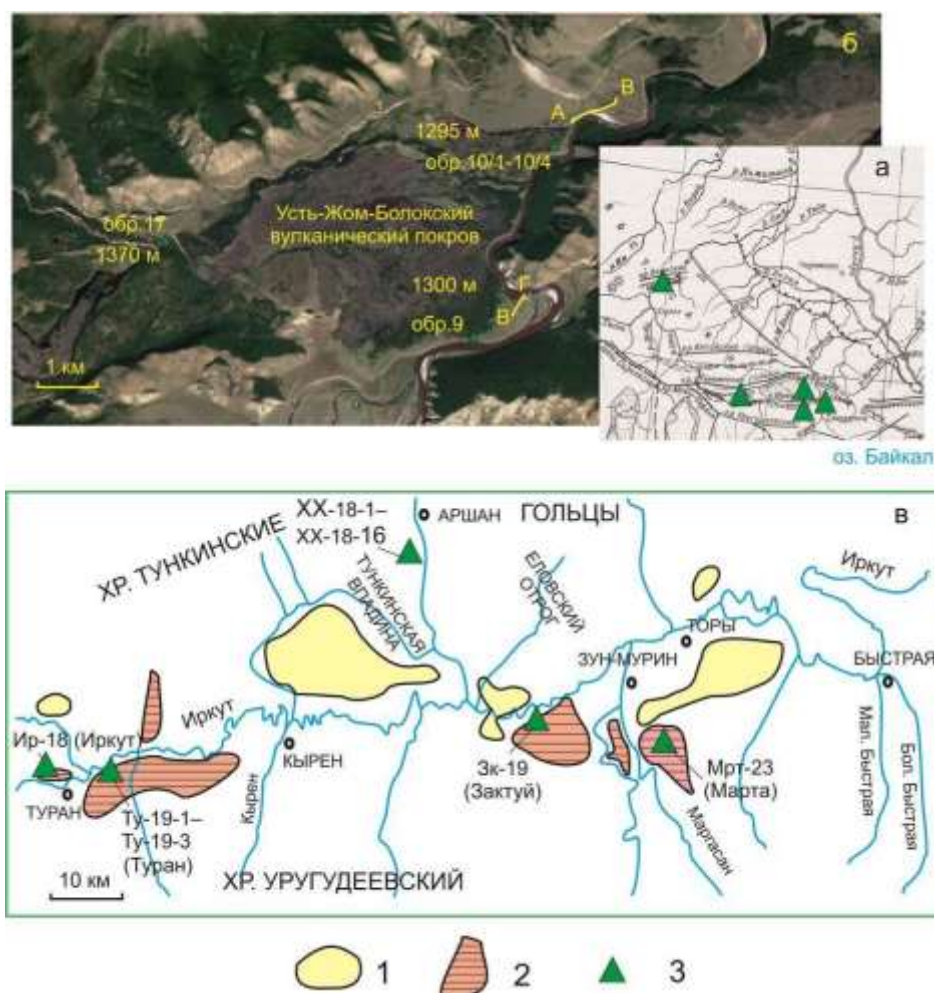


Рис. 2. Местоположение районов опробования лессов в Тункинской долине и Окинской впадине (а), местоположение изученных разрезов вулканогенно-осадочной толщи АБ (Сайлаг) и ВГ (Номто-Гол) и единичных образцов на космическом снимке Google Earth территории Усть-Жом-Болокского вулканического покрова (б) и местоположение опробованных лессов на схеме распространения дефляционных и аккумулятивных эоловых образований в Тункинской и Торской котловинах (в). Карта-схема а из работы (Флоренсов, 1960). На панели б показаны абсолютные высоты кровли вулканического покрова в его западной (1370 м), северо-восточной (1295 м) и юго-восточной (1300 м) частях. На панели в (Выркин, 2010 с упрощениями) обозначаются области: 1 – позднечетвертичной и современной дефляции и аккумуляции с донно-котловинным рельефом оголенных и заросших растительностью песков; 2 – аккумуляции с бугристо-западинным рельефом субаэральных покровов лессов; 3 – точки опробования осадочных пород: XX-18/1–XX-18/16 – разрез Хурай-Хобок, другие точки – отложения лессов трех местонахождений (Иркут, Туран и Закуй).

Fig. 2. Location of the loess areas in the Tunka Valley and Oka Basin (a), location of the studied sections of volcanogenic-sedimentary strata: АБ (Sailag) and ВГ (Nomto-Gol) in a space image Google Earth of

the territory of the Ust-Zhom-Bolok volcanic cover (б), and location of the sampled loesses on the distribution pattern of deflationary and accumulative eolian formations in the Tunka and Tory basins (в). Scheme а is after (Florensov, 1960). Satellite image б shows the absolute heights of the roof of the volcanic cover in its western (1370 m), northeastern (1295 m), and southeastern (1300 m) parts. Schematic map а is from (Florensov, 1960). Panel б shows the absolute heights of the roof of the volcanic cover in its western (1370 m), northeastern (1295 m), and southeastern (1300 m) parts. Panel в (modified after Vyrkin, 2010) indicates the areas of: 1 – late Quaternary and modern deflation and accumulation with dune-basin relief of bare and overgrown with vegetation sands; 2 – accumulation with hummocky-depression relief of subaerial loess covers; 3 – sampling sites of sedimentary rocks: XX-18/1–XX-18/16 – Khurai-Khobok section, other sites – loess deposits of three locations (Irkut, Turan, and Zaktuy).

Цель настоящей работы – провести сравнительные геохимические исследования лессов в Окинской впадине и Тункинской долине и сопоставить геохимические характеристики этих пород с характеристиками лессов, распространенных на территории сопредельной Азии.

Лессы в Окинской впадине и Тункинской долине

Окинская впадина

Усть-Жом-Болокский лавовый покров занимает площадь около 30 км² в центральной

части Окинской впадины. Покров почти изометричен в плане (имеет размеры 7.5×4.5 км). Вулканические фрагменты меньших размеров распространяются восточнее, ниже по долине р. Оки, и западнее, выше по долине р. Жом-Болок. Поверхность лав западной части Усть-Жом-Болокского лавового покрова находится на абсолютной высоте около 1370 м, его восточной части – на высоте 1295–1300 м и ниже. В долине р. Жом-Болок глубина эрозионного вреза не существенна. Лавы почти не эродированы. В долине р. Оки лавы глубоко расчленены. Экспонированы ниже- и вышележащие осадочные отложения.

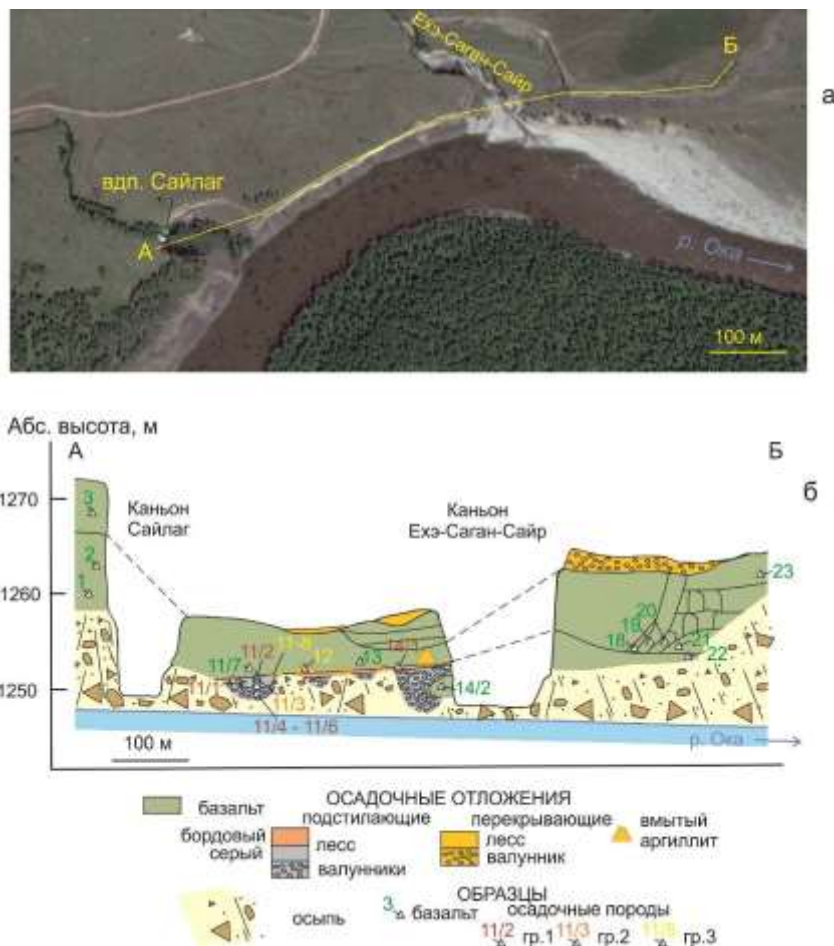


Рис. 3. Положение линии разреза АБ на космоснимке Google Earth (а) и схематический разрез Сайлаг Усть-Жом-Болоцкого вулканического покрова (б). Для упрощения иллюстрации здесь и

далее в номере образца (Zhb-1-24 и др.) приводится только непосредственно его номер (1) и опускается его начальная часть (Zhb, Жом-Болок) и год отбора (24).

Fig. 3. Position of the section line AB on the Google Earth space image (a) and the schematic Sailag section of the Ust-Zhom-Bolok volcanic cover (b). To simplify the illustration, here and below in the sample number (Zhb-1-24, etc.) only its number (1) is given and its initial part (Zhb, Zhom-Bolok) and the year of sampling (24) are omitted.

Лавовый покров и осадочные отложения, залегающие ниже и выше него, опробованы в районе водопада Сайлаг (профиль AB на рис. 2а, 3а) и р. Номто-Гол (профиль ВГ на рис. 2а, 4). На профиле AB между каньонами Сайлаг и Ехэ-Саган-Сайр, вдоль р. Оки, протягивается стенка, сложенная базальтами и осадочными отложениями (рис. 3). Протяженность стенки от мыса каньона Сайлаг до мыса каньона Ехэ-Саган-Сайр составляет 340 м. От каньона Сайлаг протягивается единый лавовый поток мощностью 7–8 м с толстостолбчатой отдельностью. Образцы базальтов Zhb-1-24 и Zhb-2-24, относятся к единому слою с образцами базальтов Zhb-11/7-24 и Zhb-13-24. Подстилающие осадочные отложения обнажены под подошвой базальтового потока почти на всем протяжении этого обнажения и закрыты осыпью только вблизи каньона Сайлаг.

Разрез в районе Номто-Гола отличается от разреза Сайлаг. В районе Номто-Гола, в широкой долине р. Оки, намечаются два террасовидных уступа, выработанные в процессе

ее формирования. В верхней части склона долины различаются два базальтовых слоя (обр. 6 и 7), разделенные галечником (рис. 4).

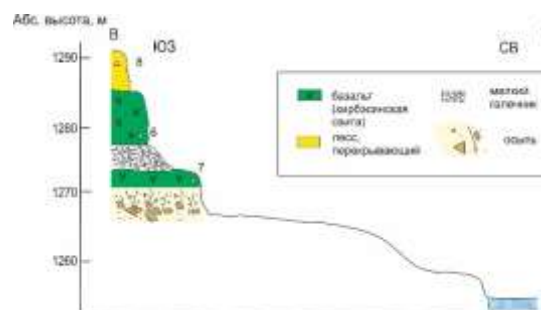


Рис. 4. Схематичный разрез вулканогенно-осадочной толщи в районе Номто-Гола, по линии ВГ (местоположение на рис. 2а). Вулканогенно-осадочная толща этого разреза древнее толщи разреза Сайлаг.

Fig. 4. Schematic section of volcanogenic-sedimentary strata in the Nomto-Gol area, along the VG line (location on Fig. 2a). The volcanic-sedimentary stratum of this section is older than the one of the Sailag section.



Рис. 5. Отложения под подошвой лавового потока: лесс бордового цвета (а), то же серого цвета (б), прожилки плотного желтого аргиллита в подошве базальтового слоя (в) и то же в лессе бордового цвета (г). На панели в желтый пылеватый материал сосредоточен не только в подошве базальтового слоя, но распространяется также по трещинам отдельности базальтов. На панели г плотным

желтым аргиллитом заполнена небольшая (2 см) трещина в осадочном материале, но более существенный объем желтого аргиллита заполняет пустоты в основании базальтового слоя.

Fig. 5. Deposits beneath the base of a lava flow: burgundy-colored loess (*a*), the same gray-colored (*b*), veins of dense yellow argillite at the base of the basalt layer (*b*), and the same in burgundy-colored loess (*c*). In panel *b*, the yellow dusty material is concentrated not only at the base of the basalt layer, but also spreads along cracks within basalt. In panel *c*, a small (2 cm) crack in the sedimentary material is filled with dense yellow argillite, but a more significant volume of yellow argillite fills the voids at the base of the basalt layer.

Слой пылеватых лессов залегает в разрезе АБ (Сайлаг) под подошвой лавового потока, выше слоя валунника (рис. 5а,б). Мощность слоя лессов не превышает 1 м. Порода имеет бордовую или серую окраску (рис. 5в,г). В рыхлом материале и на границе с базальтом встречаются линзы коричневатого сцементированного материала (рис. 5б, обр. Zhb-11/3-24 на рис. 5д).

В обнажениях осадочных пород встречаются образования плотного желтого аргиллита. Если подошва базальтового потока ровная и имеет монолитное сложение, плотный желтый аргиллит образует слой до 2 см

непосредственно на границе базальта с рыхлым лессом (рис. 6а). Если подошва базальтового потока содержит поры и каверны, плотный желтый аргиллит заполняет все образовавшиеся пустоты и образует прожилки в подстилающем рыхлом лессовом материале (рис. 6б). Аргиллитовые фрагменты хорошо индивидуализированы на фоне пористого базальта и имеют комковатое сложение (рис. 6в,г). Плотный желтый аргиллит, очевидно, имеет вторичное происхождение в связи с процессами, развивающимися на границе базальтового потока с подстилающей осадочной толщей.



Рис. 6. Поздние образования плотного желтого аргиллита на границе слабо пористой (почти монолитной) подошвы лавового покрова и подстилающего лесса (*a*), в виде прожилка в подстилающем рыхлом лессе и комковатого материала в перекрывающем базальте (*b*), в виде резко индивидуализированного тела внутри базальтового слоя (*c*) и в виде линзы комковатого материала (*d*).

Fig. 6. Late formations of dense yellow argillite at the boundary of a slightly porous (almost monolithic) base of a lava cover and underlying loess (*a*), in the form of a vein in the underlying loose loess and lumpy material in the overlying basalt (*b*), in the form of a sharply individualized body within the basalt layer (*c*), and in the form of a lens of lumpy material (*d*).

Слой подстилающего валунника обнажен на мысе каньона Эхэ-Саган-Сайр. Видимая мощность составляет 6–7 м (рис. 7а). Валунны различного состава достигают в поперечнике

1 м. Обломочный материал хорошо окатан. Между обломками находится разнозернистый песок, насыщенный пылеватым материалом (рис. 7б).



Рис. 7. Валунник, подстилающий базальтовый поток на мысе каньона Эхэ-Саган-Сайр (а) и фрагмент этого обнажения с наполнителем разнозернистого песка, содержащего пылеватый материал (б). В слое лессов этого обнажения был найден каменный артефакт (Ташак, 2021).

Fig. 7. Boulder underlying a basalt flow on the cape of the Ekhe-Sagan-Sair canyon (a) and a fragment of this outcrop with a filler of mixed-grain sand containing dusty material (b). A stone artifact was found in the loess layer of this outcrop (Tashak, 2021).

На поверхности Усть-Жом-Болокского лавового покрова находятся слои валунных галечников и скопления лессов мощностью от первых десятков сантиметров до первых метров. Слой валунников мощностью первые м залегает на базальтовом покрове в левом борту каньона Эхэ-Саган-Сайр (рис. 8а). Этот слой переходит в обширную равнину центральной части Окинской впадины. По высокой степени окатанности валунов и галек, малой доле пылеватого наполнителя и отсутствию базальтов этот материал подобен валуннику, подстилающему базальтовый покров. В галечнике разреза района Номто-Гола преобладает галька 4–5 см, уплощенной

формы, хорошо окатанная (класс 3 по шкале А.В. Хабакова). Встречается редкая галька до 15 см. Наполнитель слабо промытого крупнозернистого песка составляет 50–60 % (рис. 8в,г).

Лессы, перекрывающие лавовый покров в районах водопада Сайлаг и р. Номто-Гол, достигают мощности в западинах до 6 м. Эти отложения нередко образуют слои с последовательной сменой цвета от коричневого (переходящего в современную почву) через белесый до темно-серого (рис. 9а,б). Местами отложения приобретают желтовато-коричневую окраску (рис. 9в,г).



Рис. 8. Фрагмент гладкой сохранившейся поверхности типа пахоехое лавового покрова в левом борту каньона Ехэ-Саган-Сайра (а), отложения валунника, перекрывающие эту поверхность (б), соотношения верхнего базальтового покрова с перекрывающими его и послезэрозийными лессами и подстилающими галечниками в левом борту р. Оки (напротив долины Номто-Гола) (в) и мощная толща лессов выше базальтов в левом береговом обрыве р. Оки (г).

Fig. 8. Fragment of the smooth preserved surface of pahoe-hoe type on the lava cover in the left side of the Ekhe-Sagan-Sayr canyon (a) and boulder deposits covered this surface (b), relationship between the upper basalt cover with the overlying and post-erosional loess sediments and underlying pebbles on the left side of the Oka River (opposite the Nomto-Gol valley) (v), and a thick stratum of loess sediments above basalts in the left side of a cliff in the Oka River (z).



Рис. 9. Лессы, перекрывающие лавовый покров, вблизи водопада Сайлаг (а, б) и в районе р. Номто-Гол (в, г).

Fig. 9. Loesses covering the lava cover near the Saylag waterfall (a, б) and in the area of the Nomto-Gol River (в, г).

Тункинская долина

Эоловые отложения занимают 28 % площади Тункинской котловины (Выркин, 1998). В Тункинской долине лессы опробованы в пяти местонахождениях: Марта (Мрт-23), Хурай-Хобок (ХХ-18), Туран (Ту-19), Иркут (Ир-18) и Зактуй (Зк-19) (рис. 1в).

Местонахождение лессов Марта занимает весь водораздел на правом берегу Маргасана, между долинами Марты и Иркуты (рис. 10). Видимая мощность лессовых накоплений местами достигает 5 м. Цвет пород серый. Из представительного разреза снизу вверх отобрано 10 образцов (Мрт-23/1 – Мрт-23/10). На схеме (Выркин, 2010) это местонахождение не обозначено.



Рис. 10. Новое местонахождение лессов Марта (Мрт-23) к юго-западу от Торского лессового покрова.

Fig. 10. New location of the Marta loess (Mrt-23) southwest of the Tory loess cover.

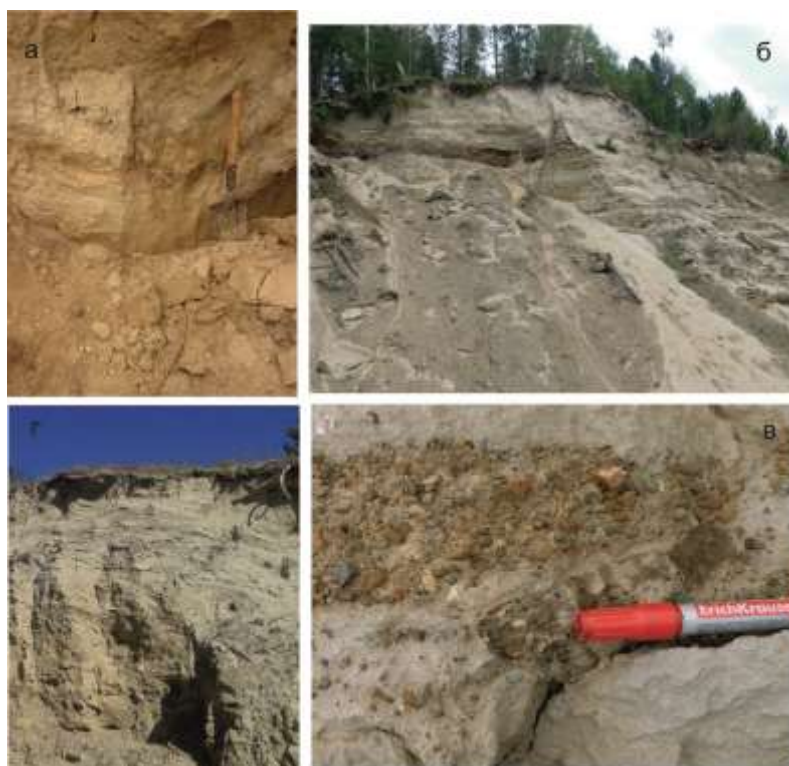


Рис. 11. Фотографии лессов Тункинской долины: а – фрагмент вскрытой верхней части разреза желтовато-коричневых лессов, перекрывающих склон вулкана Хурай-Хобок (ХХ); б – переход от

галечников к дымчато-серым лессам в карьере Туранский (Ту); *в* – деталь этого перехода; *г* – зеленовато-серые лессы Иркута (Ир).

Fig. 11. Photographs of the Tunka Valley loesses: *a* – fragment of the exposed upper part of the section of yellowish-brown loess covering the slope of the Khurai-Khobok volcano (XX); *б* – transition from pebbles to smoky-gray loess in the Turan quarry (Ty); *в* – detail of this transition; *г* – greenish-gray loess of the Irkut (Ир) location.

В *местонахождении Хурай-Хобок* лессы перекрывают южный край одноименной вулканической постройки, частично погруженной в осадочное наполнение впадины. Отложения накопились в ложбине, с подветренной стороны конуса. Вскрытие разреза выявило слои отложений с прослоем почвы. Накопление лессов явилось результатом переноса ветром частиц с севера на юг, со стороны Тункинских гольцов. Цвет пород желтовато-коричневый (рис. 11а).

В разрезе Хурай-Хобок различаются (сверху вниз): 1 – слой лесса, неоднородного, пылеватого, желтовато-коричневого (интервал 0.0–0.24 м); 2 – слой лесса, пылеватого, коричневого во влажном состоянии, желтовато-коричневого в сухом виде, с темно-коричневым прослоем, имеющим раздувы мощностью до 20 см (интервал 0.24–1.0 м); 3–4 – слой лесса, коричневого, осветленного, тонкослоистого (интервал 1.0–1.65 м) и 5 – слой лесса, коричневого, однородного (интервал 1.65–2.8 м) (рис. 12).

Лессы местонахождения Туран вскрыты карьером. Породы дымчато-серого цвета мощностью 1.5–2.5 м перекрывают охристые гравийно-галечные слои. Лессовые покровные отложения облакают неровности рельефа. В соответствии с рельефом покровы поднимаются на высоту 20–30 м (рис. 11б), относительно тальвега Иркута, и опускаются почти до уровня его поймы. Образцы лессов отобраны и у верхней бровки карьера, и на более низких уровнях рельефа. При переходе от охристых галечников к дымчато-серым лессам наблюдается перемежаемость линз лессов и галечников (рис. 11в). В *местонахождениях Иркут и Зактуй* лессы также имеют дымчато-серый цвет (рис. 11г).

Методика аналитических исследований

Главные оксиды вулканических пород определяли классическими химическими методами (Сизых, 1985). Микроэлементы измеряли методом ИСП-МС с использованием квадрупольного масс-спектрометра Agilent 7500се. Химическую пробоподготовку

проводили по методике, описанной Т.Я. Ясныгиной и др. (2015). Воду и кислоты дважды очищали с помощью систем очистки Savillex DST-1000. Для калибровки результатов измерений использовали многоэлементные стандартные растворы. В качестве внутренних стандартов вводили In и Bi. Для контроля точности анализа использовали международные сертифицированные стандартные образцы BHVO-2, AGV-2, JA-2, DNC-1a.

№ образца	Литологическая колонка	Глубина, см	Характеристика осадочных отложений	
1		24	Лесс, неоднородный, желтовато-коричневый	
2		100	Лесс, однородный, желтовато-коричневый, с темно-коричневым прослоем	
3			Лесс, коричневый, осветленный, тонкослоистый, местами волнисто-слоистый, слабо литифицированный	
4				
5				165
6		280		Лесс, однородный, коричневый
7				
8	280	Лесс, однородный, коричневый		
9				
10				
11				
12	280	Лесс, однородный, коричневый		
13				
14				
15				
16	280	Лесс, однородный, коричневый		

Рис. 12. Литологическая колонка разреза лессов Хурай-Хобок (XX).

Fig. 12. Lithological column of the Khurai-Khobok (XX) loess section.

Результаты

Гранулометрия

Для обр. 10 и 7 разреза лессов Хурай-Хобок Р.Э. Алоклой (2023) получены процентные соотношения пяти фракций (мм) (табл. 1): средне-крупнопесчаной (1–0.25); тонко-мелкопесчаной (0.25–0.05); крупнопылеватой (0.05–0.01); мелкопылеватой (0.01–

0.002); тонко-грубоглинистой (<0.002). Названия отложений приняты по классификации глинистых пород В.В. Охотина (1940). В ее основу положено содержание глинистой фракции (<0.002 мм). Отношение между песчаной и пылевой фракциями по И.П. Иванову (1990). В этой классификации использовались результаты гранулометрического анализа с полудисперсным (стандартным) способом подготовки образца.

Таблица 1

Результаты гранулометрического анализа лессов из разреза на склоне вулкана Хурай-Хобок (Алокла, 2023)

Table 1

Results of granulometric analysis of loesses from a section on the slope of the Khurai-Khobok volcano (Alokla, 2023)

№ образца	Содержание фракций, %					Тип отложений
	0.5–0.25 мм	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.002	< 0.002	
XX-18-7	3.2	35.7	48.1	5.7	7.2	Песок глинистый, пылеватый
	2.8	33.5	47.9	2.8	13.0	
XX-18-10	7.0	45.8	37.6	2.6	7.0	Песок глинистый
	5.6	38.0	34.9	5.7	15.8	

Примечание: Содержание фракций – в числителе по данным гранулометрического анализа с полудисперсным (стандартным) способом подготовки образца, в знаменателе – с дисперсным способом подготовки.

По данным гранулометрического анализа с полудисперсным способом подготовки образцов, в отложениях разреза определено близкое содержание глинистой фракции (соответственно, 7.2 и 7.0 %). В обр. XX-18-7 преобладает пылеватая фракция 0.05–0.002 мм (53.8 %), доля которой в обр. XX-18-10 существенно ниже (40.2 %). Оценки, полученные по результатам гранулометрического анализа с дисперсным способом подготовки образцов свидетельствуют об изменении реальной глинистости изученных образцов от 13.0 до 15.8%, что отвечает глине, сильно песчаной, пылевой.

Петрогенные оксиды

Смена состава лессов в разрезе Хурай-Хобок Тункинской долины иллюстрируется на

диаграммах CIA – SiO₂ и CIA – ППП* (потери при прокаливании) (рис. 13). Лессы вскрытой части основания разреза (обр. 10–16) имеют сравнительно однородный состав. Неоднородность проявляется в вышележащих слоях 2 и 3 тонкополосчатого слегка осветленного песка. В обр. 9 значение CIA возрастает при слабом относительном снижении содержания SiO₂. В обр. 7 и 8 значение CIA резко снижается, хотя содержания SiO₂ и ППП* не отличаются от содержаний в обр. 9. Резко меняется состав четвертого снизу слоя (обр. 2–6), в котором возрастает и CIA, и SiO₂, но снижается ППП*. Прослой темно-коричневого песка (почвы) (обр. 5) имеет наиболее высокое отношение Fe₂O₃.

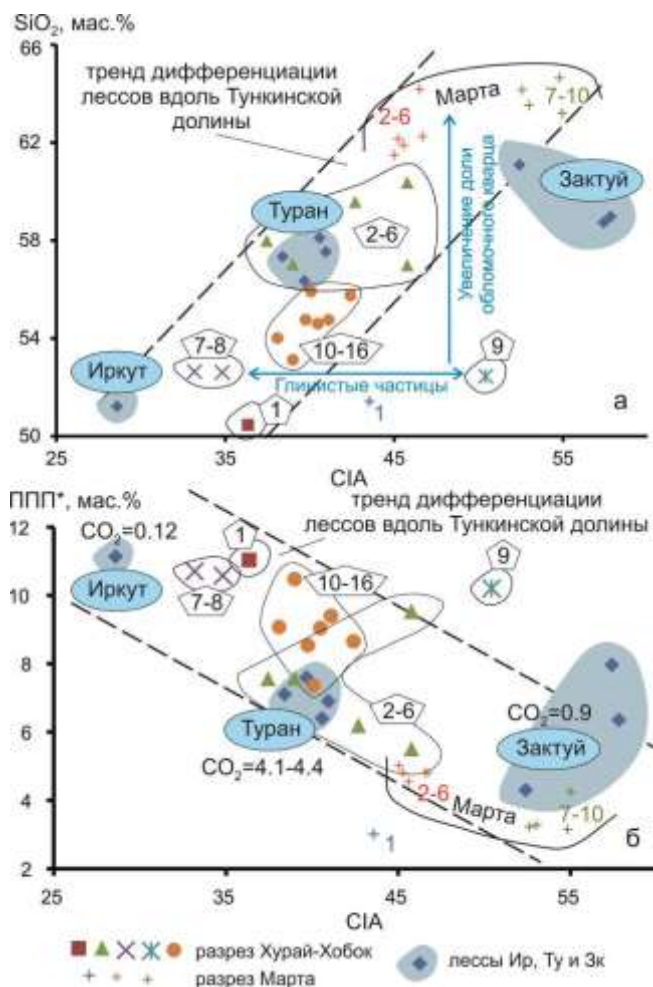


Рис. 13. Выделение трендов дифференциации лессов вдоль Тункинской долины на диаграммах SiO₂ – CIA (а) и ППП* – CIA (б). ППП* – потери при прокаливании (Т = 1000 °С) вместе с сорбированной влагой (H₂O⁻) и CO₂. CIA=[Al₂O₃/(Al₂O₃+CaO+Na₂O+K₂O)]*100 – индекс химического изменения (Nesbitt, Young, 1982). Тренды обозначены двумя параллельными штриховыми линиями.

Fig. 13. Identification of the trends in loess differentiation along the Tunka Valley on the SiO₂ vs CIA (a) and LOI* vs CIA (b) diagrams. LOI* – loss on ignition (T = 1000 °C) together with sorbed moisture (H₂O⁻) and CO₂. CIA=[Al₂O₃/(Al₂O₃+CaO+Na₂O+K₂O)]*100 – chemical index of alteration (Nesbitt, Young, 1982). The trends are indicated by two parallel dashed lines.

Контрастные вариации CIA при постоянном содержании SiO₂ во втором и третьем слоях свидетельствуют об определяющей роли поступления в осадок глинистых минералов без вариаций его обломочной составляющей. В отложениях отчетливо выражена тонкая слоистость. В вышележащих отложениях четвертого слоя (обр. 2–6) резко возрастает SiO₂. Фигуративное поле нижнего слоя разреза (обр. 10–16) расположено на диаграммах рис. 13а между глинистым вариационным трендом и фигуративным полем отложений четвертого слоя, обогащенных обломочным материалом (обр. 2–6). В целом, в отложениях основания разреза лессов

местонахождения Хурай-Хобок выявляется повышенная доля глинистых минералов, а выше по разрезу увеличивается доля обломочного материала (кварца, полевых шпатов) в связи с усилением эолового переноса.

В разрезе лессов местонахождения Марта различаются 3 слоя. Слой основания разреза (обр. 1) имеет особый состав, проявляющийся в низком SiO₂ и ППП*. Фигуративная точка образца опущена ниже трендов лессов на обеих диаграммах, возможно, из-за преобладания в этом образце местного обломочного материала. В лессах среднего слоя (обр. 2–6) резко возрастает SiO₂ и менее резко – ППП*. В лессах верхнего слоя (обр. 7–10)

заметно увеличивается CIA при относительном возрастании SiO_2 и снижении ППП*. Такое смещение состава свидетельствует об увеличении роли обломочного кварца снизу вверх по разрезу. Тенденция увеличения роли обломочного материала в составе лессов Тункинской долины определяется с течением времени не только в разрезе Хурай-Хобок, но и в разрезе Марта.

На диаграммах рис. 13 можно оценить роль эолового фактора в лессах Тункинской долины по пространственному распределению фигуративных точек отложений разных местонахождений. Лессы наиболее западного местонахождения Иркут имеют самое низкое значение CIA при низком содержании SiO_2 и высоких значениях ППП* (почти без CO_2).

Наиболее контрастный состав, по отношению к лессам Иркут, имеют лессы восточных местонахождений Зактуй и Марта, в которых значения CIA заметно возрастают при высоком содержании SiO_2 и низких значениях ППП*. Лессы других местонахождений (Туран, Хурай-Хобок) занимают промежуточное пространственное положение в Тункинской долине и характеризуются промежуточными составами. В целом вырисовывается картина дифференциации лессового материала от существенно глинистого на западе Тункинской долины (Иркут) до материала с существенной примесью обломков (кварца, полевых шпатов) на ее востоке (Зактуй, Марта).

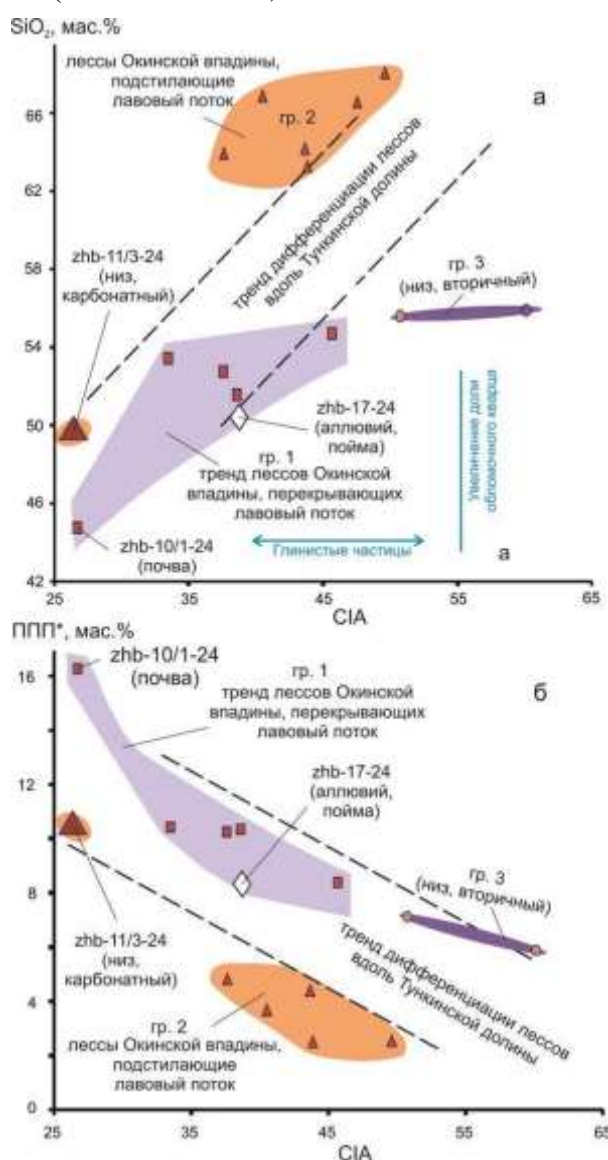


Рис. 14. Соотношение трендов лессов Окинской впадины с трендами дифференциации лессов вдоль Тункинской долины на диаграммах $\text{SiO}_2 - \text{CIA}$ (а) и ППП* – CIA (б).

Fig. 14. Relationship between the loess trends in the Oka Basin and the trends of loess differentiation along the Tunka Valley on the SiO_2 vs CIA (a) and ППП* vs CIA (б) diagrams.

Лессы Окинской впадины отличаются по составу от лессов Тункинской долины. Лессы, перекрывающие и подстилающие Усть-Жом-Болокский лавовый покров, различаются между собой по составу. Фигуративные точки перекрывающих лессов гр. 1 находятся в начале тренда дифференциации лессов Тункинской долины. Фигуративные точки подстилающих лессов группы 2 и вторичных желтых аргиллитов гр. 3 приходятся на конец тренда дифференциации лессов Тункинской долины, за исключением точки лесса, обогащенного карбонатом (zhb-11/3-24), которая соответствует началу тункинского тренда. На диаграмме SiO_2 – CIA (рис. 14а) тренд лессов групп 1 и 3 отклоняется ниже трендов дифференциации лессов Тункинской долины, на диаграмме ППП* – CIA (рис. 14б) в общем следует верхней части тренда. В желтых аргиллитах окончания тренда (гр. 3), обломочный кварц не накапливается, но возрастает роль глинистых минералов. Между тем, лессы Окинской впадины, подстилающие лавовый покров (гр. 2), находятся на диаграмме SiO_2 – CIA (рис. 14а) выше окончания тренда дифференциации лессов Тункинской долины, а на диаграмме ППП* – CIA (рис. 14б), наоборот, ниже окончания такого тренда. Смещение свидетельствует о том, что в подстилающих лессах гр. 2 повышается роль обломочного кварца.

Выстраивая аналогии образования лессов Окинской впадины с образованием лессов в Тункинской долине, можно сделать вывод о том, что до извержения Усть-Жом-Болокского лавового покрова процесс был подобен процессу восточной части Тункинской долины, а после его извержения сменился процессом, подобным процессу образования лессов в ее западной части. В отличие от Тункинской долины, в которой роль обломочного кварца увеличивается в лессах с запада на восток, в Окинской впадине роль обломочного кварца снижается с течением времени. Обломочный кварц играет заметную роль в лессах, накопившихся до Жом-Болокского лавового покрова, но не обнаруживает значимого присутствия в отложениях

лессов на этом лавовом покрове. Работы здесь проводились на ограниченной территории, поэтому пространственные изменения состава лессов пока не оценены.

Группирование лессов Тункинской долины и Окинской впадины по химическому составу на факторных диаграммах

Общий анализ характера распределения в лессах петрогенных оксидов проводится с построением диаграмм факторов для лессов Окинской впадины и Тункинской долины (рис. 15). Для выяснения вероятных местных источников лессового материала в выборку включены также составы осадочных пород пачек 8 и 9 верхней части осадочного заполнения Тункинской впадины, вскрытых скважиной Тунка-13. Пачка 8, сложенная песками, соответствует по спорово-пыльцевому комплексу охристой анососовской свите, пачка 9 коррелируется по возрасту со средне-верхнеплейстоценовыми песками (Логачев, 1958, 1974; Хассан и др., 2020).

Главное направление изменчивости состава лессов (фактор 1) обусловлено в основном отрицательной корреляцией оксидов Na_2O и CaO (в меньшей степени SiO_2 и MgO) с группой оксидов Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 и K_2O . Положительные значения фактора 1 характеризуют красноцветные отложения анососовской свиты (пачка 8 скв. Тунка-13), с которыми близко соотносятся желтые аргиллиты гр. 3 лессов Окинской впадины. Отрицательные значения фактора 1 характеризуют группы 1 и 2 лессов Окинской впадины. Фигуративные точки лессов Тункинской долины группируются по фактору 1 вблизи начала координат. В содержаниях CaO проявляется карбонатная составляющая лессов и присутствие компонентов, сопутствующих карбонатам, в содержаниях Fe_2O_3 и других оксидов – литогенез аллювия анососовской свиты в условиях семиаридного климата.

Второе по значимости направление изменчивости состава лессов (фактор 2) в основном определяется отрицательной корреляцией между ППП* и SiO_2 . Положительная

связь ППП* с CaO и MgO (карбонат) (гр. 1 лессов Окинской впадины, большинство лессов Тункинской долины) противопоставляется отрицательной связи SiO₂ с Na₂O, Al₂O₃ и K₂O (гр. 2 лессов Окинской впадины с обломочным материалом полевых шпатов и кварца, лессы Марты)

Третье по значимости направление изменчивости состава лессов (фактор 3) подчеркивает вариации FeO и MnO в противовес SiO₂ и Fe₂O₃. По восстановленности железа особо выделяются желтые аргиллиты гр. 3 Окинской впадины, тогда как по окисленности железа – субаквальные осадочные породы верхней части разреза Тункинской впадины.

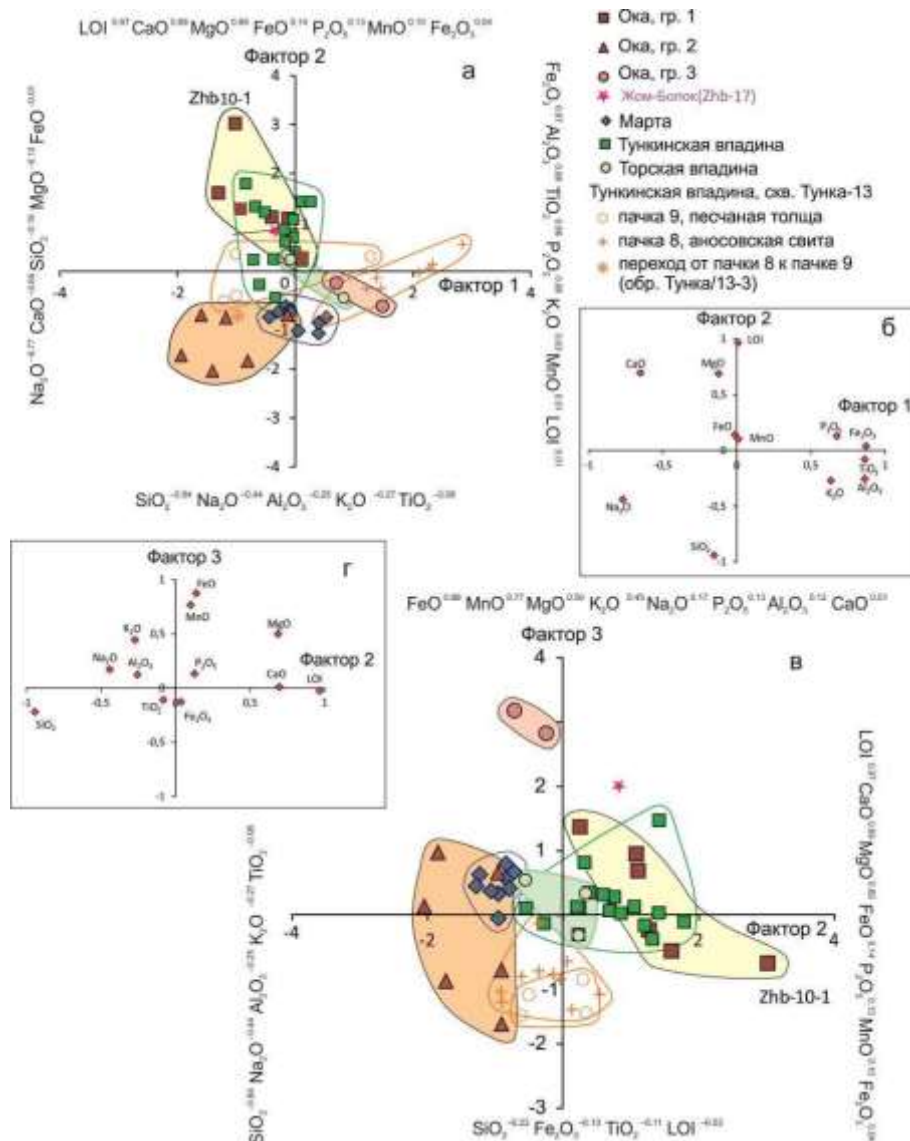


Рис. 15. Диаграммы результатов факторного анализа петрогенных оксидов лессов Тункинской долины и Окинской впадины. *а, в* – диаграммы окончаний векторов проб, направленных от центра координат; *б, г* – диаграммы окончаний векторов петрогенных оксидов, направленных от центра координат. Для Китая использованы данные (Ding et al., 2001; Fang et al., 2017; Xie et al., 2018; Zhang W. et al., 2018). Расчеты выполнены в программном пакете «Statistica 12».

Fig. 15. Diagrams of the results of factor analysis of major oxides of loesses from the Tunka Valley and Oka Basin. *a, в* – diagrams of ends of sample vectors, directed from the center of coordinates; *б, г* – diagrams of ends of major oxide vectors, directed from the center of coordinates. Data for China are from (Ding et al., 2001; Fang et al., 2017; Xie et al., 2018; Zhang W. et al., 2018). The calculations were performed using the Statistica 12 software package.

Группирование лессов на факторных диаграммах петрогенных оксидов дополняется группированием микроэлементов. Первые три (по значимости) направления изменчивости микроэлементов лессов (факторы 1, 2 и 3) характеризуются общим возрастанием роли различных групп микроэлементов. В факторе 1 особо выделяются редкоземельные элементы и Th в противовес Mo; в факторе 2 – элементы группы железа (Co, Ni, V, Cr) с U и

Hf в противовес Sr и Pb, в факторе 3 – Pb, Rb, Ba и Be в противовес Mo и Sr. По фактору 1 отделяются лессы Торской впадины, имеющие слегка повышенные содержания РЗЭ, по фактору 2 обособляются вектора проб ановской свиты, а по фактору 3 – разделяются вектора проб лессов Тункинской долины и Марты (положительные значения) и вектора проб лессов групп 1 и 2 Окинской впадины (отрицательные значения) (рис. 16).

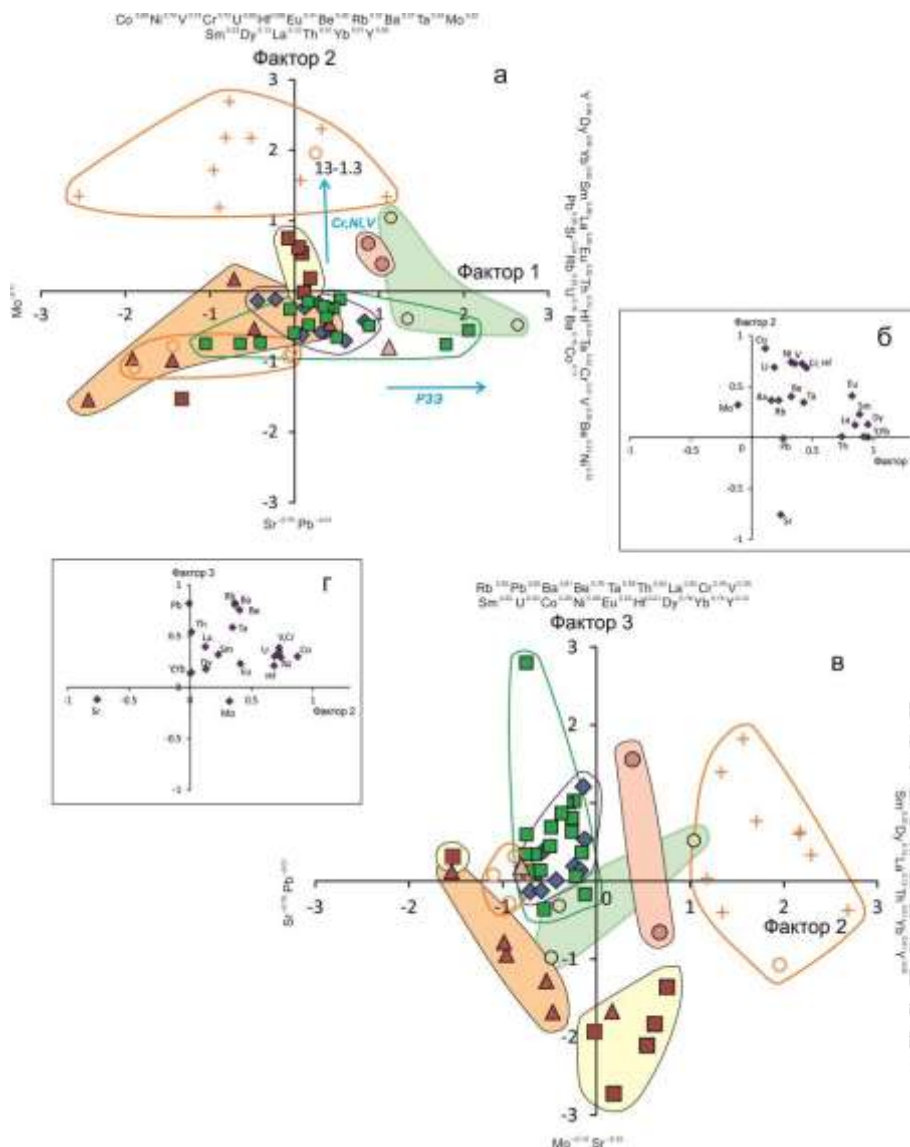


Рис. 16. Диаграммы результатов факторного анализа микроэлементов лессов Тункинской долины и Окинской впадины. *а, в* – диаграммы окончаний векторов проб, направленных от центра координат; *б, г* – диаграммы окончаний векторов элементов, направленных от центра координат. Условные обозначения см. рис. 15. Для Китая использованы данные (Ding et al., 2001; Zhang L. et al., 2016; Xie et al., 2018; Zhang W. et al., 2018). Расчеты выполнены в программном пакете «Statistica 12».

Fig. 16. Diagrams of the results of factor analysis of trace elements of loesses from the Tunka Valley and Oka Basin. *a, в* – diagrams of ends of sample vectors, directed from the center of coordinates; *б, г* – diagrams of ends of element vectors, directed from the center of coordinates. Symbols are as in Fig. 15. Data

for China are from (Ding et al., 2001; Zhang L. et al., 2016; Xie et al., 2018; Zhang W. et al., 2018). The calculations were performed using the Statistica 12 software package.

Сравнение состава лессов юга Восточной Сибири и сопредельных территорий Азии

В контексте настоящей работы лессы Тункинской долины и Окинской впадины рассматриваются как представительные для лессов Юга Восточной Сибири (см. рис. 1). Для сопоставления привлекаются опубликованные данные о составе лессов Китая, а, частично, Якутии и Таджикистана.

На диаграммах $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (рис. 17а,б) тренды лессов Китая и Якутии смещены к гранит-риолитовым составам магматических пород, тренд лессов Восточной Сибири – к базальт-габбровым составам.

Тренды протягиваются из областей диаграмм, представляющих метаморфические породы, в области диаграмм, характеризующих магматические породы. Фигуративные точки китайских лессов (горы Цинлин, Восточный Китай и Лессовое плато) находятся в области метаморфических пород. Фигуративные точки Северо-Восточного Китая образуют две группы: одна перекрывает поле составов лессов гор Цинлин, Восточного Китая и Лессового плато в области метаморфических пород, другая смещается в область магматических пород. Фигуративные точки лессов Якутии частично расположены в области метаморфических пород, частично – в области магматических пород.

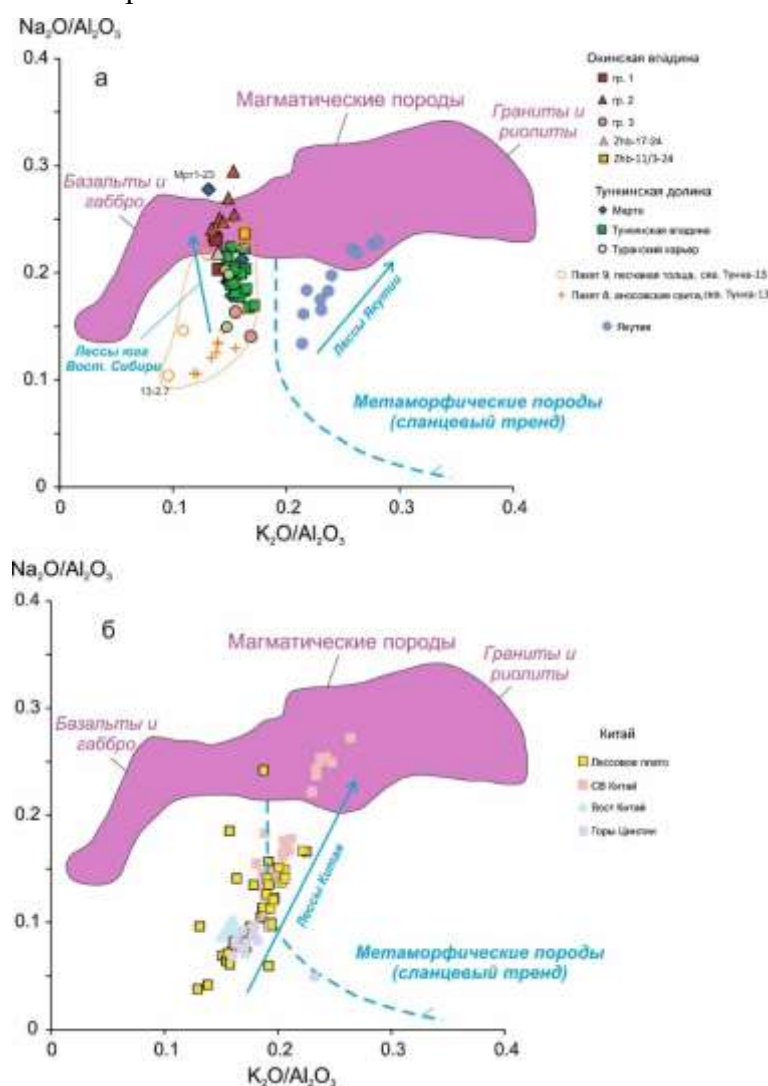


Рис. 17. Диаграммы $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ для лессов юга Восточной Сибири и Якутии (а) и Китая (б). Поля магматических и метаморфических пород из работы (Muhs, 2013). Для Восточной Сибири используются данные настоящей работы, для Якутии – данные из работы (Muhs, 2013), для Китая – данные (Ding et al., 2001; Zhang H. et al., 2012; Muhs, 2013; Zhang L. et al., 2016; Fang et al., 2017; Xie et al., 2018; Zhang W. et al., 2018).

Fig. 17. $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ diagrams for loesses in the south of Eastern Siberia and Yakutia (a) and China (b). Fields of igneous and metamorphic rocks are shown after (Muhs, 2013). For Eastern Siberia, the data of this work are used, for Yakutia – the data from (Muhs, 2013), for China – the data used are from (Ding et al., 2001; Zhang L. et al., 2016; Fang et al., 2017; Xie et al., 2018; Zhang W. et al., 2018).

Мы располагаем представительными данными по лессам юга Восточной Сибири с сопоставлением их состава с составом более ранних (плиоцен-эоплейстоценовых) речных песков. Фигуративные точки речных песков Тункинской долины находятся в области метаморфических пород. Фигуративные точки лессов Тункинской долины смещаются к полю магматических пород. Наиболее продвинуты вдоль тренда фигуративные точки лессов гр. 2 (подстилающие лавы) Окинской впадины, вторичные желтые аргиллиты гр. 3 смещены в противоположном направлении.

В лессах плато Китая CaO возрастает со слабым увеличением MgO . Низко-Са началу тренда соответствуют фигуративное поле

лессов Северо-Восточного и Восточного Китая, высоко-Са окончанию тренда – фигуративное поле лессов Таджикистана (рис. 18б). Группы лессов Восточной Сибири различаются между собой по соотношению MgO – CaO . Лессы Марты соответствуют началу тренда лессов Тункинской долины – возрастания CaO с повышением MgO . Лессы группы 1 (выше лавового покрова) характеризуются повышенным содержанием MgO при широком диапазоне CaO . В лессах группы 2 (ниже лавового покрова) содержания MgO и CaO сравнительно низкие. Лессы Якутии отличаются еще более низким содержанием MgO (рис. 18а).

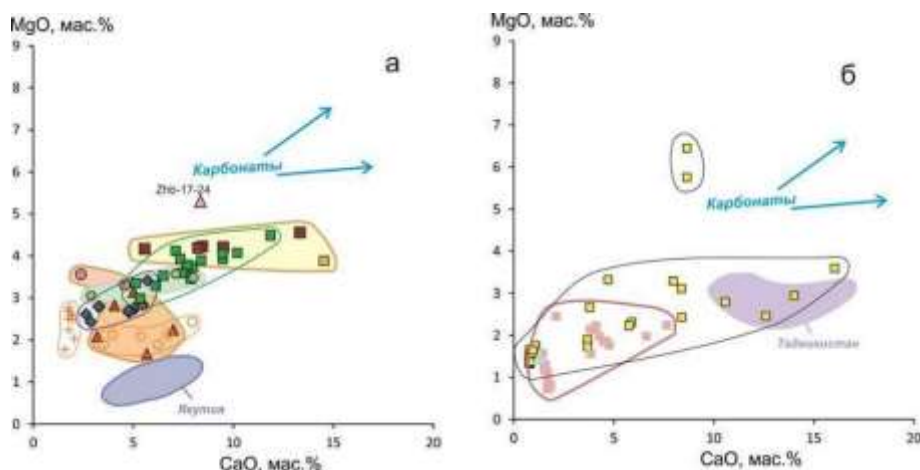


Рис. 18. Диаграммы MgO – CaO для лессов юга Восточной Сибири, Якутии (а) и Китая, Таджикистана (б). Фигуративные поля лессов Якутии и Таджикистана из работы (Muhs, 2013). Для Китая использованы данные (Ding et al., 2001; Zhang L. et al., 2016; Fang et al., 2017; Xie et al., 2018). Условные обозначения см. на рис. 17.

Fig. 18. MgO vs CaO diagrams for loesses in the south of Eastern Siberia, Yakutia (a) and China, Tajikistan (b). Data fields of loesses from Yakutia and Tajikistan after (Muhs, 2013). Data for China are from (Ding et al., 2001; Zhang L. et al., 2016; Fang et al., 2017; Xie et al., 2018). Symbols are as in Fig. 17.

Лессы Северо-Восточного и Восточного Китая образуют тренд возрастания отношения La/Sc , в начале которого находится фигуративное поле пород Лессового плато, Восточного Китая и Северо-Восточного Тибета. Это поле соответствует составу верхней континентальной коры (UCC). Лессы Восточной Сибири образуют тренд возрастания отношения Co/Th . На продолжении этого тренда находятся аллювиальные пески верхней

части разреза Тункинской впадины (рис. 19а,б). На тройной диаграмме Co – Th – Hf (рис. 20б) фигуративные точки лессов Восточной Сибири распределяются вдоль стороны Co – Th , тогда как фигуративные точки лессов Китая образуют фигуративные поля в средней части диаграммы. На тройной диаграмме Th – La – Sc (рис. 20а) фигуративные точки лессов Китая смещены к составу

гранита, фигуративные точки лессов Восточной Сибири – к составам андезита и базальта.

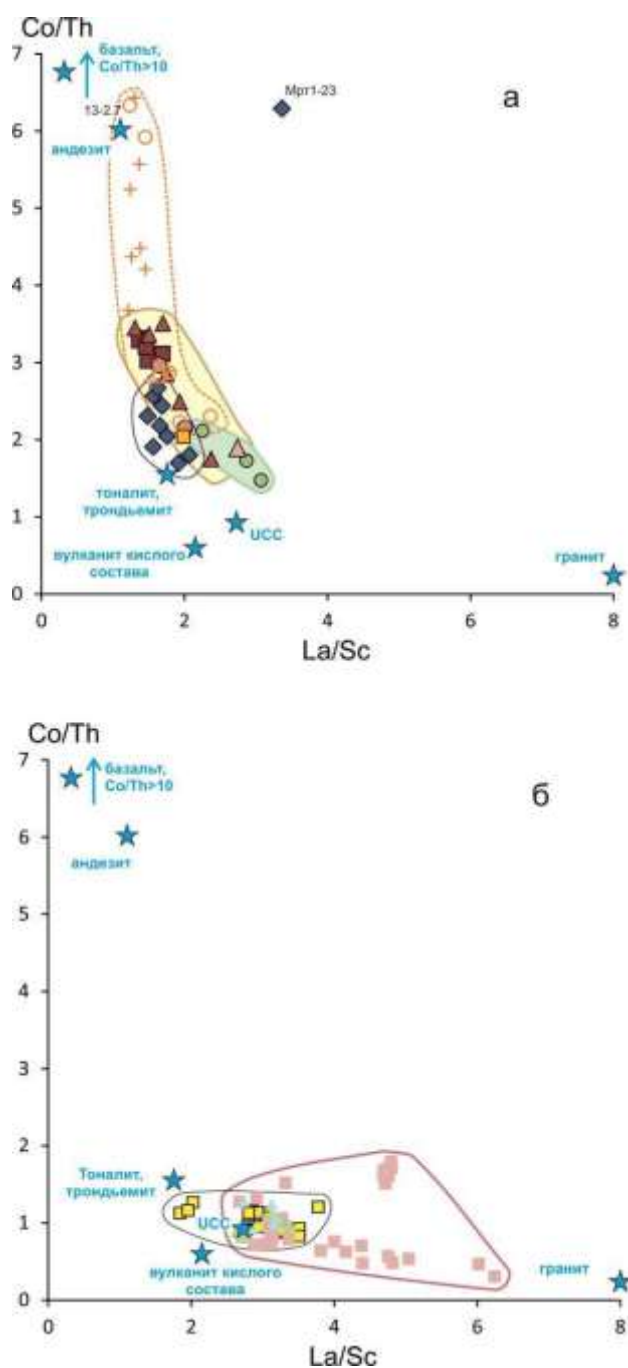


Рис. 19. Диаграммы Co/Th – La/Sc для лессов юга Восточной Сибири (а) и Китая (б). Условные обозначения см. рис. 17. Эталонные составы пород из работы (Xie et al., 2018). Для Китая использованы данные (Ding et al., 2001; Zhang L. et al., 2016; Xie et al., 2018; Zhang W. et al., 2018).

Fig. 19. Co/Th vs La/Sc diagrams for loesses of the south of Eastern Siberia (a) and China (b). Symbols are as in Fig. 17. Reference rock compositions are from (Xie et al., 2018). Data for China are from (Ding et al., 2001; Zhang L. et al., 2016; Xie et al., 2018; Zhang W. et al., 2018).

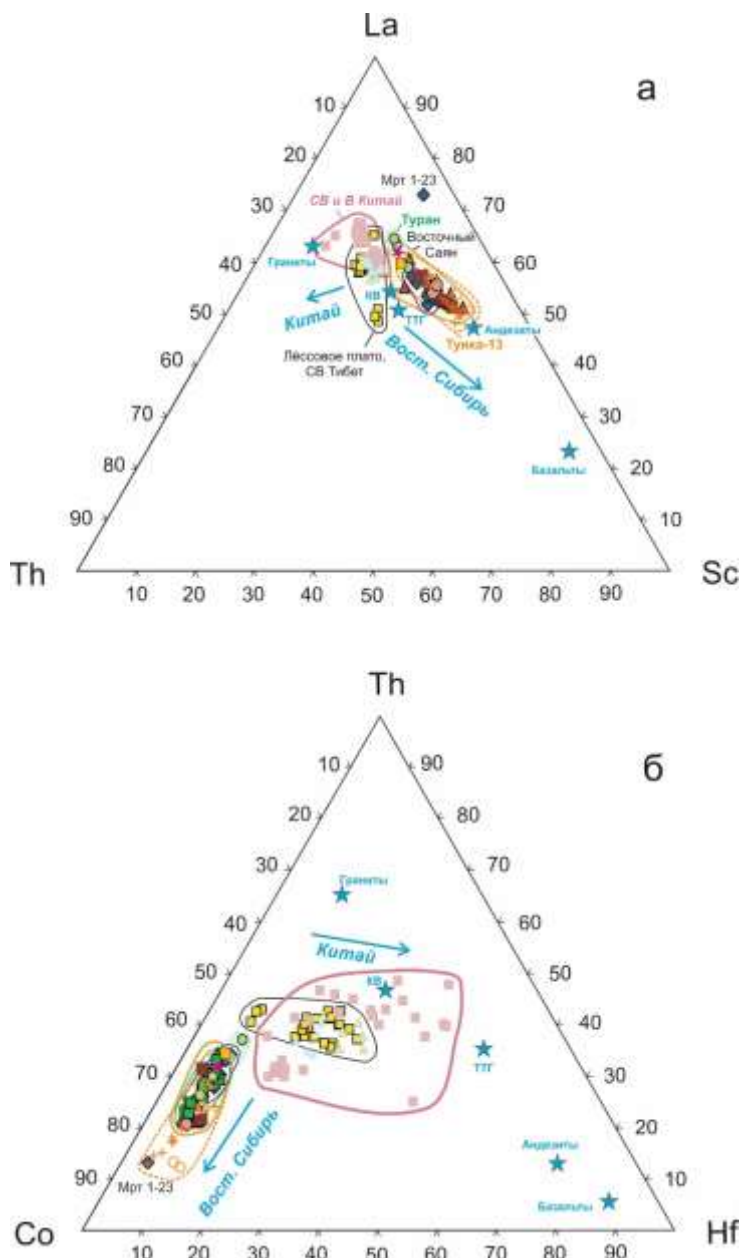


Рис. 20. Тройные диаграммы Th–La–Sc (а) и Co–Th–Hf (б) для лессов юга Восточной Сибири и Китая. Условные обозначения см. рис. 17. Для Китая использованы данные (Ding et al., 2001; Zhang L. et al., 2016; Xie et al., 2018; Zhang W. et al., 2018).

Fig. 20. Ternary diagrams Th–La–Sc (a) and Co–Th–Hf (b) for loesses from the south of Eastern Siberia and China. Symbols are as in Fig. 17. Data for China are from (Ding et al., 2001; Zhang L. et al., 2016; Xie et al., 2018; Zhang W. et al., 2018).

Обсуждение

Реконструкция обстановки образования лессов в Окинской впадине

В настоящее время большая часть Усть-Жом-Болокского лавового покрова в Окинской впадине покрыта почвой и занята листовенным лесом с кустарниковым

подлеском, хотя местами, на неровной поверхности аа-типа, растительность отсутствует. Неровности образуются вследствие истечения лавы из внутренней части покрова с последующим обрушением кровли образовавшихся туннелей. Часть территории Окинской впадины не залесена и представляет собой степную зону, покрытую почвой с травянистой растительностью. Лавовый покров

здесь имеет гладкую поверхность типа пахоехое. По этой поверхности двигался ледник и как бульдозер растаскивал по ней валунные отложения. Очевидно, что ледник спускался в Окинскую впадину и до, и после лавовых извержений. В пользу существования ледника в Окинской впадине после извержения Усть-Жом-Болокского лавового покрова служит ровный слой хорошо окатанных валунов (класс 3 и 4 по шкале А.В. Хабакова), образующий равнину на гладкой поверхности лавового покрова (см. рис. 8а,б). Вряд ли равнина этой территории создавалась миандрирующими водотоками.

Каких-либо следов взаимодействия базальтовых лав с ледниками не обнаружено. Возможно, ледник деградировал перед извержением лав, и открывшаяся пост-ледниковая равнина покрывалась лессовым материалом. В результате вулканического извержения подвижных базальтовых магматических расплавов на ровной поверхности деградировавшего ледникового щита образовалась базальтовая щитовая постройка, бронировавшая пост-ледниковую равнину, на которой, в отсутствие водотоков, прошла планация рельефа за счет эоловых процессов. При извержении лавы ее поверхность была поднята на 10–30 м выше базиса эрозии – равнины, подготовленной покровным ледником и доработанной эоловой деятельностью. Эоловый перенос пылеватых частиц продолжался и после лавового извержения. В результате, поверхность лав была перекрыта слоем лессов, мощность которых в западинах вулканического рельефа превысила 6 м.

Лессовые отложения, предшествующие излиянию Усть-Жом-Болокского лавового покрова, формировались в условиях холодного климата. Об этом свидетельствует почти полное отсутствие в них глинистых минералов. Физическое (морозное) выветривание порождало пылеватые частицы при отсутствии новообразования глинистых минералов. Чтобы появился глинистый материал, нужны теплые и влажные условия. Эти условия проявились после извержения лав. Важно подчеркнуть, что отложение лессов под лавовым потоком свидетельствует об обстановке оледенения непосредственно перед извержением, тогда как лессы, перекрывающие

лавовый покров могли быть оторваны во времени от базальтового извержения. Об этом можно судить по распространению в перекрывающих лессах глинистых минералов в таком же количестве как в осадочных отложениях современной поймы.

С учетом начала накопления биогенного кремнезема (диатомовых) в байкальских осадках и определения для них календарного возраста по данным радиоуглеродного датирования предполагается быстрое изменение климатических условий в Прибайкалье уже около 15 тыс. лет назад, произошедшее одновременно с потеплением Бёллинг. Значение этого рубежа в осадках оз. Байкал подчеркивалось в работе (Chebykin et al., 2002), а позднее такой же рубеж палеоклиматической смены обозначался при радиоуглеродном датировании осадков оз. Хубсугул (Прокопенко и др., 2003). Календарные даты, полученные радиоуглеродным датированием древесных остатков из вулканогенных и осадочных отложений суходольных впадин северо-восточной части Байкальской рифтовой системы, свидетельствуют о том, что в это же время начались тектонические движения, сопровождавшиеся вулканической деятельностью (Rasskazov et al., 2010). Климат начал меняться на более теплый и влажный короткими потеплениями Бёллинг и Allerød (Bølling и Allerød) с последующим холодным интервалом молодого дриаса (Younger Dryas), завершающего плейстоцен. Климат окончательно сменился на более теплый в голоцене. На территории началась речная эрозия. Восточный край Усть-Жом-Болокского лавового покрова был расчленен р. Окой до уровня подошвы и ниже.

Глубинная эрозия р. Оки привела к расчленению осадочных отложений Окинской впадины, подстилающих лавовый покров. Глубина вреза относительно добазальтовой равнины в районе Сайлага была порядка 3–5 м. Подошва базальтового покрова в центральной части Окинской впадины (в районе Сайлага) была опущена. По отсутствию лессов ниже верхнего потока и наличию межбазальтовой линзы мелких, хорошо сортированных, окатанных аллювиальных галечников в районе Номто-Гола (см. рис. 4) можно сделать вывод о существенном отличии этого разреза

от разреза Сайлаг (см. рис. 3). Мы предварительно относим вулканогенно-осадочную толщу района Номто-Гола к хирбэсинской свите плиоцена–эоплейстоцена, фрагменты которой распространены на низком ярусе рельефа вдоль долины р. Оки, рядом с пос. Усть-Боксон и Орликом (Рассказов, 1993; Рассказов и др., 2000).

Возрастные оценки лессов, корреляции

Возникает вопрос о возрасте оледенения, которому сопутствовала транспортировка обломочного материала в виде отложений валунов и лессов, подстилающих и перекрывающих Усть-Жом-Болокский лавовый покров в Окинской впадине, как, впрочем, и вопрос о времени извержения этого покрова. А.И. Киселев и др. (1979, с. 40) писали: «Потоки оливиновых базальтов заполнили днища долин рек Хи-Гол, ее левых притоков

Жусэрлиг и Харганата, долину р. Жом-Болок от истоков до устья и достигли правого борта долины Оки. В верховьях рек лавовые языки образовали подпруженные озера, самое крупное из которых Хара-Нур». Далее (стр. 44): «Послеледниковый возраст вулканогенных образований Жом-Болока и Хи-Гола не вызывает сомнения. Центры излияния и потоки лавы расположены в днище троговой долины последнего оледенения, базальты обтекают или перекрывают верхнечетвертичные морены ниже устья р. Шарзы, выполняют эрозионную долину, промытую в конечной морене Жом-Болока ниже р. Бомба-Жалга и перекрывают 10–12-метровую террасу ниже устья р. Обтой». Фотография широкой троговой долины р. Жом-Болок, заполненной базальтовыми лавами выше по течению р. Шарзы, приведена на рис. 21.



Рис. 21. Широкая троговая долина р. Жом-Болок, заполненная лавами. Фотография сделана выше притока р. Шарзы.

Fig. 21. Wide trough valley of the Zhom-Bolok River filled with lavas. The photograph was taken to the east of the tributary Sharza River.

Голоценовый возраст извержений принимался всеми авторами, проводившими изучение вулканизма в долине р. Жом-Болок (Адамович и др., 1959; Ярмолюк и др., 2003; и др.). А.И. Киселевым и др., (1979) предполагалось, что долину Жом-Болока заполнил

единный 70-километровый поток, излившийся на вулканах пади Хикушка. Однако, в долине Жом-Болока имеются узкие ущелья, через которые лава в голоцене не могла спуститься в Окинскую впадину. Из этого следует, что центры извержения, кроме пади Хикушка,

должны были находиться в долине р. Жом-Болок или ее притоках, а, возможно, и в Окинской впадине. Этот вывод был сделан в монографии (Расказов и др., 2000). В настоящей работе представлены фактические материалы, свидетельствующие о доголоценовом извержении Усть-Жом-Болокского лавового покрова в обстановке накопления лессов, сопутствующих деятельности ледников.

Усть-Жом-Болокский лавовый покров мог образоваться во время последнего (сартанского) оледенения (максимум около 20–18 тыс. лет назад), соответствующего «холодной» морской изотопной стадии МИС 2, или во время более ранних оледенений первой половины позднего плейстоцена, соответствующих «холодным» морским изотопным стадиям МИС 4, МИС 5.2 и МИС 5.4 (Bassinot, 2009). По измеренным значениям ^{14}C финал сартанского оледенения в Приангарье обозначается пачкой лессовых пород верхнего плейстоцена с датировкой 12570 ± 180 лет (Иваньев, Цейтлин, 1980) (календарные значения возраста превышают эти значения, в 1980-х гг. они не рассчитывались).

Недавно была опубликована работа о «тефрохронологических исследованиях» вулканических извержений в долине р. Жом-Болок с далеко идущими выводами об эпизодах вулканической деятельности в широком диапазоне конца позднего плейстоцена и голоцена (Щетников и др., 2019). Авторы утверждали, что они идентифицировали «тефру» в колонке донных отложений длиной 1.5 м в оз. Каскадное-1, расположенном в 3–4 км западнее вулкана Перетолчина. Под «тефрой» авторы понимали «...стекла без включений и стекла с включениями тонкозернистых минералов двух типов: стекла с пылеватыми включениями тонкозернистых минералов, стекловидная масса со слабо проявленной раскристаллизацией, включающей микрозерна кварца, плагиоклаза, оливина, пироксена и пылеватые включения рудного материала» (стр. 338). В «тефре» они отметили амфибол и определили в ее составе 0.9 мас.% Na_2O и 0.4 мас.% K_2O . Морфология частиц «стекла» не охарактеризована, поэтому представляют

ли «стекла» действительно вулканические частицы – осталось не ясно. В материале с приведенными характеристиками к извергавшимся базальтам могут иметь отношение только зерна оливина и, может быть, частично (в зависимости от состава) – зерна клинопироксена, плагиоклаза и рудного минерала. Такие минералы как кварц, ортопироксен или амфибол в излившихся щелочно-базальтовых расплавах Восточных Саян никогда не кристаллизовались. Очевидно, что материал, принимаемый авторами за «тефру», большей частью не имеет отношения к вулканическому материалу, извергавшемуся на вулканах пади Хикушка.

В версии такой же статьи на английском языке авторы привели фотографии фрагментов «тефры» (Shchetnikov et al., 2019; Fig. 6). Фотография, представленная на рис. 22, действительно показывает частицы базальтового материала с характерной для них микропористостью и неровными краями. Глубина отбора этой пробы, однако, не указана. На рис. 4 этой статьи приведены результаты измерения магнитной восприимчивости, которая заметно возрастает только в интервале глубин 140–150 см, соответствующем радиоуглеродной датировке около 14 тыс. календарных лет. В вышележащих донных отложениях значения магнитной восприимчивости не превышают фоновые значения, характеризующие осадочный материал, не содержащий «тефру». Отсутствие конкретной документации вулканических микрочастиц, подобных микрочастицам в рис. 22, в разрезе донных отложений делает построение авторов с выводом о вулканической активности на протяжении всего голоцена сомнительными. Вулканический материал мог накопиться в основании донных отложений либо в момент начальных потеплений бёллинг и аллерёд, когда озеро только образовалось и началась биопродуктивная деятельность, либо до начала образования озера. В любом случае речь идет о вулканическом событии позднего плейстоцена.

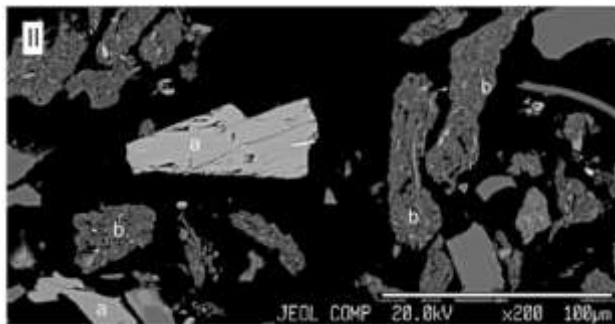


Рис. 22. Фотография обломочного материала из донных отложений оз. Каскадное-1 в обратных электронах на микрозонде JXA-8200 (Shchetnikov et al., 2019; Fig. 6II). Номер пробы и глубина ее отбора не указываются. Авторы различают на фотографии однородное вулканическое стекло (a) и агрегированное стекло с кристаллическими микролитами (b). Буквой b обозначены действительно пористые микрочастицы базальтового материала, буквой a – обломок кристалла с хорошо выраженной спайностью. Частицы, представленные на других фотографиях этого рисунка (Shchetnikov et al., 2019; Fig. 6I), не относятся к вулканическому материалу.

Fig. 22. Photograph of detrital material from the bottom sediments of Lake Kaskadnoe-1 in backward electrons on the JXA-8200 microprobe (Shchetnikov et al., 2019; Fig. 6II). The sample number and sampling depth are not indicated. In the photograph, the authors distinguish homogeneous volcanic glass (a) and aggregated glass with crystal microlites (b). The letter b denotes indeed porous microparticles of basaltic material, the letter a denotes a crystal fragment with well-defined cleavage. The particles shown in other photographs of this figure (Shchetnikov et al., 2019; Fig. 6I) do not belong to volcanic material.

Возникает вопрос – могут ли иметь пористые микрочастицы генетическое отношение к материалу вулканических конусов? В составе микрочастиц, приведенном авторами, кроме аномально низких содержаний Na_2O (0.1–1.5 мас.%) и K_2O (0.2–1.1 мас.%), нужно отметить необычно высокое содержание Fe_2O_3 (11.4–20.7 мас.%), а также низкие содержания Al_2O_3 (1.2–10.6 мас.%) и P_2O_5 (<0.08 мас.%). Такие содержания петрогенных оксидов существенно отличаются от содержаний в базальтах. Следовательно, проанализированные пористые микрочастицы не имеют отношения к материалу вулканических конусов. Приведенные содержания перечисленных оксидов подобны содержаниям оксидов псевдотахилитов, поэтому можно

предположить, что пористые микрочастицы обозначают феномен «эруптивного псевдотахилита», который маркирует сильную тектоническую подвижку.

Датирование непосредственно материала базальтовых извержений, произошедших в позднем плейстоцене и голоцене, представляет собой особую задачу, требующую понимания возможностей радиоизотопных методов датирования и скрупулезного подбора материала с его подробной геологической документацией. Точное датирование таких молодых извержений в K–Ar-изотопной системе часто невозможно из-за ничтожно малой концентрации радиогенного ^{40}Ar , накопившегося в результате слишком короткого времени радиоактивного распада ^{40}K после кристаллизации базальта. Малая концентрация радиогенного ^{40}Ar искажается присутствием в стеклах пузырьков избыточного аргона. В результате для исторического или голоценового извержения можно получить датировку в десятки и сотни тыс. лет (Рассказов и др., 2000). В методе $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ со ступенчатым нагревом в исключительных случаях удастся обосновать возраст порядка 12 тыс. лет (Gutmann et al., 2000). Рутинное использование датировок для базальтов голоцена и верхнего плейстоцена только в K–Ar-изотопной системе может привести к ошибочным выводам. Необходим контроль этих датировок другими методами датирования.

На северо-востоке Байкальской рифтовой системы последняя серия вулканических извержений началась около 14.4 тыс. лет назад и завершилась около 2 тыс. лет назад (в ^{14}C календарном летоисчислении с 1950 г.). Предшествующее извержение вулкана Обильного, датированное методом $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ в долине р. Чулбачи (возраст около 190 тыс. лет), было оторвано во времени от молодой серии извержений (Rasskazov et al., 2010).

В юго-западной части Байкальской рифтовой системы, на территории Центральной Монголии, выделяется серия вулканических извержений последних 50 тыс. лет. Извержения датировались U–Th методом (Рассказов и др., 2014). Получены датировки извержений около 50 тыс. лет (западная группа вулканов рядом с вулканом Хорго) и 38–35 тыс. лет (лавовые потоки долины верхнего течения Орхона). Время заключительного извержения вулкана Хорго оценивалось с учетом календарных ^{14}C датировок органического материала донных осадков оз. Тэрхийн-Цаган-Нур: 5690 ± 260 лет и 7710 ± 810 лет

(Чувашова и др., 2007). Это озеро образовалось в результате подпруживания р. Чулутын-Гол излившимися лавами вулкана Хорго (Девяткин, 2004). С учетом результатов измерений изотопов в U–Th системе заключительное излияние вулкана Хорго, образовавшее подпрудную дамбу, относится к раннему голоцену и коррелируется по времени со структурной перестройкой вулканической зоны хр. Удокан около 9 тыс. лет назад (Рассказов, 1999; Чувашова и др., 2007). Между тем, для голоценового вулкана Хорго, например, в японской лаборатории была получена K–Ar датировка 0.14 ± 0.02 млн лет (Enkhtuvshin, 1995).

В геодинамическом отношении вулканизм территорий Восточных Саян и Центральной Монголии составляет единую область юго-западной части Байкальской рифтовой системы, поэтому эволюция вулканизма этих территорий может быть в общем сходной. Для самой молодой вулканической постройки Улуг-Арга в Восточной Туве получена U–Th-оценка возраста около 50 тыс. лет (Рассказов и др., 2014). Эта датировка согласуется с K–Ar датировкой (Ярмолук и др., 1999). В данном случае имеется U–Th-изотопное подтверждение K–Ar оценки возраста. Конус вулкана Улуг-Арга, так же как Усть-Жом-Болокский лавовый покров, перекрыт мореной (Грачев, Лопатин, 1978). Не исключено, что лессы, подстилающие Усть-Жом-Болокский лавовый покров, отложились перед Каргинским интерстадиалом (т.е. перед МИС 3). Кроме голоценовых извержений, близких по возрасту извержению вулкана Хорго, в Окинской впадине и

сопредельных районах Восточных Саян можно ожидать вулканические события, близкие по возрасту орхонским извержениям в Монголии 38–35 тыс. лет назад.

Послебазальтовые лессы Окинской впадины и вторичные желтые аргиллиты в основании Усть-Жом-Болокского лавового покрова

Для оценки климатических условий накопления лессов показательны оценки соотношения карбонатных и глинистых минералов, выявляемые на диаграмме ППП* – CO₂. (рис. 23). Морозное физическое выветривание приводит к дроблению материала до пылеватых частиц. Чтобы образовались глинистые минеральные фазы, нужно тепло и вода. В глинистых минералах содержится около 10–12 мас.% кристаллизационной H₂O. Прямая зависимость ППП* от концентрации CO₂ означает, что при прокаливании образца все потери происходят за счет разложения карбоната, выделяющего CO₂.

Фигуративные точки лессов Окинской впадины гр. 2 (ниже лавового покрова) образуют тренд чуть выше линии ППП* : CO₂ = 1. Тренд протягивается параллельно этой линии. Содержание кристаллизационной H₂O в лессах гр. 2 остается, примерно, одинаковым (около 1–2 мас.%), т.е. содержание глинистых минералов в лессах гр. 2 в разных образцах практически не меняется. Меняется содержание карбоната. В обр. zhb-11/3-24 количество карбоната аномально высокое среди лессов, подстилающих лавовый покров, что отражается в цементации этой породы.

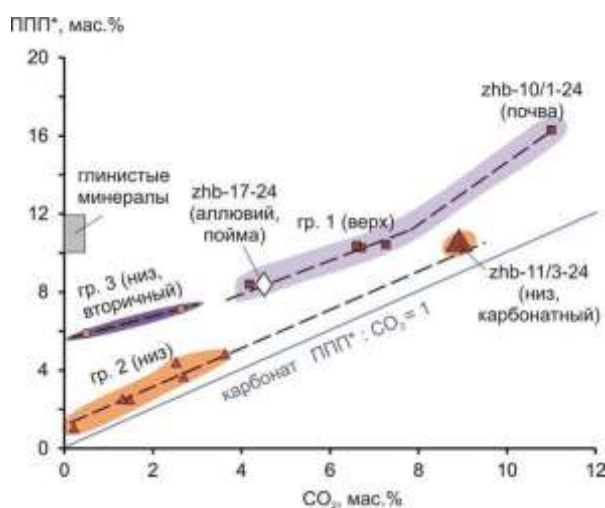


Рис. 23. Диаграмма ППП* – CO₂. ППП* – потери при прокаливании вместе с сорбированной влагой (H₂O) и CO₂. Условные обозначения см. на рис. 14.

Fig. 23. LOI* vs CO₂ diagram. LOI* – loss on ignition together with sorbed moisture (H₂O⁻) and CO₂. Symbols are as in Fig. 14.

С одной стороны, фигуративные точки вторичных желтых аргиллитов гр. 3 смещаются от линии ППП* : CO₂ = 1 при низком CO₂ (т.е. низком содержании карбоната). Содержание H₂O в этой группе составляет в среднем около 6 мас.%, т.е. выше, чем в неизмененных подстилающих лессах гр. 2. С другой стороны, фигуративные точки перекрывающих лессов гр. 1 располагаются в виде тренда, также поднятого над линией ППП* : CO₂ = 1 при более высоком содержании CO₂, чем в желтых аргиллитах гр. 3. Повышенное содержание глинистых минералов имеет маркирующее значение для лессов гр. 1, перекрывающих Усть-Жом-Болокский лавовый покров. Вторичные желтые аргиллиты гр. 3 находятся на продолжении тренда этих лессов. Следовательно, вторичные отложения желтых аргиллитов, образовавшиеся в подошве лавового покрова, генетически отличаются от лессов, подстилающих лавовый покров, и генетически близки к лессам, перекрывающим его.

Каким образом материал с повышенным содержанием глинистых минералов внедрился в основание лавового покрова? Возможны два механизма внедрения: 1) перенос материала при боковом проникновении вод р. Оки, несущих тонкий обломочный материал, и 2) перенос материала с поверхности покрова водами, просачивающимися по трещинам в базальтах.

Факты инфильтрации подземных вод с внедрением глинистых частиц в пористые базальты на уровне эрозионного вреза были выявлены на территории Восточных Саян в вулканической толще, вскрытой скважинами на

Боксонском месторождении бокситов, и в обнажении вулканической толщи г. Малгайта (Расказов, 1993; Чувашова и др., 2021; Расказов и др., 2024б). Поры и каверны были заполнены в этом случае исключительно глинистым материалом без примеси терригенной составляющей. В порах и кавернах базальтов образовались черные плотные сливные наполнения. Иногда наблюдается частичное заполнение пустот сливным глинистым материалом.

В рассматриваемом случае подошвы Усть-Жом-Болокского покрова более вероятен перенос смешанного (обломочного и глинистого) материала водами, просачивающимися сверху по трещинам в базальтах. Долины Оки и ее притоков активно расширяются в настоящее время за счет отчленения от субвертикальных бортов блоков базальтовых пород с толстостолбчатой отдельностью по крупным трещинам (рис. 24). Протяженность трещин вдоль краев долин составляет от нескольких метров до десятков метров. Лессовый материал гр. 1, отложенный на поверхности лавового покрова, перемещается в трещины и увлекается вниз по трещине метеорными водами до основания базальтового слоя. Карбонат перерывающих лессов растворяется, и в жилах основания покрова отлагается желтый аргиллит гр. 3 (рис. 25). Подобное проникновение смешанного (обломочного и глинистого) материала наблюдается в виде отложений в основании базальтового потока вулкана Хулугайша в Мондинской впадине, на западном окончании Тункинской долины.



Рис. 24. Трещина в толстостолбчатых базальтах борта долины, заполненная рыхлым материалом, в том числе, материалом перекрывающих лессов гр. 1, которые служили в качестве исходного материала для жил желтых аргиллитов гр. 3 в основании Усть-Жом-Болокского базальтового покрова.

Fig. 24. Crack in thick-columnar basalts of the valley side, filled with loose material, including the one from overlying loesses of group 1, which are a source material for veins of yellow argillites of group 3 at a base of the Ust-Zhom-Bolok basalt cover.

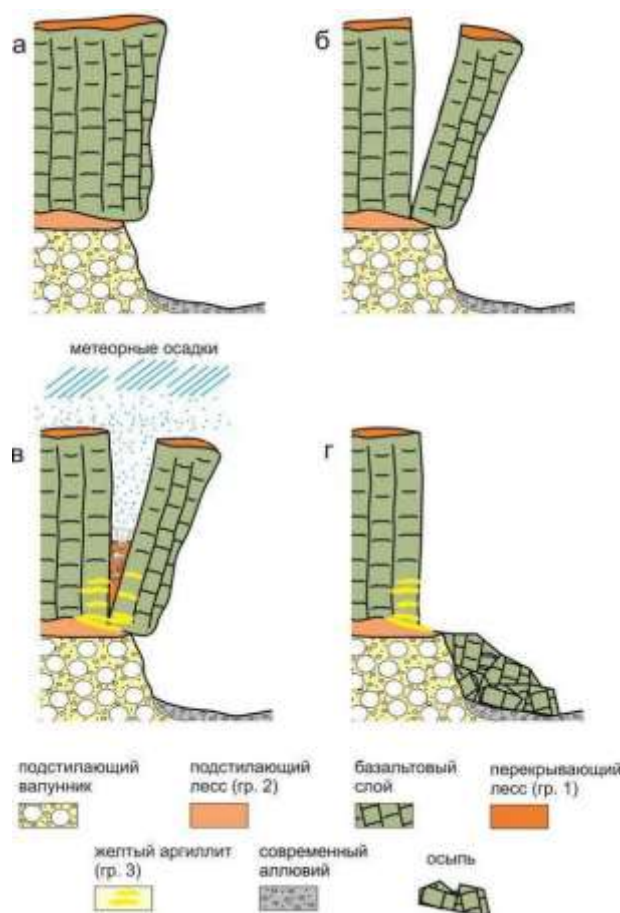


Рис. 25. Схема образования жил вторичных желтых аргиллитов в основании базальтового покрова. *а* – подмыв берега реки с удалением валунного материала из-под лавового покрова; *б* – образование открытой трещины в толстостолбчатых базальтах в борту долины; *в* – заполнение раскрытого пространства трещины рыхлым материалом, в том числе, материалом перекрывающих лессов гр. 1 с участием метеорных осадков (дождевых вод), вмывание материала лессов гр. 1 в пустоты основания базальтового слоя; *г* – обрушение отторженного базальтового блока в реку.

Fig. 25. Scheme of formation of secondary yellow mudstone veins at the base of the basalt cover. *a* - scouring of the river bank with removal of boulder material from under the lava cover; *б* - formation of an open fissure in thick columnar basalts in the valley rim; *в* - filling of an opened space of the fissure with loose material, including material of overlying loesses group 1 with participation of meteoric water (rainwater), washing in of loess material group 1 into voids of the basalt layer base; *г* - collapse of the detached basalt block into the river.

На рис. 23 фигуративные точки основной совокупности лессов гр. 1 Окинской впадины составляют общий тренд с фигуративной точкой тонкозернистого песка, отобранного из поймы р. Жом-Болок (местоположение см. на рис. 2а). В послебазальтовом осадочном материале Окинской впадины во всех случаях

определяется повышенная роль глинистых минералов. В сущности, подстилающие лессы гр. 2 законсервированы под базальтовым покровом и представляют собой закрытую систему. Перекрывающие лессы гр. 1 экспонированы на поверхности и подвергаются постоянному воздействию метеорных

вод и солнечной радиации. Высокая пористость делает эти породы проницаемыми для вод, несущих микрочастицы. Эти лессы отличаются от лессов гр. 2 изменениями, которые характерны для открытой системы. Для таких образований вряд ли можно получить адекватные датировки, к примеру, термолюминесцентным методом.

При анализе распределения точек на диаграмме рис. 23 обращает на себя внимание аномально высокое содержание ППП* (16.31 мас.%) в буром лессе zhb-10/1-24 (см. фотографию на рис. 9б), которое превышает возможное содержание кристаллизационной H₂O в глинистых минералах. В этом лессе имеется примесь органического материала. Слой бурого лесса представляет собой карбонатизированную почву.

Вариации состава лессов в результате механической дифференциации пылеватого материала

Источник пылеватого материала лессов Тункинской долины находился в ее западной части, в районе Мондинской впадины, в которой распространены ледниковые отложения (Медведев, Клейн, 1967) (рис. 26). Перенос пылеватого материала обеспечивался ветрами, направленными от Мондинской впадины вдоль Тункинской долины, с запада на восток. Выявленная смена состава лессового материала от Туранской до Торской впадины (см. рис. 13) может быть следствием его механической эоловой дифференциации. Ближе к источнику (в Туранской впадине) накапливался преимущественно глинистый пылеватый материал, в Тункинской впадине к этому материалу добавлялся обломочный пылеватый материал, а в Торской впадине обломочный пылеватый материал преобладал над глинистым материалом.

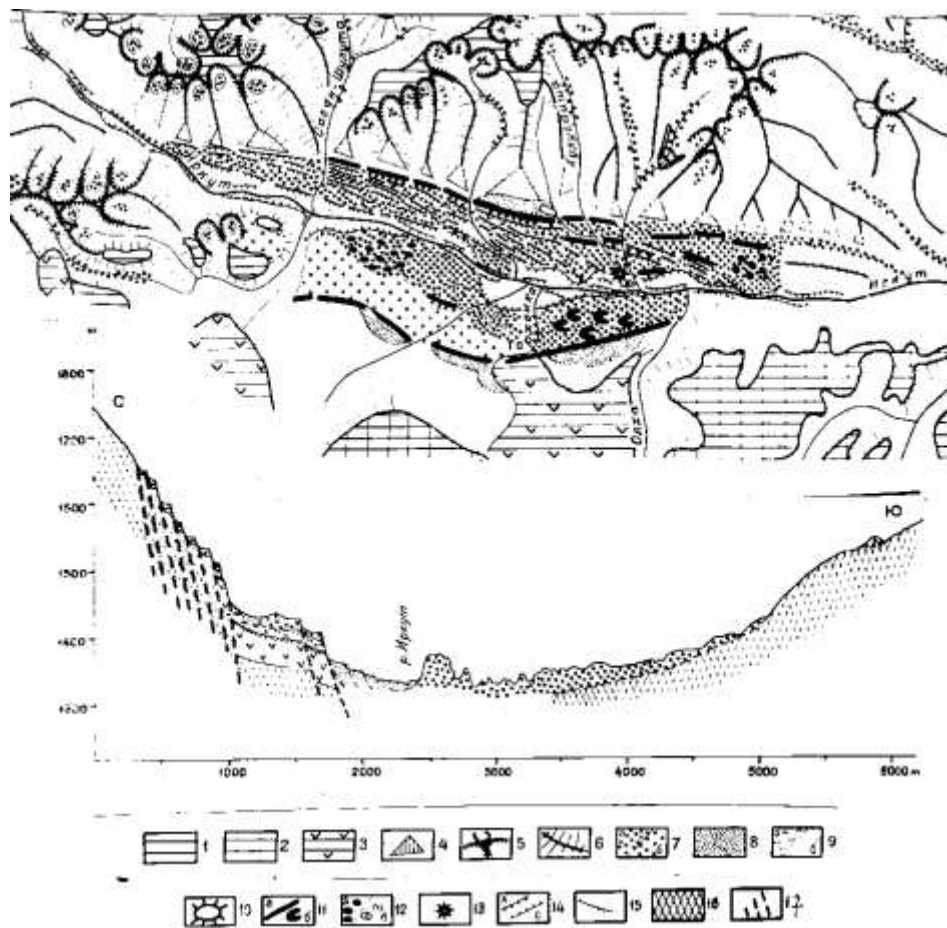


Рис. 26. Геоморфологическая схема Мондинской впадины. Составил М.Е. Медведев. 1 – исходная поверхность выравнивания; 2 – поверхность гольцового выравнивания; 3 – плато, бронированное

базальтовыми покровами; 4 – сбросовые «фасетки» южного уступа Тункинских гольцов; 5 – кары; 6 – водораздельные гребни; 7 – поверхности ледниковой аккумуляции (а) и экзарации (б); 8 – отложения подпруженных ледниковых озер; 9 – охристые отложения эоплейстоцена (а) и аллювиальные отложения речных террас и пойм; 10 – останцы на поверхности выравнивания речных террас и пойм; 11 – валы боковой морены (а) и бараньи лбы (б); 12 – моренный бугристо-западинный рельеф (а) и карстовые воронки (б); 13 – разрушенный миоценовый вулкан Хулугайша; 14 – тектонические уступы (а) и уступы речных террас (б). На профиле: 15 – зона выветривания на базальтах; 16 – породы фундамента (докембрий); 17 – сбросы.

Fig. 26. Geomorphological scheme of the Mondy Basin. Compiled by M.E. Medvedev. 1 – initial planation surface; 2 – surface of range planation; 3 – plateau covered with basalts; 4 – normal fault "facets" of the southern ledge of the Tunka range; 5 – cirques; 6 – watershed ridges; 7 – surfaces of glacial accumulation (a) and exaration (b); 8 – deposits of dammed glacial lakes; 9 – ocher deposits of the Eopleistocene (a) and alluvial deposits of river terraces and floodplains; 10 – remnants on the planation surface of river terraces and floodplains; 11 – ridges of lateral moraine (a) and sheep's foreheads (b); 12 – moraine hummocky-depressive relief (a) and karst sinkholes (b); 13 – destroyed Miocene volcano Khulugaysha; 14 – tectonic scarps (a) and scarps of river terraces (b). On the profile: 15 – weathering zone on basalts; 16 – basement rocks (Precambrian); 17 – faults.

Подобным образом, с запада на восток, осуществлялся перенос пылеватого материала вдоль долины р. Жом-Болок в Окинскую впадину. Постоянно действующий эоловый перенос влаги тормозился хребтом Большой Саян и в холодное время плейстоцена привел к мощному накоплению льда (более 500 м) перед этим хребтом, в Восточной Туве (Гросвальд, 1965).

Мы приходим к выводу, что, несмотря на некоторое различие состава лессов в Тункинской долине и Окинской впадине, условия накопления пылеватых отложений на этих территориях были в общем сходными. Если механическая дифференциация проявлялась вдоль Тункинской долины, такая же дифференциация могла проявляться вдоль долины р. Жом-Болок и Окинской впадины.

Различия условий накопления лессов на юге Восточной Сибири, в Китае и Якутии

Лессы Центрального Китайского плато начинают формироваться под действием Азиатского муссона около 22 млн лет назад в связи с поднятием Гималайско-Тибетского горного сооружения на высоту более 5000 м. Весьма резкий переход от слоев красных глин к лессовым слоям наблюдается около 2.7–2.6 млн лет назад. В 481-метровой скважине Хуайнан (равнина Хубей, координаты: 32°50.123' с.ш., 116°30.167' в.д.) красные глины в интервале глубин 300–180 м датируются возрастным интервалом 8.0–2.5 млн лет, а переслаивание лессов и почв в интервале

глубин верхних 180 м – возрастным интервалом последних 2.5 млн лет (Zhang et al., 2016).

Такая выдержанность разреза с лессами на территории Центрального Китая может быть следствием устойчивого действия Азиатского муссона. Пылеватый материал переносился на расстояние тысяч км из приэкваториальных районов Азии (рис. 27). На конференции по Азиатскому муссону, состоявшейся 9–11 августа 2007 г. в Пекине (Китай), С. Клеменс представил фазы эволюции индо-азиатских муссонов и глобального объема льда, предположив изменения в морской кислородной изотопной хроностратиграфии до 3 млн лет назад для достижения внутренне согласованных и физически правдоподобных откликов на летнюю и зимнюю циркуляцию муссонов, изменений в глобальном объеме льда и орбитального воздействия. Ц. Юн и др. продемонстрировали с помощью моделирования, что, хотя записи глыбоводных и ледяных кернов показывают прохладный МИС 13, межледниковый период с низкой концентрацией парниковых газов, астрономические и ледниковые воздействия ~500 тыс. лет назад в основном отвечают за интенсивный Восточно-Азиатский летний муссон, в согласовании с косвенными данными. Согласно математическому моделированию японской группы исследователей (М.Е. Хори и др.) отзвуки пылевых

отложений распространялись Азиатским муссоном до Байкала.

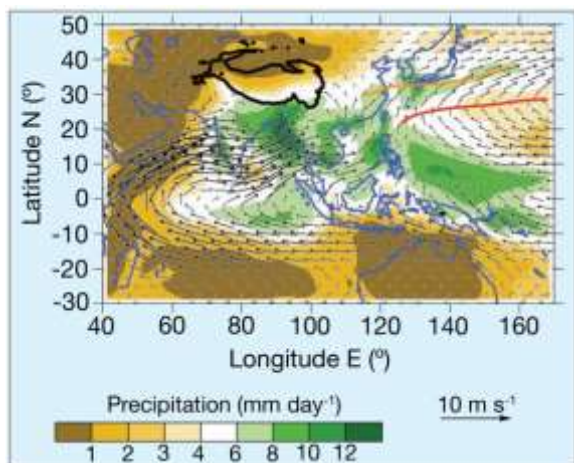


Рис. 27. Азиатские летние (июнь-июль-август) муссонные осадки и ветровое поле (Berger et al., 2008). Черная линия представляет собой топографический контур высотой 3000 м, который очерчивает Тибетское нагорье. Красная и оранжевая линии представляют собой субтропическую дождевую полосу и хребет субтропического максимума соответственно.

Fig. 27. Asian summer (June-July-August) monsoon precipitation and wind field (Berger et al., 2008). Black line represents 3000 m topographic contour, which outlines the Tibetan Plateau. Red and orange lines represent the subtropical rain band and the ridge of the subtropical high, respectively.

Специфика состава лессов Центрального Китая и сопредельных территорий (см. рис. 17–20) может объясняться его происхождением в результате ближнего и дальнего эолового переноса. Одним из источников дальнего переноса микрочастиц могла служить покрытая ледниковыми шапками высокогорная часть Гималаев и Тибетского плато. В этом смысле пылеватый материал по происхождению не отличается от происхождения пылеватого материала в высокогорных районах Восточных Саян.

Время отложения лессов местонахождения Хурай-Хобок ограничено К–Аг датировкой базальта вулканического конуса Хурай-Хобок 1.57 ± 0.03 млн лет (Рассказов и др., 2000). Вовлеченные в исследование лессы Тункинской долины могли формироваться в течение всего плейстоцена, но в основном в

процессе отложения песков среднего-позднего плейстоцена. Лессы из разреза Сайлаг в Окинской впадине более определенно характеризуют эпизоды эоловой деятельности, сопровождавшей оледенения позднего плейстоцена. В то же время, в разрезе Номто-Гол выявляются более древние галечники, перемежающиеся с лавами, предположительно, хирбэсинской свиты плиоцена-эоплейстоцена. Результаты моделирования распределение лессов под действием Азиатского муссона (Hori et al., 2007) предполагают действие Азиатского муссона с юго-востока Азии до территории Байкала. Выяснение возрастных интервалов накопления лессов на юге Восточной Сибири представляет задачу будущих исследований.

Что касается лессов Якутии, частичная близость их состава к китайским лессам и явное отличие от состава лессов юга Восточной Сибири (см. рис. 17 и 18) делает лессы этой территории объектом исследований, которые покажут основные факторы лессообразования в высоких широтах Азии и насколько эти факторы повторяют закономерности лессообразования в Северной Америке, на Аляске (Muhs, Budahn, 2006).

Заключение

На юге Восточной Сибири выполнены сравнительные геохимические исследования лессов Окинской впадины и Тункинской долины.

При изучении лессов Окинской впадины сделан вывод об их определяющей роли для датирования извержения Усть-Жом-Болокского лавового покрова. Состав лессов непосредственно перед извержением соответствовал условиям позднеплейстоценового оледенения. В лессах практически отсутствовали глинистые минералы. После извержения отложения лессов продолжались, но в их состав входило заметное количество глинистых минералов, что свидетельствовало об послебазальтовом отложении и преобразовании осадков в условия теплого и влажного климата. Выяснилось также, что Усть-Жом-Болокский лавовый покров представляет собой полихронное вулканическое сооружение. Его часть в районе Сайлага образовалась в

позднем плейстоцене, другая часть в районе Номто-Гола – предположительно, в плиоцене-эоплейстоцене.

При изучении лессов Тункинской долины выявлена дифференциация лессового материала вдоль долины. В лессах западной части долины присутствовало существенное количество глинистых минералов. В лессах ее восточной части роль глинистых минералов снижалась и возрастала роль обломочного кварц-полевошпатового материала. Для подтверждения выявленных закономерностей в изменении состава лессов во времени и пространстве нужны дополнительные исследования. Определение времени образования лессов Тункинской долины представляет собой задачу, решение которой потребует подбора представительных объектов, отвечающих разным геологическим ситуациям, и использования комплекса надежных методов относительной и абсолютной геохронологии.

Более широкий диапазон вариаций состава лессов Окинской впадины, чем Тункинской долины, и общее отличие состава лессов юга Восточной Сибири от лессов Китая и Якутии открывает перспективу сравнительных исследований многообразия обстановок эолового накопления пылеватого материала на территории Азии.

Благодарности

Настоящая статья является продолжением исследования лессов Окинской впадины (Расказов и др., 2024а), которое начиналось во время поездки студентов геологического факультета ИГУ и школьников Орликской средней школы Окинского района на Жом-Болокский лавовый поток. Поездка была организована директором школы Б.Д. Шарастепановым и зам. директора по воспитательной работе А.П. Папаевым. Данные по лессам Окинской впадины были получены для сравнительных геохимических исследований вместе с лессами Тункинской долины, частично представленных в работах (Алокла и др., 2021; Алокла, 2023). Для измерений микроэлементов использовался масс-спектрометр Agilent 7500se ЦКП «Ультрамикроанализ» Лимнологического института СО РАН, г. Иркутск (измерения А.П. Чебыкина). Петрогенные оксиды пород определялись

химиками–аналитиками Г.В. Бондаревой и М.М. Самойленко, микроэлементы – Е.В. Сараниной в ИЗК СО РАН. Авторами решалась образовательная задача подготовки статьи от постановки цели и задач исследования, отбора образцов из обнажений с участием студентов на учебной практике через выполнение аналитических работ и обработки полученных данных до подготовки и оформления коллективной статьи в рамках проведения магистерского курса заочного обучения 2025 г. «Подготовка, оформление и представление результатов научно-исследовательских и научно-производственных работ».

Литература

Адамович А. Ф., Гросвальд М. Г., Зоненшайн Л. П. Новые данные о вулканах Кропоткина и Перетолчина // Мат-лы по региональной геологии. 1959. Вып. 5. С. 79–90.

Алокла Р.Э. Глинистые минералы в зоне гипергенеза Байкальской рифтовой системы. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Иркутск, 2023. 116 с.

Алокла Р., Чувашова И.С., Расказов С.В., Акулова В.В., Рубцова М.Н., Будаев Р.Ц. Лессовидные породы на вулканическом конусе Хурай-Хобок в Тункинской впадине // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2022. Т. 41. С. 3–20. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.41.3>

Выркин В.Б. Эоловое рельефообразование в Прибайкалье и Забайкалье // География и природные ресурсы. 2010. № 3. С. 25–32.

Грачев А.Ф., Лопатин Д.В. Некоторые итоги полевых исследований по правобережью р. Бий-Хем (Восточная Тува) // Вестник ЛГУ. Сер. геогр. № 6. С. 152–154.

Гросвальд М. Г. Развитие рельефа Саяно-Тувинского нагорья. М.: Наука, 1965. 167 с.

Девяткин Е. В. Геохронология кайнозойских базальтов Монголии и их связь со структурами новейшего этапа // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2004. Т. 12, № 2. С. 102–114.

Иванов И.П. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых: Учебник для вузов. М.: Недра, 1990. 302 с.

Иваньев Л.И., Цейтлин С.М. Геологические условия залегания культурных остатков на

Верхоленской горе 1 // Мезолит Верхнего Приангарья. Памятники Иркутского района. Иркутск: Изд-во Иркут, та, 1980. С. 25–44.

Киселев А. И., Медведев М. Е., Головкин Г. А. Вулканизм Байкальской рифтовой зоны и проблемы глубинного магмообразования. Новосибирск: Изд-во «Наука», Сиб. отделение, 1979. 197 с.

Логачев Н.А. Кайнозойские континентальные отложения впадин байкальского типа // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1958. № 4. С. 18–20.

Логачев Н.А. Саяно-Байкальское и Становое нагорья. Нагорья Прибайкалья и Забайкалья / Ред. Н.А. Флоренсов. М.: Наука. 1974. С. 16–162.

Медведев М.Е., Клейн Я.Я. Неотектоника и вулканизм Мондинской впадины / Вопросы геологии Прибайкалья и Забайкалья. Вып. 2, № 4. Чита, 1967. С. 258–260.

Охотин В.В. Грунтоведение. Л.: Изд. Военно-трансп. Академии, 1940. 240 с.

Поморцев О.А., Попов В.Ф. Плиоциальные эпохи плейстоцена и лессообразование // Вестник СВФУ. серия «Науки о Земле». 2021. № 3 (23). С. 5–20.

Прокопенко А.А., Кузьмин М.И., Калмычков Г.В. и др. Изменение состава донных осадков озера Хубсугул как показатель изменения климата в Байкальском регионе на рубеже 15–14 тыс. лет назад // Докл. АН. 2003. Т. 390, № 1. С. 109–112.

Рассказов С.В. Магматизм Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: ВО "Наука". Сибирская издательская фирма, 1993. 288 с.

Рассказов С.В. Среднеголоценовое изменение тектонических напряжений в вулканической зоне хребта Удокан, Восточная Сибирь // Вулканология и сейсмология. 1999. № 2. С. 70–74.

Рассказов С.В., Логачев Н.А., Брандт И.С., Брандт С.Б., Иванов А.В. Геохронология и геодинамика позднего кайнозоя (Южная Сибирь – Южная и Восточная Азия). Новосибирск: Наука, 2000. 288 с.

Рассказов С.В., Снопков С.В., Папаев А.П., Парфенов Д.И., Петров Д.А., Хайдаков Б. По следам П.А. Кропоткина: Изучение юных базальтовых лав в районе Сайлагского водопада, Восточный Саян // Геология и окружающая среда. 2024а. Т. 4, № 2. С. 164–178. DOI 10.26516/2541-9641.2024.2.164

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Чувашова И.С., Воднева Е.Н., Степанова О.Н. Оценка современной активности мантии Центральной Азии в ретроспективе четвертичных магматических событий: контроль плавления мантии накоплением и стаиванием ледников // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2014. Т. 8, № 2. С. 91–101.

Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С., Саранина Е.В., Ильясова А.М., Скопинцев В.Г. Гарганский тип континентальной тектоносферы: Pb-изотопные оценки возраста событий ранней, средней и поздней геодинамических эпох Земли в слоях внешней оболочки, коромантийного перехода и литосферной мантии // Геология и окружающая среда. 2024б. Т. 4, № 3. С. 7–32. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.3.7>

Рященко Т.Г., Акулова В.В., Ербаева М.А., Гринь Н.Н. Процессы лессообразования в Приангарье, Забайкалье, Западной Монголии и Северо-Западном Китае (сравнительный анализ) // География и природные ресурсы. 2007. № 2. С. 105–113.

Рященко Т.Г., Акулова В.В., Ухова Н.Н., Штельмах С.И., Гринь Н.Н. Лессовые грунты Монголо-Сибирского региона. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2014. 241 с.

Сизых Ю.И. Общая схема химического анализа горных пород и минералов. Отчет. Институт земной коры СО АН СССР. Иркутск, 1985. 50 с.

Ташак В.И. Перспективы исследований древнейших этапов заселения человеком территории Окинского плоскогорья (Восточный Саян) // Известия Лаборатории древних технологий. 2021. Т. 17. № 4. С. 9–19. <https://doi.org/10.21285/2415-8739-2021-4-9-19>.

Флоренсов Н.А. Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья / Труды Вост.-Сиб. фил. СО АН СССР. Вып. 19. Серия геол. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 258 с.

Хассан А., Рассказов С.В., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Титова Л.А., Кулагина Н.В., Усолцева М.В. Идентификация озерных отложений верхнего миоцена – нижнего плиоцена в суходольной Тункинской впадине Байкальской рифтовой зоны // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11, № 2. С. 261–284.

Чувашова И.С., Алокла Р., Рассказов С.В. Инфильтрация глин в поры и каверны неогеновых базальтов Восточного Саяна // Геология и

окружающая среда. 2021. Т. 1, № 1. С. 16–26. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2021.1.16>

Чувашова И.С., Рассказов С.В., Ясныгина Т.А. Трассирование потенциальной сейсмической структуры в Гарятской впадине Центральной Монголии вулканическими извержениями из ОИВ-подобного источника 50–9 тыс. лет назад // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 4. С. 80–103. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.80

Чувашова И.С., Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Саранина Е.В., Фефелов Н.Н. Голоценовый вулканизм в Центральной Монголии и Северо-Восточном Китае: асинхронное декомпрессионное и флюидное плавление мантии // Вулканология и сейсмология. 2007. № 6. С. 19–45.

Щетников А.А., Безрукова Е.В., Кербер Е.В., Белозерова О.Ю., Кузьмин М.И., Иванов Е.В., Крайнов М.А., Филинов И.А., Нечаев И.О. Первые результаты тефрохронологических исследований позднплейстоцен-голоценовых вулканических извержений в долине р. Жом-Болок (Восточный Саян) // Доклады Академии наук 2019. Т. 486. № 3. С. 336–340. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524863336-340>

Ярмолук В.В., Лебедев В.И., Аракелянц М.М., Лебедев В.А., Прудников С.Г., Сугоракова А.М., Коваленко В.И. Вулканизм Восточной Тувы: хронология вулканических событий на основе К–Аг-датирования // Доклады Академии наук. 1999. Т. 368, № 2. С. 244–249.

Ярмолук В. В., Никифоров А. В., Иванов В. Г. Строение, состав, источники и механизм долинных излияний лавовых потоков Жом-Болок (голоцен, Южно-Байкальская вулканическая область) // Вулканология и сейсмология. 2003. № 5. С. 41–59.

Ясныгина Т.А., Маркова М.Е., Рассказов С.В., Пахомова Н.Н. Определение редкоземельных элементов, Y, Zr, Nb, Hf, Ta, Ti в стандартных образцах серии ДВ методом ИСП-МС // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81, № 2. С. 10–20.

Bassinot F.C. SPECMAP. In: Gornitz V. (ed.) Encyclopedia of paleoclimatology and ancient Environments. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht, 2009. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4411-3_212

Berger A., Ding Z., Guo Z., Fabian P. 3rd Alexander von Humboldt International Conference: East Asian Monsoon, past, present and future // PAGES News. 2008. Vol.16, No 1. P. 36–37.

Chebykin E.P., Edgington D.N., Grachev M.A. et al. Abrupt increase in precipitation and weathering of soils in East Siberia coincident with the end of the last glaciation // Earth Planet. Sci. Letters. 2002. Vol. 200, No. 1–2. P. 167–175.

Ding Z.L., Sun J.M., Yang S.L., Li T.S. Geochemistry of the Pliocene red clay formation in the Chinese Loess Plateau and implications for its origin, source provenance and paleoclimate change // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2001. Vol. 65, No. 6. P. 901–913.

Enkhtuvshin H.A. Petrological study on the Late Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks of the Mongolian Plateau // Master thesis. Shimane University, 1995. 119 p.

Gutmann J.T., Turrin B.D., Dohrenwend J.C. Basaltic rocks from the Pinacate volcanic field notably young $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages // EOS. 2000. P. 33–37.

Fang Q., Hong H., Zhao L., Furnes H., Lu H., Han W., Liu Y., Jia Zh., Wang Ch., Yin K., Algeo T.J. Tectonic uplift-influenced monsoonal changes promoted hominin occupation of the Luonan Basin: Insights from a loess-paleosol sequence, eastern Qinling Mountains, central China // Quaternary Science Reviews. 2017. Vol. 169. P. 312–329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.05.025>

Hori M.E., Abe M., Yasunari T., Kitoh A. Impact of orbital forcing on the Southeastern Monsoon seasonality based on an atmosphere-ocean coupled general circulation model experiment // 3rd Alexander von Humboldt International Conference: East Asian Monsoon, past, present and future. 27–30 August 2007, Beijing, China. P. 20.

Lindeburg K.S., Drohan P.J. Geochemical and mineralogical characteristics of loess along northern Appalachian, USA major river systems appear driven by differences in meltwater source lithology // CATENA. 2019. V. 172. С. 461–468.

Muhs D.R. Loess deposits: Origins, properties / Encyclopedia of Quaternary Science. Elsevier, 2013. – 573–584 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53643-3.00145-X>

Muhs D.R. The geochemistry of loess: Asian and North American deposits compared // Journal of Asian Earth Sciences. 2018. Vol. 155. P. 81–115. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.10.032>

Muhs D.R., Budahn J.R. Geochemical evidence for the origin of late Quaternary loess in central Alaska // Canadian Journal of Earth Sciences. 2006. Vol. 43, No. 3. P. 100275. <https://doi.org/10.1139/e05-115>

Muhs D.R., Cattle S.R., Crouvi O., Rousseau D.-D., Sun J., Zárate M.A. Loess records // *Mineral Dust*. Springer Netherlands, Dordrecht 2014. P. 411–441. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8978-3_16

Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // *Nature*. 1982. V. 299. P. 715–717.

Rasskazov S.V., Brandt S.B., Brandt I.S. Radiogenic isotopes in geologic processes. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 2010. 306 p.

Ryashchenko T.G., Akulova V.V., Erbaeva M.A. Loessial soils of Priangaria, Transbaikalia, Mongolia, and northwestern China // *Quaternary International*. 2008. Vol. 179. P. 90–95. [doi:10.1016/j.quaint.2007.06.035](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.06.035)

Shchetnikov A.A., Bezrukova E.V., Krivonogov S.K. Late Glacial to Holocene volcanism of Jom-Bolok Valley (East Sayan Mountains, Siberia) recorded by microtephra layers of the Lake Kaskadnoe-1 sediments // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2019. Vol. 173. P. 291–303.

Xie Y., Yuan F., Zhan T., Kang Ch., Chi Y. Geochemical and isotopic characteristics of sediments for the Hulun Buir Sandy Land, northeast China: implication for weathering, recycling and dust provenance // *Catena*. 2018. Vol. 160. P. 170–184. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.008>

Zhang H., Lu H., Jiang S.-Y., Vandenberghe J., Wang S., Cosgrove R. Provenance of loess deposits in the Eastern Qinling Mountains (central China) and their implications for the paleoenvironment // *Quaternary Sci. Rev.* 2012. V. 43, P. 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.04.010>

Zhang L., Liu J., Qin X. Preliminary study on the magnetostratigraphy framework of Huainan (east China) borehole: constraints from the ages of three tephra layers // 6th International Maar Conference Abstracts. Changchun, China, 2016. P. 117–118.

Zhang L., Qin X., Liu J., Sun Ch., Mu Y., Gao J., Guo W., An Sh., Lu Ch. Geochemistry of sediments from the Huaibei Plain (east China): Implications for provenance, weathering, and invasion of the Yellow River into the Huaihe River // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2016. Vol. 121. P. 72–83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.02.008>

Zhang W., Zhao J., Chen J., Ji J., Liu L. Binary sources of Chinese loess as revealed by trace and REE element ratios // *Journal of Asian Earth*

Sciences. 2018. Vol. 166. P. 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.07.017>

References

Adamovich A.F., Grosvald M.G., Zonenshain L.P. New data on the Kropotkin and Peretolchin volcanoes // *Materials on regional geology*. 1959. Issue 5. P. 79–90.

Alokla R. E. Clay minerals in the hypergenesis zone of the Baikal rift system. Dissertation for the degree of candidate of geological and mineralogical sciences. Irkutsk, 2023. 116 p.

Alokla R., Chuvashova I.S., Rasskazov S.V., Akulova V.V., Rubtsova M.N., Budaev R.Ts. Loess-like rocks on the Khurai-Khobok volcanic cone in the Tunka basin // *Bulletin of Irkutsk State University. Earth Sciences Series*. 2022. Vol. 41. P. 3–20. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.41.3>

Bassinot F.C. SPECMAP. In: Gornitz V. (ed.) *Encyclopedia of paleoclimatology and ancient Environments*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht, 2009. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4411-3_212

Berger A., Ding Z., Guo Z., Fabian P. 3rd Alexander von Humboldt International Conference: East Asian Monsoon, past, present and future // *PAGES News*. 2008. Vol.16, No 1. P. 36–37.

Chebykin E.P., Edgington D.N., Grachev M.A. et al. Abrupt increase in precipitation and weathering of soils in East Siberia coincident with the end of the last glaciation // *Earth Planet. Sci. Letters*. 2002. Vol. 200, No. 1–2. P. 167–175.

Chuvashova I.S., Alokla R., Rasskazov S.V. Clay infiltration into pores and caverns of Neogene basalts of the Eastern Sayan // *Geology and Environment*. 2021. Vol. 1, No. 1. P. 16–26. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2021.1.16>

Chuvashova I.S., Rasskazov S.V., Yasnygina T.A. Tracing of a potential seismic structure in the Taryat Basin of Central Mongolia by volcanic eruptions from an OIB-Like Source at 50–9 Ka // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 4. P. 80–103. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.80

Chuvashova I.S., Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Saranina E.V., Fefelov N.N. Holocene volcanism in Central Mongolia and Northeast China: asynchronous decompression and fluid melting of the mantle // *Volcanology and Seismology*. 2007. No. 6. P. 19–45.

- Devyatkin E.V. Geochronology of Cenozoic basalts of Mongolia and their relationship with the structures of the latest stage // *Stratigraphy and Geological Correlation*. 2004. Vol. 12, No. 2. P. 199–209.
- Ding Z.L., Sun J.M., Yang S.L., Li T.S. Geochemistry of the Pliocene red clay formation in the Chinese Loess Plateau and implications for its origin, source provenance and paleoclimate change // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001. Vol. 65, No. 6. P. 901–913.
- Grachev A.F., Lopatin D.V. Some results of field research on the right bank of the river. Biy-Khem (Eastern Tuva) // *Bulletin of Leningrad State University. Ser. geogr.* No. 6. P. 152–154.
- Grosvald M.G. Development of the relief of the Sayan-Tuva highlands. Moscow: Nauka, 1965. 167 p.
- Enkhtuvshin H.A. Petrological study on the Late Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks of the Mongolian Plateau // *Master thesis*. Shimane University, 1995. 119 p.
- Gutmann J.T., Turrin B.D., Dohrenwend J.C. Basaltic rocks from the Pinacate volcanic field notably young $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages // *EOS*. 2000. P. 33–37.
- Fang Q., Hong H., Zhao L., Furnes H., Lu H., Han W., Liu Y., Jia Zh., Wang Ch., Yin K., Algeo T.J. Tectonic uplift-influenced monsoonal changes promoted hominin occupation of the Luonan Basin: Insights from a loess-paleosol sequence, eastern Qinling Mountains, central China // *Quaternary Science Reviews*. 2017. Vol. 169. P. 312–329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.05.025>
- Florensov N.A. Mesozoic and Cenozoic basins of the Baikal region / *Proceedings of the East Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. Issue 19. Geological series*. Moscow–Leningrad: Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1960. 258 p.
- Hassan A., Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Yasnygina T.A., Titova L.A., Kulagina N.V., Usoltseva M.V., 2020. Identifying Upper Miocene – Lower Pliocene lacustrine sediments in dry Tunka basin of the Baikal rift zone. *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (2), 262–284. doi:10.5800/GT-2020-11-2-0473)
- Hori M.E., Abe M., Yasunari T., Kitoh A. Impact of orbital forcing on the Southeastern Monsoon seasonality based on an atmosphere-ocean coupled general circulation model experiment // *3rd Alexander von Humboldt International Conference: East Asian Monsoon, past, present and future*. 27–30 August 2007, Beijing, China. P. 20.
- Ivanov I.P. Engineering geology of mineral deposits: Textbook for universities. Moscow: Nedra, 1990. 302 p.
- Ivanyev L. I., Zeitlin S. M. Geological conditions of the cultural remains deposit on Verkholenskaya Mountain 1 // *Mesolithic of the Upper Angara Region. Monuments of the Irkutsk region*. Irkutsk: Irkutsk Publishing House, 1980. P. 25–44.
- Kiselev A.I., Medvedev M.E., Golovko G.A. Volcanism of the Baikal rift zone and problems of deep magma formation. Novosibirsk: Publishing house Nauka, Siberian Branch, 1979. 197 p.
- Lindeburg K.S., Drohan P.J. Geochemical and mineralogical characteristics of loess along northern Appalachian, USA major river systems appear driven by differences in meltwater source lithology // *CATENA*. 2019. V. 172. C. 461–468.
- Logatchev N.A. Cenozoic continental deposits of the Baikal-type basins // *Izvestiya AN USSR. Geol. Ser.* 1958. No. 4. P. 18–20.
- Logatchev N.A. Sayan-Baikal and Stanovoe Uplands. Uplands of the Baikal and Transbaikalian Regions / Ed. N.A. Florensov. Moscow: Nauka. 1974. P. 16–162.
- Medvedev M.E., Klein Ya.Ya. Neotectonics and volcanism of the Mondy Basin / *Problems of Geology of the Baikal and Transbaikalian Regions. Issue 2, No. 4*. Chita, 1967. P. 258–260.
- Muhs D.R. Loess deposits: Origins, properties / *Encyclopedia of Quaternary Science*. Elsevier, 2013. – 573–584 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53643-3.00145-X>
- Muhs D.R. The geochemistry of loess: Asian and North American deposits compared // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018. Vol. 155. P. 81–115. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.10.032>
- Muhs D.R., Budahn J.R. Geochemical evidence for the origin of late Quaternary loess in central Alaska // *Canadian Journal of Earth Sciences*. 2006. Vol. 43, No. 3. P. 100275. <https://doi.org/10.1139/e05-115>
- Muhs D.R., Cattle S.R., Crouvi O., Rousseau D.-D., Sun J., Zárata M.A. Loess records // *Mineral Dust*. Springer Netherlands, Dordrecht 2014. P. 411–441. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8978-3_16
- Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // *Nature*. 1982. V. 299. P. 715–717.

- Okhotin V.V. Soil Science. Leningrad: Voennotransp. Publ. Akademii, 1940. 240 p.
- Pomortsev O. A., Popov V. F. Pluvial epochs of the Pleistocene and loess formation // Bulletin of NEFU. Earth Sciences series. 2021. No. 3 (23). P. 5–20.
- Prokopenko A.A., Kuzmin M.I., Kalmychkov G.V. et al. Changes in the composition of bottom sediments of Lake Hovsgol as an indicator of climate measurements in the Baikal region at the turn of 15–14 thousand years ago // Reports of the Academy of Sciences. 2003. Vol. 390, No. 1. P. 109–112.
- Rasskazov S.V. Magmatism of the Baikal rift system. Novosibirsk: Nauka Siberian Publishing Company, 1993. 288 pp.
- Rasskazov S.V. Middle Holocene change in tectonic stresses in the volcanic zone of the Udokan ridge, Eastern Siberia // Volcanology and Seismology. 1999. No. 2. P. 70–74.
- Rasskazov S.V., Brandt S.B., Brandt I.S. Radiogenic isotopes in geologic processes. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 2010. 306 p.
- Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Chuvashova I.S., Vodneva E.N., Stepanova O.N. Assessment of modern activity of the Central Asian mantle in retrospect of Quaternary magmatic events: control of mantle melting by accumulation and melting of glaciers // Bulletin of Irkutsk State University. Earth Sciences Series. 2014. Vol. 8, No. 2. P. 91–101.
- Rasskazov S.V., Logatchev N.A., Brandt I.S., Brandt S.B., Ivanov A.V. Geochronology and geodynamics of the late Cenozoic (Southern Siberia – South and East Asia). Novosibirsk: Nauka, 2000. 288 p.
- Rasskazov S.V., Snopkov S.V., Papaev A.P., Parfenov D.I., Petrov D.A., Khaidakov B. In the footsteps of P.A. Kropotkin: Study of young basaltic lavas in the area of the Sailag waterfall, Eastern Sayans // Geology and Environment. 2024a. Vol. 4, No. 2. P. 164–178. DOI 10.26516/2541-9641.2024.2.164
- Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Chuvashova I.S., Saranina E.V., Ilyasova A.M., Skopintsev V.G. The Gargan-Type continental tectonosphere: Pb-isotope age estimates for events of the early, middle, and late geodynamic epochs of the Earth in layers of outer shell, crust-mantle transition, and lithospheric mantle // Geology and Environment. 2024b. Vol. 4, No. 3. P. 7–32. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.3.7>
- Ryashchenko T.G., Akulova V.V., Erbaeva M.A. Loessial soils of Priangaria, Transbaikalia, Mongolia, and northwestern China // Quaternary International. 2008. Vol. 179. P. 90–95. doi:10.1016/j.quaint.2007.06.035
- Ryashchenko T.G., Akulova V.V., Erbaeva M.A., Grin' N.N. Loess formation processes in the Angara region, Transbaikalia, Western Mongolia and Northwestern China (comparative analysis) // Geography and Natural Resources. 2007. No. 2. P.105–113.
- Ryashchenko T.G., Akulova V.V., Ukhova N.N., Shtelmakh S.I., Grin' N.N. Loess soils of the Mongolian-Siberian region. Irkutsk: Publishing house of the Institute of Soil Culture SB RAS, 2014. 241 p.
- Shchetnikov A.A., Bezrukova E.V., Kerber E.V., Belozerova O.Yu., Kuzmin M.I., Ivanov E.V., Krainov M.A., Filinov I.A., Nechaev I.O. The first results of tephrochronological study of late Pleistocene-Holocene volcanic eruptions in the Zhom-Bolok River valley (Eastern Sayan) // Doklady Earth Sciences. 2019. Vol. 486, No. 1. P. 503–506. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1905026X>
- Shchetnikov A.A., Bezrukova E.V., Krivonogov S.K. Late Glacial to Holocene volcanism of Jom-Bolok Valley (East Sayan Mountains, Siberia) recorded by microtephra layers of the Lake Kaskadnoe-1 sediments // Journal of Asian Earth Sciences. 2019. Vol. 173. P. 291–303.
- Sizykh Yu.I. Complex scheme of the chemical analysis of rock and mineral samples. Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, 1985. 50 p.
- Tashak V.I. Prospects of researching the oldest stages of human settlement on the Oka plateau territory (Eastern Sayan) // Reports of the Laboratory of Ancient Technologies. 2021. Vol. 17. No. 4. P. 9-19. <https://doi.org/10.21285/2415-8739-2021-4-9-19>.
- Vyrkin V.B. Aeolian relief formation in the Baikal and Transbaikal regions // Geography and natural resources. 2010. No. 3. P. 25–32.
- Yarmolyuk V.V., Lebedev V.I., Arakelyants M.M., Lebedev V.A., Prudnikov S.G., Sugorakova A.M., Kovalenko V.I. Volcanism of Eastern Tuva: chronology of volcanic events based on K–Ar dating // Doklady Earth Sciences. 1999. Vol. 368, No. 7. P. 207–211.
- Yarmolyuk V.V., Nikiforov A.V., Ivanov V.G. Structure, composition, sources and mechanism of valley outpourings of lava flows of Zhom-Bolok (Holocene, South Baikal volcanic region) // Volcanology and Seismology. 2003. No. 5. P. 41–59.

Yasnygina T.A., Markova M.E., Rasskazov S.V., Pakhomova N.N. Determination of rare earth elements, Y, Zr, Nb, Hf, Ta, and Th in geological reference materials of the DV series by ICP-MS // *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2015. Vol. 81, No. 2. P. 10–20.

Xie Y., Yuan F., Zhan T., Kang Ch., Chi Y. Geochemical and isotopic characteristics of sediments for the Hulun Buir Sandy Land, northeast China: implication for weathering, recycling and dust provenance // *Catena*. 2018. Vol. 160. P. 170–184. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.008>

Zhang H., Lu H., Jiang S.-Y., Vandenberghe J., Wang S., Cosgrove R. Provenance of loess deposits in the Eastern Qinling Mountains (central China) and their implications for the paleoenvironment // *Quaternary Sci. Rev.* 2012. V. 43, P. 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.04.010>

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор,

664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет, геологический факультет,

заведующий кафедрой динамической геологии, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

Институт земной коры СО РАН,

заведующий лабораторией изотопии и геохронологии,

тел.: (3952) 51–16–59,

email: rassk@crust.irk.ru

Rasskazov Sergei Vasilevich,

doctor of geological and mineralogical sciences, professor,

664025, Irkutsk, st. Lenina, 3,

Irkutsk State University, Faculty of Geology,

Head of Dynamic Geology Char,

664033, Irkutsk, st. Lermontova, 128,

Institute of the Earth's Crust SB RAS,

Head of the Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies,

tel.: (3952) 51–16–59,

email: rassk@crust.irk.ru

Ясныгина Татьяна Александровна,

кандидат геолого-минералогических наук,

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

Институт земной коры СО РАН,

старший научный сотрудник,

тел.: (3952) 51–16–59,

email: ty@crust.irk.ru

Yasnygina Tatyana Alexandrovna,

candidate of geological and mineralogical sciences,

664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128,

Zhang L., Liu J., Qin X. Preliminary study on the magnetostratigraphy framework of Huainan (east China) borehole: constraints from the ages of three tephra layers // 6th International Maar Conference Abstracts. Changchun, China, 2016. P. 117–118.

Zhang L., Qin X., Liu J., Sun Ch., Mu Y., Gao J., Guo W., An Sh., Lu Ch. Geochemistry of sediments from the Huaibei Plain (east China): Implications for provenance, weathering, and invasion of the Yellow River into the Huaihe River // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2016. Vol. 121. P. 72–83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.02.008>

Zhang W., Zhao J., Chen J., Ji J., Liu L. Binary sources of Chinese loess as revealed by trace and REE element ratios // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018. Vol. 166. P. 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.07.017>

Institute of the Earth's Crust SB RAS,

Senior Researcher,

tel.: (3952) 51–16–59,

email: ty@crust.irk.ru

Чувашова Ирина Сергеевна,

кандидат геолого-минералогических наук,

664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

Институт земной коры СО РАН,

старший научный сотрудник,

тел.: (3952) 51–16–59,

email: chuvashova@crust.irk.ru

Chuvashova Irina Sergeevna,

candidate of geological and mineralogical sciences,

664033, Irkutsk, st. Lermontova, 128,

Institute of the Earth's Crust SB RAS,

Senior Researcher,

tel.: (3952) 51–16–59,

email: chuvashova@crust.irk.ru

Папаев Алексей Пурбоевич,

кандидат географических наук,

пос. Орлик, Окинский район Бурятская республика,

Орликская средняя школа,

зам. директора по воспитательной работе,

email: papaev13@rambler.ru

Papaev Alexey Purboevich,

Candidate of Geography,

Orlik settlement, Okinsky district, Buryat Republic,

Orlik Secondary School,

Deputy Director for Educational Work,

email: papaev13@rambler.ru

Снопков Сергей Викторович,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,

664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет,
геологический факультет,

доцент,

664074, г. Иркутск, ул. Курчатова, 3,

Сибирская школа геонаук, Иркутский национальный исследовательский технический университет, ведущий научный сотрудник,

email: snopkov_serg@mail.ru

Snopkov Sergey Viktorovich,

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,

assistant professor,

664025, Irkutsk, Lenin st., 3,

Irkutsk State University, Faculty of Geology,

664074, Irkutsk, Kurchatov st., 3,

Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University,

Leading Researcher,

email: snopkov_serg@mail.ru

Парфенов Даниил Игоревич,

664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет,
геологический факультет,

студент второго курса бакалавриата,

email: parff0315@mail.ru

Parfenov Daniil Igorevich,

664025, Irkutsk, st. Lenina, 3,

Irkutsk State University, Faculty of Geology,

second year bachelor's student,

email: parff0315@mail.ru

Иванов Кирилл Олегович,

664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет,
геологический факультет,

студент второго курса магистерской подготовки, заочное отделение,

email: kirionid@yandex.ru

Ivanov Kirill Olegovich,

664025, Irkutsk, st. Lenina, 3,

Irkutsk State University, Faculty of Geology,
second year student of master's degree program,
correspondence department,

email: kirionid@yandex.ru

Полежаева Ирина Викторовна,

664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет,
геологический факультет,

студент второго курса магистерской подготовки, заочное отделение,

email: polezhaeva80@mail.ru

Polezhaeva Irina Viktorovna,

664025, Irkutsk, st. Lenina, 3,

Irkutsk State University, Faculty of Geology,
second year student of master's degree program,
correspondence department,

email: polezhaeva80@mail.ru

Калинович Милена Евгеньевна,

664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет,
геологический факультет,

студент второго курса магистерской подготовки, заочное отделение,

email: 05080058@list.ru

Kalinovich Milena Evgenievna,

664025, Irkutsk, st. Lenina, 3,

Irkutsk State University, Faculty of Geology,
second year student of master's degree program,
correspondence department,

email: 05080058@list.ru

УДК 550.8; 908

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2025.1.61>EDN: [CSWZAL](https://www.edn.ru/CSWZAL)

Влияние водных источников на р. Похабиху и прилегающую литораль оз. Байкал

Е.П. Чебыкин, Н.Н. Куликова, А.Н. Сутурин

Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Геохимическим методом установлена степень влияния водных источников на р. Похабиху и прилегающую литораль оз. Байкал в 2022 и 2024 гг. Определены водные вклады (ВВ), геохимические вклады (ГХВ) и суммарные геохимические вклады (СГХВ) источников (чистые речные, сточные и байкальские воды) в объекты смешения (р. Похабиха в устье, литораль Байкала). Более низкие ВВ сточных вод г. Слюдянки в р. Похабиху в 2024 г. (0.98 %) по сравнению с 2022 г. (1.75 %) обусловлены, вероятно, большей водностью реки. Наибольшие ГХВ сточных вод в речные (>10 %) характерны для (в %) Р (56-75), Cl (41-43), Na (28-36), Zr (11-25), К (16-24), Cs (13-22), Ga (10-21) и Ni (11-20), а также для Sb (39), As (19), Rb (16), Br (10) и Ti (10) в 2022 г. и для I (20) в 2024 г. СГХВ сточных вод в речные по всем информативным элементам в 2022 г. был 440 %, что в 1,4 раза больше, чем в 2024 г. (311 %). В 2024 г. влияние загрязнённых вод р. Похабихи в литорали Байкала прослеживалось на всех глубинах в радиусе ~ 100 м от устья, а фронтально по поверхности достигало 200 м. Субаквальная разгрузка загрязнённых речных вод обнаружена на удалении 65-80 м от устья. В 2022 г. исследовалась поверхностная вода в секторе ~ 50 м от устья и в прибрежной зоне до 90 м от устья, где влияние загрязнённых речных вод также было обнаружено. Литоральные воды Байкала в зоне влияния р. Похабихи формируются, в основном, за счёт смешения двух главных источников – байкальских и чистых речных вод. ВВ сточных вод в 56-101 раз меньше ВВ речных вод и до трёх порядков меньше, чем ВВ байкальских вод. Геохимические вклады сточных вод в литорали Байкала более значимы, по сравнению с их водными вкладами. Основное влияние сточных вод здесь прослеживается по тем же элементам, что и для р. Похабихи, но с меньшими ГХВ (%): Р (3.7-64), Cl (2.9-35), Na (0.5-17), Zr (1.0-20), К (0.5-13), Cs (1.0-16), Ga (1.0-16), Rb (0.6-12), I (0.3-7.0), Ni (0.3-5.6), а также по некоторым другим элементам: Mn (3.9-8.9), Fe (0.7-3.8), Cr (0.5-4.8), Pb (0.5-2.9), Si (0.4-2.5) Ge (0.6-4.3) и В (0.3-4.6). Основной вклад в формирование геохимического состава литоральных вод Байкала вносят чистые речные и байкальские воды. За исключением Р ГХВ чистых речных вод в литорали Байкала во всех случаях были больше, чем ГХВ сточных вод (в 1.3-116 раз). Основное влияние чистых речных вод (ГХВ %) было по Mn (61-94), Fe (18-91), Si (16-94), Ga (30-85), REE (15-92), Pb (14-86), Y (17-87), Ge (11-80), Ti, Cr, Ba и Al (10-80). По остальным элементам максимальные ГХВ были менее 80 %, а минимальные ГХВ – менее 10 %. СГХВ чистых речных вод варьировали в интервале 189-3158 %, на всех станциях они были больше (в 6-12 раз) соответствующих СГХВ сточных вод. За исключением Р, Cl, Mn и Ga ГХВ байкальских вод во всех случаях были больше, чем ГХВ сточных вод (в 1.03-5760 раз). Максимальное влияние байкальских вод было по As, Sb, Mo, W, Ni, I, Li, U, Br, Zn и Na (ГХВ = 53--100 %). Высокие ГХВ (12-98 %) были также и для

Статья получена: 26.03.2025; исправлена: 28.03.2025; принята: 28.03.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чебыкин Е.П., Куликова Н.Н., Сутурин А.Н. Влияние водных источников на р. Похабиху и прилегающую литораль оз. Байкал // Геоэкология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 1. С. 61-99. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.61. EDN: CSWZAL

Article received: 26.03.2025; corrected: 28.03.2025; accepted: 28.03.2025.

FOR CITATION: Chebykin E.P., Kulikova N.N., Suturin A.N. The influence of water sources onto the Pokhabikha River and onto the adjacent littoral of Lake Baikal // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 61-99. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.61. EDN: CSWZAL

большинства других элементов: К, В, Sr, S, V, Al, Ti, Ca, Cs, Ga, Ge, Cu, Rb, Mg, Co, Ba, P, Zr, Cl, и Cr. ГХВ REE, Pb, Si, Fe, Si и Mn варьировали в интервале 0.3-85 %. СГХВ байкальских вод варьировали в интервале 1058-3092 %, на всех станциях они были больше (в 5-106 раз) соответствующих СГХВ сточных вод. В межгодовой динамике 2022 / 2024 гг. геохимические различия чистых вод р. Похабики, также как и сточных вод канализационных очистных сооружений (КОС) г. Слюдянка по большинству химических элементов небольшие (<50 %). Более сильные различия (раз) по Cr (2.4), Ti (1.9), Ga (1.7) и Zr (1.7) в сточных водах, скорее всего, обусловлены вариациями тонкодисперсной взвеси. Существенные различия речных вод по Sb (6.1), Ni (3.2), P (2.4), Mn (2.1), Ga (1.8) и Al (1.6), вероятно, связаны с изменениями водности реки и влиянием других факторов (взвешенное вещество, физико-химические и биогеохимическими процессы). В сточных водах КОС г. Слюдянка обнаружено превышение нормативов по P (45-96 ПДК), Mn (4.7-5.6 ПДК), Fe (2.9 ПДК) и V (2.0-2.5 ПДК).

Ключевые слова: сточные воды, речные воды, байкальские воды, химические элементы, ИСП-МС, предельно допустимые концентрации, озеро Байкал

The Influence of Water Sources onto the Pokhabikha River and onto the Adjacent littoral of Lake Baikal

E.P. Chebykin, N.N. Kulikova, A.N. Sutorin

Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. The geochemical method has established the degree of influence of water sources on the Pokhabikha River and the adjacent littoral of Lake Baikal in 2022 and 2024. The water contributions (WC), geochemical contributions (GCC) and summary geochemical contributions (SGCC) of water sources (clean riverine water, wastewater and Baikalian waters) into mixing objects (Pokhabikha River at the mouth, littoral of Lake Baikal) have been determined. The lower WC from Slyudyanka City wastewater into the Pokhabikha River in 2024 (0.98 %) compared to 2022 (1.75 %) are probably due to the greater water content of the river. The highest GCC of wastewater into riverine waters (>10 %) is typical for (in %) P (56-75), Cl (41-43), Na (28-36), Zr (11-25), K (16-24), Cs (13-22), Ga (10-21) and Ni (11-20), as well as for Sb (39), As (19), Rb (16), Br (10) and Ti (10) in 2022 and for I (20) in 2024. For all informative elements, the SGCC into river waters in 2022 was 440 %, which is 1.4 times more than in 2024 (311 %). In 2024, the influence of polluted waters of the Pokhabikha River in Lake Baikal littoral was traced at all depths within a radius of ~ 100 m from the mouth, and frontally along the surface reached 200 m. Subaquatic discharge of polluted riverine waters was detected at a distance of 65-80 m from the mouth. In 2022, surface water was studied in the sector ~ 50 m from the mouth and in the coastal zone up to 90 m from the mouth, where the influence of polluted riverine waters was also detected. The littoral waters of Lake Baikal in the zone of influence of the Pokhabikha River are formed mainly due to the mixing of two main sources – Baikalian and pure riverine waters. WC of wastewater are 56-101 times less than WC of riverine water and up to three orders of magnitude less than WC of Baikalian water. Geochemical contributions of wastewater to Lake Baikal littoral are more significant than their water contributions. The main effect of wastewater here can be traced to the same elements as for the Pokhabikha River, but with lower GCC (%): P (3.7-64), Cl (2.9-35), Na (0.5-17), Zr (1.0-20), K (0.5-13), Cs (1.0-16), Ga (1.0-16), Rb (0.6-12), I (0.3-7.0), Ni (0.3-5.6), as well as some other elements: Mn (3.9-8.9), Fe (0.7-3.8), Cr (0.5-4.8), Pb (0.5-2.9), Si (0.4-2.5) Ge (0.6-4.3) and B (0.3-4.6). The main contribution to the formation of the geochemical composition of the littoral waters of Lake Baikal is made by clean riverine and Baikalian waters. With the exception of P, the GSS of clean riverine waters in the Baikal littoral were in all cases higher than the GSS of wastewater (1.3-116 times). The main influence of clean riverine waters (GCC %) was by Mn (61-94), Fe (18-91), Si (16-94), Ga (30-85), REE (15-92), Pb (14-86), Y (17-87), Ge (11-80), Ti, Cr, Ba and Al (10-80). For the remaining elements, the maximal GSS were less than 80 %, and the minimal GSS were less than 10%. The SGCC of pure riverine waters varied in the range of 189-3158 %, at all stations they were 6-12 times higher than the corresponding SGCC of wastewater. With the exception of P, Cl, Mn and Ga, the GSS of Baikalian waters were in all cases higher than the GSS of wastewater (1.03-5760 times). The maximal effect of Baikalian waters

was by As, Sb, Mo, W, Ni, I, Li, U, Br, Zn and Na (GSS = 53--100%). High GSS (12-98%) were also found for most other elements: K, B, Sr, S, V, Al, Ti, Ca, Cs, Ga, Ge, Cu, Rb, Mg, Co, Ba, P, Zr, Cl, and Cr. GSS of FREE, Pb, Si, Fe, Si, and Mn ranged from 0.3 to 85 %. The GSS of Baikalian waters varied in the range of 1058-3092 %, at all stations they were higher (5-106 times) than the corresponding GSS of wastewater. In the interannual dynamics of 2022/2024, the geochemical differences in the clean waters of the Pokhabikha River, as well as the wastewater from the Slyudyanka City water treatment facilities (WTF), are small in most chemical elements (<50 %). The stronger differences (in times) by Cr (2.4), Ti (1.9), Ga (1.7), and Zr (1.7) in wastewater are most likely due to variations in fine suspension. Significant differences in riverine waters by Sb (6.1), Ni (3.2), P (2.4), Mn (2.1), Ga (1.8) and Al (1.6) are probably related to changes in river water content and the influence of other factors (suspended matter, physico-chemical and biogeochemical processes). In WTF waste waters from Severobaikalsk town, exceeding of regulations by P (45-96 MPC), Mn (4.7-5.6 MPC), Fe (2.9 PC) and V (2.0-2.5 MPC) was detected.

Keywords: wastewater, riverine waters, Baikalian waters, chemical elements, ICP-MS, maximal permissible concentrations, Lake Baikal

Введение

На побережье Байкала в последние годы активно проявляется экологический кризис: в литоральной зоне бурно развиваются нитчатые водоросли рода *Spirogira*, гибнут эндемичные байкальские губки, водные лишайники и другие гидробионты (Грачев, 2015; Ханаев и др., 2016; Сутурин и др., 2016). Приуроченность интенсивных кризисных проявлений к местам хозяйственной деятельности человека и развития туристического бизнеса указывает на антропогенное влияние, которое может быть как непосредственной причиной кризиса, так и косвенно влиять на его развитие при неблагоприятных природно-климатических условиях. В связи с этим актуален расширенный и детальный поиск неблагоприятных факторов и оценка степени их влияния на литоральную зону Байкала.

Ярким примером антропогенного воздействия на оз. Байкал является сброс сточных вод канализационных очистных сооружений (КОС) г. Слюдянка в р. Похабику – малый приток оз. Байкал. КОС г. Слюдянка аккумулируют как промышленные, так и жилищно-коммунальные стоки и ежегодно сбрасывают около 1 млн м³ недостаточно очищенных сточных вод (Гагарина, 2016), что составляет около 2 % от стока реки, учитывая ее многолетний среднегодовой расход 1.5 м³/с (Автоматизированная..., 2023). Согласно Приказу Минприроды РФ № 83 (Приказ..., 2020) в сточных водах, сбрасываемых централизованными и локальными системами водоотведения поселений или городских

округов в пределах центральной и буферной экологических зон БПТ нормируется содержание 35 химических элементов: Li, Be, B, Na, Mg, Al, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Mo, Cd, Sn, Te, I, Cs, Ba, W, Hg и Pb. Периодические исследования сточных вод КОС г. Слюдянки (в 2014, 2017 и 2020 гг.), проводимые нами в рамках бюджетных проектов ЛИН СО РАН, выявили постоянные превышения нормативов по P (26-38 ПДК), Mn (1.8-5,5 ПДК) и Cu (1.2-2 ПДК), и эпизодические по V (2-3 ПДК), Fe (1.2 ПДК) и Mo (1.5-1.9 ПДК). В 2022 г. превышения нормативов было обнаружено по P (45 ПДК), Mn (4.7 ПДК) и V (2 ПДК) (Чебыкин и др., 2024а). Кроме того, сточные воды КОС г. Слюдянки характеризуются плохими санитарно-микробиологическими показателями (энтерококки и *E. coli* > 40 000 КОЕ / 100 мл (Malnik et al., 2022)), что свидетельствует о неудовлетворительной работе очистных сооружений. По данным водолазных исследований (устное сообщение Ханаева И.В.) антропогенное влияние р. Похабики на литораль Байкала (нарушение растительных поясов, гибель эндемичных губок, развитие нитчатой водоросли рода *Spirogyra*) прослеживается как минимум на 100 м в сторону открытого Байкала напротив устья реки.

Ранее нами был разработан геохимический метод оценки степени влияния локальных источников на водные объекты (Чебыкин и др., 2024а,б; Чебыкин и др., 2025 (в печати)) с помощью которого оценены водные и геохимические вклады сточных вод канализационных очистных сооружений (КОС) г.

Слюдянки в р. Похабихе и литоральной зоне оз. Байкал в зоне влияния загрязненных речных вод. В тот период (сентябрь 2022 г.) исследовались только поверхностные воды литорали (Чебыкин и др., 2024а). Было установлено, что водный вклад сточных вод КОС г. Слюдянки в общий речной сток р. Похабиха был 1.75 %, а влияние загрязнённых речных вод в литорали распространяется далее 90 м по берегу и за пределы 50 м зоны фронтально устью. В данной работе мы расширили зону обследования в литорали до 500 м от устья с отбором проб по глубине (поверхностные, срединные и придонные воды).

Цель данного исследования – определить степень влияния водных источников на р. Похабиху и прилегающую литораль оз. Байкал по водным и геохимическим характеристикам. Провести расширенное исследование водной толщи литорали Байкала в зоне влияния загрязнённых вод р. Похабихи (с отбором проб поверхностных, придонных и срединных вод). Определить водные вклады (ВВ), геохимические вклады (ГХВ) и суммарные геохимические вклады (СГХВ) источников (чистые речные, сточные и байкальские воды) в объекты смешения (р. Похабиха в устье, литораль Байкала). Сравнить полученные данные с результатами исследования сточных вод КОС г. Слюдянки, р. Похабихи и прилегающей литорали Байкала в 2022 г.

1. Материалы и методы

1.1. Описание района работ, отбор и фиксация проб

Город Слюдянка расположен на юго-западном окончании оз. Байкал (рис. 1). Это довольно крупный районный центр с населением ~18 тыс. человек (на 2020 г., (Итоги..., 2020)). Сточные воды КОС г. Слюдянки сбрасываются в небольшой приток Байкала – р. Похабиху в 500 м от берега озера (см. рис. 1). Согласно данным Государственного водного реестра (Поиск...), длина р. Похабиха составляет 20 км, площадь водосборного бассейна – 64.4 км². В базе данных (R-ArcticNet...) представлены среднемесячные расход воды р. Похабиха за 49 лет (с 1951 по 1999 гг.) в створе 2.2 км выше устья. Согласно этим данным,

наиболее низкие расходы воды приходится на зимне-весенний период (январь-апрель: 0.97-0.73 м³/с), наиболее высокие – на летне-осенний (июль – 2.24, август – 2.60, сентябрь – 2.45 м³/с), а многолетний среднегодовой расход составляет 1.49 м³/с. По данным Федерального агентства водных ресурсов (Автоматизированная..., 2023) средние показатели расхода воды р. Похабихи за период 2008-2021 гг. практически не изменились: наиболее низкие расходы приходится на январь-апрель (0.95-0.69 м³/с), наиболее высокие – на июль (2.01 м³/с), август (2.50 м³/с) и сентябрь (2.39 м³/с), многолетний среднегодовой расход составил 1.50 м³/с.

Отбор проб произведён 01 августа 2024 г. в ходе кругобайкальской экспедиции на НИС «Академик В.А. Коптюг». Координаты станций отбора проб, глубина и температура воды представлены в табл. 1, местоположение станций показаны на рис. 1. Проба сточных вод (ст. WW) была отобрана непосредственно из трубы сброса. Пробы речной воды были взяты в ~ 100 м выше трубы сброса сточных вод (ст. Riv(up)) и в приустьевом участке (ст. Riv) перед небольшим озером, перекрытым дамбой у самого берега Байкала. Интерстициальная вода (ст. Riv(h)) отобрана у левого берега р. Похабиха вблизи дамбы. Прибрежные воды (~ 1 м от уреза) отбирали напротив устья (ст. RivCW), и латерально от него 40 и 100 м влево (ст. 40LCW, ст. 100LCW) и 100 м вправо (ст. 100RCW). В литорали в радиусе 100 м от устья были отобраны образцы поверхностной, придонной и срединной воды (с помощью водолазов) на станциях 100R, 65, 80, 50L, 100, 100L, где цифры обозначают расстояние от устья (ст. RivCW), а индексы L и R – угловое направление (влево и вправо, соответственно) от линии, перпендикулярной берегу. Станции без индексов – напротив устья вблизи линии перпендикулярной берегу. В более удалённых секторах отобраны образцы поверхностной, придонной и срединной воды на станциях 200, 330R, 310 и 550L. Фоновая проба байкальской воды была взята из фотического слоя (усреднённая с горизонтов 0, 5, 10, 15, 20 и 25 м) в 3 км от берега (ст. 3к). Образцы воды из фотического слоя и с более глубоких

горизонтов (50, 100, 200 м) отбирали с борта НИС «Г.Ю. Верещагин» пластиковыми (ПЭ-SDR-17 (21)) батометрами (6 л – «OceanTest Equipment», Inc.), USA, 12 л – «General Oceans, Inc.», США) и разливали в ПЭТ бутылки. Фоновые литоральные пробы были

отобраны вблизи посёлка Сухой ручей в 6,5 км от устья р. Похабихи: интерстициальная вода на ст. SR(h), прибрежная на ст. SRCW, поверхностная, придонная и срединная на ст. SR на расстоянии 255 м от уреза (глубина 11.4 м).

Т а б л и ц а 1

Координаты станций отбора, физико-химические характеристики, геохимический состав (мкг/дм³) и общая минерализация (ОМ, мг/дм³) водных объектов в зоне влияния КОС г. Слюдянки и в фоновых районах. В скобках указаны ошибки определения (отн. %)

Table 1

Coordinates of sampling stations, physico-chemical characteristics, geochemical composition (μg/dm³) and total mineralization (ОМ, mg/dm³) of water bodies in the area of influence of Slyudyanka City water treatment facilities (WTF) and in the background areas. The definition errors (relative %) are shown in parentheses.

Станция *	N	E	Глубина, м	t, °C	pH	Li	B	Na	Mg
Riv(up)	N51.6707°	E103.7011°	0	7	8.13	0.85 (5)	4.2 (5)	1360 (5)	7000 (5)
WW	N51.6709°	E103.7027°	0	16.2	7.354	4.6 (5)	47 (5)	48000 (5)	12700 (5)
Riv	N51.6720°	E103.7085°	0	8.6	7.983	0.93 (5)	6.5 (5)	1680 (5)	7300 (5)
Riv(h)	N51.6725°	E103.7095°	0.2	нд	7.613	2.3 (5)	10.6 (5)	2600 (5)	6200 (5)
100RCW	N51.6716°	E103.7102°	0	нд	8.996	1.9 (5)	6.9 (5)	3400 (5)	4300 (5)
RivCW	N51.6724°	E103.7097°	0	нд	8.323	1.36 (5)	7 (5)	2400 (5)	6000 (5)
40LCW	N51.6727°	E103.7094°	0	нд	8.91	2.1 (5)	7.5 (5)	3700 (5)	4700 (5)
100LCW	N51.6732°	E103.7090°	0	нд	8.464	2 (5)	7.1 (5)	3500 (5)	4800 (5)
100R(s)	N51.6719°	E103.7109°	0	нд	8.48	2 (5)	6.1 (5)	3400 (5)	3700 (5)
100R(m)	N51.6719°	E103.7109°	0.9	нд	8.665	2 (5)	6 (5)	3500 (5)	3700 (5)
100R(b)	N51.6719°	E103.7109°	1.8	11	8.552	2.1 (5)	6.3 (5)	3600 (5)	3700 (5)
65(s)	N51.6724°	E103.7106°	0	нд	8.42	2 (5)	6.3 (5)	3500 (5)	3600 (5)
65(m)	N51.6724°	E103.7106°	0.9	нд	8.356	1.88 (5)	6.1 (5)	3300 (5)	4000 (5)
65(b)	N51.6724°	E103.7106°	1.8	12	8.141	1.63 (5)	6.6 (5)	2900 (5)	5000 (5)
80L(s)	N51.6728°	E103.7105°	0	нд	8.403	2 (5)	6.1 (5)	3500 (5)	3700 (5)
80L(m)	N51.6728°	E103.7105°	1	нд	8.107	1.55 (5)	6.3 (5)	2900 (5)	5000 (5)
80L(b)	N51.6728°	E103.7105°	2	11	7.992	1.32 (5)	6.4 (5)	2500 (5)	5900 (5)
50L(s)	N51.6728°	E103.7100°	0	нд	8.276	1.9 (5)	6 (5)	3300 (5)	3800 (5)
50L(m)	N51.6728°	E103.7100°	0.9	нд	8.285	1.69 (5)	6.4 (5)	3000 (5)	4700 (5)
50L(b)	N51.6728°	E103.7100°	1.8	12	8.42	1.88 (5)	6.3 (5)	3300 (5)	4000 (5)
100(s)	N51.6727°	E103.7110°	0	нд	8.438	1.88 (5)	6.1 (5)	3300 (5)	3600 (5)
100(m)	N51.6727°	E103.7110°	1.2	нд	8.35	1.78 (5)	5.9 (5)	3100 (5)	4300 (5)
100(b)	N51.6727°	E103.7110°	2.4	10	8.51	1.89 (5)	6 (5)	3300 (5)	4000 (5)
100L(s)	N51.6732°	E103.7102°	0	нд	8.375	1.9 (5)	6.2 (5)	3300 (5)	3900 (5)
100L(m)	N51.6732°	E103.7102°	1.4	нд	8.383	2 (5)	6.1 (5)	3400 (5)	3900 (5)
100L(b)	N51.6732°	E103.7102°	2.8	7	8.6	2.2 (5)	6 (5)	3700 (5)	3500 (5)
200(s)	N51.6730°	E103.7124°	0	нд	8.354	1.9 (5)	6 (5)	3500 (5)	3600 (5)
200(m)	N51.6730°	E103.7124°	2.3	нд	8.234	2.1 (5)	6 (5)	3800 (5)	3400 (5)
200(b)	N51.6730°	E103.7124°	4.6	4	8.305	2.1 (5)	6.2 (5)	3700 (5)	3400 (5)
330R(s)	N51.6713°	E103.7141°	0	нд	8.41	2 (5)	6.2 (5)	3400 (5)	3900 (5)
330R(m)	N51.6713°	E103.7141°	6	нд	8.264	2.2 (5)	6 (5)	3700 (5)	3400 (5)
330R(b)	N51.6713°	E103.7141°	12.6	5	7.968	2.2 (5)	5.9 (5)	3700 (5)	3400 (5)
310(s)	N51.6726°	E103.7141°	0	нд	8.488	2.1 (5)	6 (5)	3600 (5)	3500 (5)
310(m)	N51.6726°	E103.7141°	5	нд	8.355	2.1 (5)	5.9 (5)	3700 (5)	3300 (5)
310(b)	N51.6726°	E103.7141°	12.2	6	8.152	2.2 (5)	6.1 (5)	3800 (5)	3400 (5)
550L(s)	N51.6763°	E103.7145°	0	нд	8.326	2 (5)	6 (5)	3500 (5)	3600 (5)

550L(m)	N51.6763°	E103.7145°	5	нд	8.176	2.2 (5)	5.9 (5)	3700 (5)	3300 (5)
550L(b)	N51.6763°	E103.7145°	10	6	8.061	2.1 (5)	5.8 (5)	3700 (5)	3400 (5)
SR(s)	N51.6383°	E103.7862°	0	9.5	8.39	2.1 (5)	5.8 (5)	3600 (5)	3300 (5)
SR(m)	N51.6383°	E103.7862°	5.6	нд	8.325	2.2 (5)	5.9 (5)	3700 (5)	3400 (5)
SR(b)	N51.6383°	E103.7862°	11.4	4	7.949	2.1 (5)	6.1 (5)	3700 (5)	3300 (5)
SRCW	N51.6375°	E103.7828°	0	нд	7.92	2 (5)	6.3 (5)	3600 (5)	3400 (5)
SR(h)	N51.6375°	E103.7828°	0.2	нд	6.868	1.77 (5)	18.5 (5)	2600 (5)	4900 (5)
3k	N51.6826°	E103.7492°	0-25	15.5	8.233	2.1 (1.7)	6 (1.7)	3730 (1.7)	3356 (1.7)

Примечание * - описание станций отбора в тексте, (s) – поверхностная вода, (m) – срединная вода, (b) – придонная вода.

Note * - description of sampling stations in the text, (s) – surface water, (m) – middle water, (b) – bottom water.

Продолжение таблицы 1
Continuation of table 1

Станция	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V
Riv(up)	5700 (5)	33 (5)	3400 (5)	590 (5)	700 (5)	31000 (5)	0.3 (10)	0.56 (5)
WW	8900 (5)	4800 (5)	9900 (5)	48000 (5)	12700 (5)	51000 (5)	1.17 (6.4)	2.5 (5)
Riv	5600 (5)	65 (5)	3200 (5)	1140 (5)	790 (5)	31000 (5)	0.35 (9.6)	0.58 (5)
Riv(h)	4500 (5)	75 (5)	3200 (5)	1230 (5)	1760 (5)	39000 (5)	0.91 (7)	1.59 (5)
100RCW	1220 (5)	23 (5)	2200 (5)	680 (5)	1000 (5)	20000 (5)	0.18 (12)	0.45 (5)
RivCW	3600 (5)	37 (5)	2700 (5)	960 (5)	870 (5)	26000 (5)	0.27 (10)	0.55 (5)
40LCW	1340 (5)	18.8 (5)	2600 (5)	780 (5)	1090 (5)	22000 (5)	0.2 (11)	0.51 (5)
100LCW	1730 (5)	20 (5)	2300 (5)	990 (5)	1130 (5)	24000 (5)	0.2 (12)	0.43 (5)
100R(s)	730 (5)	12.4 (5)	2100 (5)	600 (5)	990 (5)	17500 (5)	0.16 (12)	0.38 (5)
100R(m)	700 (5)	11.7 (5)	1900 (5)	660 (5)	990 (5)	17900 (5)	0.15 (13)	0.42 (5)
100R(b)	640 (5)	16.5 (5)	2200 (5)	590 (5)	990 (5)	18200 (5)	0.19 (12)	0.52 (5)
65(s)	730 (5)	37 (5)	2100 (5)	600 (5)	1010 (5)	17200 (5)	0.22 (11)	0.4 (5)
65(m)	1070 (5)	23 (5)	2200 (5)	620 (5)	970 (5)	18700 (5)	0.17 (12)	0.42 (5)
65(b)	2400 (5)	34 (5)	2500 (5)	870 (5)	940 (5)	23000 (5)	0.22 (11)	0.63 (5)
80L(s)	680 (5)	18 (5)	2300 (5)	620 (5)	980 (5)	17600 (5)	0.14 (13)	0.4 (5)
80L(m)	2500 (5)	40 (5)	2600 (5)	910 (5)	920 (5)	23000 (5)	0.19 (12)	0.59 (5)
80L(b)	3600 (5)	48 (5)	2700 (5)	1120 (5)	900 (5)	26000 (5)	0.24 (11)	0.72 (5)
50L(s)	950 (5)	16.5 (5)	2100 (5)	590 (5)	940 (5)	17900 (5)	0.13 (13)	0.42 (5)
50L(m)	1900 (5)	26 (5)	2400 (5)	800 (5)	930 (5)	22000 (5)	0.2 (12)	0.48 (5)
50L(b)	1130 (5)	17.6 (5)	1900 (5)	640 (5)	950 (5)	19000 (5)	0.19 (12)	0.44 (5)
100(s)	830 (5)	35 (5)	2100 (5)	620 (5)	970 (5)	17300 (5)	0.18 (12)	0.4 (5)
100(m)	1650 (5)	25 (5)	2200 (5)	730 (5)	940 (5)	20000 (5)	0.19 (12)	0.46 (5)
100(b)	1090 (5)	25 (5)	2100 (5)	640 (5)	950 (5)	19000 (5)	0.17 (12)	0.48 (5)
100L(s)	1140 (5)	39 (5)	2300 (5)	700 (5)	980 (5)	18600 (5)	0.15 (13)	0.43 (5)
100L(m)	970 (5)	21 (5)	2200 (5)	670 (5)	980 (5)	18900 (5)	0.16 (12)	0.44 (5)
100L(b)	280 (5)	15.9 (5)	2000 (5)	600 (5)	990 (5)	17300 (5)	0.12 (14)	0.44 (5)
200(s)	770 (5)	15.8 (5)	2200 (5)	630 (5)	990 (5)	17100 (5)	0.1 (15)	0.4 (5)
200(m)	250 (5)	18.6 (5)	2200 (5)	640 (5)	1020 (5)	16900 (5)	0.19 (12)	0.41 (5)
200(b)	185 (5)	25 (5)	2200 (5)	590 (5)	1020 (5)	17100 (5)	0.14 (13)	0.4 (5)
330R(s)	950 (5)	11.7 (5)	2100 (5)	690 (5)	1000 (5)	18400 (5)	0.21 (11)	0.42 (5)
330R(m)	240 (5)	13 (5)	2100 (5)	620 (5)	1030 (5)	16800 (5)	0.1 (14)	0.4 (5)
330R(b)	103 (5)	23 (5)	2400 (5)	600 (5)	1020 (5)	16900 (5)	0.09 (15)	0.39 (5)
310(s)	660 (5)	40 (5)	2000 (5)	650 (5)	1020 (5)	17000 (5)	0.15 (13)	0.4 (5)
310(m)	190 (5)	23 (5)	2200 (5)	600 (5)	1010 (5)	16400 (5)	0.07 (16)	0.39 (5)
310(b)	85 (5)	17 (5)	2200 (5)	610 (5)	1020 (5)	16800 (5)	0.09 (15)	0.39 (5)
550L(s)	810 (5)	34 (5)	2000 (5)	640 (5)	990 (5)	17200 (5)	0.16 (12)	0.4 (5)
550L(m)	330 (5)	16.6 (5)	2000 (5)	580 (5)	990 (5)	16200 (5)	0.15 (13)	0.39 (5)
550L(b)	176 (5)	12.5 (5)	2100 (5)	600 (5)	1010 (5)	16600 (5)	0.1 (15)	0.41 (5)
SR(s)	350 (5)	14.4 (5)	2000 (5)	710 (5)	1000 (5)	16300 (5)	0.13 (13)	0.39 (5)
SR(m)	360 (5)	6.7 (5)	1860 (5)	650 (5)	1010 (5)	16600 (5)	0.12 (14)	0.39 (5)
SR(b)	99 (5)	19 (5)	2200 (5)	620 (5)	1020 (5)	16400 (5)	0.1 (15)	0.38 (5)
SRCW	460 (5)	21 (5)	2000 (5)	660 (5)	1060 (5)	16800 (5)	0.19 (12)	0.41 (5)
SR(h)	3900 (5)	65 (5)	1090 (5)	1090 (5)	2600 (5)	26000 (5)	1.9 (5.5)	1.01 (5)
3k	335 (1.8)	15.6 (1.8)	2060 (1.8)	624 (1.7)	1016 (1.7)	16440 (1.7)	0.12 (4.9)	0.39 (1.7)

Продолжение таблицы 1
Continuation of table 1

Станция	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Ga
Riv(up)	0.56 (5)	0.23 (8.9)	6.2 (5)	15.6 (5)	0.098 (5.8)	0.12 (8.9)	0.3 (4.9)	0.007 (17)
WW	2.5 (5)	0.4 (7.4)	56 (5)	290 (5)	0.61 (5)	1.31 (5)	0.61 (5)	0.082 (7.4)

Riv	0.58 (5)	0.23 (8.9)	12.4 (5)	71 (5)	0.135 (5.2)	0.12 (8.8)	0.31 (4.9)	0.008 (16)
Riv(h)	1.59 (5)	0.23 (9)	4.9 (5)	51 (5)	0.155 (5)	0.69 (4.9)	2.7 (5)	0.036 (9.7)
100RCW	0.45 (5)	0.09 (12)	13.8 (5)	80 (5)	0.072 (6.4)	0.22 (7.2)	0.24 (5.3)	0.0047 (19)
RivCW	0.55 (5)	0.19 (9.6)	11.8 (5)	74 (5)	0.095 (5.8)	0.18 (7.7)	0.23 (5.3)	0.005 (18)
40LCW	0.51 (5)	0.12 (11)	15.1 (5)	94 (5)	0.082 (6.1)	0.25 (6.9)	0.26 (5.2)	0.005 (18)
100LCW	0.43 (5)	0.16 (10)	23 (5)	130 (5)	0.098 (5.8)	0.23 (7.1)	0.26 (5.2)	0.006 (18)
100R(s)	0.38 (5)	0.1 (12)	3.1 (5)	15 (5)	0.052 (7.2)	0.2 (7.4)	0.21 (5.5)	0.0011 (31)
100R(m)	0.42 (5)	0.1 (12)	2.3 (5)	6.3 (5)	0.056 (7)	0.16 (8)	0.2 (5.6)	0.0014 (28)
100R(b)	0.52 (5)	0.1 (12)	8.4 (5)	9.4 (5)	0.068 (6.5)	0.16 (8)	0.26 (5.1)	0.0049 (19)
65(s)	0.4 (5)	0.09 (12)	2.4 (5)	10.8 (5)	0.05 (7.2)	0.19 (7.5)	0.26 (5.2)	0.0028 (22)
65(m)	0.42 (5)	0.1 (12)	3.1 (5)	10.5 (5)	0.06 (6.8)	0.18 (7.8)	0.21 (5.6)	0.0031 (22)
65(b)	0.63 (5)	0.17 (9.9)	8.6 (5)	30 (5)	0.084 (6.1)	0.14 (8.3)	0.22 (5.4)	0.006 (18)
80L(s)	0.4 (5)	0.08 (13)	2 (5)	9.2 (5)	0.051 (7.2)	0.19 (7.6)	0.24 (5.3)	0.0029 (22)
80L(m)	0.59 (5)	0.17 (9.9)	7.4 (5)	32 (5)	0.079 (6.2)	0.16 (8)	0.22 (5.5)	0.006 (17)
80L(b)	0.72 (5)	0.23 (9)	9.4 (5)	45 (5)	0.092 (5.9)	0.17 (7.9)	0.21 (5.5)	0.007 (17)
50L(s)	0.42 (5)	0.1 (12)	2.5 (5)	10.4 (5)	0.053 (7.1)	0.18 (7.6)	0.28 (5.1)	0.0021 (25)
50L(m)	0.48 (5)	0.13 (11)	6.8 (5)	25 (5)	0.072 (6.4)	0.18 (7.7)	0.21 (5.6)	0.0035 (21)
50L(b)	0.44 (5)	0.11 (11)	5.7 (5)	15.3 (5)	0.06 (6.8)	0.17 (7.8)	0.21 (5.6)	0.0035 (21)
100(s)	0.4 (5)	0.12 (11)	1.84 (5)	9.1 (5)	0.049 (7.3)	0.15 (8.2)	0.24 (5.3)	0.0033 (21)
100(m)	0.46 (5)	0.11 (11)	4.7 (5)	18.8 (5)	0.061 (6.8)	0.19 (7.6)	0.23 (5.4)	0.0025 (23)
100(b)	0.48 (5)	0.09 (12)	5.2 (5)	11.4 (5)	0.066 (6.6)	0.19 (7.5)	0.25 (5.2)	0.0037 (21)
100L(s)	0.43 (5)	0.09 (12)	3.7 (5)	24 (5)	0.057 (6.9)	0.23 (7.1)	0.24 (5.3)	0.0018 (26)
100L(m)	0.44 (5)	0.09 (12)	3.4 (5)	18 (5)	0.053 (7.1)	0.16 (8)	0.21 (5.5)	0.0024 (24)
100L(b)	0.44 (5)	0.08 (13)	2.3 (5)	9.8 (5)	0.048 (7.3)	0.15 (8.2)	0.21 (5.6)	0.0025 (24)
200(s)	0.4 (5)	0.1 (12)	0.81 (5)	7.8 (5)	0.044 (7.6)	0.17 (7.9)	0.25 (5.2)	0.0012 (30)
200(m)	0.41 (5)	0.12 (11)	0.52 (5)	9.6 (5)	0.05 (7.2)	0.23 (7.1)	0.2 (5.6)	0.0022 (24)
200(b)	0.4 (5)	0.08 (13)	1.52 (5)	7.8 (5)	0.049 (7.3)	0.21 (7.3)	0.23 (5.4)	0.0017 (26)
330R(s)	0.42 (5)	0.12 (11)	2.4 (5)	18 (5)	0.057 (6.9)	0.17 (7.8)	0.2 (5.6)	0.0028 (22)
330R(m)	0.4 (5)	0.08 (13)	0.28 (5)	5.7 (5.2)	0.044 (7.6)	0.21 (7.4)	0.18 (5.8)	0.0008 (34)
330R(b)	0.39 (5)	0.08 (13)	0.36 (5)	7 (4.8)	0.052 (7.1)	0.26 (6.8)	0.22 (5.4)	0.0016 (27)
310(s)	0.4 (5)	0.09 (12)	1.1 (5)	11.7 (5)	0.044 (7.5)	0.2 (7.4)	0.24 (5.3)	0.002 (25)
310(m)	0.39 (5)	0.062 (14)	0.153 (5)	5.4 (5.3)	0.045 (7.5)	0.2 (7.4)	0.19 (5.8)	0.0014 (29)
310(b)	0.39 (5)	0.067 (13)	0.72 (5)	7.1 (4.8)	0.046 (7.4)	0.14 (8.3)	2 (5)	0.001 (32)
550L(s)	0.4 (5)	0.1 (12)	1.47 (5)	12.2 (5)	0.045 (7.5)	0.21 (7.3)	0.26 (5.2)	0.0026 (23)
550L(m)	0.39 (5)	0.07 (13)	0.097 (5.3)	4.8 (5.5)	0.045 (7.5)	0.26 (6.8)	0.29 (5)	0.001 (31)
550L(b)	0.41 (5)	0.14 (11)	0.43 (5)	6.4 (5)	0.046 (7.4)	0.22 (7.2)	0.21 (5.6)	0.0015 (28)
SR(s)	0.39 (5)	0.09 (12)	0.34 (5)	10.7 (5)	0.041 (7.7)	0.33 (6.3)	0.77 (5)	0.0018 (26)
SR(m)	0.39 (5)	0.09 (12)	0.28 (5)	9.3 (5)	0.046 (7.4)	0.18 (7.7)	0.36 (5)	0.0008 (34)
SR(b)	0.38 (5)	0.11 (11)	0.19 (5)	8.5 (5)	0.054 (7)	0.19 (7.6)	0.26 (5.1)	0.0005 (39)
SRCW	0.41 (5)	0.13 (11)	13.4 (5)	52 (5)	0.098 (5.8)	0.26 (6.8)	0.4 (5)	0.0016 (27)
SR(h)	1.01 (5)	0.45 (7.2)	168 (5)	270 (5)	0.8 (5)	1.66 (5)	3.4 (5)	0.018 (12)
3k	0.39 (1.7)	0.082 (4.5)	0.068 (2.4)	5.2 (2)	0.046 (2.5)	0.19 (2.7)	0.23 (2.2)	0.00064 (14)

Продолжение таблицы 1
Continuation of table 1

Станция	Ge	As	Br	Rb	Sr	Y	Zr	Mo
Riv(ур)	0.007 (21)	0.063 (14)	4.1 (5.7)	1.12 (5)	122 (5)	0.025 (7.5)	0.0048 (17)	0.29 (5.5)
WW	0.036 (12)	0.51 (6.9)	28 (5)	10.5 (5)	155 (5)	0.064 (5.5)	0.075 (6.7)	0.7 (5)
Riv	0.007 (21)	0.06 (14)	4.5 (5.5)	1.23 (5)	124 (5)	0.025 (7.5)	0.007 (15)	0.28 (5.6)
Riv(h)	0.035 (12)	0.6 (6.5)	6.8 (4.8)	2.2 (5)	185 (5)	0.052 (5.9)	0.021 (10)	0.77 (5)
100RCW	0.005 (23)	0.34 (7.8)	8.5 (5)	0.76 (5)	116 (5)	0.012 (9.5)	0.0032 (19)	1.19 (5)
RivCW	0.004 (25)	0.17 (9.9)	6.4 (4.9)	0.98 (5)	121 (5)	0.022 (7.9)	0.0045 (17)	0.68 (5)
40LCW	0.006 (22)	0.4 (7.4)	9.1 (5)	0.81 (5)	126 (5)	0.013 (9.4)	0.004 (18)	1.33 (5)
100LCW	0.002 (50)	0.32 (8)	8.7 (5)	1.04 (5)	131 (5)	0.013 (9.2)	0.0047 (17)	1.14 (5)
100R(s)	0.0035 (26)	0.34 (7.8)	8.6 (5)	0.67 (5)	110 (5)	0.0073 (11)	0.0042 (17)	1.26 (5)
100R(m)	0.0029 (28)	0.37 (7.6)	9 (5)	0.67 (5)	112 (5)	0.0069 (11)	0.0026 (21)	1.3 (5)
100R(b)	0.002 (32)	0.38 (7.6)	9.1 (5)	0.68 (5)	113 (5)	0.011 (9.9)	0.0041 (18)	1.28 (5)
65(s)	0.0023 (30)	0.36 (7.7)	8.9 (5)	0.68 (5)	109 (5)	0.017 (8.5)	0.0046 (17)	1.28 (5)
65(m)	0.002 (50)	0.31 (8.1)	8.4 (5)	0.72 (5)	112 (5)	0.011 (9.9)	0.0042 (17)	1.21 (5)
65(b)	0.004 (25)	0.23 (8.9)	7.7 (5)	0.89 (5)	118 (5)	0.014 (9.1)	0.0035 (19)	0.97 (5)
80L(s)	0.0026 (29)	0.36 (7.7)	8.8 (5)	0.67 (5)	110 (5)	0.0071 (11)	0.0039 (18)	1.27 (5)
80L(m)	0.0028 (28)	0.24 (8.8)	7.3 (5)	0.89 (5)	116 (5)	0.009 (10)	0.003 (20)	0.89 (5)
80L(b)	0.007 (21)	0.18 (9.6)	6.4 (4.9)	1.04 (5)	120 (5)	0.014 (9.1)	0.0047 (17)	0.7 (5)
50L(s)	0.0032 (27)	0.34 (7.9)	8.8 (5)	0.7 (5)	110 (5)	0.0089 (11)	0.0035 (18)	1.2 (5)
50L(m)	0.006 (22)	0.28 (8.4)	7.9 (5)	0.82 (5)	117 (5)	0.011 (9.8)	0.0043 (17)	1.04 (5)
50L(b)	0.004 (25)	0.35 (7.7)	8.6 (5)	0.73 (5)	113 (5)	0.01 (10)	0.0047 (17)	1.2 (5)
100(s)	0.005 (23)	0.34 (7.8)	8.9 (5)	0.69 (5)	109 (5)	0.017 (8.4)	0.0049 (17)	1.26 (5)
100(m)	0.0031 (27)	0.3 (8.2)	8.2 (5)	0.78 (5)	113 (5)	0.012 (9.5)	0.0038 (18)	1.07 (5)
100(b)	0.0026 (29)	0.32 (8)	8.7 (5)	0.74 (5)	114 (5)	0.01 (10)	0.0059 (16)	1.18 (5)
100L(s)	0.0035 (26)	0.33 (7.9)	8.8 (5)	0.7 (5)	110 (5)	0.02 (8)	0.0049 (17)	1.17 (5)

100L(m)	0.0036 (26)	0.36 (7.7)	8.9 (5)	0.69 (5)	113 (5)	0.012 (9.6)	0.0023 (21)	1.25 (5)
100L(b)	0.004 (26)	0.39 (7.5)	9.5 (5)	0.64 (5)	112 (5)	0.0083 (11)	0.0021 (22)	1.39 (5)
200(s)	0.002 (50)	0.35 (7.7)	9.7 (5)	0.62 (5)	108 (5)	0.015 (8.8)	0.005 (16)	1.3 (5)
200(m)	0.0026 (29)	0.39 (7.5)	10 (5)	0.65 (5)	112 (5)	0.0081 (11)	0.0053 (16)	1.37 (5)
200(b)	0.0022 (31)	0.39 (7.5)	9.5 (5)	0.64 (5)	112 (5)	0.0062 (12)	0.0026 (20)	1.34 (5)
330R(s)	0.0033 (27)	0.34 (7.9)	9 (5)	0.67 (5)	111 (5)	0.0067 (12)	0.0033 (19)	1.24 (5)
330R(m)	0.002 (50)	0.39 (7.5)	10 (5)	0.64 (5)	111 (5)	0.0045 (13)	0.0026 (20)	1.41 (5)
330R(b)	0.002 (50)	0.35 (7.8)	9.6 (5)	0.63 (5)	112 (5)	0.006 (12)	0.0033 (19)	1.38 (5)
310(s)	0.002 (50)	0.33 (7.9)	9.8 (5)	0.66 (5)	108 (5)	0.013 (9.4)	0.0051 (16)	1.3 (5)
310(m)	0.002 (50)	0.39 (7.5)	9.6 (5)	0.62 (5)	111 (5)	0.0082 (11)	0.0044 (17)	1.36 (5)
310(b)	0.0017 (34)	0.38 (7.6)	9.9 (5)	0.62 (5)	111 (5)	0.0054 (12)	0.0029 (20)	1.34 (5)
550L(s)	0.002 (50)	0.33 (7.9)	9.8 (5)	0.68 (5)	107 (5)	0.014 (9)	0.0049 (17)	1.26 (5)
550L(m)	0.0027 (29)	0.38 (7.6)	9.8 (5)	0.62 (5)	109 (5)	0.0069 (11)	0.0059 (16)	1.32 (5)
550L(b)	0.0019 (32)	0.36 (7.7)	9.5 (5)	0.63 (5)	110 (5)	0.0053 (13)	0.0036 (18)	1.37 (5)
SR(s)	0.002 (50)	0.36 (7.7)	10.8 (5)	0.63 (5)	109 (5)	0.0057 (12)	0.0053 (16)	1.33 (5)
SR(m)	0.002 (50)	0.38 (7.6)	10.3 (5)	0.63 (5)	110 (5)	0.005 (13)	0.0038 (18)	1.36 (5)
SR(b)	0.002 (50)	0.39 (7.5)	10.1 (5)	0.63 (5)	111 (5)	0.0042 (13)	0.001 (50)	1.37 (5)
SRCW	0.0036 (26)	0.38 (7.6)	10 (5)	0.68 (5)	110 (5)	0.0085 (11)	0.0035 (19)	1.31 (5)
SR(h)	0.032 (13)	0.4 (7.4)	12.7 (5)	3.3 (5)	143 (5)	0.08 (5.1)	0.026 (9.5)	0.71 (5)
3k	0.0021 (16)	0.39 (2.5)	10.1 (1.7)	0.62 (1.7)	110 (1.7)	0.0048 (4.9)	0.0026 (7.8)	1.36 (1.7)

Продолжение таблицы 1
Continuation of table 1

Станция	Sb	I	Cs	Ba	La	Ce	W	U
Riv(up)	0.055 (9.4)	0.83 (5.1)	0.0039 (14)	28 (5)	0.0073 (11)	0.0068 (11)	0.014 (13)	0.26 (5)
WW	0.4 (4.9)	19 (5)	0.045 (6.3)	25 (5)	0.015 (8.7)	0.022 (7.7)	0.022 (11)	0.42 (5)
Riv	0.2 (6.1)	0.94 (4.9)	0.0034 (15)	29 (5)	0.01 (9.9)	0.011 (9.5)	0.013 (14)	0.26 (5)
Riv(h)	0.55 (5)	1.47 (5)	0.0048 (13)	39 (5)	0.032 (6.7)	0.056 (5.6)	0.065 (8)	0.54 (5)
100RCW	0.17 (6.5)	2.7 (5)	0.0021 (17)	12.8 (5)	0.0068 (11)	0.0078 (11)	0.048 (8.8)	0.52 (5)
RivCW	0.16 (6.6)	1.64 (5)	0.003 (15)	21 (5)	0.0078 (11)	0.011 (9.8)	0.028 (10)	0.36 (5)
40LCW	0.19 (6.3)	2.9 (5)	0.0021 (17)	14 (5)	0.007 (11)	0.008 (11)	0.048 (8.8)	0.56 (5)
100LCW	0.19 (6.3)	2.6 (5)	0.003 (15)	18.6 (5)	0.0078 (11)	0.0077 (11)	0.043 (9.1)	0.55 (5)
100R(s)	0.15 (6.8)	2.5 (5)	0.0022 (17)	11.8 (5)	0.0038 (14)	0.0042 (13)	0.041 (9.3)	0.52 (5)
100R(m)	0.16 (6.7)	2.6 (5)	0.0017 (18)	11.9 (5)	0.0047 (13)	0.0039 (14)	0.045 (9)	0.53 (5)
100R(b)	0.19 (6.2)	2.6 (5)	0.002 (17)	11.3 (5)	0.0061 (12)	0.007 (11)	0.051 (8.6)	0.53 (5)
65(s)	0.18 (6.3)	3.3 (5)	0.0013 (20)	10.8 (5)	0.0048 (13)	0.0043 (13)	0.044 (9)	0.51 (5)
65(m)	0.19 (6.3)	2.6 (5)	0.0021 (17)	13 (5)	0.0046 (13)	0.004 (14)	0.045 (9)	0.51 (5)
65(b)	0.16 (6.5)	2.2 (5)	0.003 (15)	17 (5)	0.0049 (12)	0.0061 (12)	0.039 (9.4)	0.44 (5)
80L(s)	0.16 (6.6)	2.8 (5)	0.0017 (18)	10.8 (5)	0.004 (13)	0.0049 (13)	0.048 (8.8)	0.53 (5)
80L(m)	0.16 (6.6)	2.2 (5)	0.0031 (15)	18 (5)	0.0056 (12)	0.0059 (12)	0.036 (9.7)	0.42 (5)
80L(b)	0.17 (6.5)	1.9 (5)	0.003 (15)	22 (5)	0.0062 (11)	0.0065 (12)	0.028 (10)	0.37 (5)
50L(s)	0.19 (6.3)	2.3 (5)	0.0019 (18)	12.1 (5)	0.004 (13)	0.0041 (13)	0.041 (9.3)	0.52 (5)
50L(m)	0.18 (6.4)	2 (5)	0.0023 (17)	15.4 (5)	0.0047 (13)	0.0057 (12)	0.039 (9.4)	0.47 (5)
50L(b)	0.17 (6.5)	2.3 (5)	0.0023 (17)	12 (5)	0.0051 (12)	0.0055 (12)	0.045 (8.9)	0.51 (5)
100(s)	0.131 (7.1)	3.3 (5)	0.0014 (20)	11.1 (5)	0.0049 (12)	0.0041 (13)	0.045 (9)	0.52 (5)
100(m)	0.14 (6.9)	2.5 (5)	0.0018 (18)	16.6 (5)	0.0053 (12)	0.0044 (13)	0.039 (9.4)	0.49 (5)
100(b)	0.17 (6.5)	2.2 (5)	0.002 (18)	13.4 (5)	0.0047 (13)	0.0057 (12)	0.042 (9.2)	0.51 (5)
100L(s)	0.21 (6.1)	3.4 (5)	0.0023 (17)	12.2 (5)	0.0062 (12)	0.0054 (12)	0.045 (9)	0.49 (5)
100L(m)	0.15 (6.8)	2.9 (5)	0.0019 (18)	12.7 (5)	0.0045 (13)	0.0041 (13)	0.043 (9.1)	0.51 (5)
100L(b)	0.2 (6.1)	3 (5)	0.0012 (21)	10.3 (5)	0.0041 (13)	0.0035 (14)	0.053 (8.5)	0.54 (5)
200(s)	0.123 (7.2)	4.1 (5)	0.0014 (20)	10.2 (5)	0.0051 (12)	0.0034 (14)	0.047 (8.8)	0.52 (5)
200(m)	0.17 (6.5)	3.3 (5)	0.0015 (19)	11.5 (5)	0.0071 (11)	0.0083 (11)	0.045 (9)	0.55 (5)
200(b)	0.14 (6.9)	3 (5)	0.0018 (18)	11 (5)	0.0043 (13)	0.0037 (14)	0.052 (8.6)	0.56 (5)
330R(s)	0.18 (6.3)	2.6 (5)	0.0023 (17)	12.3 (5)	0.0051 (12)	0.0049 (13)	0.043 (9.1)	0.51 (5)
330R(m)	0.17 (6.5)	2.8 (5)	0.0016 (19)	11.3 (5)	0.0034 (14)	0.0019 (17)	0.049 (8.7)	0.55 (5)
330R(b)	0.15 (6.8)	2.8 (5)	0.0014 (20)	11.1 (5)	0.004 (13)	0.0027 (15)	0.05 (8.6)	0.55 (5)
310(s)	0.16 (6.6)	3.4 (5)	0.0016 (19)	10.4 (5)	0.0053 (12)	0.0044 (13)	0.046 (8.9)	0.52 (5)
310(m)	0.128 (7.1)	2.9 (5)	0.002 (18)	10.8 (5)	0.0038 (14)	0.0018 (18)	0.049 (8.7)	0.55 (5)
310(b)	0.119 (7.3)	2.9 (5)	0.0019 (18)	11.1 (5)	0.0035 (14)	0.0019 (17)	0.042 (9.2)	0.54 (5)
550L(s)	0.15 (6.8)	3.3 (5)	0.0017 (18)	10.4 (5)	0.0072 (11)	0.0043 (13)	0.045 (9)	0.52 (5)
550L(m)	0.114 (7.4)	2.8 (5)	0.0012 (21)	10.8 (5)	0.0032 (14)	0.0028 (15)	0.048 (8.8)	0.56 (5)
550L(b)	0.15 (6.7)	2.7 (5)	0.0013 (20)	10.8 (5)	0.0028 (15)	0.0022 (16)	0.05 (8.7)	0.55 (5)

SR(s)	0.14 (6.9)	2.7 (5)	0.0011 (21)	10.7 (5)	0.003 (15)	0.0022 (16)	0.049 (8.7)	0.55 (5)
SR(m)	0.136 (7)	2.7 (5)	0.0018 (18)	10.6 (5)	0.0034 (14)	0.0038 (14)	0.048 (8.8)	0.54 (5)
SR(b)	0.124 (7.2)	2.7 (5)	0.0014 (20)	11.1 (5)	0.0027 (15)	0.0013 (19)	0.05 (8.7)	0.54 (5)
SRCW	0.15 (6.8)	2.7 (5)	0.0017 (18)	11.8 (5)	0.0047 (13)	0.0058 (12)	0.044 (9)	0.51 (5)
SR(h)	0.24 (5.8)	4.3 (5)	0.0072 (11)	38 (5)	0.081 (4.9)	0.156 (5)	0.018 (12)	0.126 (5)
3k	0.15 (3)	2.9 (1.8)	0.0014 (6.6)	10.5 (1.7)	0.0022 (6.6)	0.00107 (8.5)	0.048 (2.9)	0.55 (1.7)

Продолжение таблицы 1
Continuation of table 1

Станция	OM	LREE	MREE	HREE	REE
Riv(up)	190 (3.3)	0.016 (7.1)	0.018 (9.6)	0.0079 (9.5)	0.042 (5.2)
WW	460 (2.2)	0.04 (5.5)	0.064 (6.6)	0.017 (8.2)	0.12 (4.1)
Riv	190 (3.2)	0.023 (6.4)	0.02 (9.4)	0.0056 (11)	0.049 (5.1)
Riv(h)	220 (3.4)	0.094 (4.1)	0.058 (7)	0.012 (9)	0.16 (3.5)
100RCW	120 (3.2)	0.015 (7.5)	0.011 (12)	0.0025 (15)	0.029 (6.1)
RivCW	160 (3.2)	0.021 (6.8)	0.013 (11)	0.0035 (14)	0.037 (5.6)
40LCW	130 (3.2)	0.017 (7.2)	0.0077 (13)	0.002 (16)	0.026 (6)
100LCW	150 (3.2)	0.017 (7.2)	0.01 (11)	0.0031 (14)	0.03 (5.7)
100R(s)	110 (3.1)	0.0089 (8.8)	0.0096 (12)	0.0024 (14)	0.021 (6.9)
100R(m)	110 (3.2)	0.0095 (8.9)	0.0052 (15)	0.0014 (18)	0.016 (7.3)
100R(b)	110 (3.2)	0.015 (7.4)	0.01 (12)	0.0037 (12)	0.029 (5.8)
65(s)	110 (3.1)	0.01 (8.5)	0.014 (12)	0.0027 (15)	0.027 (7.1)
65(m)	120 (3.2)	0.0098 (8.7)	0.012 (12)	0.0016 (19)	0.023 (7.1)
65(b)	140 (3.2)	0.012 (7.9)	0.012 (11)	0.0042 (12)	0.028 (6)
80L(s)	110 (3.1)	0.0099 (8.5)	0.0085 (12)	0.0037 (11)	0.022 (6.2)
80L(m)	140 (3.2)	0.012 (8.1)	0.0096 (12)	0.0027 (15)	0.025 (6.4)
80L(b)	160 (3.2)	0.014 (7.6)	0.0093 (12)	0.0033 (14)	0.027 (6.1)
50L(s)	110 (3.2)	0.0088 (8.6)	0.0082 (12)	0.0026 (13)	0.02 (6.6)
50L(m)	130 (3.2)	0.011 (8.2)	0.009 (12)	0.0021 (16)	0.022 (6.5)
50L(b)	120 (3.2)	0.012 (7.9)	0.009 (12)	0.0031 (13)	0.024 (6.3)
100(s)	110 (3.1)	0.0098 (8.3)	0.02 (11)	0.0037 (14)	0.033 (7.1)
100(m)	120 (3.2)	0.011 (8)	0.013 (12)	0.0035 (13)	0.028 (6.7)
100(b)	120 (3.2)	0.011 (8.3)	0.012 (11)	0.0029 (13)	0.026 (6.4)
100L(s)	110 (3.1)	0.013 (8)	0.023 (10)	0.0046 (12)	0.04 (6.4)
100L(m)	120 (3.2)	0.0093 (8.7)	0.012 (12)	0.0015 (17)	0.023 (7.5)
100L(b)	110 (3.2)	0.0083 (8.9)	0.0057 (15)	0.0017 (17)	0.016 (7.4)
200(s)	110 (3.1)	0.0094 (8.5)	0.013 (12)	0.0022 (15)	0.025 (7.3)
200(m)	100 (3.1)	0.017 (7.3)	0.011 (12)	0.002 (17)	0.03 (6.3)
200(b)	100 (3.2)	0.009 (8.7)	0.0081 (13)	0.0019 (14)	0.019 (7.1)
330R(s)	110 (3.2)	0.011 (8.1)	0.01 (12)	0.0013 (18)	0.023 (6.9)
330R(m)	100 (3.2)	0.0057 (10)	0.0049 (15)	0.001 (20)	0.012 (8.4)
330R(b)	100 (3.2)	0.0075 (9.1)	0.0084 (12)	0.0032 (12)	0.019 (6.5)
310(s)	110 (3.1)	0.011 (8.3)	0.019 (11)	0.002 (17)	0.032 (7.5)
310(m)	100 (3.1)	0.0061 (10)	0.0084 (13)	0.0013 (16)	0.016 (8.3)
310(b)	100 (3.2)	0.0058 (10)	0.0075 (14)	0.0012 (18)	0.015 (8.5)
550L(s)	110 (3.1)	0.013 (7.9)	0.019 (12)	0.0021 (17)	0.033 (7.2)
550L(m)	100 (3.1)	0.0065 (9.6)	0.011 (13)	0.0015 (18)	0.019 (8.5)
550L(b)	100 (3.2)	0.0058 (9.9)	0.008 (13)	0.0024 (13)	0.016 (7.5)
SR(s)	100 (3.1)	0.0059 (10)	0.0062 (15)	0.001 (21)	0.013 (8.5)
SR(m)	100 (3.2)	0.0076 (9.5)	0.0044 (18)	0.00095 (20)	0.013 (8.3)
SR(b)	100 (3.1)	0.0046 (11)	0.0044 (17)	0.00054 (24)	0.0095 (9.4)
SRCW	100 (3.1)	0.011 (8.3)	0.0075 (13)	0.0016 (17)	0.02 (6.9)
SR(h)	160 (3.1)	0.25 (3.5)	0.11 (5.8)	0.02 (7.8)	0.38 (2.9)
3k	100 (1)	0.0041 (4.4)	0.0039 (6.3)	0.00082 (8.2)	0.0088 (3.5)

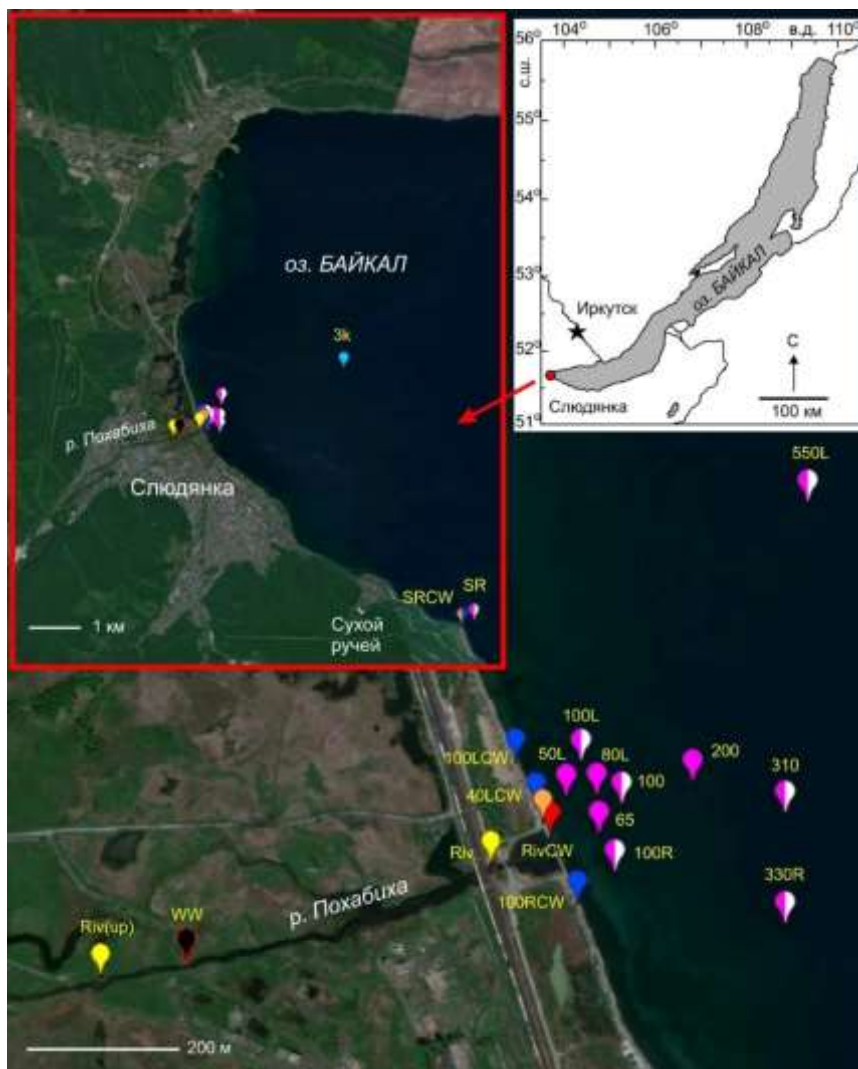


Рис. 1. Карта-схема оз. Байкал и космоснимки с указанием мест отбора проб в фоновых районах (врезка) и в зоне влияния сточных вод КОС г. Слюдянки и р. Похабихи.

Примечание. Космоснимки взяты из открытых источников (SAS Planet, <https://sasplanet.ru/>). Желтыми символами отмечены места отбора речных проб (Riv(up) – 100 м выше трубы сброса КОС, Riv – устье), черным – сточных вод (WW – труба сброса КОС), красным – прибрежная вода напротив устья реки (RivCW), синими – прибрежная вода 40 м (40LCW) и 100 м (100LCW) от устья влево и 100 м от устья вправо (100RCW), розовыми – поверхностная, придонная и срединная вода в литорали, розовым с белым – станции на которых отбирались бентосные пробы; голубым – фоновая станция в 3 км от берега (3k). Цифры в названиях станций означают расстояния от устья (ст. RivCW), а индексы L и R – угловое направление (влево и вправо, соответственно) от линии, перпендикулярной берегу. Станции без индексов – напротив устья вблизи линии перпендикулярной берегу. Фоновые литоральные пробы были отобраны вблизи посёлка Сухой ручей в 6,5 км от устья р. Похабихи: интерстициальная вода на ст. SR(h), прибрежная на ст. SRCW, поверхностная, придонная и срединная на ст. SR на расстоянии 255 м от уреза.

Fig. 1. A schematic map of Lake Baikal and satellite images indicating sampling sites in the background areas (inset) and in the area of influence of wastewater of Slyudyanka City water treatment facilities (WTF) and Pokhabikha River.

Note. Satellite images are taken from open sources (SAS Planet, <https://sasplanet.ru/>). Yellow symbols mark the riverine sampling sites (Riv(up) – 100 m above the WTF discharge pipe, Riv – mouth), black – wastewater (WW – WTF discharge pipe), red – coastal water opposite the river mouth (RivCW), blue – coastal water 40 m (40LCW) and 100 m (100LCW) from the mouth to the left and 100 m from the mouth to the right (100RCW), pink – surface, bottom and middle water in the littoral, pink and white – stations where benthic samples were taken; blue is the background station in 3 km from the shore (3k). The numbers in the station names indicate the distance from the mouth (RivCW station), and the L and R indexes indicate the angular direction (left and right, respectively) from the

line perpendicular to the shore. Stations without indexes are located opposite the mouth near the line perpendicular to the shore. Background littoral samples were taken near the village of Sukhoi Ruchey, 6.5 km from the mouth of the river: interstitial water at SR(h) station, coastal water at SRCW station, surface, bottom and middle water at SR station at a distance of 255 m from the water edge.

Для многоэлементного ИСП-МС анализа пробы воды отбирали одноразовыми стерильными медицинскими шприцами (10 мл) непосредственно из объектов исследования. В гидрохимической лаборатории на борту НИС «Г.Ю. Верещагин» отобранные пробы в количестве 2 мл фильтровали через одноразовые полистирольные стерильные шприц-насадки Minisart 16555-K (размер пор 0,45 мкм, ацетат целлюлозы, Sartorius Stedim Biotech GmbH, Германия) в предварительно взвешенные полипропиленовые пробирки Эппендорфа (2 мл, Ахуген Scientific, Cat.-No. MCT-200-C, США, Мексика), содержащие 40 мкл консерванта. В качестве консерванта использовалась 70 % HNO₃, дважды очищенная с помощью суббуйлинговой системы перегонки кислот (Savillex DST-1000 sub-boiling distillation system, Япония), содержащая индий (1008 ppb) в качестве внутреннего стандарта. Консервант добавляли в пробирки Эппендорфа весовым методом. Пробирки с отобранными образцами воды взвешивали и рассчитывали точное содержание азотной кислоты (типично 2 %) и индия (типично 30 ppb). Все необходимые взвешивания проводились на аналитических весах Mettler Toledo AG104 (погрешность взвешивания ± 0,0003 г).

Для определения гидрохимических и физико-химических параметров образцы воды отбирали в ПЭТ бутылки. Измерения pH проводили сразу же после отбора проб pH-метром testo 252 (Германия, точность определения ± 0.02 pH).

1.2. Многоэлементный ИСП-МС анализ

Подготовленные пробы воды измеряли на квадрупольном ИСП-МС масс-спектрометре Agilent 7500 се в ЦКП «Ультрамикроанализ» ЛИН СО РАН в соответствии с разработанными ранее подходами (Чебыкин и др., 2012; Чебыкин и др. 2020; Чебыкин и др. 2024а,б). Система ввода проб: боросиликатный распылитель MicroMist (режим подачи растворов - самораспыление), PFA распылительная камера, кварцевая горелка с системой

ShieldTorch. Измерения проводили в режиме «горячей плазмы» (мощность генератора плазмы 1580 Вт) без столкновительной ячейки.

Растворы измерялись в сканирующем режиме с дополнительным загроулением сигналов в 30 раз для изотопов ²³Na, ²⁷Al, ²⁸Si, ³⁹K и ¹¹⁵In (3 канала на массу, 0,05 с на канал, общее время сканирования масс-спектра – 62 с, промывка между пробами – 60 с).

Для калибровки масс-спектрометра использовали многоэлементные стандартные растворы ICP-MS-68A-A и ICP-MS-68A-B (HIGH-PURITY STANDARDS, Charleston, USA), образец байкальской бутылированной воды (для Na, Mg, Si, S, Cl, K, Ca, (Suturin et al., 2003)), а также растворы катионов (Na, Mg, K, Ca, Fe, Hg) и анионов (Si, P, S, Cl, Br, I), приготовленные смешением одноэлементных ИСП-МС стандартных растворов компании Inorganic Ventures (США): Na (Cat. No. MSNA-100PPM), Mg (Cat. No. MSMG-100PPM), K (Cat. No. MSK-100PPM), Ca (Cat. No. CGCA1), Fe (Cat. No. MSFE-100ppm), Hg (Cat. No. MSHGN-10PPM), Si (Cat. No. MSSI-100PPM), P (Cat. No. MSP-100ppm), S (Cat. No. CGS1), Cl (Cat. No. CGICCL1), Br (Cat. No. CGICBR1), I (Cat. No. CGICII). Металлы и Si в стандартных растворах присутствовали в азотнокислой среде, S и P в форме серной ортофосфорной кислот соответственно, галогениды – в водном растворе аммонийных солей. Концентрации элементов в рабочем стандартном растворе анионов и катионов готовили исходя из их типичных содержаний (кроме ртути и фосфора) в пресных природных водах: Na (3 ppm), Mg (3 ppm), K (1 ppm), Ca (16 ppm), Fe (0,3 ppm) и Hg (0,6 ppb), Si (2 ppm), P (1 ppm), S (5 ppm), Cl (4 ppm), Br (40 ppb) и I (20 ppb).

Корректировку на интерферирующие молекулярные ионы (MeO⁺, MeOH⁺, MeAr⁺, MeCl⁺) проводили с использованием подхода, описанного в работе (Aries et al., 2000).

Ошибки измерения элементов, оценивали по экспериментально установленной зависимости к-нта вариации (*RSD* %) от величины аналитического сигнала (*N*, имп./с): *RSD* % =

$125.71 \cdot N^{-0.33103}$, где $N = 20-20\ 000$ имп./с. Сигналы величиной более 20 000 имп./с характеризуются RSD 5 % и лучше, сигналы величиной менее 20 имп./с характеризуются RSD более 50 %. Типичные ошибки измерения (коэффициент вариации RSD), в зависимости от концентрации химических элементов находятся в следующих диапазонах: <0.001 мг/дм³ – RSD >25 %; $0.001-0.1$ мг/дм³ – RSD 25-10 %; $0.1-1$ мг/дм³ – RSD 10-5 %; >1 мг/дм³ – RSD 5 %.

1.3. Расчёт общей минерализации воды

Расчёт общей минерализации (ОМ) воды проводили по результатам многоэлементного ИСП-МС анализа с использованием баланса химических эквивалентов. При известных значениях pH рассчитывали соотношения равновесных формы угольной кислоты ($[\text{HCO}_3^-]$, $[\text{CO}_3^{2-}]$ и $[\text{CO}_2]$), в отсутствии данных о pH полагали, что в типичных природных водах доминируют её гидрокарбонатные формы (90-98 % в диапазоне 7.3-9.4 pH). При составлении баланса химических эквивалентов измеренные концентрации химических элементов переводили в молярные концентрации их типичных ионных форм: Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} . При содержании кремния менее 2 ммоль (56 мг/дм³) полагали, что он находится в виде ортокремневой кислоты (H_4SiO_4 , слабодиссоциируемой при pH < 9), при более высоких концентрациях – в её полимерных формах, условно, в виде линейного полимера $(\text{H}_2\text{SiO}_3)_n$ (Мышляева, Краснощеков, 1972). В расчёт были также включены условно следовые элементы в формах: Li^+ , VO_3^{3-} , Al^{3+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Sr^{2+} и Ba^{2+} , которые могут присутствовать в природных и техногенных водах в значимом количестве. Составленный баланс химических эквивалентов позволяет рассчитать суммарную концентрацию ионов, которые методом ИСП-МС не определяются (HCO_3^- , CO_3^{2-} и NO_3^- , полагая, что концентрация NO_3^- в водах значительно меньше суммарного содержания форм угольной кислоты) и оценить общую минерализацию воды по сумме всех ионов.

1.4. Расчёт ошибок результатов математических операций

Расчёт ошибок результатов математических операций в простых и сложных выражениях осуществлялся в соответствии с подходами, описанными в работе (Geyh, Schleicher, 1990).

1. Для результатов сложения и/или вычитания.

Абсолютные ошибки:

$$t^* \pm \sigma^* = t_1 + t_2 - t_3 \pm \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} \quad (1),$$

где σ_1 , σ_2 и σ_3 – абсолютные ошибки измерения переменных t_1 , t_2 и t_3 .

Относительные ошибки:

$$\bar{\sigma}^* = \frac{\sigma^*}{t^*} = \sqrt{\frac{(\bar{\sigma}_1 \times t_1)^2 + (\bar{\sigma}_2 \times t_2)^2 + (\bar{\sigma}_3 \times t_3)^2}{t^{*2}}} \quad (2),$$

где $\bar{\sigma}_1$, $\bar{\sigma}_2$ и $\bar{\sigma}_3$ – относительные ошибки измерения переменных t_1 , t_2 и t_3 .

2. Для результатов умножения и/или деления.

Абсолютные ошибки:

$$t^* \pm \sigma^* = \frac{t_1 \times t_2}{t_3} \pm t^* \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{t_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{t_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_3}{t_3}\right)^2} = \frac{t_1 \times t_2}{t_3} \pm t^* \times \sqrt{\bar{\sigma}_1^2 + \bar{\sigma}_2^2 + \bar{\sigma}_3^2} \quad (3).$$

Относительные ошибки:

$$\bar{\sigma}^* = \frac{\sigma^*}{t^*} = \sqrt{\bar{\sigma}_1^2 + \bar{\sigma}_2^2 + \bar{\sigma}_3^2} \quad (4).$$

2. Результаты и обсуждение

В исследуемых пробах были определены концентрации 72 химических элементов. Концентрации наиболее информативных элементов, использованных в работе, представлены в табл. 1.

Согласно полученным данным, сточные воды КОС г. Слюдянки в исследуемый период превышают установленные нормативы (Приказ..., 2020) по Р (96 ПДК), Mn (5.6 ПДК), Fe (2.9 ПДК) и V (2.5 ПДК), и составляют более половины нормы по Cu (0.6 ПДК) и Mo (0.7 ПДК).

За исключением бария (Ba) концентрации всех информативных химических элементов в сточных водах больше, чем в речных на участке 100 м выше трубы сброса (табл. 1, рис. 2, столбец WW**). Наибольшее

различие (> 10 раз), характерно для P (145 раз), Cl (81), Na (35), I (23), Fe (19), K (18), Zr (16), Ga (12), Cs (12), B (11) и Ni (11). Общая минерализация сточных вод г. Слюдянки составляла 460 мг/дм^3 , что в 2.4 раза выше, чем в р. Похабиха.

Речная вода в устье обогащена относительно речной воды на участке 100 м выше сброса сточных вод (рис. 2., столбец Riv**) Fe (4.6 раз), Sb (3.6), Mn (2), P (2), Cl (1.9), Ce (1.6), B (1.5), Zr (1.5), суммой лёгких редких земель LREE (1.4), Co (1.4), La (1.4), Na (1.2), общей суммой редких земель REE (1.2), Al (1.1), I (1.1) и Re (1.1), и обеднена суммой тяжёлых редких земель HREE (0.71). При сравнении тенденций изменения геохимических различий сточных и загрязнённых устьевых речных вод относительно условно чистых речных вод (WW** – Riv**, рис. 2) видно, что относительно высокие степени обогащения речной воды в устье по Fe, Zr, B, Mn, Sb, Co, и лёгким редкоземельным элементам связаны с влиянием дополнительных источников их поступления на участке ниже трубы сброса сточных вод. Такими источниками могут быть заболоченные протоки с низкими скоростями течения (см., рис. 1).

Относительно байкальских фоновых вод сточные воды обогащены большинством элементов, за исключением U, Mo и W (рис. 2, столбец WW*). Наибольшие степени обогащения (>100 раз) характерны для Mn (824), P (308) и Ga (128). Высокие степени обогащения (10-100 раз) обнаружены по Cl (77), Fe (56), Cs (33), Zr (29), Si (27), HREE (21), Ce (21), Ge (17), Rb (17), MREE (16), REE (16), Co (13), Y (13), Na (13), K (13) и Ti (10).

Загрязнённые устьевые речные воды в наибольшей степени обогащены относительно байкальских фоновых вод Mn (182 раза), в меньшей степени Si (17), Fe (14), Ga

(12), и редкоземельными элементами (5-10 раз), рис. 2, столбец Riv*.

Степень влияния каждого водного источника (речные, сточные и фоновые байкальские воды) на литоральные воды Байкала в зоне действия р. Похабихи зависит от их водных вкладов и геохимических составов.

2.1. Водный вклад сточных вод в речные воды

Для расчёта водных вкладов сточных вод КОС г. Слюдянки в общий речной сток р. Похабихи мы использовали подход, описанный в работах (Чебыкин и др., 2024б; Чебыкин и др., 2025 (в печати)), с учётом множества потенциально пригодных (допустимых) химических элементов, разбитых на несколько групп (рис. 3).

$$C_{i_calc} = Part_ww_riv \times C_{i_ww} + Part_riv(up)_riv \times C_{i_riv(up)} \quad (5),$$

$$Part_ww_riv + Part_riv(up)_riv = 1 \quad (6),$$

$$Part_ww_riv \geq 0; Part_riv(up)_riv \geq 0 \quad (7),$$

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{C_{i_calc} - C_i}{C_i} \right) \times 100 \right]^2} \rightarrow 0 \quad (8),$$

где C_{i_calc} и C_i – расчетная и измеренная концентрации элемента i в р. Похабиха в устье, соответственно; C_{i_ww} , $C_{i_riv_up}$ – измеренные концентрации элемента i в сточной воде КОС г. Слюдянка и в р. Похабихе выше сброса сточных вод, соответственно, а $Part_ww_riv$, $Part_riv(up)_riv$ – водные вклады соответствующих источников смешения; Δ – среднеквадратичное расхождение расчетных и измеренных концентраций элементов в р. Похабихе в устье (в объекте смешения), в %.

Элемент	WW**	Riv**	WW*	Riv*
P	145	2.0	308	4.2
Cl	41	1.9	77	1.8
Na	35	1.2	13	0.45
I	23	1.1	6.5	0.32
Fe	19	4.6	36	13
K	18	1.1	13	0.78
Zr	16	1.5	39	2.7
Ga	12	1.1	128	12
Cs	12	0.87	31	2.5
B	11	1.5	7.9	1.09
Ni	11	1.00	7.0	0.64
Rb	9.4	1.10	17	2.0
Mn	9.0	2.0	824	182
As	8.1	0.95	1.3	0.15
Sb	7.3	3.6	2.6	1.3
Br	6.8	1.10	2.8	0.44
Co	6.2	1.4	12	3.0
Li	5.4	1.09	2.2	0.45
Ge	5.1	1.00	17	3.3
V	4.5	1.04	6.4	1.5
Ti	3.9	1.2	10	3.0
MREE	3.5	1.1	16	5.3
Ce	3.2	1.6	21	10
S	2.9	0.94	4.8	1.6
REE	2.9	1.2	10	5.6
Al	2.7	1.1	6.6	2.8
Y	2.6	1.00	13	5.2
LREE	2.5	1.4	9.8	5.7
OM	2.4	1.00	4.6	1.9
Mo	2.4	0.97	0.51	0.21
HREE	2.2	0.71	21	6.9
La	2.1	1.4	6.8	4.5
Cu	2.0	1.03	2.7	1.3
Mg	1.8	1.04	3.8	2.2
Cr	1.7	1.00	4.9	2.8
Cd	1.6	1.00	3.1	1.9
U	1.6	1.00	0.76	0.47
W	1.6	0.93	0.46	0.27
Si	1.6	0.98	27	17
Sr	1.3	1.02	1.4	1.1
Ba	0.89	1.04	2.4	2.8

Ранг различий	Ранг различий
(14) >100 раз	(0) <0.01 раз
(13) 10-100 раз	(1) 0.01-0.033 раз
(12) 10-10 раз	(2) 0.033-0.1 раз
(11) 5-10 раз	(3) 0.1-0.2 раз
(10) 3-5 раз	(4) 0.2-0.33 раз
(9) 2-3 раз	(5) 0.33-0.5 раз
(8) 1-2 раз	(6) 0.5-0.91 раз
(7) 0.91-1.1 раз	(7*) <=0.1 или >=1.1 раз - нет достоверных отличий (перекрывание доверительных интервалов)
(7*) 0.91-1.1 раз - нет достоверных отличий	

Рис. 2. Тепловая карта геохимических различий (в размах) сточных и речных вод

Примечание. * – относительно фотического слоя в 3 км от уреза, ** – относительно р. Похабиха выше сброса сточных вод, OM – общая минерализация.

Fig. 2. Heat map of geochemical differences (in times) of wastewater and riverine waters.

Note. * – relative to the photic layer in 3 km from the water edge, ** – relative to the Pokhabikha River

above the wastewater discharge, OM is the total mineralization.

Решение системы уравнений (5)-(8) является задачей на оптимизацию переменных (водных вкладов $Part_{ww_riv}$, $Part_{riv(up)_riv}$) при поиске глобального минимума по параметру $\Delta\%$ и осуществлялось численными методами с помощью модуля «Поиск решения» в ПО Excel.

Принципы отбора потенциально пригодных элементов для расчета водных вкладов подробно описаны в предыдущих работах (Чебыкин и др., 2024а,б; Чебыкин и др., 2025 (в печати)). Необходимо, чтобы концентрации элементов в источниках смешения различались, чем больше – тем лучше (фактор контрастности); элементы должны вести себя консервативно – смешиваться чисто механически, без изменения концентрации на физико-химических и биогеохимических барьерах; элементы должны удовлетворять граничным условиям – их концентрации в объектах смешения не должны быть больше максимальных или меньше минимальных в источниках смешения; элементы должны надёжно определяться методом ИСП-МС в исследуемых объектах. Для системы смешения «р. Похабиха – сточные воды КОС г. Слюдянка» отобрано восемь потенциально пригодных элементов – Cl, Na, I, K, Rb, Br, Li и V, которые были разделены на пять групп: Группа {1} – высококонтрастные (Вкт) и типично консервативные (Тк) элементы: Na и Cl; Группа {2} – все допустимые Вкт элементы:– Na, Cl, I и K; Группа {3} – Вкт, надёжно определяемые (НО) и условно надёжно определяемые (УНО) элементы: Na, Cl и K; Группа {4} – все допустимые Вкт и контрастные (Кт) элементы:– Na, Cl, I, K, Rb, Br, Li и V; Группа {5} – Вкт, Кт, НО и УНО элементы: Na, Cl, K, Rb, Li и V. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Элемент	FC	Контрастность	Консервативность	Надежность определения	НизК, ОНизК в объектах смешения	ОНизК в источниках	Группа (1) ВКт&ТК	Группа (2) ВКт	Группа (3) ВКт&НО	Группа (4) ВКт&Кт	Группа (5) ВКт&Кт&НО
P	145	СВКт	НК(б)	УНО							
Cl	81	ВКт	ТК	УНО			1	1	1	1	1
Na	35	ВКт	ТК	НО			1	1	1	1	1
I	23	ВКт	К	ННО				1		1	
Fe	19	ВКт	НК(о/в)	ННО							
K	18	ВКт	УК(чб)	НО				1	1	1	1
Zr	16	ВКт	УК(взв)	УНО	ОНизК	Riv(up)					
Ga	12	ВКт	УК	УНО	ОНизК	Riv(up)					
Cs	12	ВКт	К	УНО	ОНизК	Riv(up)					
B	11	ВКт	УК(чб)	НО							
Ni	11	ВКт	УК(взв)	ННО							
Rb	9.4	Кт	К	НО						1	1
Mn	9.0	Кт	НК(о/в)	НО							
As	8.1	Кт	УК(д)	УНО	НизК						
Sb	7.3	Кт	УК	УНО	НизК						
Br	6.8	Кт	К	УНО						1	
Co	6.2	Кт	К	УНО	НизК						
Li	5.4	Кт	К	НО						1	1
Ge	5.1	Кт	УК	ННО	ОНизК	Riv(up)					
V	4.5	СКт	УК(д)	НО						1	1
Ti	3.9	СКт	УК(взв)	ННО							
MREE	3.5	СКт	УК(орг, взв)	УНО	НизК						
Ce	3.2	СКт	УК(орг, взв)	УНО	НизК	Riv(up)					
S	2.9	СКт	К	ННО							
REE	2.9	СКт	УК(орг, взв)	УНО							
Al	2.7	СКт	УК(взв)	НО							
Y	2.6	СКт	УК(орг, взв)	УНО	НизК						
LREE	2.5	СКт	УК(орг, взв)	УНО	НизК						
OM	2.4	СКт	К	УНО							
Mo	2.4	СКт	К	НО							
HREE	2.2	СКт	УК(орг, взв)	УНО	ОНизК	Riv(up)					
La	2.1	СКт	УК(орг, взв)	УНО	НизК	Riv(up)					
Cu	2.0	СКт	УК	УНО*							
Mg	1.8	НКт	К	НО							
Cr	1.7	НКт	УК(взв)	ННО							
Ca	1.6	НКт	К	НО							
U	1.6	НКт	УК	НО							
W	1.6	НКт	К	УНО	НизК						
Si	1.6	НКт	УК(чб)	НО							
Sr	1.3	ОНКт	К	НО							
Ba	1.1*	ОНКт	К	НО							

Рис. 3. Классификация элементов по категориям контрастности, консервативности и надежности определения, выбор элементов и их групп для расчета водных вкладов сточных вод КОС г. Слюдянки (Part_ww_riv) в формирование вод р. Похабихи (элементы, исключенные из расчетов выделены красным шрифтом, “1” в группах – включенный в расчет элемент).

Примечание. FC = WW / Riv(up) – фактор контрастности, отношение концентраций элементов в источниках смешения: WW – сточные воды, Riv(up) – р. Похабиха выше сброса сточных вод, [для отношений WW / Riv(up) < 1 взяты обратные величины, отмечены звездочкой (*)].

Контрастность: СВКт – сверхвысоко контрастные (FC > 100), ВКт – высококонтрастные (FC = 10-100), Кт – контрастные (FC = 5-10), СКт – средние контрастные (FC = 2-5), НКт – низко контрастные (FC = 1.4-2), ОНКт – очень низко контрастные (FC < 1.4).

Консервативность: ТК – типично консервативный, К – консервативный, УК – условно консервативный [(орг) – мигрирующий в составе тонкодисперсных органо–минеральных коллоидов, (чб) – частично биогенный, (д) – может быть диагенетического происхождения из осадков, (взв) – частично мигрирующий в составе тонкодисперсной взвеси], НК – неконсервативный [(о/в) – Red/Ox зависимый, (б) – биогенный].

Надежность определения: НО – надежно определяется во всех объектах, УНО – условно надежно определяемый [значимые корректировки на интерференции и/или вычитание приборного фона или низкие концентрации (< 0.1 мкг/дм³) (НизК) или очень низкие (< 0.01 мкг/дм³, для Sb < 0.05 мкг/дм³) (ОНизК) во всех объектах или в их большинстве (НизК*, ОНизК*) или ОНизК в источниках смешения. УНО* – условно надежно определяемый [эпизодическая контаминация проб или масс–спектрометра], ННО – ненадежно определяемые [сложность

вычитания приборного фона, большие эффекты памяти, большое количество интерференций и/или сложности их учета при пороговых концентрациях аналита].

Fig. 3. Classification of elements by categories of contrast, conservativeness and measurement reliability, selection of elements and their groups for calculating the water contributions of wastewater of Slyudyanka City WTF (*Part_ww_riv*) to the formation of the riverine waters (the elements excluded from the calculations are highlighted in red, the “1” in the groups is the element included in the calculation).

Note. $FC = WW/Riv(up)$ – contrast factor, ratio of elements concentrations in mixing sources: *WW* – wastewater, *Riv(up)* – Pokhabikha River above the wastewater discharge, [for ratios $WW/Riv(up) < 1$, reversal values are taken].

Contrast: **СВКт** – ultrahigh contrast ($FC > 100$), **ВКт** – high contrast ($FC = 10-100$), **Кт** – contrast ($FC = 5-10$), **СКт** – medium contrast ($FC = 2-5$), **Нкт** – low contrast ($FC = 1.4-2$), **ОНкт** – very low contrast ($FC < 1.4$).

Conservativeness: **Тк** – typically conservative, **К** – conservative, **Ук** – conventionally conservative [(**opr**) – migrating as part of finely-dispersed organic-mineral colloids, (**чб**) – partly biogenic, (**д**) – may be of diagenetic origin from sediments, (**взв**) – partly migrating as part of a finely-dispersed suspension], **Нк** – non-conservative [(**о/в**) – Red/Ox dependent, (**б**) – biogenic].

Determination reliability: **НО** – determined reliably in all objects, **УНО** – conventionally reliably determinable [valuable corrections to interference and/or subtraction of instrumental background or low concentrations ($< 0.1 \mu\text{g}/\text{dm}^3$) (**НизК**) or very low ($< 0.01 \mu\text{g}/\text{dm}^3$, for $S_b < 0.05 \mu\text{g}/\text{dm}^3$) (**ОНизК**) in all objects or in their major part (**НизК***, **ОНизК***) or **ОНизК** in mixing sources]. **УНО*** – conventionally reliably determinable [episodic contamination of samples or of the mass-spectrometer], **ННО** – non-reliably determinable [complexity in subtraction of instrumental background, great memory effects, a large amount of interferences and/or complexity in their taking into account at threshold concentration of an analyte].

Т а б л и ц а 2

Результаты расчёта водного вклада сточных вод КОС г. Слюдянки (*Part_ww_riv*) и чистых речных вод (*Part_riv(up)_riv*) в р. Похабику

Table 2

The results of calculating the water contribution of wastewater of Slyudyanka City WTF (*Part_ww_riv*) and clean riverine waters (*Part_riv(up)_riv*) into the Pokhabikha River

Результаты расчёта	Группа {1} ВКт&Тк	Группа {2} ВКт	Группа {3} ВКт&НО	Группа {4} ВКт&Кт	Группа {5} ВКт&Кт&НО	Среднее
<i>Part_ww_riv</i>, %	1.01	0.95	0.99	0.96	1.00	0.98
Δ , %	7.7	6.8	6.7	5.3	5.1	2.9*
<i>Part_riv(up)_riv</i>, %	98.99	99.05	99.01	99.04	99.00	99.02
Error, %	0.08	0.06	0.07	0.05	0.05	0.03*
Тест с генератором случайных чисел (n=50)						
<i>Part_ww_riv</i> (test) max, %	1.15	1.09	1.10	1.11	1.13	
<i>Part_ww_riv</i> (test) min, %	0.88	0.81	0.87	0.81	0.87	
<i>Part_ww_riv</i> (test) aver, %	1.01	0.94	0.98	0.95	1.01	0.98
RSD (test), %	6.7	7.0	5.9	6.0	7.2	3.0*
Error (test), %**	1.9	2.0	1.7	1.7	2.0	

Примечание. Формирование групп элементов описано в тексте и показано на рис.3; $\Delta\%$ – среднеквадратичное отклонение расчетных и измеренных концентраций элементов в объекте смешения, показывает ошибку расчета *Part_ww_riv*; * – расчёт ошибок для результата усреднения проведён по формуле (2); ** – ошибка расчёта среднего результата с использованием статистики Стьюдента.

Note. The formation of groups of elements is described in the text and shown in Fig.3; $\Delta\%$ is the standard deviation of the calculated and measured concentrations of elements in the mixing object, it shows the calculation error of *Part_ww_riv*; * – error calculation for the averaging result is carried out according to formula (2); ** – error calculation of the average result using Student statistics.

Из анализа табл. 2 следует, что расчёт водного вклада сточных вод в р. Похабику по пяти группам даёт близкие результаты и составляет в среднем 0.98 % с относительной ошибкой 2.9 %. Для проверки устойчивости

решения был проведён тест, в котором концентрации элементов варьировались случайным образом (отдельно для каждого элемента на каждой станции) в пределах их ошибок определения (относительные ошибки

определения элементов представлены в табл. 1). В каждой группе было проведено 50 вычислений, определены максимальные, минимальные и средние величины, а также коэффициенты вариации и ошибки среднего результата (см. табл. 2). Из полученных данных следует, что исходные и усреднённые тестовые величины водных вкладов в группах практически совпадают, а ошибки их определения (Δ , % и RSD (test), %) весьма близки, что указывает на то, что параметр Δ является адекватной оценкой точности определения водных вкладов.

Водный вклад чистых речных вод в р. Похабиху ($Part_{riv}(up)_{riv}$) в отсутствие значимых вкладов других источников определяется как:

$$Part_{riv}(up)_{riv} = 1 - Part_{ww}_{riv} \quad (9),$$

и может быть пересчитан из полученных величин $Part_{ww}_{riv}$. Согласно расчётам, их вклад составляет в среднем 99.02 % с относительной погрешностью 0.03 % (см. табл. 2).

2.2. Водные вклады загрязнённых речных вод и сточных вод в литоральные воды Байкала в зоне влияния р. Похабиха

Для расчёта водного вклада загрязнённых речных вод в литорали Байкала в зоне их влияния мы использовали тот же самый подход, что и для расчёта водного вклада сточных в речные, но, естественно, с другим набором допустимых элементов (рис. 4).

Элемент	FC	Контрастность	Консервативность	Надёжность определения	НизК; ОНизК во всех или в большинстве (*) объектах смешения	ОНизК в источниках	{1} Кт	{2} СКт	{3} Нет	{4} Кт&СКт	{5} Кт&СКт&НО	{6} Все	{7} Все&НО
Mn	182	СВКт	НК(об)	НС									
Ni	17	НС	УК(об)	НС									
Fe	14	НС	НК(об)	ННО									
Ga	12	НС	УК	УНО	ОНизК	Riv							
Ce	10	Кт	УК(опт, см)	УНО	ОНизК*	BW							
HREE	6.9	Кт	УК(опт, см)	УНО	ОНизК	Riv							
As	6.5*	Кт	УК(н)	УНО			1			1		1	
LREE	5.7	Кт	УК(опт, см)	УНО	НизК*	BW							
RFE	5.6	Кт	УК(опт, см)	УНО	НизК	BW							
MREE	5.3	Кт	УК(опт, см)	УНО	НизК*	BW							
Y	5.2	Кт	УК(опт, см)	УНО	НизК*	BW							
Mo	4.9*	СКт	Н	НС			1			1	1	1	1
La	4.5	СКт	УК(опт, см)	УНО	ОНизК	Riv							
P	4.2	СКт	НК(об)	УНО					1				
W	3.7*	СКт	Н	УНО	НизК			1					1
Ge	3.3	СКт	УК	ННО	ОНизК	Riv							
I	3.1*	СКт	Н	ННО									
Ti	3.0	СКт	УК(см)	ННО									
Co	3.0	СКт	Н	УНО	НизК								
Cr	2.8	СКт	УК(см)	ННО									
Al	2.8	СКт	УК(см)	НС									
Ba	2.8	СКт	Н	НС				1		1	1	1	1
Zr	2.7	СКт	УК(см)	УНО	ОНизК	Riv							
Cu	2.5	СКт	Н	УНО	ОНизК	Riv							
Br	2.3*	СКт	Н	УНО									
Li	2.2*	СКт	Н	НС				1		1	1	1	1
Nu	2.2*	СКт	НС	НС				1		1	1	1	1
Mg	2.2	СКт	Н	НС				1		1	1	1	1
U	2.1*	СКт	УК	НС				1		1	1	1	1
Rb	2.0	СКт	УК	НС				1		1	1	1	1
OM	1.9	НВКт	Н	УНО					1				
Ca	1.9	НВКт	Н	НС					1				1
Cl	1.8	НВКт	НС	УНО					1				1
Ni	1.6*	НВКт	УК(см)	ННО									
S	1.6	НВКт	Н	ННО									
V	1.5	НВКт	УК(н)	НС					1			1	1
Cu	1.3	ОНВКт	УК	УНО*									
Sb	1.3	ОНВКт	УК	УНО									
K	1.3*	ОНВКт	УК(об)	НС									
Sr	1.1	ОНВКт	Н	НС									
B	1.1	ОНВКт	УК(об)	НС									

Рис. 4. Классификация элементов по категориям контрастности, консервативности и надёжности определения, выбор элементов и их групп для расчета водных вкладов загрязнённых речных вод ($Part_{riv}(up)_{riv}$) в формирование литоральных вод Байкала в зоне влияния р. Похабиха (элементы, исключённые из расчетов выделены красным шрифтом, “1” в группах – включенный в расчет элемент).

Примечание. $FC = Riv / BW$ – фактор контрастности, отношение концентраций элементов в источниках смешения: Riv – р. Похабиха, устье, BW – байкальская вода на фоновой станции (3к) [для отношений $Riv / BW < 1$ взяты обратные величины, отмечены звёздочкой (*)]. Остальные обозначения даны в примечании к рис 3.

Fig. 4. Classification of elements by categories of contrast, conservativeness and measurement reliability, selection of elements and of their groups for calculating the water contributions of polluted riverine waters ($Part_{riv}(up)_{riv}$) to the formation of the littoral waters of Lake Baikal in the zone of influence of the

Pokhabikha River (the elements excluded from the calculations are highlighted in red, the “1” in the groups is the element included in the calculation).

Note. $FC = Riv / BW$ – contrast factor, ratio of elements concentrations in mixing sources: *Riv* – Pokhabikha River, mouth, *BW* – Baikalian water at the background station (3k), *WW* – wastewater, *Riv(up)* – Pokhabikha River above the wastewater discharge, [for ratios $Riv / BW < 1$, reversal values are taken]. The other designations are given in the note to Fig. 3.

В связи с более низкой контрастностью в системе смешения «р. Похабиха (устье) – байкальская вода» список потенциально пригодных элементов был расширен на категорию среднеконтрастных (СКт) и низкоконтрастных (НКт). Для тестирования на устойчивость результатов расчёта было отобрано 13 элементов (As, Mo, W, Ba, Li, Na, Mg, U, Rb, OM, Ca, Cl и V), которые были разделены не семь групп: {1} – контрастные (Кт): As, Mo; {2} – СКт: W, Ba, Br, Li, Na, Mg, U и Rb; {3} – НКт: OM, Ca, Cl и V; {4} – Кт&СКт, объединяющая группы {1} и {2}; {5} – Кт&СКт&НО, в которой оставлены только надёжно определяемые (НО) элементы группы {4} (исключены As и W); {6} – Все, включающая все 13 тестируемых элементов, {7} – Все&НО, в которой оставлены только надёжно определяемые элементы группы {6} (исключены As, W, OM и Cl). Результаты

расчетов представлены в табл. 3. Характеристики геохимического состава исследованных проб позволяют надёжно рассчитать вклады загрязнённых речных вод для станций в радиусе 100 метров от устья р. Похабихи, а также в поверхностной воде на ст. 200 (в 200 метрах напротив устья). В более удалённых от устья секторах, из-за сильного разбавления речных вод байкальскими в отсутствии высококонтрастных индикаторов, точность определения элементов не позволяет получить однозначных оценок. В прибрежной воде на ст. 40LCW и ст. 100LCW в 40 и 100 м влево от устья также невозможно однозначно определить водные вклады загрязнённых речных вод из-за контаминации, вероятно, вследствие влияния других локальных источников (площадной смыв, интерстициальные воды?).

Таблица 3

Водный вклад загрязнённых речных (*Part_riv_lit*) и сточных (*Part_ww_lit*) вод в литоральные воды Байкала в зоне влияния р. Похабиха

Table 3

Water contribution of polluted riverine waters (*Part_riv_lit*) and wastewater (*Part_ww_lit*) into the littoral waters of Lake Baikal in the zone of influence of the Pokhabikha River

Станция	Параметр	{1} N = 2	{2} N = 7	{3} N = 4	{4} N = 9	{5} N = 7	{6} N = 13	{7} N = 9	Среднее *	Part_ww_lit, % [Error, %]**
100 RCW	Part_riv_lit, %	16	15	20	15	16	16	17	16	0.156
	Δ, % (Error, %)	0.27	5.8	4.6	5.2	4.1	5.3	4.5	(1.9)	[3.4]
Riv CW	Part_riv_lit, %	65	61	68	63	63	64	63	63	0.621
	Δ, % (Error, %)	3.2	3.4	3.0	4.2	2.7	4.0	3.4	(1.4)	[3.2]
100R (s)	Part_riv_lit, % Искл.	13	9.8	9.1 Cl, V	10	8.5	10 Cl, V	8.4 V	9.5	0.093
	Δ, % (Error, %)	2.7	4.2	1.6	4.1	2.2	3.8	2.1	(1.6)	[3.3]
100R (m)	Part_riv_lit, %	6.1	8.2	10	7.7	7.8	8.2	8.2	7.7	0.076
	Δ, % (Error, %)	0.23	1.0	1.8	1.1	1.2	1.6	1.6	(0.5)	[2.9]
100R (b)	Part_riv_lit, % Искл.	5.5	6.5 W, Li	17 Cl	6.2 W, Li	6.6 Li	8.1 W, Li, Cl	8.3 Li	6.9	0.068
	Δ, % (Error, %)	1.9	2.3	11	2.2	2.1	7.4	8.1	(2.3)	[3.7]
65 (s)	Part_riv_lit, % Искл.	8.6	5.8	7.6 Cl	6.4	5.5	6.6 Cl	5.4	6.4	0.063
	Δ, % (Error, %)	0.75	4.2	2.2	3.8	3.8	3.5	3.4	(1.3)	[3.2]
65	Part_riv_lit, %	20	15	18	16	15	16	15	16	0.153

(m)	Искл.			Cl			Cl			
	$\Delta, \%$	5.0	2.5	2.3	3.9	1.8	3.6	1.6	(1.3)	[3.2]
65	Part_riv_lit, %	44	37	51	40	38	41	40	39	0.386
(b)	$\Delta, \%$ (Error, %)	7.7	4.6	12	6.4	2.5	9.1	9.1	(3.1)	[4.2]
80L	Part_riv_lit, %	9.0	4.7	8.8	5.5	5.5	6.1	5.7	5.5	0.054
(s)	Искл.			Cl			Cl			
	$\Delta, \%$ (Error, %)	0.3	3.5	1.6	3.5	3.4	3.3	3.1	(1.5)	[3.2]
80L	Part_riv_lit, %	45	41	53	43	43	44	44	43	0.425
(m)	$\Delta, \%$ (Error, %)	1.3	3.1	9.2	3.3	1.6	6.5	6.7	(1.8)	[3.4]
80L	Part_riv_lit, %	63	62	81	62	63	64	64	63	0.617
(b)	$\Delta, \%$ (Error, %)	2.1	3.1	14	2.9	2.1	9.5	9.9	(2.5)	[3.8]
50L	Part_riv_lit, %	15	12	11	13	12	13	12	12	0.122
(s)	Искл.			Cl			Cl			
	$\Delta, \%$ (Error, %)	0.17	4.0	1.2	3.7	3.1	3.3	2.9	(1.5)	[3.3]
50L	Part_riv_lit, %	32	30	36	31	31	32	32	31	0.305
(m)	$\Delta, \%$ (Error, %)	2.1	3.1	2.5	3.0	2.7	3.4	3.6	(1.2)	[3.1]
50L(b)	Part_riv_lit, %	14	13	15	13	13	13	14	13	0.131
	$\Delta, \%$ (Error, %)	1.2	4.2	6.1	3.8	4.1	4.7	4.1	(1.6)	[3.3]
100	Part_riv_lit, %	13	7.5	7.9	8.7	7.7	8.5	7.4	8.0	0.078
(s)	Искл.			Cl			Cl			
	$\Delta, \%$ (Error, %)	2.7	4.9	2.0	5.0	4.9	4.4	4.4	(2.1)	[3.6]
100	Part_riv_lit, %	27	28	24	27	28	27	28	27	0.269
(m)	$\Delta, \%$ (Error, %)	0.23	3.2	2.9	2.8	3.1	3.1	3.1	(1.1)	[3.1]
100	Part_riv_lit, %	19	17	16	18	17	17	18	18	0.173
(b)	$\Delta, \%$ (Error, %)	2.2	1.5	8.4	2.0	1.5	5.0	4.1	(1.2)	[3.1]
100L	Part_riv_lit, %	18	12	14	14	14	14	14	13	0.132
(s)	$\Delta, \%$ (Error, %)	0.29	3.7	1.9	4.0	3.9	3.5	3.6	(1.7)	[3.3]
100L	Part_riv_lit, %	9.9	13	17	12	12	13	13	12	0.119
(m)	$\Delta, \%$ (Error, %)	0.48	2.0	4.2	2.0	2.0	3.3	2.8	(1.0)	[3.0]
100L	Part_riv_lit, %	0.34	3.3	10	2.7	3.3	5.1	5.0	3.9	0.038
(b)	Искл.	Mo	W, Ba, Li	Cl	Mo, W, Ba, Li	Mo, Ba, Li	Mo, W, Ba, Li, Cl	Mo, Ba, Li		
	$\Delta, \%$ (Error, %)	0.0	0.6	4.4	1.2	0.6	4.0	3.9	(1.5)	[3.2]
200	Part_riv_lit, %	9.5	7.9	5.5	8.5	8.3	7.5	7.4	8.2	0.081
(s)	Искл.		Ba, Rb		Ba, Rb	Ba, Rb	Ba, Rb	Ba, Rb		
	$\Delta, \%$ (Error, %)	2.9	2.8	3.0	2.9	2.5	3.1	2.4	(1.1)	[3.1]

Примечание. Формирование групп элементов описано в тексте и показано на рис. 4; N – количество элементов в группе; $\Delta, \%$ – среднеквадратичное отклонение расчетных и измеренных концентраций элементов в объекте смешения, показывает качество расчета *Part_riv_lit*, (чем меньше, тем лучше); Искл. – элемент исключен из расчета, поскольку не удовлетворяет граничным условиям: его концентрация достоверно выше (выделено жирным шрифтом) или ниже (выделено не жирным шрифтом), чем в источниках смешения; * – расчёт ошибок для результата усреднения проведён по формуле (2), из расчёта исключены группы, выделенные серой заливкой. ** - расчёт водных вкладов сточных вод в литорали озера проведён по формуле (10), а ошибок определения по формуле (4).

Note. The formation of groups of elements is described in the text and shown in Fig. 4; N is the number of elements in the group; $\Delta, \%$ is the standard deviation of the calculated and measured concentrations of elements in the mixing object, shows the quality of the calculation *Part_riv_lit*, (the smaller the better); Искл. – the element is excluded from the calculation because it does not meet the boundary conditions: its concentration is significantly higher (highlighted in bold) or lower (highlighted in non-bold) than in the sources of mixing; * – the calculation of errors for the averaging result is carried out according to formula (2), the groups highlighted in gray are excluded from the calculation. ** - calculation of water contributions of wastewater in the lake littoral was carried out according to formula (10), and errors of determination according to formulas (4).

Таблица 3 демонстрирует хорошую устойчивость расчётов водных вкладов, полученных во всех группах, за исключением группы {3}, которая в большинстве случаев даёт результаты, заметно отличающиеся от других групп. Результаты этой спорной группы,

состоящей только из низкоконтрастных элементов, мы исключили из последующего рассмотрения. Довольно часто результаты, полученные в группе двух контрастных элементов {1} (As, Mo), из которых As определяется условно надёжно, также имеют выбросы (в

основном, в сторону увеличения водных вкладов). Эту группу элементов в некоторых случаях мы также исключили из

рассмотрения (выделено серой заливкой в табл. 3). Полученные результаты более наглядно представлены на рис. 5.

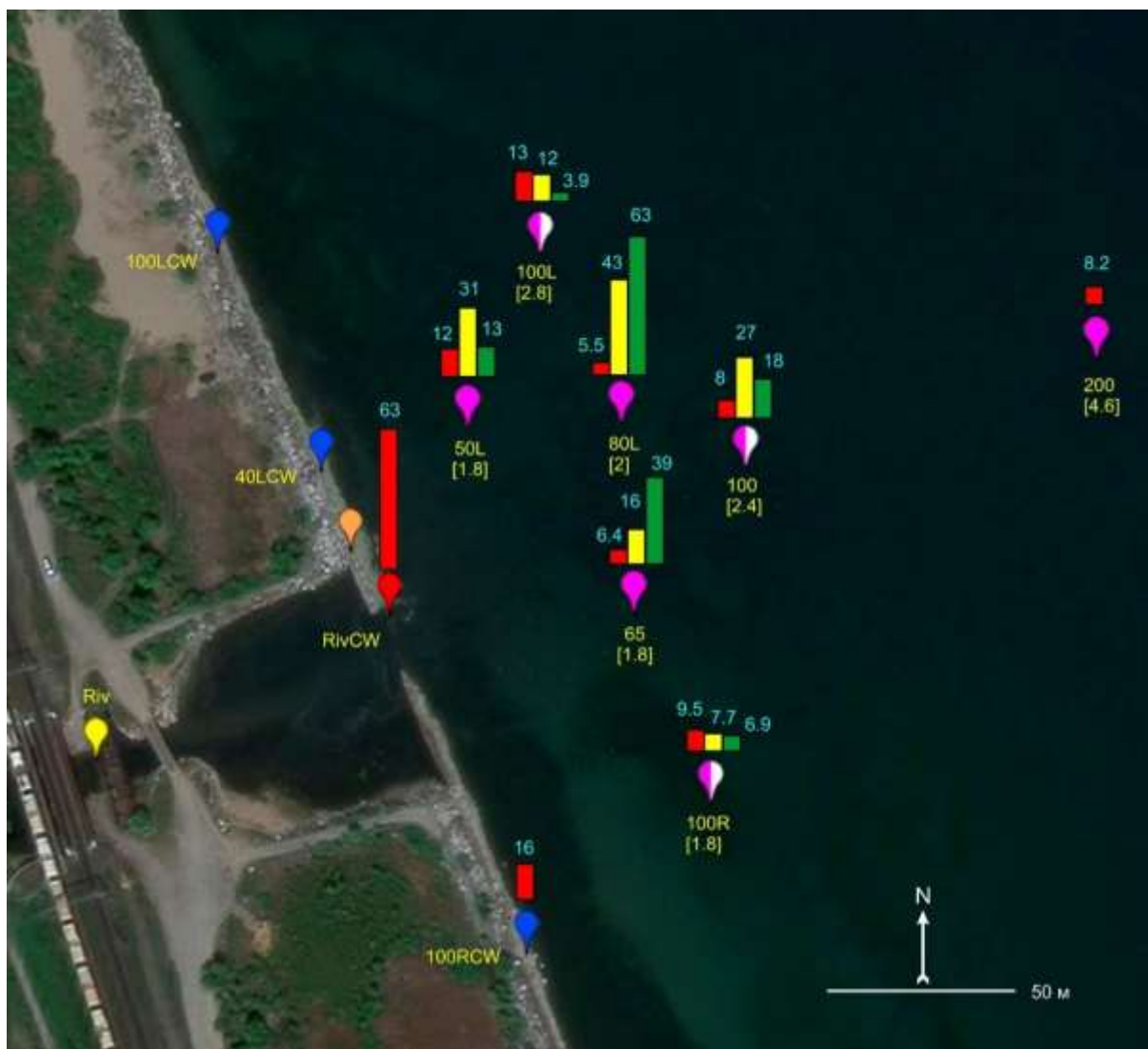


Рис. 5. Распределение водных вкладов загрязнённых речных вод в литорали Байкала в зоне влияния р. Похабихи.

Примечание Космоснимок взят из открытых источников (SAS Planet, <https://sasplanet.ru/>). Красными барами показаны водные вклады речных вод (значения в % подписаны голубым шрифтом) в поверхностные воды литорали, жёлтыми – в срединные, зелёными – в придонные. В квадратных скобках указаны глубины. Остальные обозначения такие же, как на рис. 1.

Fig. 5. Distribution of water contributions of polluted riverine waters in Lake Baikal littoral in the zone of influence of the Pokhabikha River.

Note The satellite image is taken from open sources (SAS Planet, <https://sasplanet.ru/>). The red bars show the water contributions of riverine waters (values in % are signed in blue) to the surface waters of the littoral, yellow – to the middle waters, green – to the bottom waters. The depths are shown in square brackets. The other symbols are the same as in Fig. 1.

Из полученных данных (табл. 3, рис. 5) следует, что максимальный вклад загрязнённых речных вод 63 % наблюдается в

прибрежной воде напротив устья (ст. RivCW), что ожидаемо. Однако такой же большой вклад речных вод обнаружен в

придонной воде (глубина 2 м) на ст. 80L (в 80 м под углом влево от устья) с последующим уменьшением вверх по глубинному профилю – 43 % на глубине 1 м и 5.5 % в поверхностной воде. Такой же инверсный профиль распределения речных вод, но с меньшими вкладами на глубинах, наблюдается на соседней станции ст. 65 (в 65 метрах напротив устья) – 39 % в придонной воде (глубина 1.8 м), 16 % в срединной воде (глубина 0.9 м) и 6.4 % в поверхностной воде. На двух других ближайших соседних станциях ст. 50L (в 50 м под углом влево от устья, глубина 1.8 м) и ст. 100 (в 100 м напротив устья, глубина 2.4 м) водный вклад речных вод в срединных водах (m) больше чем в придонных (b) и поверхностных (s): ст. 50L – 12 % (s) / 31 % (m) / 13 % (b); ст. 100L – 8 % (s) / 27 % (m) / 18 % (b). На краевых станциях сектора 100 м от устья – ст. 100L (в 100 м под углом влево, глубина 2.8 м) и 100R (в 100 м под углом вправо, глубина 1.8 м) профиль распределения вкладов речных вод прямой и почти однородный: ст. 100L – 13 % (s) / 12 % (m) / 3.9 % (b); ст. 100R – 9.5 % (s) / 7.7 % (m) / 6.9 % (b). В поверхностной воде ст. 200 (в 200 м напротив устья) вклад речных вод – 8.2 %, в прибрежной воде ст. 100RCW (в 100 м вправо от устья) – 16 %.

Такая сложная картина распределения вод р. Похабихи в литорали указывает на вероятную субаквальную разгрузку речного стока в зоне ст. 80L и ст. 65 с последующим внедрением потоков в срединную толщу на соседних станциях ст. 50L и ст. 100. Можно также предполагать, что происходит затопление более холодных (8.6 °C) и минерализованных (190 мг/дм³) поверхностных речных вод в

более тёплых (11–12 °C) и пресных (~ 100 мг/дм³) литоральных водах, однако вероятность и степень воздействия таких процессов требует проведения гидрологических расчётов. По факту, мы наблюдаем сложную картину смешения речных и байкальских вод в литорали в зоне влияния р. Похабихи с двумя основными выходами речных вод – поверхностным и субаквальным. Наличие искусственного пруда в приустьевой зоне (рис. 1) вполне может способствовать просачиванию речных вод в проницаемые песчаные грунты с последующей субаквальной разгрузкой.

Таким образом, на момент исследования, граница водных вкладов загрязнённых вод р. Похабихи в литорали Байкала прослеживается на всех глубинах в радиусе ~ 100 м от устья, а фронтально по поверхности достигает 200 м; в прибрежной зоне, вероятно, распространяется далее 100 м.

Водные вклады сточных вод в литорали (*Part_ww_lit*) рассчитываются на основе полученных вкладов загрязнённых речных вод в литорали и вкладов сточных вод в р. Похабихи, полученных на предыдущем этапе вычислений (*Part_ww_riv* = 0.0098, табл. 2) согласно (10):

$$Part_ww_lit = Part_riv_lit \times Part_ww_riv \quad (10).$$

Средние величины водных вкладов сточных вод в литорали, рассчитанные по (10), представлены в табл. 3 и на рис. 6. Очевидно, что они в 100 раз меньше, чем водные вклады загрязнённых речных вод в литорали.

Fig. 6. Heat map of geochemical contributions (ГХВ, in%) of Slyudyanka City wastewater into the Pokhabikha River and into the littoral waters of Lake Baikal in the zone of its influence in comparison with the water contributions of wastewater (*Part_ww*) and polluted riverine waters (*Part_riv*).

Note. СГХВ – summary geochemical contributions for all elements (rare earth elements are accounted for by the total amount of REE), СГХВ Пр. № 83 - summary geochemical contributions by elements (green fill), according to the Order No 83 of Ministry of Natural Resources (Order..., 2020). OM is the total mineralization. ГХВ are ranked in descending order for the station with the lowest wastewater contribution (art. 100L(b)).

Водные вклады чистых речных вод в литорали (*Part_riv^lit*) – это разница между водными вкладыми загрязнённых речных и сточных вод в литорали:

$$Part_{riv}^{lit} = Part_{riv_lit} - Part_{ww_lit} \quad (11).$$

В первом приближении будем считать, что водные вклады чистых речных вод в устье такие же, как на участке реки выше сброса сточных вод, т.е.:

$$Part_{riv}^{lit} = Part_{riv}(up) \quad (12).$$

Эти вклады будут отличаться, если есть существенное влияние притоков реки (боковые русла, протоки) на участке между трубой сброса сточных вод и устьем, где мы и определяем итоговый состав смешения речных и сточных вод (ст. Riv, рис. 1). На космоснимке (см. рис. 1) такие притоки видны, однако на местности визуально эти водотоки с сильно замедленным течением (стоячая вода, заболоченность) и не должны существенно влиять на величину водного стока основного русла реки. Однако они могут оказывать заметное влияние на элементный состав (как это будет показано ниже) устьевых вод по некоторым элементам (Fe, Mn и др.) даже при небольшом дренаже, ввиду специфики их накопления в стоячих водотоках (Чебыкин и др., 2012). Но, поскольку, такие элементы заведомо исключаются из расчёта водных вкладов, то оценка последних, с использованием описанного выше подхода (5)-(8), вполне достоверна.

Водные вклады байкальских вод в литорали вычисляются простым пересчётом:

$$Part_{bw_lit} = 1 - Part_{riv_lit} \quad (13).$$

Водные вклады чистых речных и байкальских вод представлены на рис. 7 и 8, они необходимы для вычисления их геохимических вкладов (ГХВ) по отдельным компонентам в объектах смешения.

2.3. Геохимические вклады

Очевидно, что геохимические вклады (ГХВ) по отдельным компонентам от источников смешения (сточные, речные и байкальские воды) могут быть как больше, так и меньше, чем их водные вклады в объекты смешения (*Part_source_mixture*). Это зависит от степени загрязнённости источников смешения относительно объектов смешения. ГХВ представляет собой долю компонента (химического элемента, вещества, суммы веществ) источника смешения от общего содержания данного компонента в объекте смешения и рассчитывается с учетом возможного неконсервативного поведения компонентов на физико-химических и биогеохимических барьерах (Чебыкин и др., 2024а, Чебыкин и др., 2025 (в печати)), т.е. предполагается, что сначала все компоненты смешиваются чисто механически, а возможное неконсервативное поведение элементов, меняющее их концентрацию в объектах смешения (как в сторону уменьшения, так и увеличения), происходит уже позже. Т.е. используются расчётные, а не измеренные концентрации компонентов в объектах смешения:

$$ГХВ = \frac{Part_{source_mixture} \times C_{i_source}}{C_{i_calc_mixture}} \quad (14),$$

где C_{i_source} – концентрация компонента i в источнике смешения, $C_{i_calc_mixture}$ – концентрация компонента i в объекте смешения, рассчитанная по принципу (5), т.е. в универсальной форме для любых типов смешения. При этом используются водные вклады основных источников, полученные согласно описанным выше алгоритмам.

Сектор	Прибрежная вода		50 L м				65 м			80 L м				100 L м			100 м			100 R м			200 м
Part bw, %	37	84	88	69	87	94	84	61	95	57	37	87	88	96	92	73	82	91	92	93	92		
Ошибка Part bw, %	2.5	0.3	0.2	0.6	0.2	0.1	0.2	2.0	0.1	1.4	4.2	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	0.3	0.2	0.0	0.2	0.1		

Элемент \ Станция	RivCW	100RCW	50L(s)	50L(m)	50L(b)	65(s)	65(m)	65(b)	80L(s)	80L(m)	80L(b)	100L(s)	100L(m)	100L(b)	100(s)	100(m)	100(b)	100R(s)	100R(m)	100R(b)	200(s)
Mn	0.32	2.8	3.7	1.2	3.5	7.5	2.9	0.84	8.6	0.72	0.32	3.4	3.8	12	6.0	1.4	2.5	5.0	6.1	6.9	5.8
Si	3.4	24	30	12	28	47	24	8.5	51	7.3	3.4	28	30	60	41	14	22	36	42	45	40
Fe	4.1	28	34	14	32	52	28	10	56	8.8	4.2	32	35	64	46	16	26	41	47	50	45
Ga	4.5	30	36	15	34	54	30	11	58	9.6	4.5	34	37	66	48	18	27	43	49	52	47
Ce	5.3	34	41	18	39	59	34	13	63	11	5.4	38	41	70	53	20	31	48	54	57	52
HREE	7.8	44	51	24	49	68	44	18	72	16	7.9	48	51	78	63	28	41	58	64	66	62
LREE	9.3	48	55	28	53	72	49	21	75	19	9.4	53	56	81	67	32	45	63	68	70	66
REE	9.5	49	56	29	54	72	49	22	76	19	9.6	54	57	82	67	32	46	63	68	71	67
MREE	10.0	50	57	30	55	74	51	23	77	20	10	55	58	82	69	33	47	64	69	72	68
Y	10	50	58	30	56	74	51	23	77	20	10	55	58	83	69	34	47	65	70	72	68
La	11	54	61	33	59	76	54	25	79	22	12	59	62	84	72	37	51	68	72	75	71
P	12	56	63	35	61	78	57	27	81	24	12	61	64	86	74	39	53	70	74	76	73
Ge	15	62	68	40	66	82	62	32	84	28	15	66	69	88	78	44	59	74	78	80	77
Ti	16	64	70	42	68	83	64	34	85	30	16	68	71	89	79	47	61	76	80	82	79
Co	16	64	71	43	69	83	65	34	85	31	17	68	71	89	80	47	61	76	80	82	79
Cr	17	65	72	44	70	84	66	35	86	32	17	69	72	90	80	48	62	77	81	83	80
Al	17	66	72	45	70	84	66	36	86	32	18	70	72	90	81	49	63	78	81	83	80
Ba	17	66	72	45	70	84	66	36	86	32	18	70	72	90	81	49	63	78	81	83	80
Zr	18	66	72	45	71	84	67	36	86	33	18	70	73	90	81	49	63	78	81	83	80
Cs	19	68	74	47	72	86	69	38	87	35	19	72	75	91	82	52	65	79	83	84	82
Mg	21	71	77	51	75	87	71	42	89	38	21	75	77	92	84	55	68	81	85	86	84
Rb	23	73	78	53	77	88	73	44	90	40	23	76	79	93	85	57	70	83	86	87	85
OM	23	74	79	54	77	89	74	45	90	41	24	77	79	93	86	58	71	83	86	88	86
Ca	24	74	79	54	78	89	74	45	90	41	24	77	79	93	86	58	71	84	86	88	86
Cl	24	74	80	55	78	89	75	46	90	42	25	78	80	93	86	59	72	84	87	88	86
S	27	77	82	59	81	90	78	50	92	46	28	81	82	94	88	63	75	86	89	90	88
V	28	78	83	60	81	91	79	51	92	47	29	81	83	94	89	64	76	87	89	90	88
Cu	30	80	84	62	83	92	80	53	93	49	31	83	84	95	90	66	78	88	90	91	89
Sb	31	80	84	63	83	92	80	54	93	50	31	83	85	95	90	67	78	88	90	91	90
Sr	34	82	86	66	85	93	83	58	94	54	34	85	87	96	91	70	81	89	91	92	91
B	35	83	87	67	86	93	83	59	94	55	35	85	87	96	91	71	81	90	92	93	91
K	43	87	90	74	89	95	87	66	96	63	43	89	90	97	94	77	86	92	94	95	94
Ni	48	89	92	78	91	96	89	71	96	67	48	91	92	97	95	81	88	94	95	95	95
U	55	92	94	83	93	97	92	77	97	74	56	93	94	98	96	85	91	95	96	97	96
Li	56	92	94	83	94	97	92	77	97	74	57	93	94	98	96	85	91	96	96	97	96
Na	56	92	94	83	94	97	92	77	97	74	57	93	94	98	96	85	91	96	96	97	96
Br	57	92	94	83	94	97	92	78	97	75	57	94	94	98	96	86	91	96	96	97	96
I	64	94	96	87	95	98	94	83	98	80	65	95	96	99	97	89	94	97	97	98	97
W	68	95	96	89	96	98	95	85	98	83	69	96	96	99	98	91	95	97	98	98	98
Mo	74	96	97	92	97	99	96	88	99	86	74	97	97	99	98	93	96	98	98	99	98
As	79	97	98	94	98	99	97	91	99	90	79	98	98	99	99	95	97	98	99	99	99

Ошибка ГХВ bw, %	4-24	2-20	2-20	2-21	2-20	1-21	2-20	4-22	1-21	3-22	5-24	2-20	2-20	1-21	1-20	2-21	2-20	1-20	1-20	1-21	1-20
СГХВ bw, %	1058	2460	2615	1922	2573	2930	2473	1679	2986	1570	1068	2564	2628	3092	2839	2037	2390	2757	2851	2900	2825
Ошибка СГХВ bw, %	1.1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	1.4	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
СГХВ bw/riv^	0.4	2.1	2.6	1.1	2.5	4.5	2.2	0.9	5.0	0.8	0.4	2.5	2.7	6.5	3.8	1.3	1.9	3.3	3.9	4.2	3.7
СГХВ bw/ww	5	27	35	14	33	64	28	10	73	9	5	32	36	98	52	16	25	45	54	60	51

the total mineralization. ГХВ are ranked in descending order of geochemical differences of polluted riverine waters relative to the background station (Riv*, see Fig. 2). СГХВ_bw/riv^ is the ratio of СГХВ of Baikalian and pure riverine estuarine waters; СГХВ_bw/ww is the ratio of СГХВ of Baikalian and wastewater.

Рис. 8. Тепловая карта геохимических вкладов (ГХВ, в %) байкальских вод в литоральные воды Байкала в зоне влияния р. Похабиха в сопоставлении с водными вкладами байкальских вод (Part_bw).

Примечание. СГХВ – суммарные геохимические вклады по всем элементам (редкоземельные элементы учтены общей суммой REE). ОМ – общая минерализация. ГХВ ранжированы по убыванию геохимических различий загрязнённых речных вод относительно фоновой станции (Riv*, см. рис. 2). СГХВ_bw/riv^ – отношение СГХВ байкальских и чистых речных устьевых вод; СГХВ_bw/ww – отношение СГХВ байкальских и сточных вод.

ГХВ	
> 50 %	1-2 %
30-50 %	0.5-1 %
20-30 %	0.3-0.5 %
10-20 %	0.2-0.3 %
5-10 %	0.1-0.2 %
3-5 %	0.01-0.1 %
2-3 %	< 0.01 %

Fig. 8. Heat map of geochemical contributions (ГХВ, in %) of Baikalian waters to the littoral waters of Lake Baikal in the zone of influence of the Pokhabikha River in comparison with the water contributions of Baikalian waters (Part_bw).

Note. СГХВ – summary geochemical contributions for all elements (rare earth elements are accounted for by the total amount of REE). OM is

Рассчитанные геохимические вклады сточных, чистых речных и байкальских вод в объектах смешения представлены на рис. 6-8 в виде тепловых карт.

2.3.1. Геохимические вклады сточных вод

Из полученных данных следует, что максимальное влияние сточных вод (рис. 6) на р. Похабиху проявляется по Р (73 %), рангом ниже по Cl (41 %), затем по Na (28 %), затем по I (20 %), K (16 %), Cs (13 %), Ni (11 %), Zr (11 %) и Ga (10 %). Вклады по остальным элементам составляют менее 10 %. Тот же самый набор основных загрязняющих элементов сточных вод, но с меньшими вкладами, характерен и для станций с большой долей загрязнённых речных вод в литорали ($Part_{riv_lit} > 27\%$): ст. RivCW, ст. 50L(m), ст. 65(b), ст. 80L(b), ст. 80L(m), ст. 100(m).

Для остальных станций литорали, где значительно преобладают байкальские воды ($Part_{bw_lit} > 80\%$, рис. 8) – картина распределения ГХВ сточных вод более сложная (рис. 6). Здесь состав основных загрязняющих компонентов почти тот же, за исключением того, что относительное влияние по Ni и I заметно уменьшается, а по Mn, Fe, Si, Rb Ge и В, наоборот, возрастает. Обращает внимание то, что ГХВ по Mn довольно высокий и почти постоянный на всех станциях (3,9-4,4 %). Слабая вариабельность ГХВ (максимум/минимум не более 2 раз) также характерна для Si, Fe, Ga, редкоземельных элементов, Y и P, наиболее высокая вариабельность (максимум/минимум = 4.0-4.4) наблюдается для I, W, Mo и As.

Наибольший суммарный геохимический вклад сточных вод ($CGXB_{ww}$) по всем информативным элементам (редкоземельные элементы учтены общей суммой REE, общая минерализация (ОМ) исключена из суммирования) получен для р. Похабихи (311 %). По мере разбавления загрязнённых речных вод в литорали байкальскими водами $CGXB_{ww_lit}$ падает. Он в значительной мере обусловлен водными вкладами сточных вод и имеет высокие значения для станций с относительно высокими значениями $Part_{ww_lit}$ ($> 0.27\%$): ст. RivCW – 218 %, ст. 50L(m) – 140 %, ст. 65(b) – 162 %, ст. 80L(b) – 217 %, ст. 80L(m)

– 172 %, ст. 100(m) – 129 %. Наиболее низкие $CGXB_{ww_lit}$ ($< 50\%$) характерны для станций с низкими водными вкладами сточных вод ($Part_{ww_lit} < 0.07\%$): 65(s), 80L(s), 100L(b) и 100R(b).

Суммарные геохимические вклады сточных вод по элементам, нормируемым Приказом № 83 Минприроды (Приказ..., 2020) (на рис. 6 они выделены зелёной заливкой) – ($CGXB_{ww_Pr}$ № 83), немного меньше (на 13-27%) соответствующих $CGXB_{ww}$ по всем информативным элементам. Для р. Похабихи $CGXB_{ww_Pr}$ № 83 составляет 275 %.

2.3.2. Геохимические вклады чистых речных вод

Геохимические вклады чистых речных вод в устье р. Похабихи (см. рис. 7) получены двумя способами. Вначале были вычислены концентрации элементов в чистых речных водах в устье ($C_{i_riv}^{\wedge}$) исходя из известного водного вклада сточных вод ($Part_{ww_riv} = 0.0098$, см. табл. 2) и измеренных концентраций элементов в сточных (C_{i_ww}) и загрязнённых речных (C_{i_riv}) водах:

$$C_{i_riv}^{\wedge} = C_{i_riv} - C_{i_ww} \times Part_{ww_riv} \quad (15)$$

Эти полученные концентрации приняты как C_{i_source} в формуле (14).

Затем, в первом способе, концентрации элементов в объекте смешения (в р. Похабихе в устье, $C_{i_calc_mixture} = C_{i_calc_riv}$) рассчитаны исходя из консервативного смешения сточных и условно чистых речных вод (выше сброса стоков) согласно (5). ГХВ по (14) принимают вид:

$$GXB_{riv}^{\wedge_riv'} = Part_{riv}^{\wedge_riv} \times C_{i_riv}^{\wedge} / C_{i_calc_riv} \quad (16),$$

где $Part_{riv}^{\wedge_riv}$ – водный вклад чистых речных вод в устье, вычисленный по (9), принимая допущение (12), он оценивается величиной 99.02% (см. табл. 2). На рис. 7, $GXB_{riv}^{\wedge_riv'}$, рассчитанные по этому способу, находятся в столбце Riv'.

Во втором способе использованы реально измеренные концентрации элементов в устье

р. Похабихи (C_{i_riv}). ГХВ по (14) принимают вид:

$$\frac{ГХВ_{riv}^{riv}}{C_{i_riv}} = \frac{Part_{riv}^{riv}}{C_{i_riv}} \times (17)$$

На рис. 7, $ГХВ_{riv}^{riv}$, рассчитанные по этому способу, находятся в столбце Riv.

Эти два способа расчёта отличаются тем, что второй учитывает влияние других источников поступления элементов (притоки и т.п.) в русло реки на участке ниже сброса сточных вод, и, если таковые имеются и оказывают влияние на геохимический состав устьевых вод, то мы это заметим, сравнивая $ГХВ_{riv}^{riv}$ по (16) и $ГХВ_{riv}^{riv}$ по (17). Более простой способ это заметить – сравнить концентрации $C_{i_calc_riv}$ и C_{i_riv} , однако сопоставление геохимических вкладов визуальнее более наглядно (рис. 7). Видно, что по некоторым элементам $ГХВ_{riv}^{riv}$ больше 100 %, что свидетельствует о влиянии дополнительных источников поступления на участке реки ниже сброса сточных вод. Этими источниками, как указывалось выше, могут быть заболоченные протоки, в которых происходит мобилизация элементов, чувствительных к изменению окислительно-восстановительных условий (Fe, Mn), и некоторых других элементов, характерных для данных экотопов. Мы видим, что максимальный $ГХВ_{riv}^{riv}$ по Fe – 369 %, далее по Sb (332 %), Mn (175 %), редкоземельным элементам как по отдельности (Ce – 154 %, La, 132 %) так и по группам (LREE – 137 %, MREE – 106 %, REE – 111 %), по В (129 %), Со (124 %), Zr (113 %), Al (109 %) и Ti (109 %). Небольшие превышения 100 % $ГХВ_{riv}^{riv}$ по Ва (102 %) и Mg (101 %) в рамках ошибок определения недостоверны. Впрочем, это справедливо также для Ti и MREE. Для оценки степени дополнительного поступления элементов на участке ниже сброса стоков более правильно брать не

абсолютные величины $ГХВ_{riv}^{riv}$, а их отношения к $ГХВ_{riv}^{riv}$. Ряд по уменьшению этого отношения следующий: Fe (3.9), Sb (3.4), Mn (1.9), Ce (1.6), В (1.4), LREE (1.4), La (1.4), Со (1.3), Zr (1.3), REE (1.2), Ti (1.1), Al (1.1). Для остальных элементов это отношение близко к единице, или отличается от него не более чем на 20 % с перекрытием доверительных интервалов (т.е. различие между $ГХВ_{riv}^{riv}$ и $ГХВ_{riv}^{riv}$ не достоверно). Довольно странный результат получен для группы тяжёлых редких земель (HREE) – там отношение $ГХВ_{riv}^{riv} / ГХВ_{riv}^{riv} = 0.7$, т.е. эти элементы, наоборот, теряются на 30 % в условно чистых речных водах при прохождении участка от трубы сброса сточных вод до устья. Возможно, это связано с переоценкой точности определения этих ультраследовых элементов.

Очевидно, что ГХВ чистых речных вод в устье по большинству элементов будут значительно больше, чем ГВХ сточных вод, в виду большой разницы водных вкладов речных ($Part_{riv}^{riv} = 99.02\%$) и сточных ($Part_{ww_riv} = 0.98\%$) вод. Для большинства элементов $ГХВ_{riv}^{riv}$ составляют более 90 %. Исключение составляют Р (27 %), Cl (58 %), Na (71 %), I (79 %), К (83 %), Cs (86 %), Ni (88 %), Zr (89 %) и Ga (89 %), которые в значительных количествах поступают со сточными водами.

Тепловые карты геохимических вкладов чистых речных ($ГХВ_{riv}^{lit}$) и байкальских ($ГХВ_{bw_lit}$) вод в литорали, рассчитанные по (14), представлены на рис. 7 и 8. Сравнивая их друг с другом, а также с ГХВ сточных вод (см. рис. 6), видно что основная «конкуренция» по большинству элементов в литорали определяется двумя главными источниками – речными и байкальскими водами с вклиниваем в эту «борьбу» некоторых элементов сточных вод, в основном Р и Cl, и в меньшей степени Na, Cs, Ga, К, Zr, I, Rb, Mn и Fe (рис. 9).

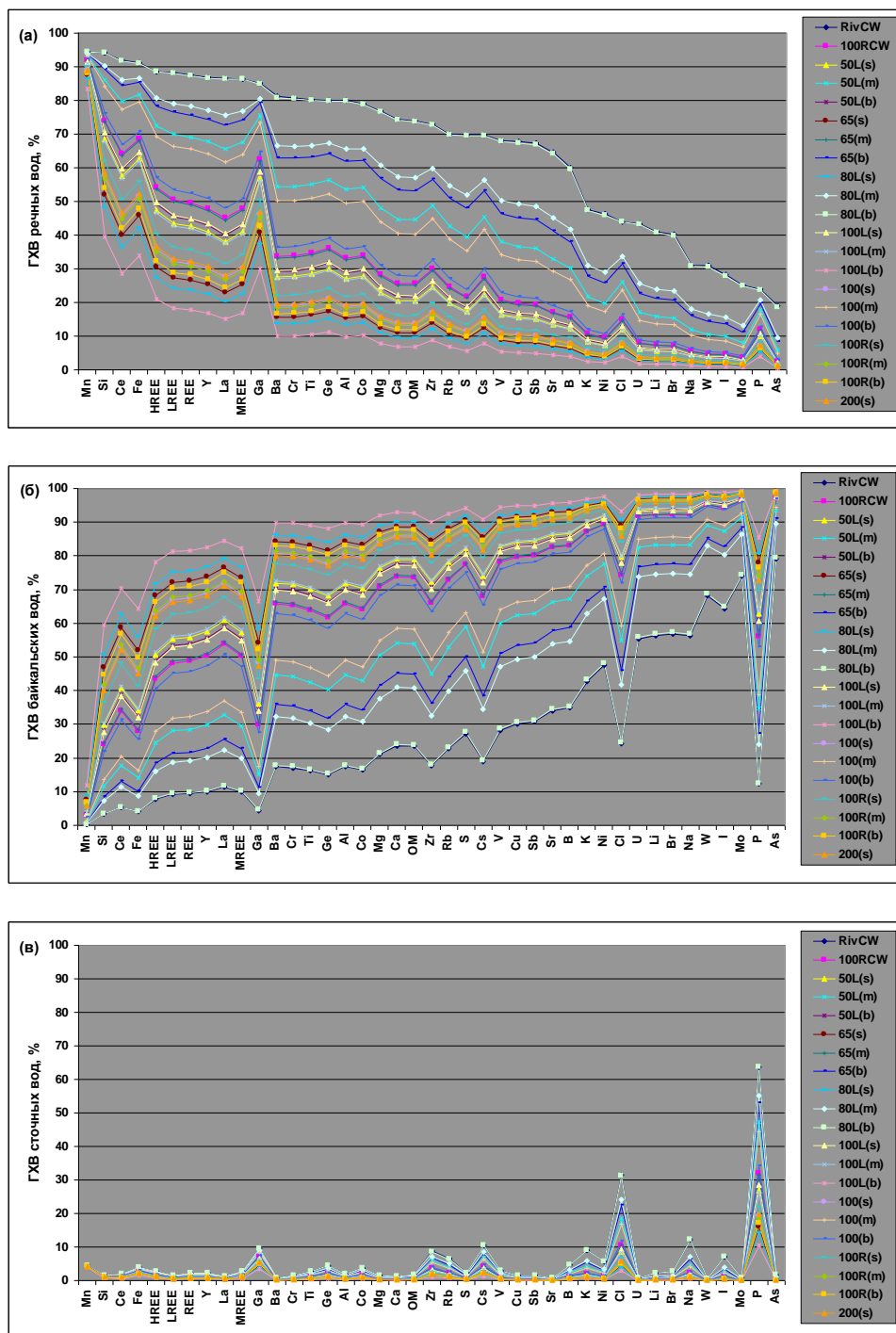


Рис. 9. Сравнение геохимических вкладов (ГХВ) чистых речных устьевых (а) байкальских (б) и сточных (в) вод в литоральные воды Байкала в зоне влияния р. Похабихи.

Примечание. Элементы ранжированы по убыванию ГХВ чистых устьевых речных вод для станции RivCW.

Fig. 9. Comparison of geochemical contributions (ГХВ) of pure riverine estuarine waters (a) Baikalian waters (b) and wastewater (c) to the littoral waters of Lake Baikal in the zone of influence of the Pokhabikha River.

Note. The elements are ranked in descending order by the ГХВ of clean estuarine riverine waters for the RivCW station.

Из полученных данных следует, что максимальное влияние чистых речных вод на литораль Байкала проявляется по Mn, ГХВ которого составляют 83-94 %, в зависимости от местоположения станций отбора проб (рис. 6, 9). Далее следуют Si (39-94 %), Fe (34-91 %), Ga (30-85 %), редкоземельные элементы (Ce, La, HREE, LREE, MREE, REE – 15-92 %), Y (17-87 %), Ge (11-80 %), Ti, Cr, Ba и Al (10-80 %). По остальным элементам максимальные ГХВ составляют менее 80 %, а минимальные ГХВ – менее 10 %. Пограничным элементом является Co, ГХВ которого находятся в интервале 10-79 % (см. рис. 9).

Суммарные геохимические вклады чистых речных вод ($CGXB_{riv}^{\wedge}$) на всех станциях на порядок больше, чем соответствующие СГХВ сточных вод (строка $CGXB_{riv}^{\wedge}/ww$, см. рис. 8). Они имеют те же закономерности распределения в литорали, что и СГХВ сточных вод (см. п. 2.3.1). Максимальный $CGXB_{riv}^{\wedge}$, очевидно, в р. Похабихе в устье (столбец Riv на рис. 8), он составляет 3158 %.

2.3.3. Геохимические вклады байкальских вод

В литорали Байкала в зоне влияния р. Похабихи, за исключением ст. RivCW и 80L(b), доминируют воды самого озера. На их долю ($Part_{bw}$) приходится более 57 % водной массы (см. рис. 8).

Основное влияние байкальских вод в литорали Байкала в зоне влияния р. Похабихи проявляется по As, Mo, W, I, Br, Na, Li и U, их ГХВ составляют 55-99 %. Довольно высокие ГХВ (12-97 %) характерны и для большинства других элементов Ni, K, B, Sr, Sb, Cu, V, S, Cl, Ca, OM, Rb, Mg, Cs, Zr, Ba, Al, Cr, Co, Ti, Ge и P. ГХВ редкоземельных элементов, Ga, Fe, Si и Mn варьируют в интервале 0.3-82 %.

Суммарные геохимические вклады байкальских вод в литорали ($CGXB_{bw}$)

варьируют в интервале 1058-3092 % (см. рис. 8). В большинстве случаев (для станций с водным вкладом байкальских вод $Part_{bw} \geq 69$ %), они превышают СГХВ чистых речных вод ($CGXB_{bw}/riv^{\wedge}$, рис. 8) в 1.3-8.3 раза. На станциях RivCW и ст. 80L(b), где доминируют речные воды ($Part_{riv}^{\wedge}_{lit} = 62-63$ %, рис. 7) $CGXB_{bw}$, наоборот, в два раза меньше $CGXB_{riv}^{\wedge}$. На ст. 50L(m) и ст. 65(b) с соотношением водных вкладов $Part_{riv}^{\wedge} / Part_{bw} = 39/61$ и $43/57$, СГХВ речных и байкальских вод почти одинаковые (~ 1600-1700 %).

СГХВ байкальских вод больше СГХВ сточных вод на всех станциях литорали в 5-98 раз (строка $CGXB_{bw}/ww$, рис. 8).

2.4. Сравнение с результатами 2022 г.

2.4.1. Геохимические составы речных и сточных вод

На рис. 10 представлено сравнение геохимических составов сточных вод КОС г. Слюдянки и условно чистых вод р. Похабихи (выше сброса), полученных в данной работе (01 августа 2024 г.) с результатами 2022 г. (06 сентября). Сезонная разница в межгодовой динамике составляет один месяц. Видно, что в межгодовой динамике геохимические составы обоих водных объектов меняются слабо – по большинству элементов разница в содержаниях составляет менее 50 %.

Состав сточных вод наиболее стабильный. Более существенные различия здесь наблюдаются только по небольшому числу трудно-растворимых следовых элементов (в размах): Ga (1.7), концентрация которого больше, и Cr (2.4), Ti (1.9) и Zr (1.7) концентрации которых меньше, чем в 2022 г. Колебания концентраций этих элементов, скорее всего, обусловлено вариациями тонкодисперсной взвеси.

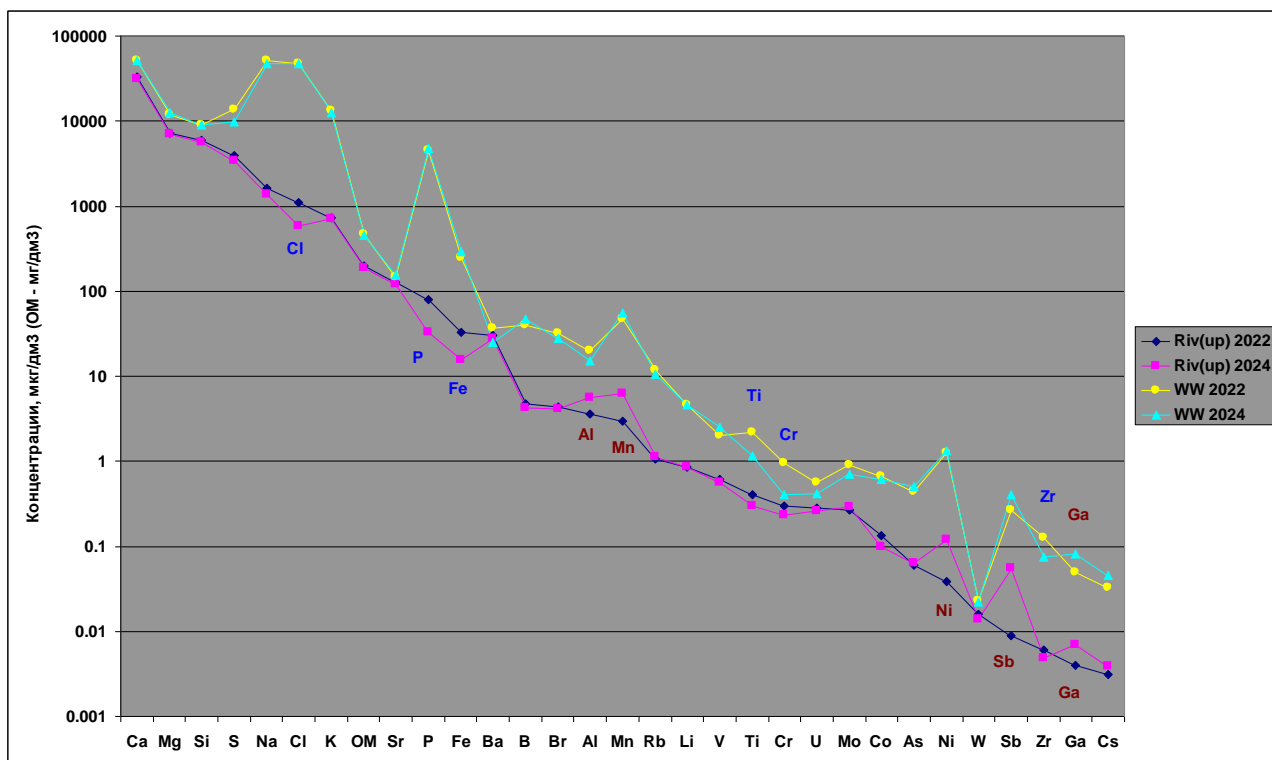


Рис. 10. Сравнение геохимических составов сточных вод КОС г. Слюдянка (WW) и условно чистых вод р. Похабиха (выше сброса сточных вод, ст. (Riv(up))) в 2022 и 2024 гг.

Примечание. Элементы, концентрации которых различаются в 1.5 и более раз отмечены дополнительными символами: синие – в 2024 г. ниже, чем в 2022 г., коричневые – в 2024 г. выше, чем в 2022 г.

Fig. 10. Comparison of geochemical compositions of wastewater from Slyudyanka City WTF (WW) and conditionally pure waters of the Pokhabikha River (upstream of wastewater discharge – st. Riv(up)) in 2022 and 2024.

Note. Elements whose concentrations differ by 1.5 or more times are marked with additional symbols: blue – lower in 2024 than in 2022, brown – higher in 2024 than in 2022.

Существенные различия речных вод по Sb (6.1), Ni (3.2), Mn (2.1), Ga (1.8) и Al (1.6), концентрации которых больше, и P (2.4), Fe (2.1) и Cl (1.9), концентрации которых меньше, чем в 2022 г., вероятно, связаны с изменениями водности реки и влиянием других факторов (взвешенное вещество, физико-химические и биогеохимическими процессы).

2.4. 2. Водные вклады источников

Водные вклады загрязнённых речных вод (основная доля которых приходится на условно чистые устьевые речные воды) в поверхностные воды литорали Байкала в зоне ~ 50 м от уреза в 2024 г. (табл. 3, рис. 5, ст. 50L(s), ст. 65(s), ст. 100R(s)) были 6.4–12 %,

что в 2.2–5.6 раз больше, по сравнению с 2022 г. – 2.2–2.9 % (Чебыкин и др., 2024а), что свидетельствует о более высокой водности р. Похабихи в 2024 г и/или более замедленном водообмене в литорали. Мы полагаем, что условия смешения вод в литорали в периоды опробования в 2022 и 2024 гг. были близкими, поскольку, в обоих случаях был почти штиль. Однако температура поверхностных вод в литорали в 2022 г. была 6.7 °С, а в 2024 г. почти в два раза выше (11–12 °С), в то время как температура речных вод в устье в 2022 г. (7.6 °С) и в 2024 г. (8.6 °С) была почти одинаковой. Следует заметить, что в 2024 г. температура речных вод была ниже литоральных, а в 2020 г, наоборот, выше.

Необходимо привлекать гидрологические расчёты, чтобы оценить, как температурный режим будет сказываться на интенсивности смешения вод. В первом приближении будем считать, что он не оказывает существенного влияния. Если мы принимаем, что увеличение водных вкладов речных вод литорали в 2024 г. обусловлены большей водностью р. Похабихи, то логично предположить, что более низкие водные вклады сточных вод в речные в 2024 г. ($Part_{ww_riv_2024} = 0.98\%$) по сравнению с 2022 г. ($Part_{ww_riv_2022} = 1.75\%$) объясняются их более сильным разбавлением.

Тем не менее, водные вклады сточных вод в литорали Байкала в рассматриваемом секторе в 2024 г. (0.063–0.122 %, табл. 3) были в 2-3 раза больше, чем в 2022 г. (0.039–0.05 %), что свидетельствует о том, что эффект водности реки превышает эффект разбавления сточных вод. Те же закономерности наблюдаются и в распределении ГХВ и СГХВ сточных вод (см. п. 2.4.3.1). Не исключено также, что поток сточных вод в 2024 г. на момент исследования был больше, чем в 2022 г. Для выявления динамики сброса сточных вод КОС г. Слюдянки и вариаций их геохимического состава требуется проведение более детальных мониторинговых исследований с почасовым и суточным отбором проб. Следует учитывать, что процессы смешения вод в литорали сложные и зависят от физических и гидрометеорологических условий на момент исследования, поэтому для получения более объективных оценок по влиянию водных источников на литораль Байкала необходимо в тот же период проводить мониторинговые исследования и в самой литоральной зоне.

Соотношение между водными вкладами чистых устьевых речных (riv^{\wedge}) и сточных (ww) вод на всех станциях в литорали будет таким же, как и в р. Похабихе в устье, оно рассчитывается из полученных водных вкладов сточных вод в речные ($Part_{ww_riv_2022} = 1.75\%$, $Part_{ww_riv_2024} = 0.98\%$). Очевидно, что отношение вкладов $Part_{riv^{\wedge}}/ww$ в 2024 г. (101) было почти в два раза больше,

чем в 2022 (56). В обоих случаях водные вклады чистых речных вод значительно превышают водные вклады сточных вод.

Формирование литоральных вод Байкала в зоне влияния р. Похабихи происходит за счёт смешения двух главных водных источников – речных и байкальских вод. В литорали Байкала в секторе ~ 50 м от уреза основная доля поверхностных вод приходится на байкальские воды. В 2022 г. их водные вклады ($Part_{bw_lit_2022}$) составляли 97–98 % (рис. 11), что немного больше (на 4–12 %), чем в 2024 г. ($Part_{bw_lit_2024} = 88–94\%$, рис. 8) за счёт более низких водных вкладов речных вод, вероятно, вследствие более низкой водности р. Похабихи.

В исследуемом секторе водные вклады байкальских вод значительно превышали водные вклады речных вод и ещё в большей степени – водные вклады сточных вод: $Part_{bw/riv^{\wedge}}_{2022} = 34–35$, $Part_{bw/ww}_{2022} = 1913–2501$; $Part_{bw/riv^{\wedge}}_{2024} = 7–15$, $Part_{bw/ww}_{2024} = 721–1495$.

2.4.3. Геохимические вклады источников

Ранее, по результатам экспедиции 2022 г., были получены и описаны геохимические вклады только сточных вод КОС г. Слюдянки в р. Похабиху и в поверхностные воды литорали Байкала в зоне её влияния (Чебыкин и др., 2024а). В данном исследовании мы также определили водные и геохимические вклады чистых речных и байкальских вод. Вся полученная информация представлена на рис. 11.

2.4.3.1. Геохимические вклады сточных вод

В 2022 г. максимальное влияние сточных вод КОС г. Слюдянки на р. Похабиху было по Р (56 %), рангом ниже по Cl (43 %), Sb (39 %) и Na (36 %), затем по Zr (25 %), K (24 %), Cs

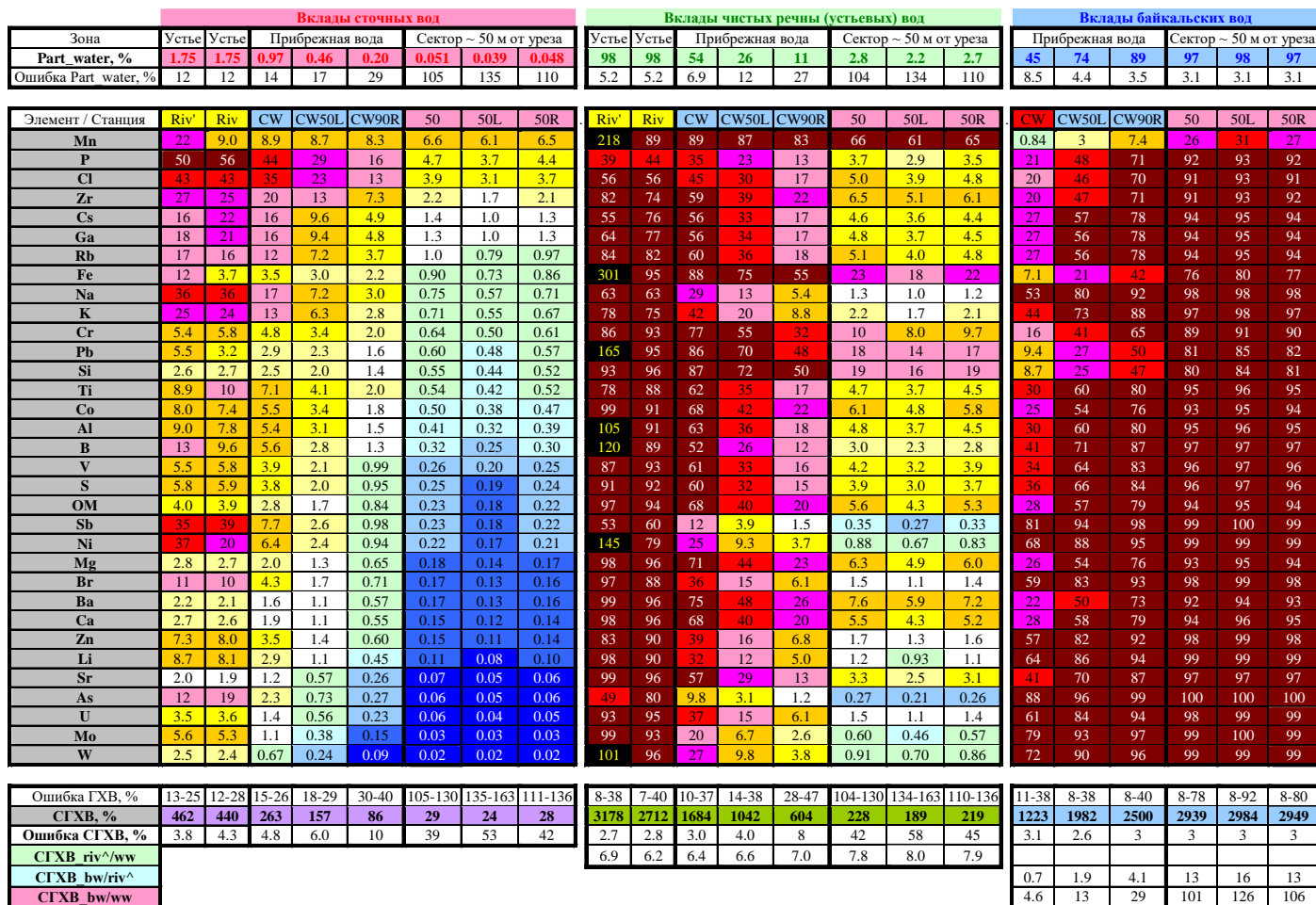


Рис. 11. Тепловая карта геохимических вкладов (ГХВ, в %) сточных и чистых речных вод в р. Похабику, а также сточных, чистых речных устьевых и байкальских вод в литоральные воды Байкала в зоне влияния р. Похабики в сопоставлении с их водными вкладами (Part_water).

Примечание. СГХВ – суммарные геохимические вклады по всем информативным элементам. OM – общая минерализация. ГХВ ранжированы по убыванию ГХВ сточных вод в секторе ~ 50 м от уреза. СГХВ_riv^ww – отношение СГХВ чистых речных и сточных вод; СГХВ_bw/riv^ – отношение СГХВ байкальских и чистых речных вод; СГХВ_bw/ww – отношение СГХВ байкальских и сточных вод.

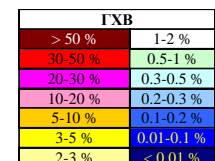


Fig. 11. Heat map of geochemical contributions (ГХВ, in%) of wastewater and pure riverine waters into the Pokhabikha River, as well as wastewater, pure riverine estuarine waters and Baikalian waters to the littoral waters of Lake Baikal in the Pokhabikha River impact zone in comparison with their water contributions (Part_water).

Note. СГХВ – summary geochemical contributions for all informative elements. OM is the total mineralization. ГХВ is ranked in descending order of ГХВ of wastewater in the sector ~ 50 m from the edge. СГХВ_riv^ww – ratio of the ГХВ of pure riverine estuarine waters and wastewater; СГХВ_bw/riv^ – ratio of the ГХВ of Baikalian and pure riverine estuarine waters; СГХВ_bw/ww is the ratio of the ГХВ of Baikalian waters and wastewater.

(22 %), Ga (21 %) и Ni (20 %), затем по As (19 %), Rb (16 %), Br (10 %) и Ti (10 %). Вклады по остальным элементам составляли менее 10 %. Это почти тот же набор основных загрязнителей, что и в 2024 г. (см. рис. 6).

При сравнении GXB_{ww_riv} в 2022 и 2024 гг. видно, что по большинству общих информативных элементов $GXB_{ww_riv_2022}$ были больше, чем $GXB_{ww_riv_2024}$ (в 1.3–20 раз), за исключением фосфора, ГХВ которого в 2022 г. были в 1.3 раза меньше, чем в 2024 г., а также Fe и Cl, ГХВ которых были почти одинаковыми ($GXB_{Fe_riv} = 3.7\text{--}4\%$, $GXB_{Cl_riv} = 41\text{--}43$). Суммарный геохимический вклад сточных вод КОС г. Слюдянки в р. Похабиху по общим информативным элементам в 2022 г. был также больше (440 %), чем в 2024 г. (279 %), в 1.6 раза. Очевидно, это связано с тем, что водные вклады сточных вод в р. Похабиху в 2022 г. были больше (см. п. 2.4.2).

Наибольшие геохимические вклады сточных вод в поверхностные воды литорали в секторе ~ 50 м от уреза в 2022 г. ($GXB_{ww_lit_2022}$) были по Mn (6.1–6.6 %), P (3.7–4.7 %), Cl (3.1–3.9 %), Zr (1.7–2.2 %), Cs (1.0–1.4 %), Ga (1.0–1.3 %), и Rb (0.8–1.0 %). Вклады по остальным элементам на всех станциях были менее 1.0 %.

Среди общих информативных элементов в 2024 г. в этом же секторе наибольшие ГХВ сточных вод в поверхностные воды литорали ($GXB_{ww_lit_2024}$) были по P (16–27 %), Cl (4.6–8.5 %), Ga (4.6–6.4 %), Mn (4.1–4.3 %), Cs (1.9–3.4 %), Fe (1.9–2.6 %), Zr (1.6–2.9 %), Rb (1.0–1.8 %), Na (0.8–1.7 %), K (0.8–1.6 %), Co (0.7–1.3 %) и Si (0.8–1.1 %). Вклады по остальным элементам на всех станциях были менее 1.0 %. Т.е., в 2024 г. к списку основных загрязнителей 2022 г. добавились Fe, Na, K, Co и Si, а сами ГХВ стали больше (в 1.5–7.3 раза), за исключением Mn, ГХВ которого в 2024 г. были, наоборот, в 1.4–1.6 раз меньше, чем в 2022 г. На отдельных станциях GXB_{Zr_lit} в 2024 г. были немного меньше (в 1.3 раза), чем в GXB_{Zr_lit} в 2022 г.

Суммарный геохимический вклад сточных вод КОС г. Слюдянки в поверхностные воды литорали Байкала в зоне влияния р. Похабихи в секторе 50 м от уреза по общим информативным элементам в 2024 г. был также

больше (43–70 %), чем в 2022 г. (24–29 %), в 1.5–3 раза. Такая ситуация в литорали подтверждает тот факт, что фактор водности реки более значим, чем фактор разбавления сточных вод речными (см. п. 2.4.2).

2.4.3.2. Геохимические вклады речных вод

В 2022 г. геохимические вклады чистых речных вод в устье р. Похабихи, рассчитанные из условия консервативного смешения элементов по (16) ($GXB_{riv^{\wedge}riv}$) значительно превышают 100 % по Fe (301 %), Mn (218 %), Pb (165 %), Ni (145 %), B (120 %) и Al (105 %) (рис. 11, столбец Riv'), что свидетельствует о влиянии дополнительных источников поступления этих элементов на участке реки ниже сброса сточных вод. Интенсивность поступления элементов $GXB_{riv^{\wedge}riv} / GXB_{riv^{\wedge}riv}$ убывает в следующей последовательности: Fe (3.2), Mn (2.4), Ni (1.9), Pb (1.7), B (1.4) и Al (1.2). В оба периода (2022 и 2024 гг.) среди общих информативных элементов наиболее интенсивно из дополнительных источников поступают Fe, Mn и B. В 2024 г., в отличие от 2022 г., высокие значения $GXB_{riv^{\wedge}riv} / GXB_{riv^{\wedge}riv}$ обнаружены также для Sb (3.4) и отсутствие дополнительного поступления Ni (0.91).

В 2022 г., как и в 2024 г., геохимические вклады чистых речных вод в устье ($GXB_{riv^{\wedge}riv}$) по большинству элементов составляли более 90 %, за исключением P (44 %), Cl (56 %), Sb (60 %), Na (63 %), Zr (74 %), K (83 %), Cs (76 %), Ga (77 %), Ni (79 %), As (80 %), Rb (82 %), Br (88 %), Ti (88 %), B (89 %), Mn (89 %), Li (90 %) и Zn (90 %), которые привносятся сточными водами. Список исключений, по сравнению с 2024 г. более расширенный, поскольку водный вклад сточных вод тогда был больше ($Part_{ww_riv_2022} = 1.75$ %).

Наибольшие геохимические вклады чистых устьевых речных вод в поверхностные воды литорали в секторе ~ 50 м от уреза в 2022 г. ($GXB_{riv^{\wedge}lit_2022}$) были по Mn (61–66 %), Fe (18–23 %), Si (16–19 %), Pb (14–18 %) и Cr (8–10 %). Вклады по остальным элементам на всех станциях были менее 10 %.

Среди общих информативных элементов в 2024 г. в этом же секторе (ст. 50L(s), ст. 65(s), ст. 100R(s), рис. 1) наибольшие ГХВ чистых устьевых речных вод в поверхностные воды литорали ($GXB_{riv}^{lit}_{2024}$) были по Mn (88–91 %), Si (52–68 %), Fe (46–63 %), Ga (57–41 %), Ti (16–29 %), Co (16–28 %), Cr (16–28 %), Ba (16–28 %), Al (15–27 %), Zr (14–25 %), Mg (13–23 %), Cs (12–22 %), Ca (11–20 %), OM (11–20 %), Rb (11–20 %), S (9.2–17 %), V (8.7–16 %), Sb (8–15 %), Sr (7–13 %), Cl (6.4–12 %), B (6.3–12 %) и P (6–10 %). Вклады по остальным элементам на всех станциях были менее 10 % (рис. 7). Т.е., в 2024 г., в связи с относительно большими водными вкладами речных вод в воды литорали – в 2.2–5.6 раз ($Part_{riv}^{lit}_{2024} = 6.3–12\%$, $Part_{riv}^{lit}_{2022} = 2.2–2.8\%$), количество элементов со значимыми вкладами чистых устьевых речных вод было больше и сами ГХВ были больше (в 1.3–57 раза, ср. рис. 7 и 11).

Суммарный геохимический вклад чистых устьевых речных вод в поверхностные воды литорали Байкала в зоне влияния р. Похабихи в секторе 50 м от уреза по общим (*) информативным элементам ($CGXB^*_{riv}^{lit}$) в 2024 г. был также больше (440–607 %), чем в 2022 г. (173–209 %), в 2–4 раза. Очевидно, что это связано с большим водным вкладом речных вод в литорали в 2024 г. по сравнению с 2022 г. (см. п. 2.4.2).

В 2022 г. в литорали Байкала $CGXB_{riv}^{lit}$ были в 6.2–8 раз больше суммарных геохимических вкладов сточных вод (рис. 11, строка $CGXB_{riv}^{ww}$). В 2024 г. этот показатель был немного выше – в 10–11 раз (рис. 7, строка $CGXB_{riv}^{ww}$). По общим информативным элементам для сектора ~ 50 м от уреза получены близкие величины: $CGXB^*_{riv}^{ww}_{2022} = 7.1–7.3$, $CGXB^*_{riv}^{ww}_{2024} = 9.5–10.2$. Это говорит о том, что в целом, по суммарным геохимическим характеристикам, влияние чистых вод р. Похабихи на литораль Байкала почти на порядок больше, чем сточных вод.

2.4.3.3. Геохимические вклады байкальских вод

Поскольку водные вклады байкальских вод в поверхностные воды литорали Байкала в секторе ~ 50 м от уреза в зоне влияния р. Похабихи в 2022 г. были немного больше ($Part_{bw}^{lit}_{2022} = 97–98\%$, рис. 11), чем в 2024 г. ($Part_{bw}^{lit}_{2024} = 88–94\%$, рис. 8), то логично ожидать, что и геохимические вклады байкальских вод в литорали в 2022 г. ($GXB_{bw}^{lit}_{2022}$) должны были быть больше, чем в 2024 г. ($GXB_{bw}^{lit}_{2024}$).

$GXB_{bw}^{lit}_{2022}$ практически по всем элементам были больше 90 %, за исключением Mn (26–31 %), Fe (76–80 %), Si (80–84 %) и Pb (81–85 %), рис. 11.

Число общих информативных элементов с высокими значениями $GXB_{bw}^{lit}_{2024}$ (> 90 %) были заметно меньше, чем в 2022 г. – только для трети списочного состава: As, Sb, Mo, W, Ni, Li, U, Br, Na, K, B, Sr и V. Их вклады были на 2–8 % меньше, чем $GXB_{bw}^{lit}_{2022}$. $GXB_{bw}^{lit}_{2024}$ по остальным элементам на всех станциях в секторе ~ 50 м от уреза были менее 90 %, наименьшие из них (< 60 %), как и в 2022 г., характерны для Mn (3.7–7.5 %), Si (30–47 %) и Fe (34–52 %), поскольку значительная их часть поступает с речными водами (см. п. 2.4.3.2).

Суммарный геохимический вклад байкальских вод в поверхностные воды литорали Байкала в зоне влияния р. Похабихи в секторе 50 м от уреза по общим (*) информативным элементам ($CGXB^*_{bw}^{lit}$) в 2022 г. был также больше (2939–2984 %), чем в 2024 г. (2253–2513 %), в 1.2–1.3 раза.

В 2022 г. в литорали Байкала в секторе ~ 50 м от уреза $CGXB_{bw}^{lit}$ были в 13–16 раз больше чистых речных вкладов $CGXB_{riv}^{lit}$ (рис. 11, строка $CGXB_{bw}^{lit}/riv^{lit}$), а в прибрежной зоне эти показатели были меньше (0.7–4.1 раза). Относительно сточных вод $CGXB$ байкальских вод были на два порядка больше (в 101–126 раз) в секторе ~ 50 м от уреза и в 5–29 раз больше в прибрежной зоне.

В 2024 г. в поверхностных водах литорали в секторе ~ 50 м от уреза (ст. 50L(s), ст. 65(s),

ст. 100R(s), рис. 1) $СГХВ_{bw/riv}^{\wedge} = 2.6-4.5$, а $СГХВ_{bw/ww} = 35-64$ (рис. 8).

По общим (*) информативным элементам в исследуемом секторе СГХВ байкальских вод значительно превышали СГХВ речных вод и ещё в большей степени – СГХВ сточных вод: $СГХВ_{bw/riv}^{\wedge}_{2022} = 14-17$, $СГХВ_{bw/ww}_{2022} = 101-126$; $СГХВ_{bw/riv}^{\wedge}_{2024} = 3.4-5.7$, $СГХВ_{bw/ww}_{2024} = 32-58$.

Заключение

Установлена степень влияния водных источников по водным и геохимическим характеристикам на р. Похабиху и прилегающую литораль оз. Байкал в 2022 и 2024 гг.

Водные вклады сточных вод КОС г. Слюдянки в р. Похабиху в 2022 г. и 2024 г. составляли 1.75 % и 0.98 %, соответственно. Более низкие водные вклады сточных вод в 2024 г., вероятно, обусловлены большей водностью реки. Об этом свидетельствуют более высокие водные вклады загрязнённых речных вод в литорали Байкала (в поверхностных водах в секторе ~ 50 м от устья) в 2024 г. (6.4-12 %) по сравнению с 2022 г. (2.2-2.9 %). Несмотря на это водные вклады сточных вод в литорали озера в 2024 г. (0.063-0.122 %) были больше, чем в 2022 г. (0.039-0.05 %), что указывает на то, что эффект водности реки превышает эффект разбавления сточных вод.

Основное геохимическое влияние сточных вод на состав речных обнаружено по Р (56-75 %), Cl (41-43 %), Na (28-36 %), Zr (11-25 %), K (16-24 %), Cs (13-22 %), Ga (10-21 %) и Ni (11-20 %), геохимические вклады (ГХВ) остальных элементов были менее 10 %. В 2022 г. высокие ГХВ сточных вод обнаружены также по Sb (39 %), As (19 %), Rb (16 %), Br (10 %) и Ti (10 %), а в 2024 – по I (20 %). Суммарный геохимический вклад (СГХВ) сточных вод в речные по всем информативным элементам в 2022 г. был 440 %, что в 1,4 раза больше, чем в 2024 г. (311 %).

В 2024 г. влияние загрязнённых вод р. Похабихи в литорали Байкала прослеживалось на всех глубинах в радиусе ~ 100 м от устья, а фронтально по поверхности достигало 200 м; в прибрежной зоне, вероятно, распространялось далее 100 м. Субквальная разгрузка загрязнённых речных вод обнаружена на

удалении 65–80 м от устья. Водные вклады речных вод в придонном слое здесь составляли 39–63 %. Высокий водный вклад речных вод (63 %) также обнаружен в прибрежной воде напротив устья. На остальных участках литорали водные вклады речных вод составляли 3.9–4.3 %, т.е. там доминировали байкальские воды. Водные вклады сточных вод в литорали исследуемого сектора варьировали в диапазоне 0.04–0.62 % и были на два порядка меньше водных вкладов чистых речных вод.

В 2022 г. исследовались только поверхностные воды литорали в секторе ~ 50 м от устья и в прибрежной зоне на удалении до 90 м от устья. В прибрежной зоне водные вклады чистых речных вод составляли 11–54 %, а в секторе ~ 50 м от устья – 2.2–2.8 %. Водные вклады сточных вод варьировали в диапазоне 0.20–0.97 % и 0.04–0.05 % соответственно, и были в 56 раз меньше водных вкладов чистых речных вод.

Формирование водной массы литоральных вод Байкала в зоне влияния р. Похабихи происходит в основном за счёт смешения двух главных источников – байкальских и чистых речных вод. Отношение их водных вкладов варьировало в пределах 0.8–45 раз в 2022 г. и 0.6–25 раз в 2024 г. На всех станциях водные вклады байкальских вод были значительно больше водных вкладов сточных вод: в 47–2501 раз в 2022 г. и в 59–2506 раз в 2024 г.

Геохимические вклады сточных вод в литорали Байкала более значимы, по сравнению с их водными вкладами. Основное влияние сточных вод здесь прослеживается по тем же элементам, что и для р. Похабихи, но с меньшими ГХВ: в 2022 г. – Р (3.7-44 %), Cl (3.1–35 %), Na (0.6–17 %), Zr (1.7–20 %), K (0.6–13 %), Cs (1.0–16 %), Ga (1.0–16 %), Rb (0.8–12 %), Mn (6.1–8.9 %), Fe (0.7–3.5 %), Cr (0.5–4.8 %), Pb (0.5–2.9 %) и Si (0.4–2.5 %); в 2024 г. – Р (10–64 %), Cl (2.9–31 %), Na (0.5–12 %), Cs (1.2–11 %), Ga (3.4–9.6 %), K (0.5–9.0 %), Zr (1.0–8.6 %), I (0.3–7.0 %), Ni (0.3–5.6 %), а также Mn (3.9–4.4 %), Fe (1.4–3.8 %), Si (0.6–1.5 %), Rb (0.6–6.5 %), Ge (0.6–4.3 %) и В (0.3–4.6 %), ГХВ которых на участках с низкими водными вкладами сточных вод были относительно выше.

Несмотря на заметное влияние сточных вод, основной вклад в формирование геохимического состава литоральных вод Байкала в зоне влияния р. Похабихи вносят чистые речные и байкальские воды.

За исключением Р ГХВ чистых речных вод в литорали Байкала во всех случаях были больше, чем ГХВ сточных вод: в 1.3–50 раз в 2022 г. и в 1.4–116 раз в 2024 г. В 2022 г. основное влияние чистых речных вод было по Mn (61–89 %), Fe (18–88 %), Si (16–87 %) и Pb (14–86 %). По остальным элементам максимальные ГХВ были менее 80 %, а минимальные ГХВ – менее 10 %. Суммарные геохимические вклады чистых речных вод варьировали в интервале 189–1684 %, на всех станциях они были больше (в 6–8 раз) соответствующих СГХВ сточных вод. В 2024 г. основное влияние чистых речных вод было по Mn (83–94 %), Si (39–94 %), Fe (34–91 %), Ga (30–85 %), редкоземельным элементам (15–92 %), Y (17–87 %), Ge (11–80 %), Ti, Cr, Ba и Al (10–80 %). По остальным элементам максимальные ГХВ были менее 80 %, а минимальные ГХВ – менее 10 %. Суммарные геохимические вклады чистых речных вод варьировали в интервале 372–3158 %, на всех станциях они на порядок превышали соответствующие СГХВ сточных вод.

За исключением P, Cl, Mn и Ga ГХВ байкальских вод во всех случаях были больше, чем ГХВ сточных вод: в 1.03–5760 раз в 2022 г. и в 1.05–5480 раз в 2024 г. В 2022 г. максимальное влияние байкальских вод было по As, Sb, Mo, W, Ni, Li, U, Br, Zn и Na, их ГХВ составляли 53–100 %. Высокие ГХВ (16–98 %) были также и для большинства других элементов: K, B, Sr, S, V, Al, Ti, Ca, Cs, Ga, Rb, Mg, Co, Ba, P, Zr, Cl, и Cr. ГХВ Pb, Si, Fe, Si и Mn варьировали в интервале 0.8–85 %. Суммарные геохимические вклады байкальских вод варьировали в интервале 1222–2984 %, на всех станциях они были больше (в 5–106 раз) соответствующих СГХВ сточных вод. В 2024 г. максимальное влияние байкальских вод было по As, Mo, W, I, Br, Na, Li и U, их ГХВ составляли 55–99 %. Высокие ГХВ (12–97 %) были также и для большинства других элементов Ni, K, B, Sr, Sb, Cu, V, S, Cl, Ca, Rb, Mg, Cs, Zr, Ba, Al, Cr, Co, Ti, Ge

и P. ГХВ редкоземельных элементов, Ga, Fe, Si и Mn варьировали в интервале 0.3–82 %. Суммарные геохимические вклады байкальских вод варьировали в интервале 1058–3092 %, на всех станциях они были больше (в 5–98 раз) соответствующих СГХВ сточных вод.

В межгодовой динамике 2022 / 2024 гг. (с сезонной разницей в один месяц, сентябрь–август) геохимические различия чистых вод р. Похабихи, также как и сточных вод КОС г. Слюдянка по большинству химических элементов небольшие (< 50 %). Состав сточных вод наиболее стабильный. Более существенные различия здесь наблюдаются только по небольшому числу труднорастворимых следовых элементов (в размах): Cr (2.4), Ti (1.9), Ga (1.7) и Zr (1.7), колебания концентраций которых, скорее всего, обусловлено вариациями тонкодисперсной взвеси. Существенные различия чистых речных вод по Sb (6.1), Ni (3.2), P (2.4), Mn (2.1), Ga (1.8) и Al (1.6), вероятно, связаны с изменениями водности реки и влиянием других факторов (взвешенное вещество, физико-химические и биогеохимическими процессы).

В сточных водах КОС г. Слюдянка обнаружено превышение нормативов, установленных для сточных вод, сбрасываемых централизованными и локальными системами водоотведения поселений или городских округов в пределах центральной и буферной экологических зон Байкальской природной территории. В 2022 г. – по P (45 ПДК), Mn (4.7 ПДК) и V (2 ПДК); в 2024 г. – по P (96 ПДК), Mn (5.6 ПДК), Fe (2.9 ПДК) и V (2.5 ПДК).

Благодарности

Аналитические исследования выполнялись на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500se в центре коллективного пользования «Ультрамикрoанализ» (ЛИН СО РАН, г. Иркутск)

Источник финансирования

Работа выполнена по государственному заданию ЛИИ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего

образования Российской Федерации (№ 121032300186-9).

Литература

Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов // Состояние поверхностных вод – Среднесуточные расходы воды рек, ручьев, каналов по постам, куб. м/с: Инф. сист. 2023. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=186> (дата обращения: 23.08.2023).

Гагаринова О.В. Водно-экологические проблемы центральной экологической зоны Байкальской природной территории // Евразийский союз ученых. 2016. № 30-5. С. 7–11.

Грачёв М.А. Что грозит Байкалу? // В мире науки. 2015. № 1. С. 4–15.

Итоги Всероссийской переписи населения 2020 года. Федеральная служба государственной статистики РФ. URL: https://rosstat.gov.ru/vpn_popul (дата обращения: 12.05.2023).

Мышляева Л.В., Краснощёков В.В. Аналитическая химия кремния (серия «Аналитическая химия элементов»). М: Наука. 1972. 212 с.

Поиск по данным Государственного водного реестра. URL: <https://textual.ru/gvr/index.php?card=208936> (дата обращения: 24.08.2023).

Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 83 от 21.02.2020 г. Об утверждении нормативов предельно допустимых воздействий на уникальную экологическую систему озера Байкал и перечня вредных веществ, в том числе веществ, относящихся к категориям особо опасных, высокоопасных, опасных и умеренно опасных для уникальной экологической системы озера Байкал. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202004230027>. (дата обращения: 08.07.2020).

Сутурин А.Н., Чебыкин Е.П., Мальник В.В., Ханаев И.В., Минаев А.В., Минаев В.В. Роль антропогенных факторов в развитии экологического стресса в литорали оз. Байкал (акватория пос. Листвянка) // География и природные ресурсы. 2016. № 6. С. 43–54.

Ханаев И.В., Дзюба Е.В., Кравцова Л.С., Грачёв М.А. Влияние массового развития зеленых нитчатых водорослей на воспроизводство желтокрылки *Cottocomephorus grewingkii* (Dybowski,

1874) (Cottidae) в условиях экологического кризиса озера Байкал // Доклады РАН. 2016. Т. 467, № 1. С. 119–121.

Чебыкин Е.П., Сороковикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В., Грачёв М.А. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20, № 5. С. 613–631.

Чебыкин Е.П., Дамбинов Ю.А., Сутурин А.Н. Многоэлементный анализ надшламовых вод карт-накопителей Байкальского целлюлозно-бумажного комбината для выбора стратегии ремедиации территории // Вода и экология: проблемы и решения. 2020. Т. 84, № 4. С. 67-80.

Чебыкин Е.П., Куликова Н.Н., Лихошвай Е.В., Сутурин А.Н. Геохимический метод оценки влияния загрязнённых стоков на водные объекты на примере г. Слюдянка, р. Похабиха и Южного Байкала // Геосферные исследования. 2024а. № 4. С. 107–136. doi: 10.17223/25421379/33/7

Чебыкин Е.П., Куликова Н.Н., Лихошвай Е.В., Сутурин А.Н. Загрязнение реки Тья и поверхностных вод литорали оз. Байкал в зоне влияния сточных вод канализационных очистных сооружений г. Севербайкальска: оценка геохимическим методом // Антропогенная трансформация природной среды. 2024б. Т. 10, № 2. С. 82-102. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-82-102>. EDN ZWQKER.

Чебыкин Е.П., Куликова Н.Н., Лихошвай Е.В., Сутурин А.Н. Загрязнение поверхностных вод литорали оз. Байкал в зоне влияния сточных вод КОС г. Байкальска: оценка геохимическим методом // Геосферные исследования. 2025 (в печати).

Aries S., Valladon M., Polve M., Dupre B. A Routine Method for Oxide and Hydroxide Interference Corrections in ICP-MS Chemical Analysis of Environmental and Geological Samples // Geostandards Newsletter. 2000. V. 24, № 1. P. 19–31.

Geyh M.A., Schleicher H. Absolute Age Determination: Physical and Chemical Dating Methods and Their Application. Heidelberg: Springer Berlin. 1990. 503 pp.

Malnik V., Masumi Y., Tomberg I., Molozhnikova E., Bukin Y., Timoshkin O. Lacustrine, wastewater, interstitial and fluvial water quality in the Southern Lake Baikal region // Journal of Water and Health. 2022. V. 20, № 1. P. 23–40.

R-ArcticNet // A Regional, Electronic, Hydrographic Data Network For the Arctic Region. URL:

<https://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/View-Point.pl?Point=6069> (дата обращения: 23.08.2023).

Shchetnikov A.A., Bezrukova E.V., Krivonogov S.K. Late Glacial to Holocene volcanism of Jom-Bolok Valley (East Sayan Mountains, Siberia) recorded by microtephra layers of the Lake Kaskadnoe-1 sediments // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2019. Vol. 173. P. 291–303.

Suturin A.N., Paradina L.F., Epov V.N., Semenov A.R., Lozhkin V.I., Petrov L.L. Preparation and assessment of a candidate reference sample of Lake Baikal deep water // *Spectrochimica Acta Part B*. 2003. V. 58. P. 277–288.

References

Aries S., Valladon M., Polve M., Dupre B. (2000) A Routine Method for Oxide and Hydroxide Interference Corrections in ICP-MS Chemical Analysis of Environmental and Geological Samples // *Geostandards Newsletter*. 2000. 24(1). pp. 19–31. DOI:10.1111/j.1751-908X.2000.tb00583.x.

Automated information system of state monitoring of water objects. Surface water condition – Average daily water discharge of rivers, streams, channels by posts, cubic meters/s: Inf. syst. 2023. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=186> (Date of accessed: 23.08.2023). In Russian.

Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Vodneva E.N., Rasskazov S.V., Khodzher T.V., Grachev M.A. Modern state of water in the Selenga river at the territory of Russia over major components and trace elements // *Chemistry for Sustainable Development*. 2012. 20(5). pp. 613–631. In Russian.

Chebykin E.P., Dambinov Yu.A., Suturin A.N. Multielemental analysis of above slime waters in the accumulation cells of Baikalsk Pulp and Paper Plant for the choice of territory remediation strategy // *Water and ecology*. 2020. 84(4). pp. 67–80, in Russian DOI:10.23968/2305-3488.2020.25.4.67-80.

Chebykin E.P., Kulikova N.N., Likhoshway Ye.V., Suturin A.N. Geochemical method of assessment of the impact of polluted drains onto water bodies illustrated by Slyudyanka City, the Pokhabikha River and South Baikal // *Geosphere Research*. 2024a. 4. pp. 107–136. In Russian. doi:10.17223/25421379/33/7.

Chebykin, E., Kulikova, N., Likhoshway, Y. and Suturin, A. Pollution of Tyya River and Lake Baikal littoral surface waters in the zone of influence of waste water from the Severobaikalsk Town

wastewater treatment facilities: assessment by geochemical method // *Anthropogenic Transformation of Nature* 2024b. 10(2). pp. 82–102. In Russian .doi:10.17072/2410-8553-2024-2-82-102. EDN ZWQKER.

Chebykin E.P., Kulikova N.N., Likhoshway Ye.V., Suturin A.N. Pollution of Lake Baikal littoral surface waters in the zone of influence of waste water from the Baikalsk town wastewater treatment facilities: assessment by geochemical method // *Geosphere Research*. 2025 In press. (In Russian).

Gagarinova O.V. Water-ecological problems of the Central Ecological Zone of the Baikal Natural Territory // *Eurasian Union of Scientists*. 2016. 30-5. pp. 7–11. In Russian.

Grachev M.A. What threatens Baikal? // *In the World of Science*. 2015. 1. pp. 4–15. In Russian.

Geyh M.A., Schleicher H. Absolute Age Determination: Physical and Chemical Dating Methods and Their Application. Heidelberg: Springer Berlin. 1990. 503 pp.

Khanaev I.V., Dzyuba E.V., Kravtsova L.S., Grachev M.A. The effect of bloom of filamentous green algae on the reproduction of yellowfin sculpin *Cottomephorus grewingkii* (Dybowski, 1874) (Cottoidae) during ecological crisis in Lake Baikal // *Doklady Biological Sciences*. 2016. 467(1). pp. 63–641. DOI: 10.7868/S0869565216070306.

Malnik V., Masumi Y., Tomberg I., Molozhnikova E., Bukin Y., Timoshkin O. Lacustrine, wastewater, interstitial and fluvial water quality in the Southern Lake Baikal region // *Journal of Water and Health*. 2022. 20(1). pp. 23–40. DOI:10.2166/wh.2021.064.

Myshlyaeva L.V., Krasnoshchekov V.V. Analytical chemistry of silicon (series "Analytical chemistry of elements"). Moscow: Publishing house "Nauka". 1972. 212 p. In Russian.

Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation No. 83 dated 02.21.2020 On Approval of the Standards of maximum permissible impacts on the Unique Ecological system of Lake Baikal and the List of harmful Substances, including substances belonging to the categories of especially dangerous, highly dangerous, dangerous and moderately dangerous for the unique ecological system of Lake Baikal.: URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202004230027>. (Date of accessed: 08.07.2020). In Russian.

R-ArcticNet. A Regional, Electronic, Hydrographic Data Network For the Arctic Region. URL: <https://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/View-Point.pl?Point=6069> (Date of accessed: 23.08.2023).

Results of the All - Russian Population Census 2020 // Federal State Statistics Service of the Russian Federation. URL: https://rosstat.gov.ru/vpn_popul (Date of accessed: 12.05.2023). In Russian.

Search according to the State Water Register. URL: <https://textual.ru/gvr/index.php?card=208936> (Date of accessed: 24.08.2023). In Russian.

Suturin A.N., Paradina L.F., Epov V.N., Semenov A.R., Lozhkin V.I., Petrov L.L. Preparation and

assessment of a candidate reference sample of Lake Baikal deep water // Spectrochimica Acta Part B. 2003. 58. pp. 277–288. DOI: 10.1016/S0584-8547(02)00157-X.

Suturin A.N., Chebykin E.P., Mal'nik V.V., Khanaev I.V., Minaev A.V., Minaev V.V. The role of anthropogenic factors in the development of ecological stress in Lake Baikal littoral (the Listvyanka settlement lakescape) // Geography and Natural Resources. 2016. 6. pp. 43–54. In Russian. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(43-54).

Чебыкин Евгений Павлович,
кандидат химических наук,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
старший научный сотрудник,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,
Лимнологический институт СО РАН,
ведущий специалист,
email: epcheb@yandex.ru

Chebykin Eugene Pavlovich,
candidate of Chemical Sciences,
664033, Irkutsk, st. Lermontova, d. 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Senior Researcher,
664033, Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3,
Limnological Institute SB RAS,
Leading Specialist,
email: epcheb@yandex.ru

Куликова Наталья Николаевна,
кандидат биологических наук,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,
Лимнологический институт СО РАН,

старший научный сотрудник,
email: kulikova@lin.irk.ru

Kulikova Natalya Nikolaevna,
candidate of Biological Sciences,
664033, Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3,
Limnological Institute SB RAS,
Senior Researcher,
email: kulikova@lin.irk.ru

Сутурин Александр Николаевич,
кандидат геолого-минералогических наук,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,
Лимнологический институт СО РАН,
Зав. лабораторией биогеохимии,
email: san@lin.irk.ru

Suturin Alexander Nikolaevich,
candidate of Geological and Mineralogical,
Head of Laboratory of Biogeochemistry,
664033, Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3,
Limnological Institute SB RAS,
email: san@lin.irk.ru

МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 550.8.; 551.2; 556

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2025.1.100>

EDN: [CWDKPA](#)

О влиянии уровня воды в озере Байкал на сейсмическую активность Прибайкалья

С.В. Снопков^{1,2}, А.А. Куроленко¹

¹Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. На сейсмическую активность Прибайкалья влияет большое количество факторов разной природы. Статистический анализ динамики сейсмических событий и уровня воды в озере Байкал показали, что существует определенная взаимосвязь между этими событиями. Повышение скорости изменения уровня воды производит триггерный эффект, высвобождая сейсмическую энергию. Эта статистическая зависимость наблюдается не только в районе самого озера, но и в северо-восточном и юго-западном секторах Байкальской рифтовой зоны.

Ключевые слова: сейсмическая активность, Прибайкалье, уровень воды в Байкале, статистический анализ, Байкальская рифтовая зона

On the Influence of the Water Level in Lake Baikal on Seismic Activity in the Pribaikalye Region

S.V. Snopkov^{1,2}, A.A. Kurolenko¹

¹Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The seismic activity of the Baikal region is influenced by a large number of factors of different nature. Statistical analysis of the dynamics of seismic events and the water level in Lake Baikal has shown that there is a definite relationship between these events. Increasing the rate of change in the water level produces a trigger effect, releasing seismic energy. This statistical relationship is observed not only in the area of the lake itself, but also in the northeastern and southwestern sectors of the Baikal rift zone.

Keywords: seismic activity, Baikal region, Baikal water level, statistical analysis, Baikal rift zone

Статья получена: 13.01.2025; исправлена: 21.01.2025; принята: 24.01.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Снопков С.В., Куроленко А.А. О влиянии уровня воды в озере Байкал на сейсмическую активность Прибайкалья // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 1. С. 100-113. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.100. EDN: CWDKPA

Article received: 13.01.2025; corrected: 21.01.2025; accepted: 24.01.2025.

FOR CITATION: Snopkov S.V., Kurolenko A.A. On the Influence of the Water Level in Lake Baikal on Seismic Activity in the Pribaikalye Region // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 100-113. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.100. EDN: CWDKPA

Введение

2021 год отметился повышенной сейсмической активностью в Прибайкалье. В течение года произошло 1065 сейсмических событий, из которых 39 были классом 12 и выше, в том числе Хубсугульское землетрясение ($K=16$). (Куроленко и др., 2021; Снопков и др., 2023).

Нельзя было не обратить внимание, что пик сейсмической активности совпал с периодом резкого подъема уровня воды в Байкале. С 2015 по 2018 год на Байкале наблюдалось маловодие, а затем за три года среднегодовой

уровень воды в озере поднялся почти на 80 см (рис. 1). Такое изменение уровня воды соизмеримо с подъемом водного зеркала во время заполнения водохранилища Иркутской ГЭС (1957–1961 гг.), когда уровень воды поднялся более чем на 100 см. Заполнение водохранилища также совпало с пиком сейсмической активности. Причем даже беглого взгляда на характер изменения параметров достаточно чтобы отметить важную особенность взаимосвязи параметров – пики сейсмической активности соответствуют интервалам резкого изменения среднегодового уровня воды в озере.

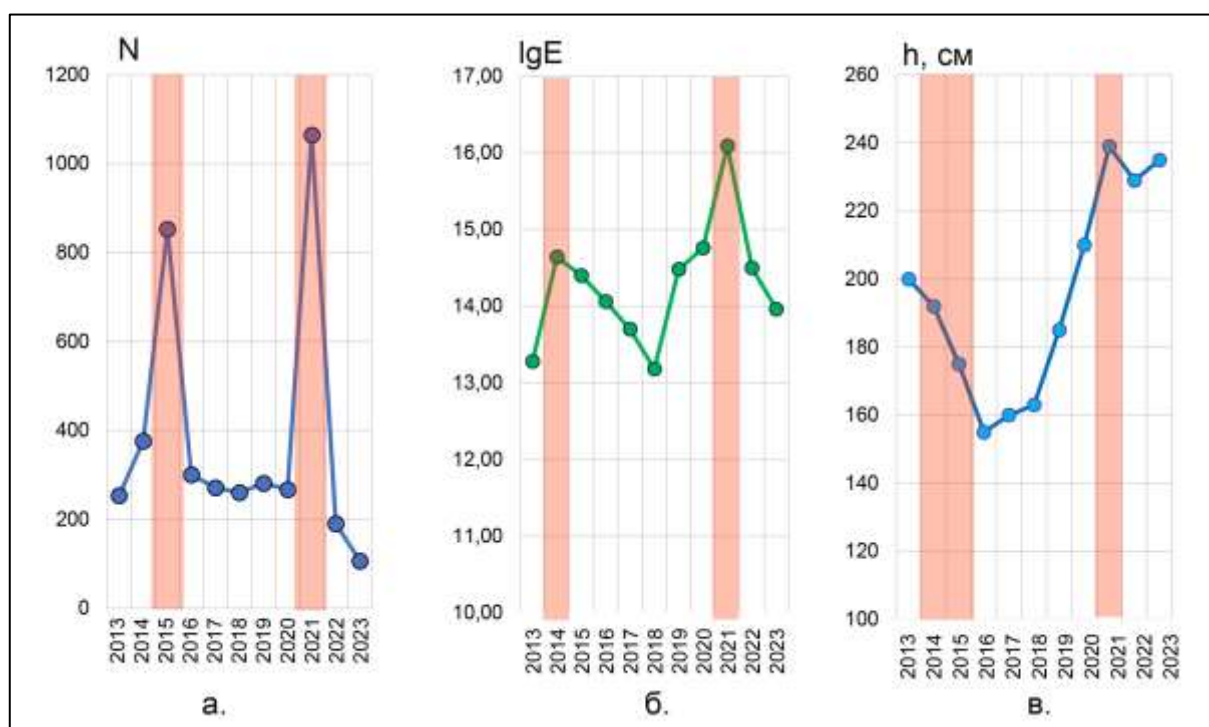


Рис. 1. Характер изменения уровня воды в Байкале и сейсмичности за 11 лет (2013–2023 гг.) (а. – количество сейсмических событий; б. – логарифм суммарной годовой сейсмической энергии; в. – среднегодовой уровень воды в озере, относительно нулевой отметки гидропоста в п. Байкал.

Fig. 1. The nature of changes in the water level in Lake Baikal and seismicity over 11 years (2013–2023) (а. – the number of seismic events; б. – the logarithm of the total annual seismic energy; в. – the average annual water level in the lake, relative to the zero mark of the hydro post in Lake Baikal.

Целью данного исследования была проверка гипотезы о влиянии уровня воды в Байкале на сейсмическую активность Прибайкалья. Очевидно, что изменение объема воды в Байкале не является главным фактором накопления и высвобождения сейсмической энергии в Байкальской рифтовой зоне. Резкие изменения уровня воды в озере, скорее всего, служат своеобразным триггером,

провоцирующим высвобождение накопившейся в недрах энергии.

Основные тезисы данной работы представлялись А.А. Куроленко на ежегодной научной конференции студентов и молодых ученых по наукам о земле геологического факультета ИГУ, которая проходила 10 апреля 2024 г.

Для проверки гипотезы была собрана информация о землетрясениях в Прибайкалье и

изменении уровня воды в озере, изучен характер изменения уровня воды и сейсмической активности, проведен статистический анализ взаимозависимости параметров.

Динамика изменения уровня воды в Байкале и сейсмической активности в Прибайкалье

Сведения о сейсмических событиях были взяты с сайта Байкальского филиала ФГБУН ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», где выставлены данные с 1960 года по настоящее время (Байкальский..., 2025). Данные

об изменении уровня воды в Байкале, относительно нулевой отметки гидропоста в п. Байкал, были получены с сайта «Уровень воды в Байкале (пос. Байкал) сегодня» (Уровень..., 2025) и из атласа «Байкал» (Байкал, 1993, с. 72).

По данным среднегодового уровня воды в озере были рассчитаны значения ежегодного прироста уровня воды (далее, градиент – Δh , см/год), а также модуль градиента (далее, модуль – $|\Delta h|$, см/год). Были построены графики уровня воды, и рассчитанных параметров с 1960 по 2023 гг. (рис. 2).

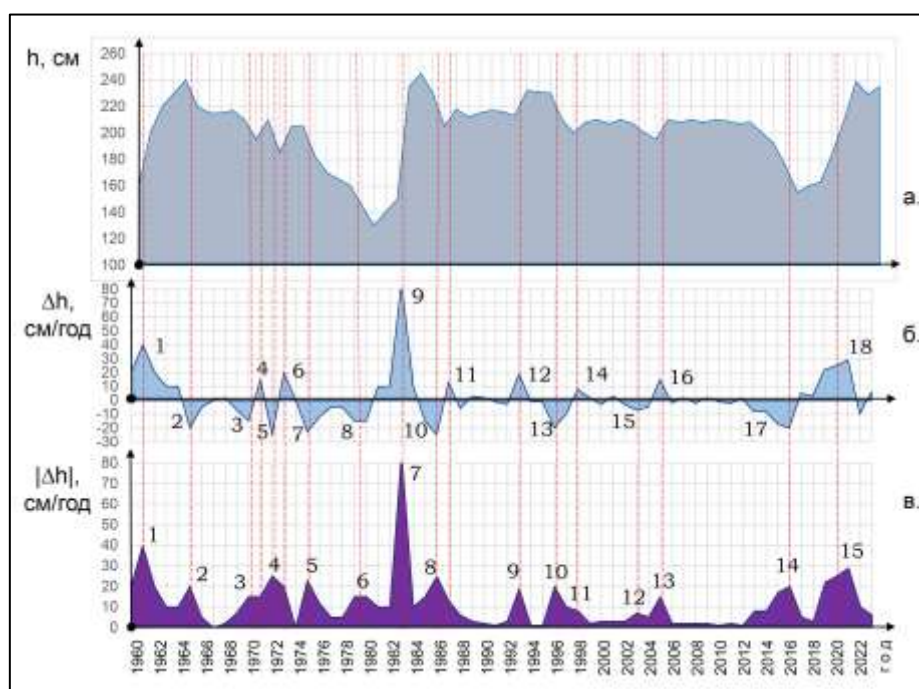


Рис. 2. Характер изменения уровня водного зеркала в Байкале за период с 1960 по 2023 гг.: а. – среднегодовой уровень воды в озере, относительно нулевой отметки гидропоста в п. Байкал; б. – градиент уровня воды; в. – модуль градиента.

Fig. 2. The nature of changes in the level water mirror in Lake Baikal in the period from 1960 to 2023: а. – the average annual water level in the lake, relative to the zero mark of the hydropost in lake Baikal; б. – the gradient of the water level; в. – the modulus of the gradient.

На графике градиента выделяется 18 временных интервалов, когда за год уровень воды изменялся на 10 и более см. На графике модуля градиента таких интервалов выделяется 15, так как некоторые разнонаправленные колебания уровня по модулю объединяются в единые интервалы (см. рис. 2).

По данным базы Байкальского филиала «Единой геофизической службы РАН» были проведены расчеты параметров, характеризующих сейсмическую активность: количество сейсмических событий, классом 8.6 и выше

(N); количество сейсмических событий, классом 12 и выше ($N > 12$) – «сильные» события; суммарная годовая энергия сейсмических событий, классом 8.6 и выше ($E, Дж$); суммарная годовая энергия сейсмических событий, классом ниже 12 ($E < 12, Дж$) – «слабые» события (см. рис. 2). В расчет были включена вся территория Прибайкалья и Забайкалья, по которой публикуются данные Байкальским филиалом «Единой геофизической службы РАН».

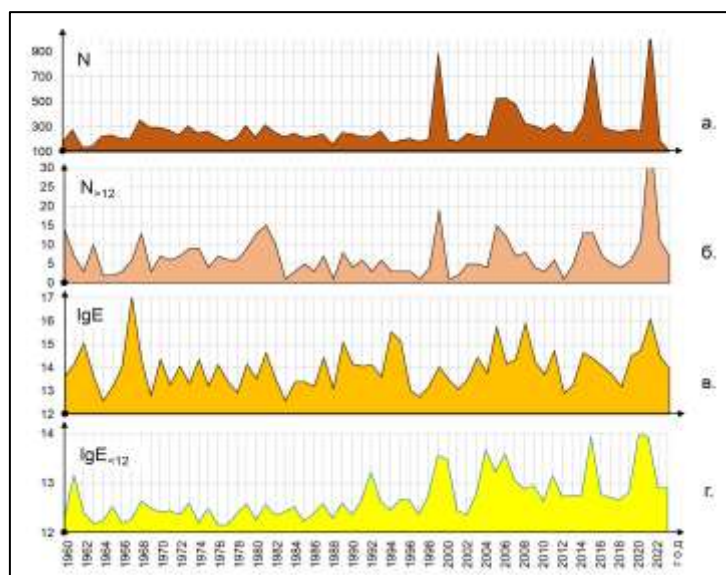


Рис. 3. Динамика сейсмической активности за период с 1960 по 2023 гг.: а. – количество сейсмических событий, классом 8.6 и выше; б. – количество сейсмических событий, классом 12 и выше; в. – суммарная годовая энергия сейсмических событий, классом 8.6 и выше; г. – суммарная годовая энергия сейсмических событий, классом ниже 12.

Fig. 3. Dynamics of seismic activity for the period from 1960 to 2023: а. – number of seismic events, class 8.6 and above; б. – number of seismic events, class 12 and above; в. – total annual energy of seismic events, class 8.6 and above; г. – total annual energy of seismic events, class below 12.

Расчет коэффициентов корреляции между параметрами, характеризующими сейсмичность Прибайкалья и динамику уровня

Байкала, показал отсутствие взаимосвязи между их абсолютными значениями (Харченко, 2008, с. 13) (рис. 4).

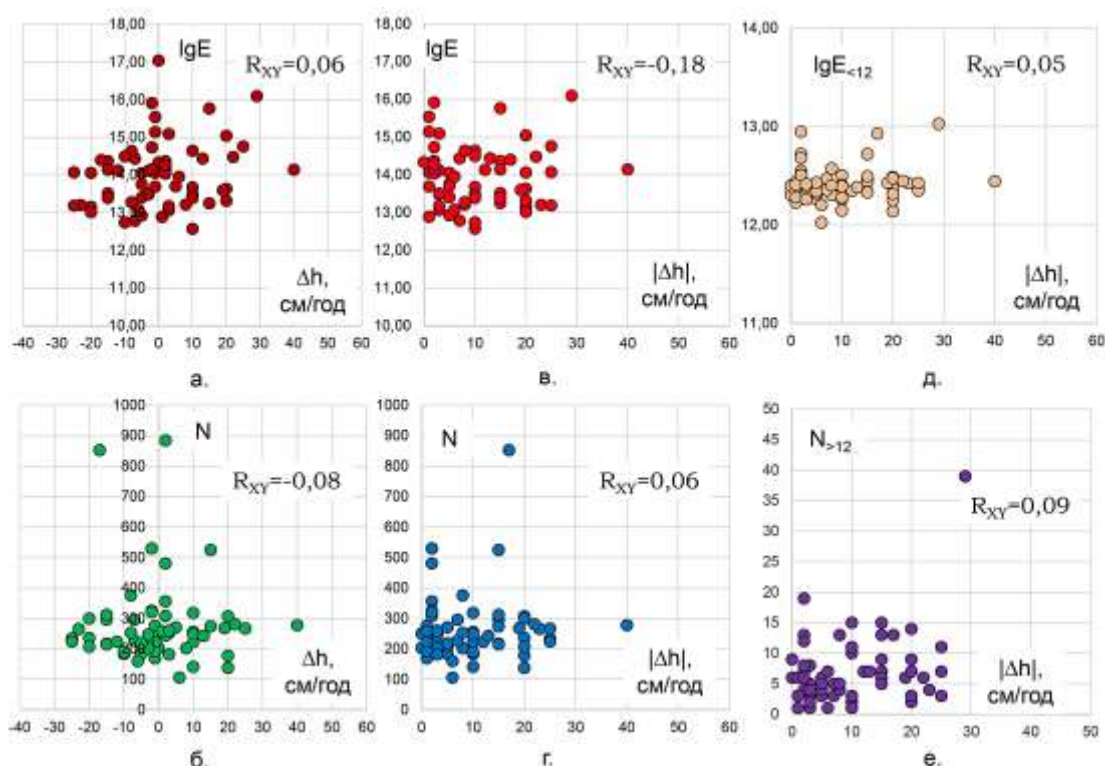


Рис. 4. Диаграммы рассеивания параметров, характеризующими сейсмичность Прибайкалья и динамику уровня Байкала. На каждой диаграмме указаны коэффициенты корреляции. Критическое значение при доверительной вероятности 0.95 % составляет 0.25.

Fig. 4. Dispersion diagrams of parameters characterizing the seismicity of the Baikal region and the dynamics of the Baikal level. Each chart shows the correlation coefficients. The critical value with a confidence probability of 0.95 % is 0.25.

Совместный анализ гидрологических и сейсмических параметров

Несмотря на то, что корреляционный анализ значений гидрологических и сейсмических параметров показал отсутствие статистических взаимосвязей между ними, анализ динамики аномальных «всплесков» данных свидетельствует об их схожести.

Сопоставление аномальных пиков в распределении анализируемых параметров выявило, что в большинстве случаев они происходили синхронно (рис. 5, 6). С учетом того, что анализировались значения осредненные для календарного года и последовавшие через несколько месяцев за изменением уровня

Байкала сейсмические события формально могли произойти в следующем году, сравнение аномальных пиков выполнялось в период 2 лет – год, соответствующий «всплеску» гидрологического параметра, плюс один. 15 эпизодам повышения $|\Delta h|$ соответствовало 15 локальных скачков количества сейсмических событий (N) и 14 – аномалий повышения годовой сейсмической энергии (E). При этом «всплесков» сейсмических параметров, которыми не сопутствовали (или не предшествовали) гидрологические за анализируемый период было 4 и 5, соответственно (рис. 5).

Сопоставление аномалий $|\Delta h|$ с количеством «сильных» событий ($N_{>12}$) и суммарной энергией «слабых» ($E_{<12}$) также показало повторяемость пиковых значений в 13 случаях.

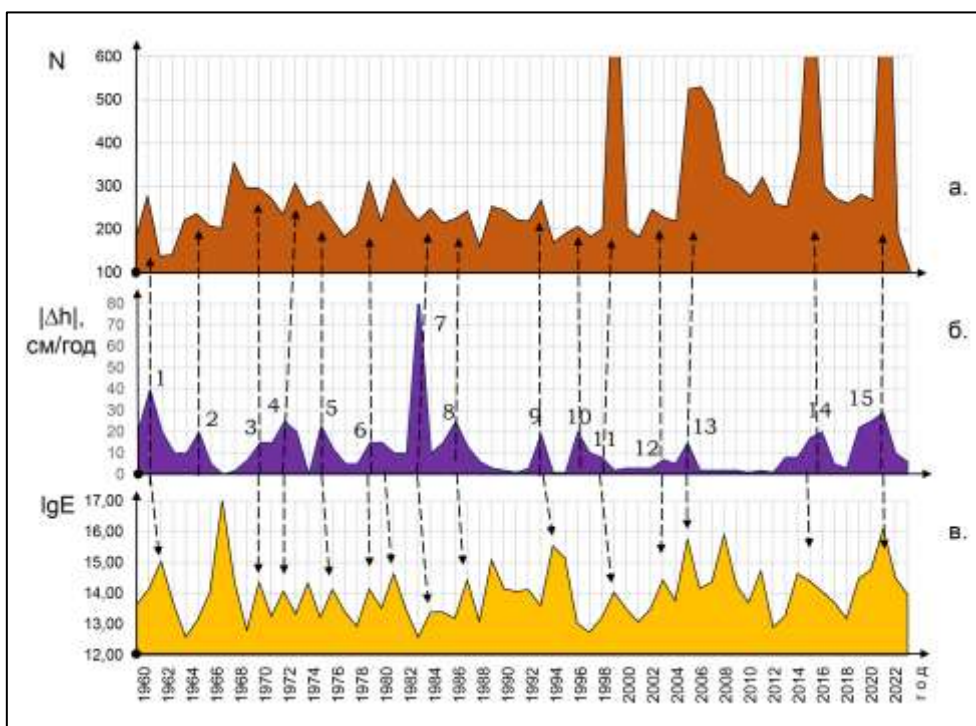


Рис. 5. Графики сейсмических (N – а, lgE – в) и гидрологических ($|\Delta h|$ – б) параметров для территории Прибайкалья, с указанием корреляции пиковых значений (пунктирные стрелки).

Fig. 5. Graphs of seismic (N – а, lgE – в) and hydrological ($|\Delta h|$ – б) parameters for the Baikal territory, indicating the correlation of peak values (dotted arrows).

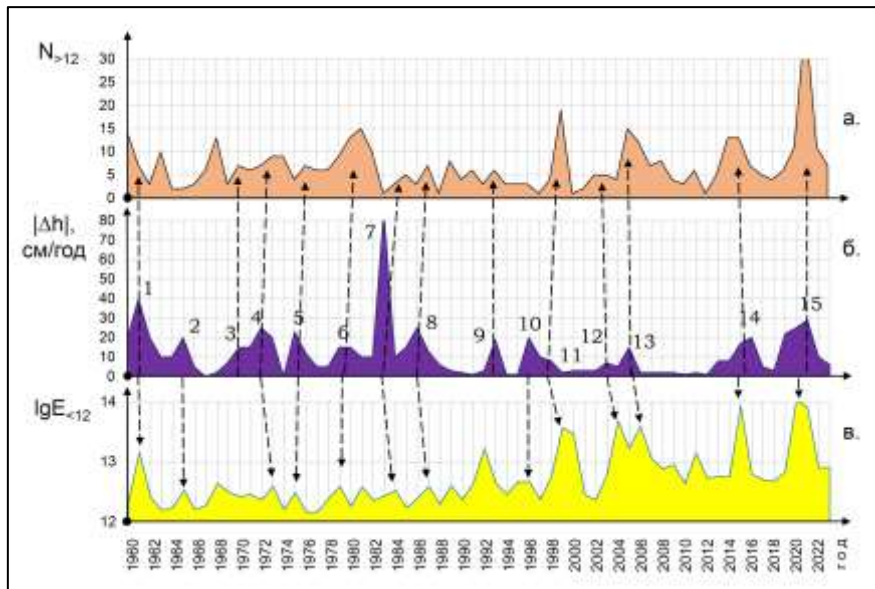


Рис. 6. Графики сейсмических ($N_{>12}$ – а, $lgE_{<12}$ – в) и гидрологических ($|\Delta h|$ – б) параметров для территории Прибайкалья, с указанием корреляции пиковых значений (пунктирные стрелки).

Fig. 6. Graphs of seismic ($N_{>12}$ – а, $lgE_{<12}$ – в) and hydrological ($|\Delta h|$ – б) parameters for the Baikal territory, indicating the correlation of peak values (dotted arrows).

При этом на диаграммах рассеивания гидрологических (Δh и $|\Delta h|$) и сейсмических (N и E) параметров облака пиковых значений не имеют значимой взаимосвязи (рис. 7). То есть, изменение уровня воды провоцирует сейсмическую активность, но сама величина

этой активности не связана со скоростью изменения уровня воды. Интересно то, что при понижении уровня воды высвобождающаяся сейсмическая энергия на порядок ниже энергии событий при повышении уровня воды (рис. 7в).

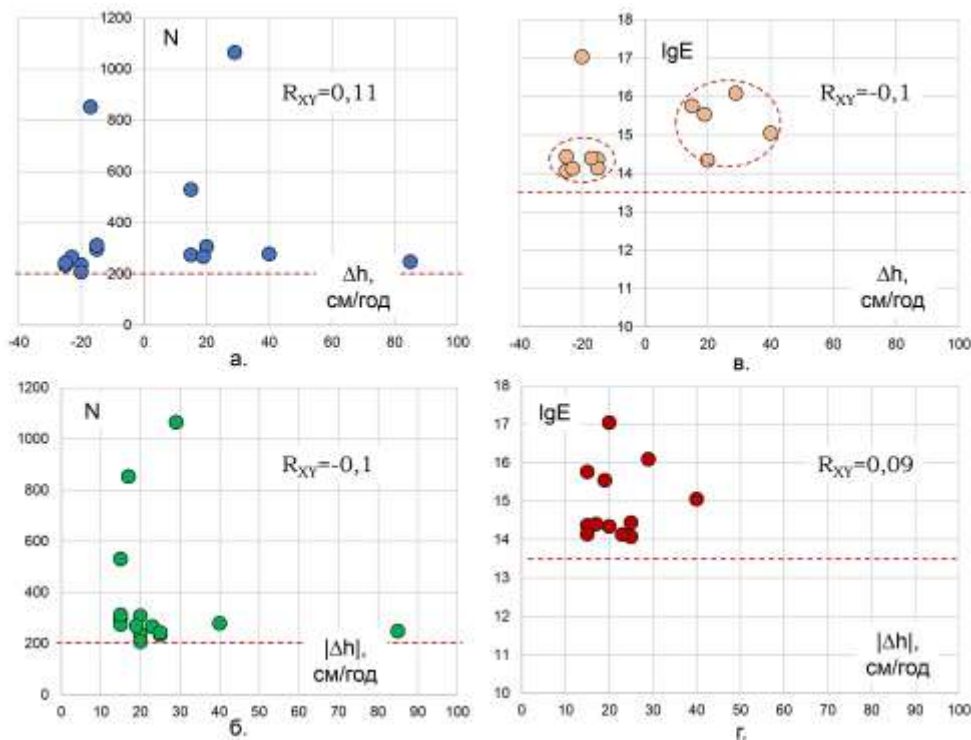


Рис. 7. Диаграммы рассеивания пиковых значений гидрологических (Δh и $|\Delta h|$) и сейсмических параметров (N и E). На каждой диаграмме указаны коэффициенты корреляции. Критическое значение при доверительной вероятности 0.95 % составляет 0.504. Красной пунктирной линией указан фоновый уровень сейсмических параметров.

Fig. 7. Dispersion diagrams of peak values of hydrological (Δh and $|\Delta h|$) and seismic parameters (N and E). Each chart shows the correlation coefficients. The critical value with a confidence probability of 0.95 % is 0.504. The red dotted line indicates the background level of seismic parameters.

Пространственное распространение эффектов

Во время представления работы на ежегодной научной конференции студентов и молодых ученых по наукам о земле геологического факультета ИГУ, профессором С.В. Рассказовым было высказано мнение о необходимости проанализировать насколько

пространственно широко проявляется описанный выше эффект на территории Байкальской рифтовой зоны (БРЗ).

Для решения этой задачи из базы данных о сейсмических событиях по Прибайкалью были сделаны 3 выборки: I – «Байкал» (озеро Байкал и территория непосредственно к нему примыкающая), II – «Север» (северо-восточная часть БРЗ), III – «Юг» (юго-западная часть БРЗ) (рис. 8).

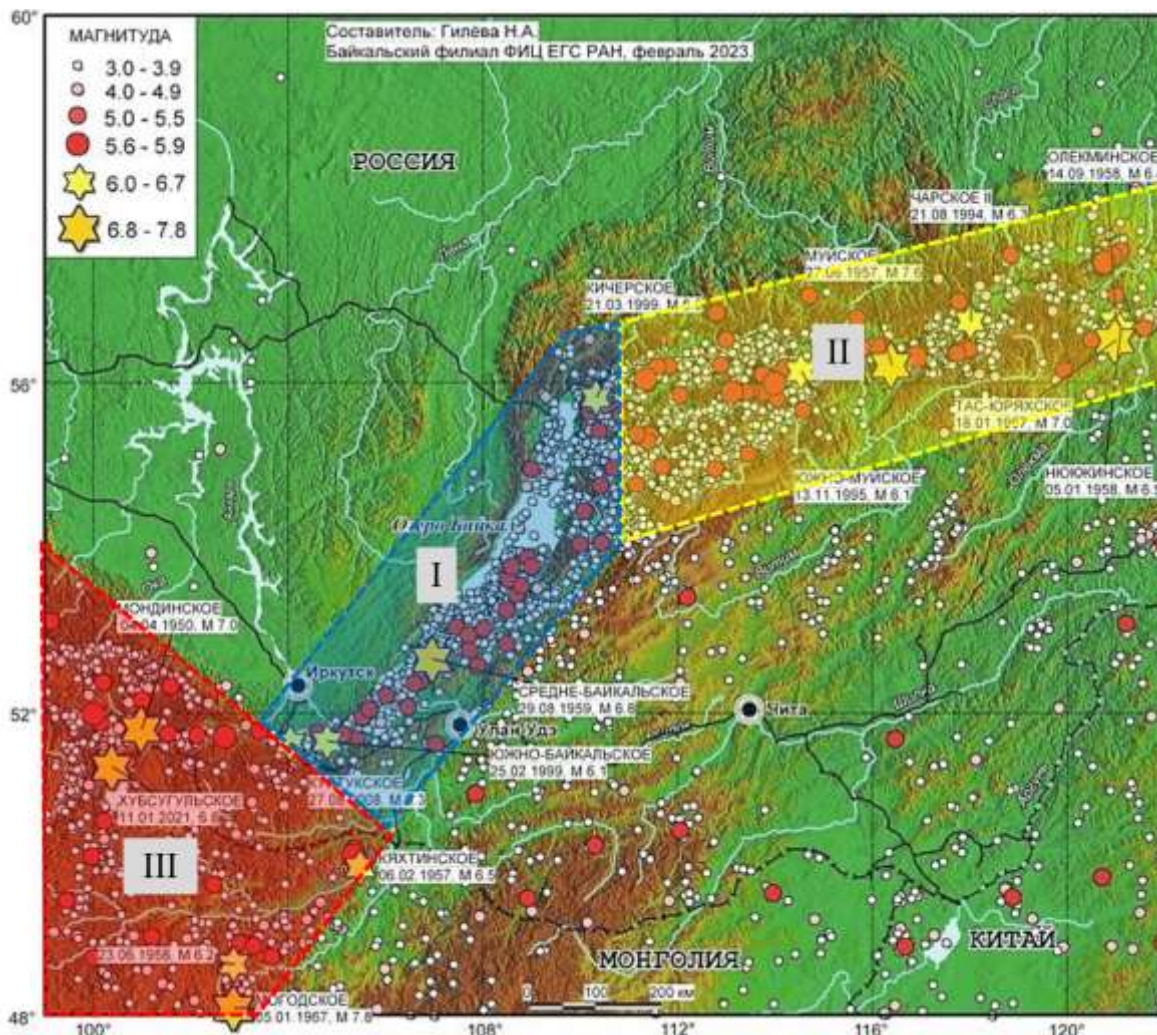


Рис. 8. Карта эпицентров землетрясений с магнитудой $M \geq 3$ территории Прибайкалья и Забайкалья за период 1950–2022 гг. (с сайта Байкальского филиала «Единой геофизической службы РАН»), с указанием площадей «Байкал», «Север» и «Юг».

Fig. 8. A map of earthquake epicenters with a magnetic magnitude of $M \geq 3$ in the Baikal and Trans-Baikal territories for the period 1950–2022 (from the website of the Baikal branch of the Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences), indicating the areas "Baikal", "North" and "South".

На рис. 9 показаны графики суммарной сейсмической энергии и количества сейсмических событий по годам за период с 1960 по 2023 гг. для всех трех полигонов.

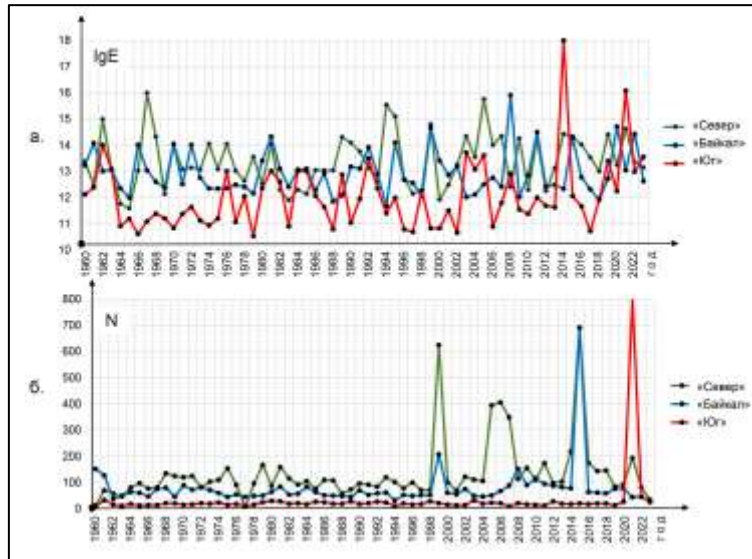


Рис. 9. Графики суммарной сейсмической энергии (а) и количества сейсмических событий (б) по годам за период с 1960 по 2023 гг. для площадей «Байкал», «Север» и «Юг».

Fig. 9. Graphs of total seismic energy (a) and the number of seismic events (б) by year for the period from 1960 to 2023 for the Baikal, North and South areas.

На рисунке 10 (а, б) приведены коэффициенты корреляции (R_{XY}) сейсмических параметров (N , E , $N_{>12}$ и $E_{<12}$) для площадей «Байкал», «Север» и «Юг». Полученные R_{XY} показывают, что несмотря на удаленность и особенности геологического строения площадей, сейсмические процессы имеют высокую схожесть. Так, например, значимая статистическая связь отмечается при сравнении: количества сейсмических событий для площадей «Байкал» и «Север» ($R_{XY}=0.68$),

суммарной энергии «слабых» событий для площадей «Север» и «Юг» ($R_{XY}=0.61$). А распределение количества «сильных» событий площади «Север» коррелируется с тем же параметром площадей «Байкал» ($R_{XY}=0.35$) и «Юг» ($R_{XY}=0.53$), при этом данные параметры самих полигонов («Байкал» и «Юг») находятся в обратной зависимости ($R_{XY}=-0.25$). Примеры значимых статистических взаимосвязей показаны в виде диаграмм рассеивания на рис. 10 (в, г).

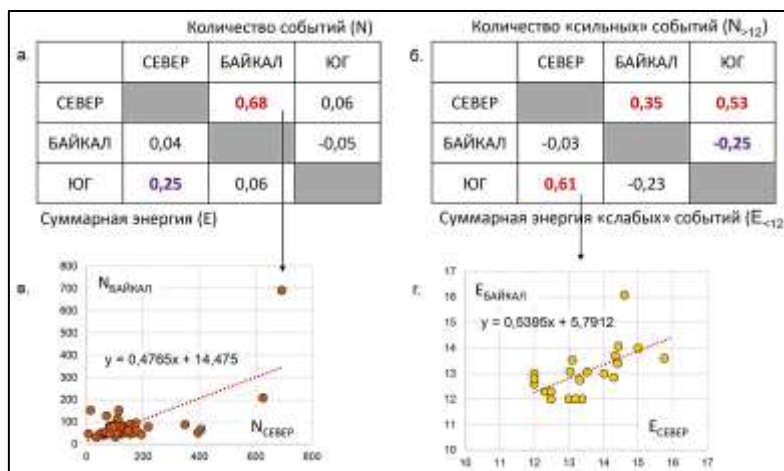


Рис. 10. Коэффициенты корреляции сейсмических параметров (N , E , $N_{>12}$ и $E_{<12}$) для площадей «Байкал», «Север» и «Юг» (а, б). Критическое значение при доверительной вероятности 0.95 % составляет 0.25. Красным цветом выделены значимые величины, фиолетовым – на уровне критического, черным – ниже критического. Внизу показаны диаграммы рассеивания значений годового количества событий для площадей «Север» и «Байкал» (в) и значений суммарной годовой энергии «слабых» событий (г). На диаграммах указан линейный тренд зависимостей и регрессионное уравнение.

Fig. 10. Correlation coefficients of seismic parameters (N, E, N12 and E12) for the Baikal, North and South areas (а, б). The critical value with a confidence probability of 0.95 % is 0.25. Significant values are highlighted in red, purple – at the critical level, black – below the critical level. The diagrams below show the dispersion of the values of the annual number of events for the "North" and "Baikal" areas (в) and the values of the total annual energy of "weak" events (г). The diagrams show a linear trend of dependencies and a regression equation.

Для всех трех площадей было проведено сопоставление аномальных интервалов гидрологического параметра ($|\Delta h|$) и сейсмических параметров (N , E , $N_{>12}$ и $E_{<12}$), подобно тому, как это было сделано для всей

территории БРЗ (рис. 5, 6). Рисунки 11, 12, 13, 14, 15, 16 иллюстрируют результаты этого анализа. Очевидно, что общая тенденция по полигонам такая же, как и для всей БРЗ, при этом каждый имеет свои особенности.

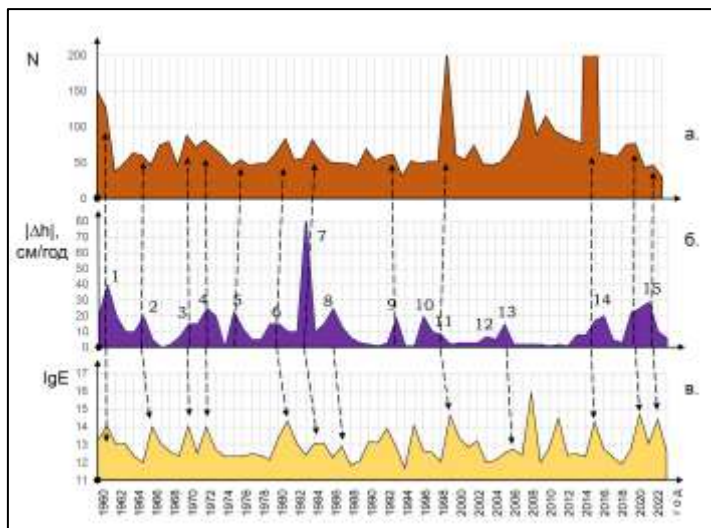


Рис. 11. Графики сейсмических (N – а, lgE – в) и гидрологических ($|\Delta h|$ – б) параметров для площади «Байкал», с указанием корреляции пиковых значений (пунктирные стрелки).

Fig. 11. Graphs of seismic (N – а, lgE – в) and hydrological ($|\Delta h|$ – б) parameters for the square «Baikal», indicating the correlation of peak values (dotted arrows).

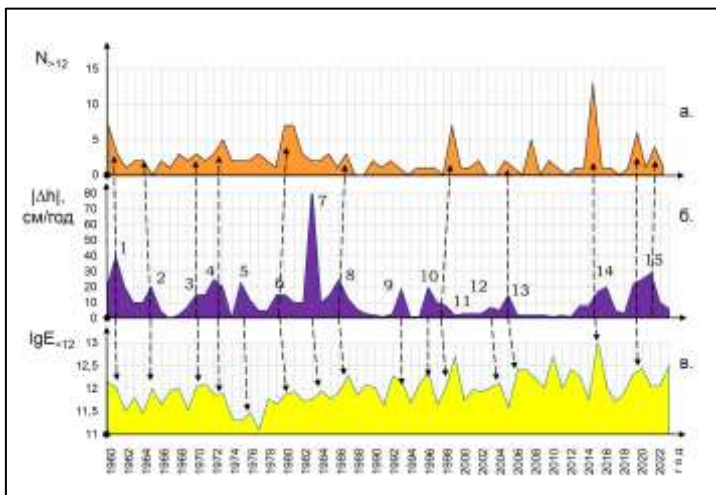


Рис. 12. Графики сейсмических ($N_{>12}$ – а, $lgE_{<12}$ – в) и гидрологических ($|\Delta h|$ – б) параметров для площади «Байкал», с указанием корреляции пиковых значений (пунктирные стрелки).

Fig. 12. Graphs of seismic ($N_{>12}$ – а, $lgE_{<12}$ – в) and hydrological ($|\Delta h|$ – б) parameters for the square «Baikal», indicating the correlation of peak values (dotted arrows).

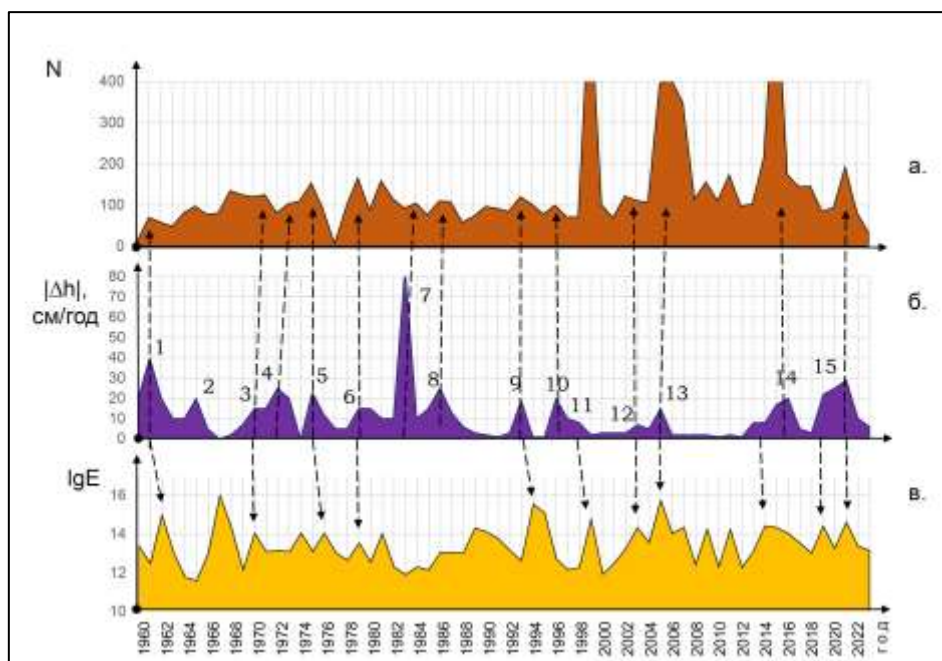


Рис. 13. Графики сейсмических (N – а, $\lg E$ – в) и гидрологических ($|\Delta h|$ – б) параметров для площади «Север», с указанием корреляции пиковых значений (пунктирные стрелки).

Fig. 13. Graphs of seismic (N – а, $\lg E$ – в) and hydrological ($|\Delta h|$ – б) parameters for the square «North», indicating the correlation of peak values (dotted arrows).

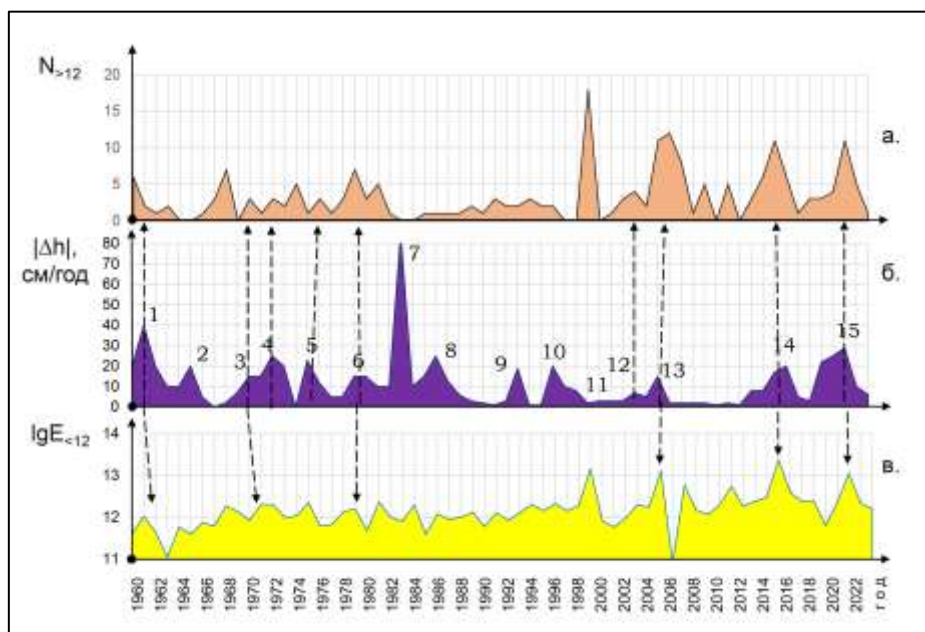


Рис. 14. Графики сейсмических ($N_{>12}$ – а, $\lg E_{<12}$ – в) и гидрологических ($|\Delta h|$ – б) параметров для площади «Север», с указанием корреляции пиковых значений (пунктирные стрелки).

Fig. 14. Graphs of seismic ($N_{>12}$ – а, $\lg E_{<12}$ – в) and hydrological ($|\Delta h|$ – б) parameters for the square «North», indicating the correlation of peak values (dotted arrows).

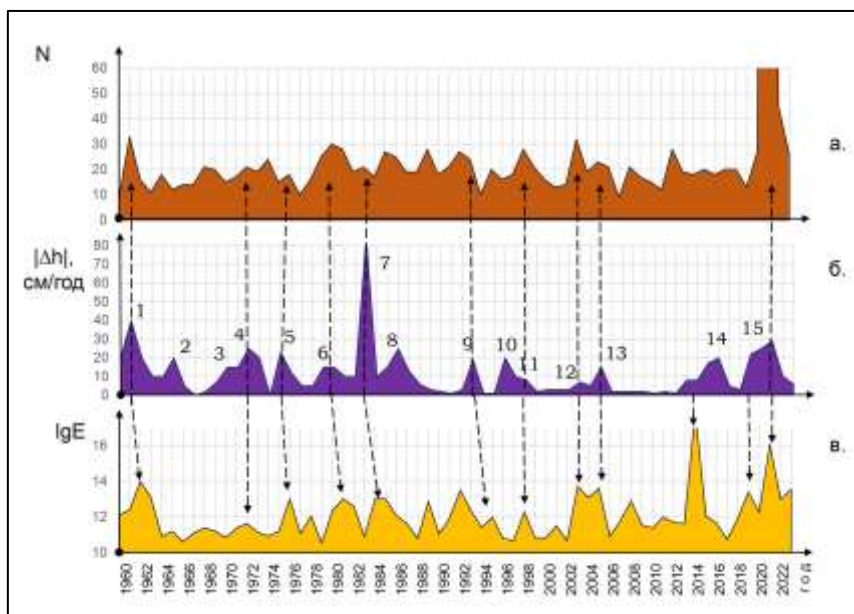


Рис. 15. Графики сейсмических (N – а, IgE – в) и гидрологических ($|\Delta h|$ – б) параметров для площади «Юг», с указанием корреляции пиковых значений (пунктирные стрелки).

Fig. 15. Graphs of seismic (N – а, IgE – в) and hydrological ($|\Delta h|$ – б) parameters for the square «South», indicating the correlation of peak values (dotted arrows).

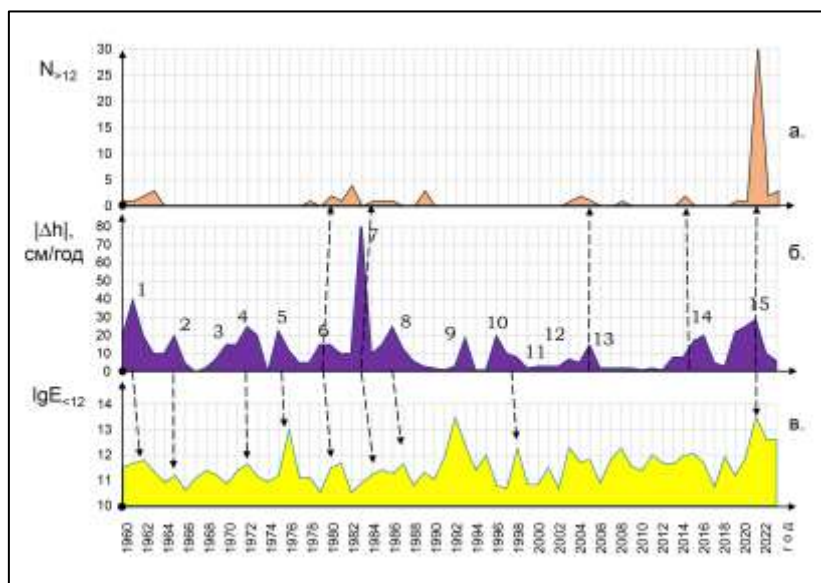


Рис. 16. Графики сейсмических ($N_{>12}$ – а, $IgE_{<12}$ – в) и гидрологических ($|\Delta h|$ – б) параметров для площади «Юг», с указанием корреляции пиковых значений (пунктирные стрелки).

Fig. 16. Graphs of seismic ($N_{>12}$ – а, $IgE_{<12}$ – в) and hydrological ($|\Delta h|$ – б) parameters for the square «South», indicating the correlation of peak values (dotted arrows).

Для того чтобы количественно сравнить полученные данные по площадям был использован ϕ -коэффициент сопряжённости Пирсона, который позволяет оценить взаимосвязь бинарных данных. (Харченко, 2008, с. 29–30) Вся последовательность значений гидрологических и сейсмических параметров

была преобразована в бинарную последовательность: локальный пик на графике – 1; остальные значения – 0. Расчет ϕ -коэффициента производился по формуле:

$$\phi = \frac{ad - bc}{\sqrt{(a + b)(c + d)(a + c)(b + d)}}$$

где, a – количество пар, имеющих значения 0-0; b – количество пар, имеющих значения 1-0; c – количество пар, имеющих значения 0-1; d – количество пар, имеющих значения 1-1.

В таблице 1 представлены результаты расчета ϕ -коэффициент сопряженности Пирсона модуля градиента уровня воды в Байкале ($|\Delta h|$) с сейсмическими параметрами (N , E , $N_{>12}$ и $E_{<12}$).

Т а б л и ц а 1

ϕ -коэффициент сопряженности Пирсона

Table 1

Pearson conjugacy coefficient

Сейсмический параметр	БРЗ	«Байкал»	«Север»	«Юг»
N	0.85	0.69	0.66	0.48
E	0.69	0.64	0.48	0.31
$N_{>12}$	0.8	0.52	0.52	0.64
$E_{<12}$	0.72	0.68	0.27	0.42

Из таблицы 1 видно, что на площади «Байкал», в целом, коррелируемость гидрологических и сейсмических параметров выше, чем у тех же характеристик полигонов «Север» и «Юг». При этом, площадь «Север» имеет высокую статистическую взаимосвязь $|\Delta h|$ с N , а полигон «Юг» – $|\Delta h|$ с $N_{>12}$. Самые низкие значения ϕ -коэффициента имеет сравнение $|\Delta h|$ с $E_{<12}$ для площади «Север» и E для полигона «Юг».

проявляются в сейсмических параметрах разных полигонов. За 64-летний анализируемый период выделяется: 4 временных отрезка, где изменения $|\Delta h|$ проявляются в сейсмических параметрах всех полигонов; 2 интервала, когда гидрологические изменения никак не проявлялись в сейсмичности полигона «Байкал»; 2 интервала, которые не проявлялись в сейсмичности полигонов «Север» и «Юг» (причем эти интервалы не совпадают с интервалами площади «Байкал»).

На рисунке 17 показано, как разновременные эпизоды повышения значений $|\Delta h|$

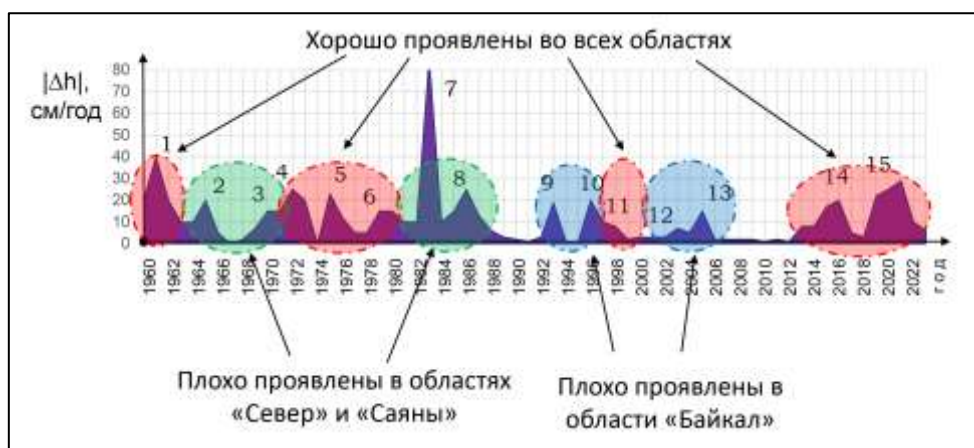


Рис. 17. График $|\Delta h|$, на котором выделены особенности проявления сейсмических параметров для площадок «Байкал», «Север» и «Юг».

Fig. 17. Graph $|\Delta h|$, which highlights the features of the manifestation of seismic parameters for the «Baikal», «North» and «South» squares.

Наибольшей сопряженностью гидрологических и сейсмических параметров (табл. 1) обладают суммарные данные по всей

территории БРЗ. Изменение уровня воды в Байкале проявляется в следующих вариантах:

- активизация сейсмической активности по всей территории Прибайкалья;
активизация сейсмической активности в одном либо двух полигонах, при этом аномальные сейсмические события на другом отсутствуют (например, может происходить активизация на площадях «Север» и «Юг», при этом полигон «Байкал» остается относительно спокойным).

Такой характер сейсмической активности соответствует предположению о триггерном характере воздействия изменений уровня озера. Аномалии изменения уровня воды вызывают сейсмическую активность на той территории, где произошло достаточное накопление сейсмической энергии. При этом «спусковым крючком» сейсмических событий гидрологические изменения могут стать при одновременном воздействии с другими факторами, например космическими.

Заключение

Проведенный статистический анализ гидрологических параметров озера Байкал позволил выделить 15 временных интервалов быстрого изменения среднегодового уровня воды. Сопоставление этих интервалов с пиками сейсмической активности в Прибайкалье показало, что её увеличение происходит синхронно выделенным аномальным интервалам модуля градиента, но при этом сама величина этой активности не связана с величиной амплитуды и скорости изменения уровня воды. Таким образом, можно предположить, что изменение уровня воды в Байкале является своеобразным триггером геологических процессов – наряду с геологическими и космическими, гидрологический фактор провоцирует увеличение количества и энергии сейсмических событий. В ходе статистического анализа отмечено, что при понижении уровня воды высвобождающаяся сейсмическая энергия на порядок ниже, чем при повышении.

Сравнение сейсмической активности в юго-западной, центральной и северо-восточной части БРЗ показало общую схожесть процессов. Значимая статистическая связь отмечается у количества сейсмических событий для площадей «Байкал» и «Север», у

суммарной энергии «слабых» событий для площадей «Север» и «Юг» ($R_{XY}=0.61$). Количество «сильных» событий площади «Север» коррелируется с тем же параметром для площадей «Байкал» и «Юг».

Сравнение сейсмической активности и характера изменения уровня воды в Байкале показало, что их взаимосвязь для разных полигонов проявляется по-разному. В одних случаях, аномалии модуля градиента могут вызывать активизацию сейсмической активности по всей территории БРЗ, в других – только в одном (либо двух). За весь 64-летний анализируемый период было 4 временных отрезка, когда на изменения $|\Delta h|$ реагировала сейсмическая активность всех полигонов; 2 интервала, когда на гидрологические изменения никак не реагировал полигон «Байкал»; и 2 интервала, когда сейсмичность полигонов «Север» и «Юг» «проигнорировала» аномалии $|\Delta h|$. Наибольшей сопряженностью гидрологических и сейсмических параметров обладают суммарные данные по всей БРЗ.

Выявленные закономерности носят статистический и гипотетический характер и требуют дальнейшего изучения. В рамках исследования проходило осреднение данных с интервалом в 1 год, что, как выяснилось, является достаточно «грубой» аппроксимацией. В дальнейшем, необходимо провести анализ уменьшив интервал осреднения до 1 месяца. В этом есть смысл, так как годовой ход уровня воды в Байкале достаточно велик – в среднем 80–90 см (в редких случаях до 140 см), при этом среднемесячная амплитуда градиента изменяется от 0 до 30 см/мес.

Литература

- Байкал. Атлас. М.: Федеральная служба геодезии и картографии России, 1993, 160 с.
- Байкальский филиал ФГБУН ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН». URL: <http://seisbukl.ru/> (дата обращения: 28.01.2025)
- Куроленко А.А., Снопков С.В. Хубсугульское землетрясение 2021 года // Вестник Иркутского университета / ФГБОУ ВО «ИГУ». Иркутск: Издательство ИГУ, 2021. Вып. 24. С. 48–50.
- Снопков С.В., Куроленко А.А. Хубсугульское землетрясение 12 января 2021 г. и афтершоки: электрохимические отклики подземных вод юго-

западного побережья Байкала // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 172–180.

Уровень воды в Байкале (пос. Байкал) сегодня. URL: <https://allrivers.info/gauge/baykal> (дата обращения: 28.01.2025)

Харченко М.А. Корреляционный анализ. Учебное пособие для ВУЗов. Воронеж: Издательско-полиграфический центр ВГУ, 2008. 30 с.

References

Baikal. Atlas. Moscow: Federal Service of Geodesy and Cartography of Russia, 1993, 160 p.

Baikal branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences". URL: <http://seis-bykl.ru/> (date of access: 28.01.2025)

Снопков Сергей Викторович,

*кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
664003, Россия, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Иркутский государственный университет,
доцент,*

664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 91,

*Сибирская школа геонаук, Иркутский национальный исследовательский технический университет,
научный сотрудник,*

email: snopkov_serg@mail.ru

Snopkov Sergey Viktorovich,

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor,

Karl Marx st., 1, Irkutsk, 664003, Russia,

Irkutsk State University,

Associate Professor,

91 Lermontov st., Irkutsk, 664033, Russia,

Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University,

Researcher,

email: snopkov_serg@mail.ru

Куроленко Анатолий Александрович,

664003, Россия, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,

Иркутский государственный университет,

магистрант,

email: kurolenko.01@mail.ru

Kurolenko Anatoly Aleksandrovich,

1 Karl Marx st., Irkutsk, 664003, Russia,

Irkutsk State University,

Master's student at IGU,

email: kurolenko.01@mail.ru

Kurolenko A.A., Snopkov S.V. The Khubsugul earthquake of 2021 // Bulletin of Irkutsk University / IGU Federal State Budgetary Educational Institution. Irkutsk: IGU Publishing House, 2021, Vol. 24. P. 48–50.

Snopkov S.V., Kurolenko A.A. The Khubsugul earthquake on January 12, 2021 and aftershocks: electrochemical responses of groundwater on the southwestern coast of Lake Baikal // Geology and the environment. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 172–180. DOI 10.26516/2541-9641.2023.1.172. EDN: HZVDAG

The water level in Lake Baikal (Baikal village) today. URL: <https://allrivers.info/gauge/baykal> (date of access: 28.01.2025)

Kharchenko M.A. Correlation analysis. Textbook for universities. Voronezh: VSU Publishing and Printing Center, 2008. 30 p.

Мониторинг подземных вод берега Байкала в режиме реального времени: основной контролирующий фактор возмущений ОВП магнитными бурями в начале 2025 г.

С.В. Рассказов^{1,2}, И.А. Асламов³, С.В. Снопков^{2,4}, В.И. Архипенко³, А.М. Ильясова¹
Е.П. Чебыкин^{1,3}

¹Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

³Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Приводятся результаты мониторинга в режиме реального времени с января до начала марта 2025 г окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) в подземных водах двух скважин Култукского полигона на берегу Байкала. Выявляется основной контролирующий фактор возмущений ОВП магнитными бурями с запаздыванием относительно них. Делается вывод о разном характере соотношений ОВП с землетрясениями и с лунно-солнечными приливами, и об изменении условий проявления этих процессов в 2025 г. по сравнению с 2024 г.

Ключевые слова: подземные воды, мониторинг, окислительно-восстановительный потенциал, землетрясения, Байкал

Real-Time Monitoring of Redox Potential in Groundwater from the Baikal Coast: The Main Controlling Factor of ORP Disturbances by Magnetic Storms in Early 2025

S.V. Rasskazov^{1,2}, I.A. Aslamov³, S.V. Snopkov^{2,4}, V.I. Archipenko³, A.M. Ilyasova¹, E.P. Chebykin^{1,3}

¹Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

³Limnological Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia

⁴Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Results of real-time monitoring from January to early March 2025 of the oxidation-reduction potential (ORP) in groundwater from two wells of the Kultuk area on the shore of Lake Baikal are presented. The main controlling factor of disturbances of the ORP by magnetic storms with a delay relative to them is substantiated. It is inferred that the nature of the ORP relationships with earthquakes

Статья получена: 14.02.2025; исправлена: 24.02.2025; принята: 28.03.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рассказов С.В., Асламов И.А., Снопков С.В., Архипенко В.И., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П. Мониторинг подземных вод берега Байкала в режиме реального времени: основной контролирующий фактор возмущений ОВП магнитными бурями в начале 2025 г. // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 1. С. 114-128. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.114. EDN: [DFPEBC](#)

Article received: 14.02.2025; corrected: 24.02.2025; accepted: 28.03.2025.

FOR CITATION: Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Snopkov S.V., Arkhipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. Real-Time Monitoring of Redox Potential in Groundwater from the Baikal Coast: The Main Controlling Factor of ORP Disturbances by Magnetic Storms in Early 2025 // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 114-128 DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.114. EDN: [DFPEBC](#)

and lunar-solar tides are different and that the conditions for displaying these processes in 2025 have changed compared to 2024.

Keywords: groundwater, monitoring, redox potential, earthquakes, Baikal

Введение

Сенсоры, измеряющие окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), рН и температуру подземных вод в режиме реального времени (измерения через 2 минуты), были установлены на берегу западной оконечности Байкала в начале декабря 2023 г. в двух скважинах (ст. 9 и 184). Зонды были установлены на расстоянии 1624 м друг от друга: ст. 9 – в зоне активного Обручевского разлома, по

которому ложе Южно-Байкальской впадины опущено в позднем кайнозое приблизительно на 4 км, ст. 184 – на торцовой Култукской тектонической ступени Южно-Байкальской впадины, наклоненной к востоку, в сторону Байкала (рис. 1). На ст. 9 сенсор находится приблизительно на уровне зеркала Байкала, на ст. 184 – на 18 м выше уровня Байкала. Подробная характеристика приборов и условия их установки приведены в работе (Рассказов и др., 2023).

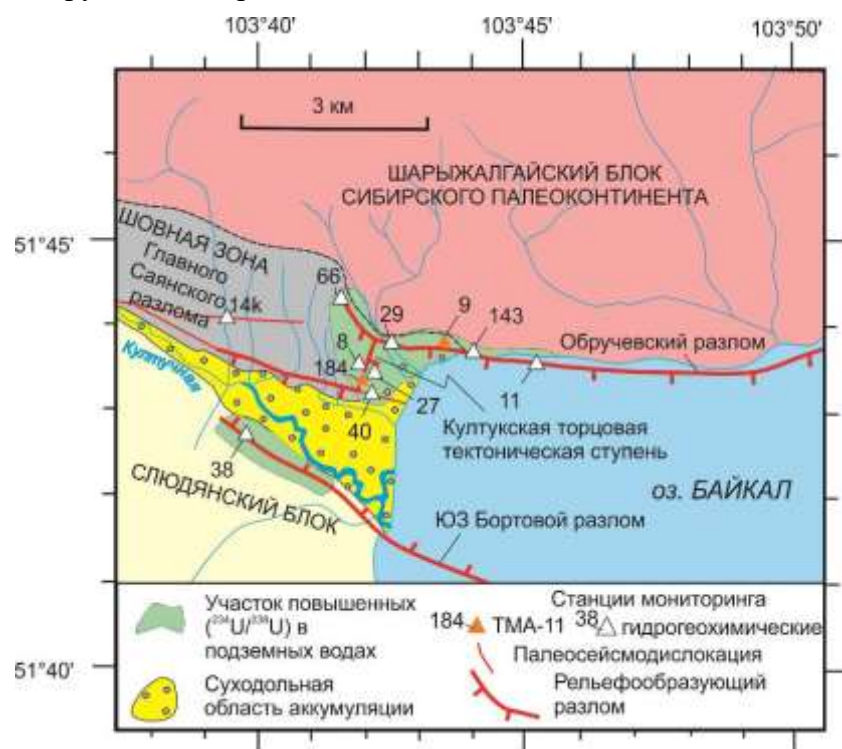


Рис. 1. Схематическая карта расположения станций мониторинга в режиме реального времени относительно активных разломов и станций гидрогеохимического мониторинга на западном побережье оз. Байкал (Култукский полигон). Палеосейсмодислокации шовной зоны Главного Саянского разлома (ГСР) показаны по работе (Чипизубов, Смекалин, 1999).

Fig. 1. Schematic map of the location of real-time monitoring stations relative to active faults and hydrogeochemical monitoring stations on the western coast of Lake Baikal (Kultuk area). Paleoseismic dislocations of the suture zone in the Main Sayan Fault (ГСР) are shown after (Chipizubov, Smekalin, 1999).

Вода скважин каждый день обновляется короткими прокачками. Кроме того, на ст. 9 раз в неделю прокачка интенсифицируется. Благодаря такому режиму эксплуатации скважин измеряются параметры вод, активно циркулирующих в верхней части коры.

За время наблюдений, продолжающихся более года, зарегистрированы сильные сигналы ОВП, связанные с разрушением ледового покрова на Байкале, с приходом магнитных бурь, с проявлением лунно-солнечных приливов и с ходом сейсмической активности в коре центральной части Байкальской

рифтовой системы (БРС) (Асламов и др., 2024; Рассказов и др., 2024; Снопков и др., 2024; Чебыкин и др., 2024).

Основная задача мониторинга – выявлять закономерности изменений ОВП в зависимости от протекающих (в том числе, опасных) природных явлений и использовать эти закономерности для их своевременного предупреждения. В процессе мониторинга представляется важным реагировать на любые сигналы ОВП, выяснять их причину в начале

проявления и выстраивать текущий прогноз развития природного процесса, производящего сигналы.

В январе и феврале 2025 г. ОВП ст. 9 характеризуется режимом без видимых закономерностей, но в начале марта проявляется некоторый порядок. Цель настоящей работы – определить характер и причины возмущений этого параметра с января до начала марта, чтобы в дальнейшем отследить возмущения ОВП с элементами прогноза.

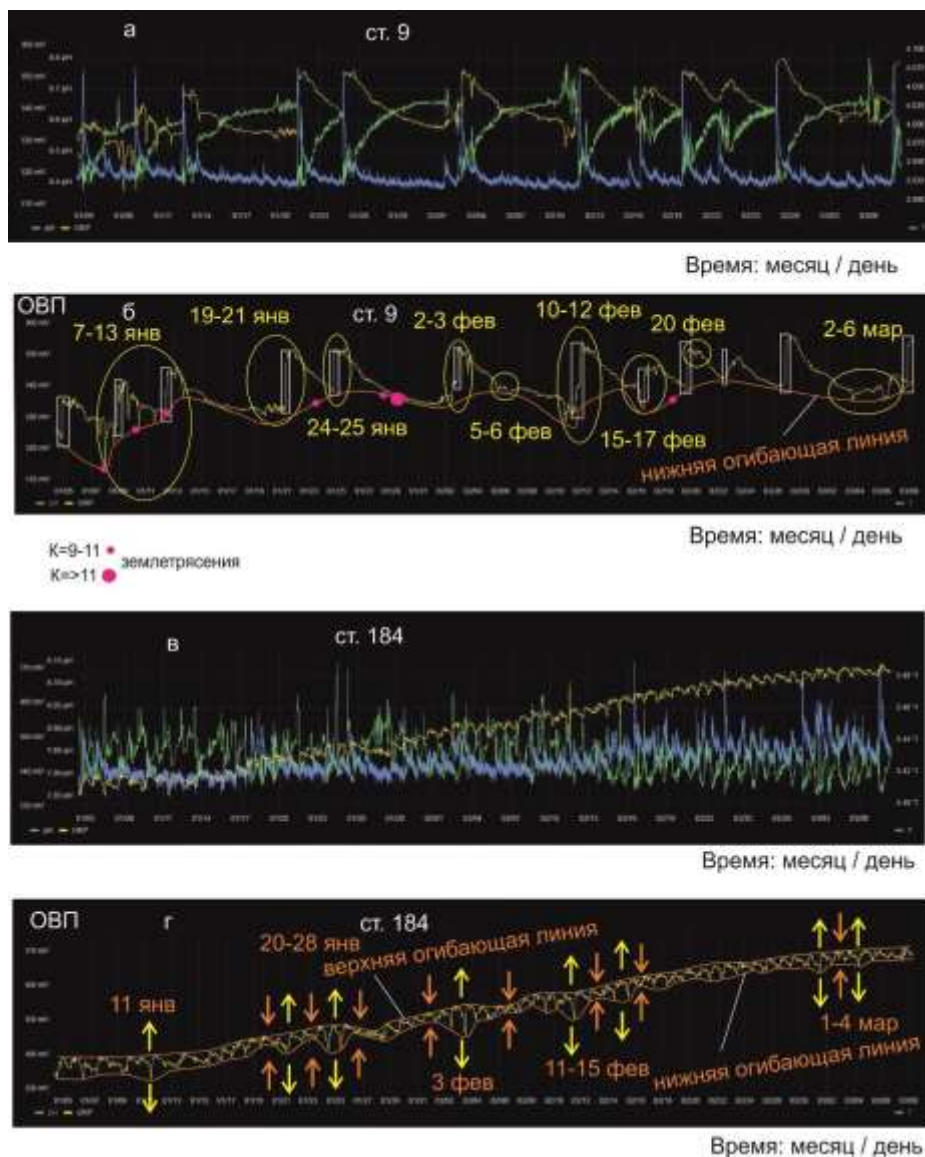


Рис. 2. Графики наблюдений в январе, феврале и начале марта 2025 г.: а – ОВП, рН и температуры подземных вод ст. 9; б – ОВП ст. 9; в – ОВП, рН и температуры подземных вод ст. 184; г – ОВП ст. 184. С течением времени, существенное поднятие ОВП ст. 184 на панелях в и г сопровождается слабым возрастанием температуры и снижением рН на панели в. Здесь и далее все данные приводятся по Иркутскому времени (опережает время по Гринвичу на 8 ч). Землетрясения приводятся по данным сайта (Карта..., 2025).

Fig. 2. Observation graphs in January, February, and early March 2025: *a* – ORP, pH, and temperature of groundwater at station 9; *b* – ORP at station 9; *c* – ORP, pH and temperature of groundwater at station 184; *d* – ORP at station 184. Over time, a significant increase in ORP at station 184 in panels *c* and *d* is accompanied by a slight increase in temperature and a decrease in pH in panel *c*. From here on, all data are given in Irkutsk time (8 hours ahead of Greenwich Mean Time). Data on earthquakes are taken from the website (Map..., 2025).

Возмущения ОВП в январе – феврале 2025 г.

Непрерывная серия возмущений отслеживается с 7-го января (начало в 13 ч 26 мин) до 13-го января (окончание в 18 ч 10 мин). Серия продолжается 6 дней 5 ч. и слегка нарушается двумя прокачками скважины, вызывающими резкое повышение значений ОВП. Тем не менее, сильные природные наложенные сигналы имеют резкое выражение на графике в виде минимумов (рис. 26).

Следующие две серии откликов ОВП имели место 19–21-го и 24–25-го января. Нестабильность первого эпизода начинается 19-го января в 7 ч 18 мин и завершается около полуночи с 21-го на 22-е января. Нестабильность второго эпизода начинается 24 января в 10 ч 18 мин и завершается 25-го января в 17 ч 52 мин. Общая продолжительность двух эпизодов (6 дней и 10 ч), включая интервал между ними без возмущений, сопоставим с продолжительностью возмущений 7–13-го января. Эпизоды сочетаются во времени с эффектами двух прокачек скважин. Возмущения ОВП 19–25-го января отделяются от возмущений 7–13-го января интервалом без возмущений продолжительностью 5 дней 15 ч. После 25 января интервал без заметных колебаний ОВП длится до 1 февраля. В феврале определяется 5 эпизодов возмущения ОВП подземных вод ст. 9: 2–3-го, 5–6-го, 10–12-го, 15–17-го и 20-го февраля.

В подземных водах ст. 184 с течение времени наблюдается существенное поднятие ОВП, сопровождающееся слабым возрастанием температуры и снижением рН. Возрастание ОВП описывает плавная верхняя огибающая линия. Более изменчивая нижняя огибающая линия обуславливает схождение и расхождение верхней и нижней огибающих линий ОВП. Расхождения имеют место 11-го, 20–28-го января, 3-го, 11–15-го февраля и 1–4-го марта. Эти аномалии подземных вод ст. 184, по крайней мере, частично совпадают по

времени с возмущениями ОВП в подземных водах ст. 9.

Последовательное усиление ОВП-импульсов 1–8 марта 2025 г.

В начале марта проявляется последовательное усиление возмущений ОВП подземных вод ст. 9. С 1 по 8 марта наблюдаются три возмущения: 2-го, 3–4-го и 5–6-го марта (рис. 36). Первое из них было слабым. Оно началось в 12 ч 46 мин (ОВП=342 мВт) с выходом на минимум ОВП в 14 ч 08 мин (ОВП=340 мВт) с последующей релаксацией. Второе возмущение было сильнее: началось 3 марта в 17 ч 42 мин (ОВП=339 мВт) и вышло на минимум ОВП в 19 ч 32 мин (ОВП=336 мВт). Эта нестабильность завершилась 4 марта в 09 ч 20 мин. Третье возмущение ОВП проявилось еще сильнее. Оно началось 5 марта в 08 ч 12 мин (ОВП=339 мВт) и после продолжительных колебаний вышло на минимум 06 марта в 00 ч 52 мин (ОВП=336 мВт). Низкие значения ОВП сохранялись до 09 ч 34 мин. После поднятия до значения ОВП=343 мВт, последовал еще один минимум в 15 ч 44 мин (ОВП=340 мВт) с последующим выходом на плато без заметных колебаний.

Возмущения ОВП 2-го и 3–4-го марта не сопровождалось изменениями рН и температуры, тогда как более сильное возмущение ОВП 5–6-го марта ассоциировалось с колебаниями рН с выходом этого параметра на максимум (заметных изменений температуры не наблюдается). Следовательно, два предшествующих эпизода возмущений ОВП можно считать как предваряющие событие, произошедшее 5–6-го марта. Включение режима прокачки 7 марта с 20 ч 00 мин до 21 ч 20 мин сопровождается понижением рН и возрастанием температуры (рис. 3а). Сигналы прокачки как артефакты явно отличаются от природных сигналов ОВП, проявившихся со 2-го до 6-го марта.

На ст. 184 широкие колебания параметров подземных вод вызывает дневная прокачка

скважины (рис. 3в). В период с 1 по 8 марта намечаются интервалы сближения и расхождения верхней и нижней огибающих линий.

Линии расходятся 4 марта, а затем сближаются между собой (рис. 3г).

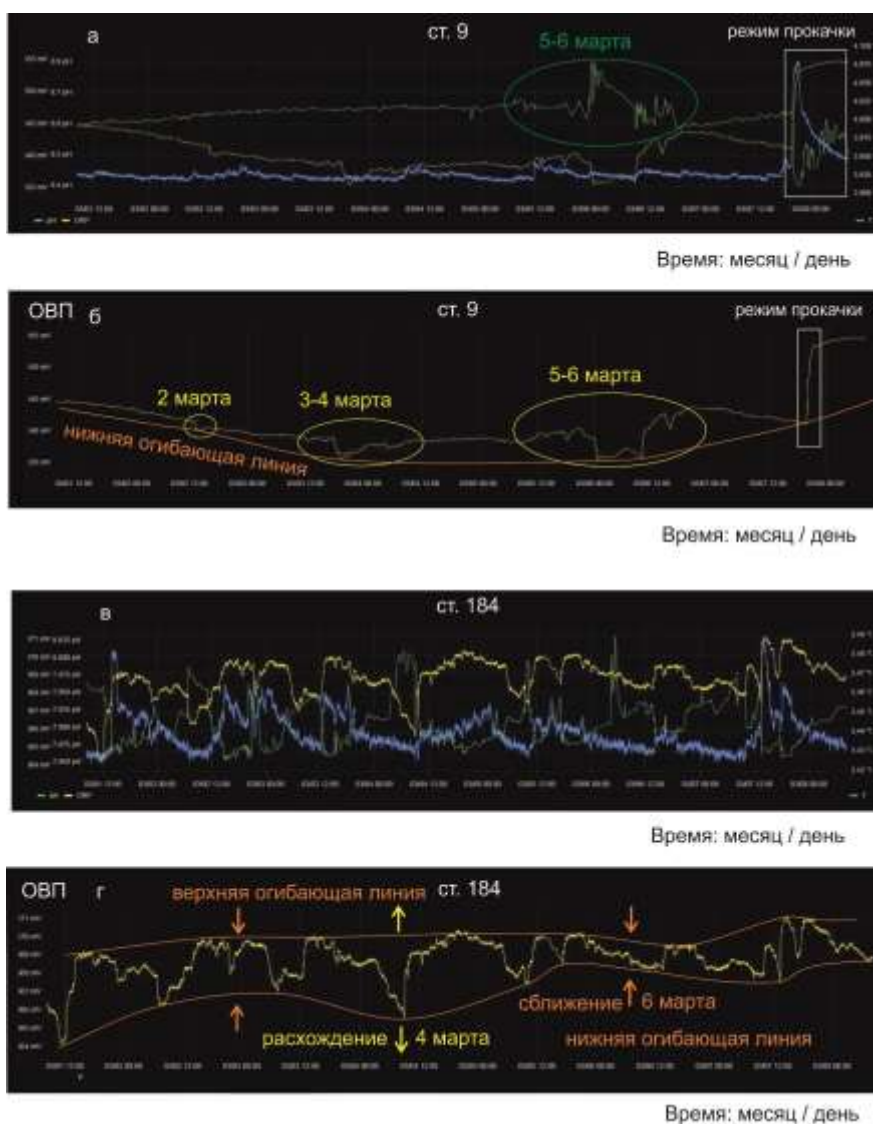


Рис. 3. Графики наблюдений 1–8 марта 2025 г.: *а* – ОВП, рН и температуры подземных вод ст. 9; *б* – ОВП ст. 9; *в* – ОВП, рН и температуры подземных вод ст. 184; *г* – ОВП ст. 184. Последовательному усилению возмущений ОВП ст. 9 на панели *б* соответствует расхождение и сближение огибающих линий на панели *г*.

Fig. 3. Graphs of observations for March 1–8, 2025: *a* – ORP, pH, and temperatures of groundwater at station 9; *b* – ORP at station 9; *v* – ORP, pH, and temperatures of groundwater at station 184; *z* – ORP at station 184. The consistent increase in ORP disturbances at station 9 in panel *b* corresponds to the divergence and convergence of the envelope lines in panel *z*.

Обсуждение результатов

Предварительное замечание

2025-й год отличается от 2024-го года более теплой зимой. Лед сковал Байкал в районе Култукского полигона в 2024 г. около 15 января, а в 2025 г. – около 28 января. В 2025

г. на Байкале образовалось тонкое ледовое покрытие. Такое отличие может иметь отпечаток на результатах мониторинга подземных вод ст. 9, сенсор которой находится в скважине, приблизительно, на уровне зеркала оз. Байкал.

Регулярность ОВП-импульсов в начале 2024 г. как отражение лунно-солнечных

приливов и отсутствие регулярности в начале 2025 г.

Весьма выразительно регулярные отрицательные ОВП-импульсы в подземных водах ст. 9 проявляются с 07 февраля до 07 марта 2024 г. В каждом ОВП-импульсе вода резко получает порцию электронов. После достижения минимума наблюдается кривая релаксации сигнала с выходом на уровень плато. Предполагается, что 30-суточная активность импульс-генерирующего процесса февраля–марта 2024 г. регулируется квадратурными и сизигийными лунно-солнечными приливами (Снопков и др., 2024; Асламов и др., 2024).

С января до марта 2025 г. ОВП-импульсы с характерным строением (Снопков и др., 2024) отсутствуют. Импульс нарушения плавности кривой имеет характер возмущения, распадающегося на 2, 3 и более минимумов, объединяющихся в интервал от первых

часов до нескольких дней. В январе и феврале регулярность в ОВП-импульсах не наблюдается. Элемент упорядоченности воспринимается только в относительном нарастании продолжительности ОВП-эффектов в начале марта 2025 г.

Очевидно, что лунно-солнечные приливы отражаются в ОВП подземных вод ст. 9 с 07 февраля до 07 марта 2024 г. только как исключительный случай сочетания этого руководящего фактора с другими благоприятными обстоятельствами. В 2025 г. такого сочетания обстоятельств не было.

Возмущения ОВП подземных вод ст. 9 и магнитные бури

В конце 2023 г. выразительные минимумы ОВП проявляются в подземных водах ст. 9 в течение короткого временного интервала 22–24 декабря (рис. 4).

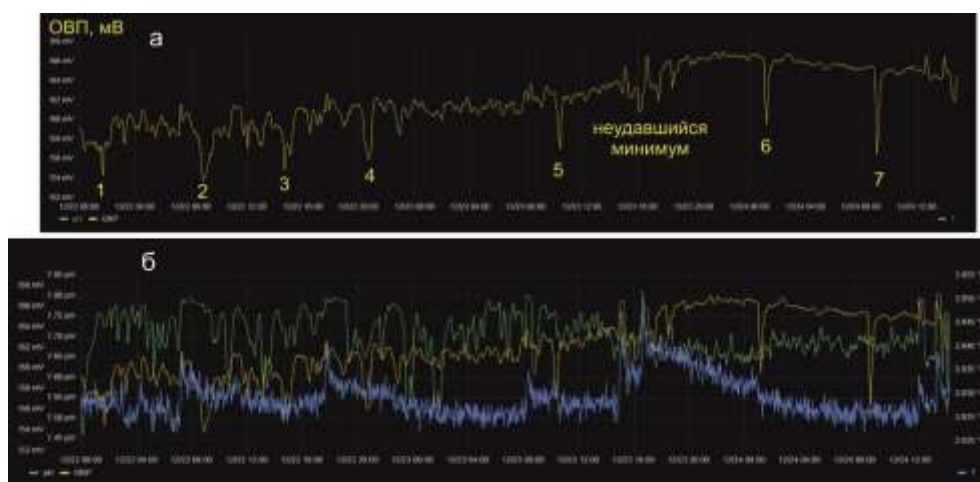


Рис. 4. Графики ОВП ст. 9 с 22 декабря 00:00 до 14:52 24 декабря 2023 г. (а) и сопоставление графиков ОВП, рН и температуры станции в этом же временном интервале (б). На панели а цифрами от 1 до 7 обозначены сравнительно глубокие минимумы.

Fig. 4. ORP graphs of station 9 from 00:00 on December 22 to 14:52 on December 24, 2023 (a) and those of comparison of ORP, pH, and temperature of the station in the same time interval (b). In panel a, numbers from 1 to 7 indicate relatively deep minima.

В интервале температурного перелома 22–23 декабря в воде ст. 9 проявляется 7 глубоких ОВП-минимумов через временные интервалы от 5 час. 46 мин. до 9 час. 32 мин. Эти ОВП-импульсы не согласуются с изменениями рН и температуры (см. рис. 4а,б). В последующее более теплое время декабря ОВП-минимумов не наблюдается.

Первые 4 ОВП-минимума 22 декабря со значениями 254–256 мВ разделены между собой сравнительно небольшими временными интервалами (от 5 час. 46 мин. до 7 час. 14 мин.). В промежутках между минимумами наблюдаются заметные фоновые колебания

значений ОВП. После события 4 (22 декабря, 20:44, 256 мВ) амплитуда фоновых колебаний сокращается приблизительно в 2 раза с выходом на минимум события 5 (23 декабря, 10:26, 257 мВ) через 13 час. 42 мин.

Между минимумами 5 и 7 фоновые колебания имеют еще более сокращенную амплитуду. В средней части интервала между этими минимумами амплитуда колебаний резко увеличивается. Здесь должен был проявиться следующий минимум, но вместо него наблюдается только слабое возмущение ОВП. Неудавшийся минимум связан либо с избыточной прокачкой скважины в это

время, отразившейся в возрастании температуры воды (рис. 4б), либо со снижением температуры и возрастанием давления атмосферы в районе Байкала. Без учета неудавшегося минимума пауза между ОВП-импульсами 5 и 6 составляет 14 час. 50 мин.

Далее, отчетливо выражены ОВП-импульсы 6 (24 декабря, 01:14, 260 мВ) и 7 (24 декабря, 09:10, 256 мВ) с паузой между ними, длившейся 7 ч. 56 мин. По наиболее слабым фоновым вариациям ОВП и значительным амплитудам (соответственно, 6 и 10 мВ) минимумы 6 и 7 имеют наибольшее сходство с февральскими ОВП-минимумами.

С одной стороны, в начале и середине декабря в пос. Култук долгое время стояла низкая температура воздуха. С 8 до 20 декабря дневная максимальная температура -24 – 33 °С сменялась минимальной ночной температурой -24 – 36 °С. С 21 декабря температура воздуха начала меняться в сторону потепления, а с 24 до 31 декабря выдерживалась более высокая температура: максимальная дневная -2 – 7 °С и минимальная ночная -6 – 10 °С (рис. 5). С другой стороны, серия ОВП-импульсов 22–24 декабря 2023 г. запаздывает относительно серии магнитных бурь, продолжавшихся с 12-го до 20-го декабря 2023 г. (рис. 6).

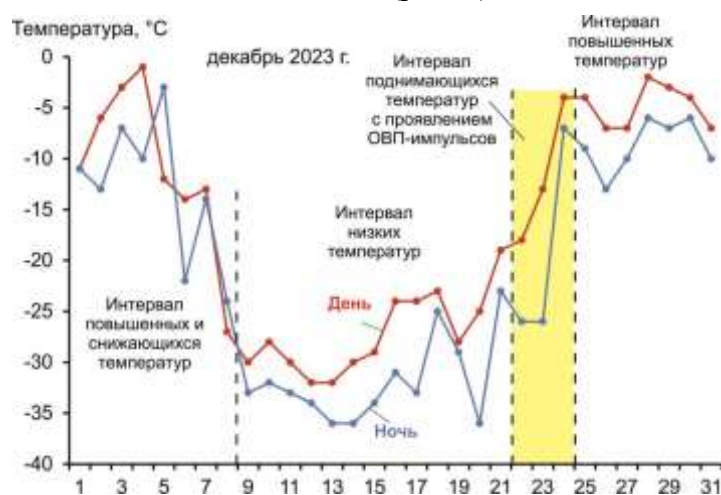


Рис. 5. Интервал проявления ОВП-импульсов в подземных водах ст. 9 (22–24 декабря) на графике изменения температуры воздуха в декабре 2023 г. в районе Култук (температура по данным сайта World Weather <https://world-weather.ru/pogoda/russia/kultuk/february-2024/>).

Fig. 5. The interval of ORP pulses displaying in groundwater at station 9 (December 22–24) on the graph of air temperature changes in December 2023 in the Kultuk area (temperature according to the World Weather website



Рис. 6. График запаздывания ОВП подземных вод ст. 9 относительно магнитных бурь 22–24 декабря 2023 г. (запаздывание показано желтой стрелкой). Данные по магнитным бурям с сайта: https://xras.ru/magnetic_storms.html.

Fig. 6. Graph of the delay of the redox potential of groundwater at station 9 relative to the magnetic storms of December 22–24, 2023 (delay is shown by yellow arrow). Magnetic storm data are from the website: https://xras.ru/magnetic_storms.html.

В течение 2024 г. магнитные бури происходили неоднократно. Серия магнитных бурь вызвала крупноамплитудные возмущения ОВП на ст. 9 во временном интервале 20–27-го марта (Чебыкин и др., 2024). Еще одна магнитная буря отозвалась в возмущениях ОВП подземных вод ст. 9 20-го апреля 2024 г. (рис. 7).

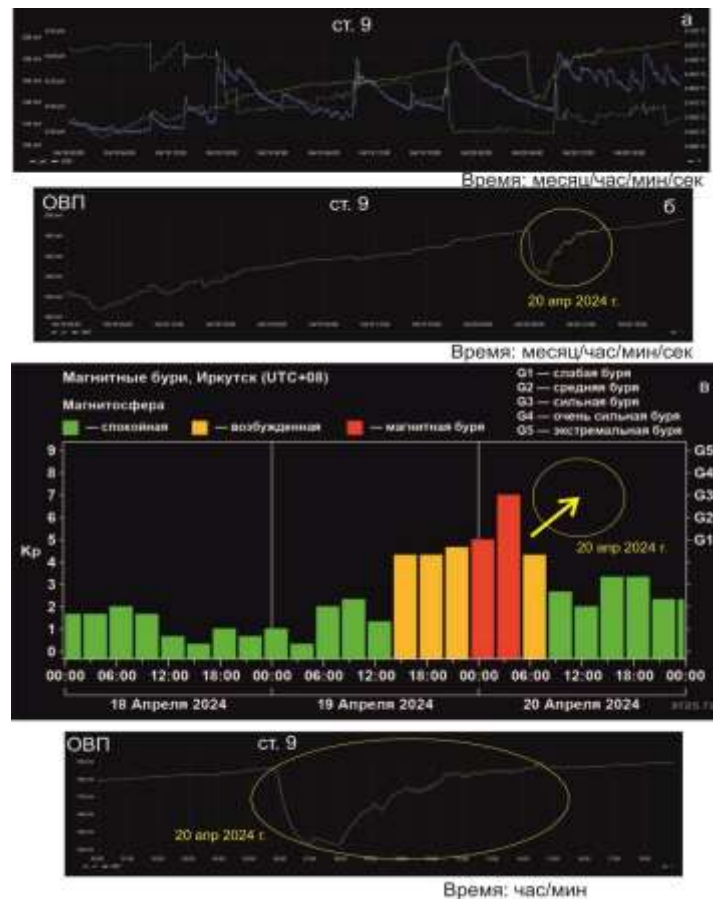


Рис. 7. Графики ст. 9 в интервале 18–20 апреля 2024 г.: а – ОВП, рН и температуры подземных вод; б – ОВП; в – магнитные бури и г – более детальный график ОВП подземных вод ст. 9 20-го апреля. Крупноамплитудный ОВП-импульс 20 апреля запаздывает относительно магнитной бури (запаздывание показано желтой стрелкой). Данные по магнитным бурям с сайта: https://xras.ru/magnetic_storms.html.

Fig. 7. Graphs of station 9 in the time interval of April 18–20, 2024: а – ORP, pH, and temperatures of groundwater; б – ORP; в – magnetic storms, and г – a more detailed graph of ORP of groundwater at station 9 on April 20. The large amplitude ORP impulse on April 20 is delayed relative to the magnetic storm (delay is shown by yellow arrow). Magnetic storm data are from the website: https://xras.ru/magnetic_storms.html.

В течение трех дней, с 18 по 20 апреля значения ОВП постепенно возрастали со 105 мВ до 187 мВ. Несмотря на прокачки, отразившиеся в скачкообразном возрастании температуры и снижении рН, линия ОВП оставалась относительно ровной. 20 апреля в интервале от 06 ч 46 мин до 06 ч 56 мин ОВП резко снизилось от 187 мВ до 143 мВ. На минимуме линия стала мелко-зубчатой и постепенно поднималась с выходом на плато (187 мВ) до 14 ч 46 мин, после чего выровнялась (рис. 7г).

Зубчатые фрагменты линии ОВП наблюдались в серию магнитных бурь 20–27-го марта 2024 г. (Чебыкин и др., 2024). Также крупноамплитудные ОВП запаздывали относительно магнитных бурь 20–27-го марта 2024 г., минимум ОВП 20 апреля 2024 г. запаздывал относительно магнитной бури, вступление которой наблюдается 19 апреля в 14 ч. с достижением максимального $K_p=7$ в 02–05 ч 20 апреля. С 5 до 8 ч, когда наблюдается спад K_p , образуется минимум ОВП (рис. 7б,в).

Магнитная буря проходит, а зубчатые эффекты некоторое время продолжают (рис. 7Г).

На рис. 8 возмущения ОВП начала 2025 г. сравниваются со шкалой магнитных бурь в Иркутске. Декабрь 2024 г. в отношении магнитных бурь был спокойным. Возбуждение

магнитосферы началось 31 декабря в 23 ч. и переросло 1 января к 12 ч в сильную магнитную бурю. Возмущенная магнитосфера поддерживалась с перерывами до 6 января. После завершения этих процессов начались возмущения ОВП, продолжавшиеся с 07-го до 13-го января.

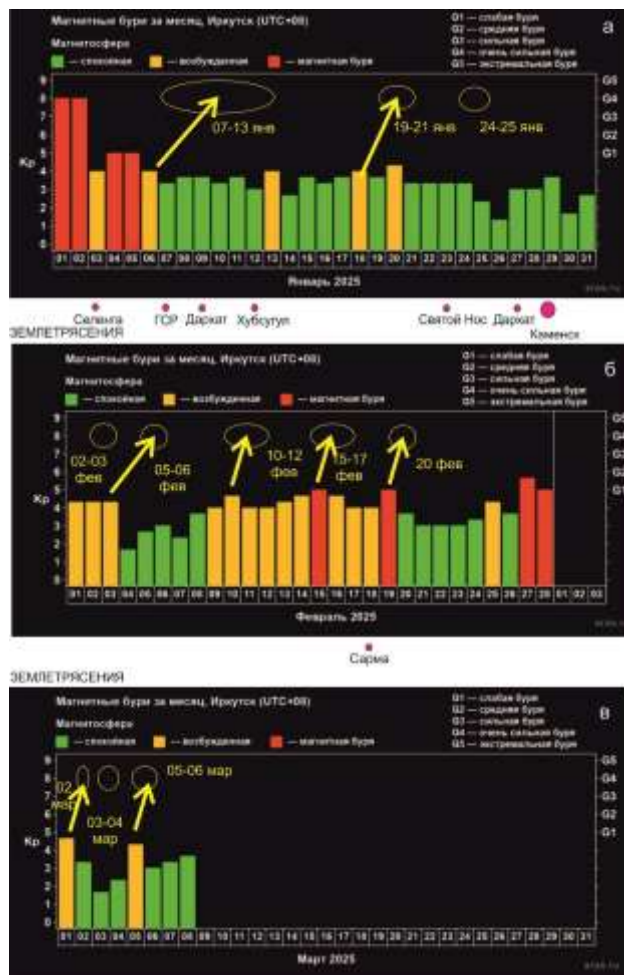


Рис. 8. Графики магнитных бурь в сопоставлении с возмущениями ОВП ст. 9 и землетрясениями в центральной части БРС в январе (а), феврале (б) и начале марта (в). Условные обозначения возмущений ОВП см. на рис. 5. Данные по магнитным бурям с сайта: https://xras.ru/magnetic_storms.html.

Fig. 8. Graphs of magnetic storms in comparison with disturbances of ORP in station 9 and earthquakes in the central part of the BRS in January (a), February (б), and early March (в). Symbols are as in Fig. 5. Magnetic storm data are from the website: https://xras.ru/magnetic_storms.html.

Судя по запаздыванию ОВП-регистрации ст. 9 относительно магнитных бурь, этот временной интервал возмущения ОВП также подчиняется той же закономерности: возмущения ОВП следуют после серии сильных бурь. После спокойного режима слабое возбуждение магнитосферы 18 и 20 января повлекло за собой возмущение ОВП ст. 9 19–21-го января. Возмущения ОВП 24–25-го января

приходится на спокойный режим магнитосферы. Обращает на себя внимание, однако, совпадение по времени с этим возмущением ОВП землетрясений Святого Носа, Дархата и Каменска (рис. 8а). Магнитные бури как причина ОВП-импульсов уступают место другой причине – деформациям коры.

Далее, возмущения ОВП 02–03-го февраля соответствуют слабому возбуждению

магнитосферы, возмущения ОВП 05–06-го февраля – на относительное понижение Кр, возмущения ОВП 10–12-го и 15–17-го февраля – на длительный интервал слабого возбуждения магнитосферы и возмущение ОВП 20-го февраля – на относительное понижение Кр (рис. 8б). В марте начальные слабые возмущения ОВП 02-го и 03–04-го марта приходятся на пониженное Кр, более сильное возмущение 05–06-го марта – на перепад повышения и снижения Кр (рис. 8в).

Мы приходим к выводу о том, что большинство возмущений ОВП подземных вод в январе – начале марта 2025 г., так же как в начале 2024 г. может объясняться запаздывающими эффектами подземных вод, производными магнитных бурь.

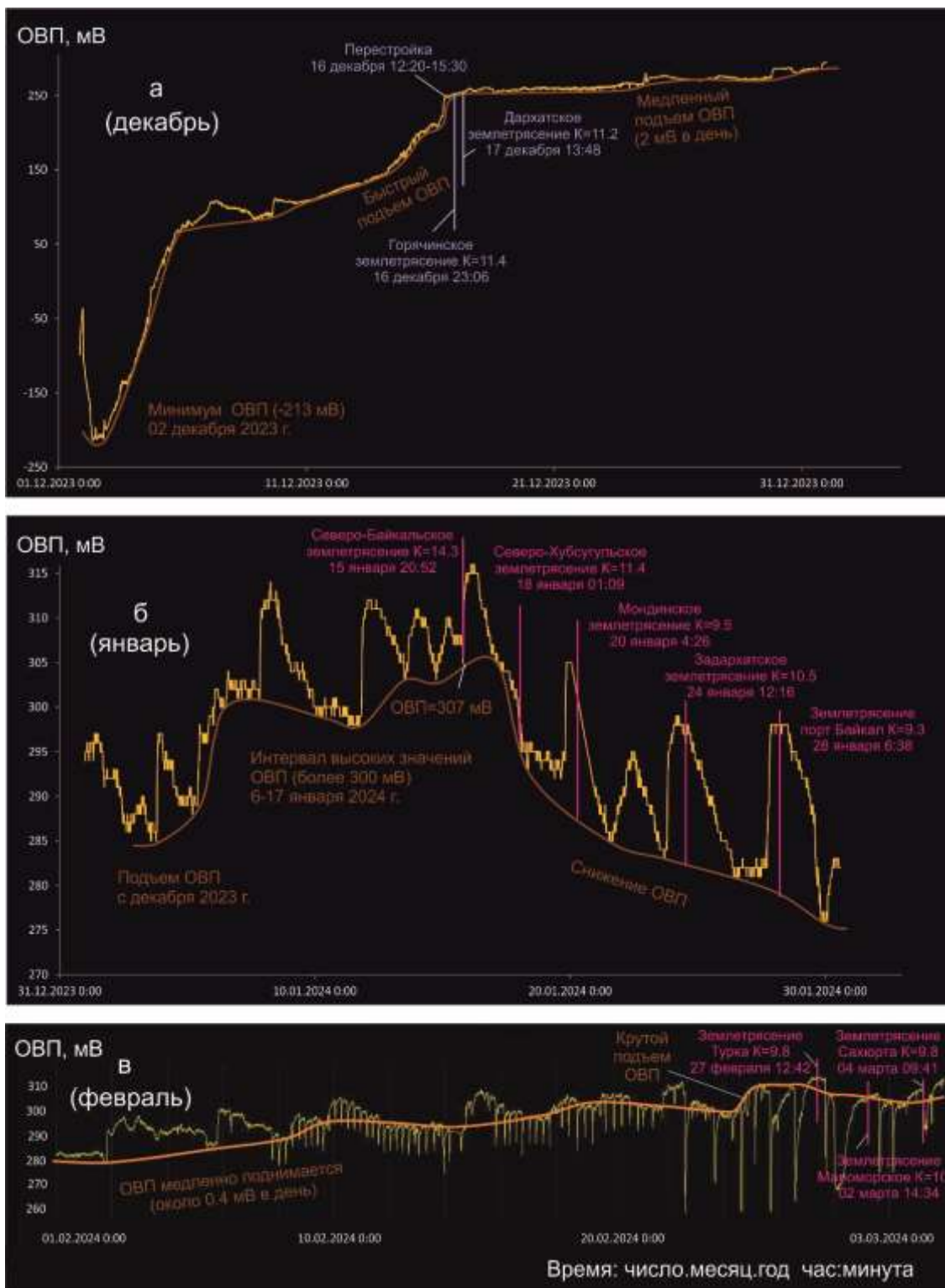
Соотношение ОВП и землетрясений в январе–марте 2024 и 2025 гг.

16 декабря 2023 г. быстрый подъем ОВП ст. 9 сменяется медленным подъемом этого параметра (2 мВ в день). Перестройка ОВП сопровождается Горячинским землетрясением 16 декабря в 23:06 и Дархатским землетрясением 17 декабря в 13:48 (рис. 5а). После продолжительного подъема ОВП выходит на максимум 06–17 января 2024 г. На максимуме ОВП 15 января 2024 г. в 20:52 происходит сильное Северо-Байкальское землетрясение ($K=14.3$). После этого землетрясения ОВП снижается. На фоне снижения ОВП до конца января следуют еще четыре землетрясения.

Весь февраль ОВП ст. 9 медленно поднимается (в среднем на 0.4 мВ в день).

Землетрясения в это время отсутствуют. С 11:00 24 февраля до 07:00 25 февраля значение ОВП возрастает на 13 мВ (с 299 до 312 мВ). Через 2 дня (27 февраля) в 12:42 на Среднем Байкале регистрируется слабое землетрясение Турка, за которым 02–04 марта на Среднем Байкале следуют еще два сейсмических толчка. 04 марта поддерживается повышенное значение ОВП (317 мВ), которое снижается к 06 марта до 296 мВ. В это время происходит Орликское землетрясение, которое по энергетическому классу ($K=10.3$) превышает (хотя и незначительно) все другие землетрясения февраль-мартовского интервала. Остальные три землетрясения (08, 09 и 10 марта) регистрируются на фоне заметного возрастания ОВП, достигающего к 11 марта 340 мВ (рис. 9б–г).

За временной отрезок наблюдений 2024 г. выявляется разный характер вариаций ОВП ст. 9 при землетрясениях: 1) короткий декабрьский сейсмический эпизод сопровождается резкой перестройкой тренда ОВП от крутого подъема к пологому, 2) январский сейсмический интервал, начинающийся сильным Северо-Байкальским землетрясением, сопровождается перестройкой тренда ОВП на максимуме с последующим снижением этого параметра, 3) февраль-мартовский сейсмический интервал, начинающийся группой слабых сейсмических событий Среднего Байкала, сопровождается новой перестройкой тренда ОВП на максимуме с последующим волнообразным снижением и возрастанием значений этого параметра.



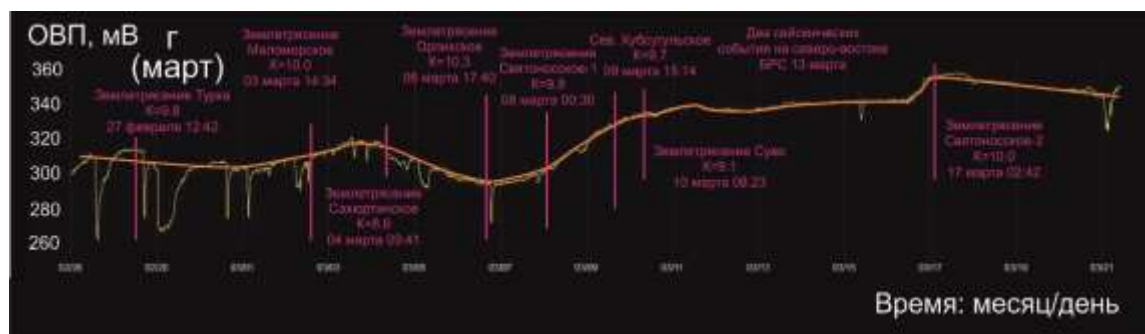


Рис. 9. Вариации ОВП подземных вод ст. 9 с 01 до 31 декабря 2023 г. (а), с 31 декабря 2023 г. до 30 января 2024 г. (б), с 31 января до 05 марта (в) и с 26 февраля до 21 марта 2024 г. (г). На панелях а и б генеральная линия огибает варьирующие значения ОВП снизу, при появлении отрицательных импульсов на панели в – соответствует минимумам значений фона. Пастельно-голубым цветом выделены короткие эпизоды проявления землетрясений, пурпурным – временные интервалы более продолжительных серий. Землетрясения приводятся по данным сайта (Карта..., 2025). Из работы (Рассказов и др., 2024).

Fig. 9. Groundwater ORP variations at station 9 from December 1 to 31, 2023 (a), from December 31, 2023 to January 30, 2024 (b), from January 31 to March 5 (c), and from February 26 to March 21, 2024 (d). In panels a and b, the general line bends around the varying ORP values from below; when negative pulses appear in panel c, it corresponds to the minimal values of the background values. Short episodes of earthquakes are highlighted in pastel-blue; time intervals of longer series are highlighted in purple. Earthquakes are given according to the website (Map..., 2025). After (Rasskazov et al., 2024).

В 2025 г. землетрясение 07 января совпало с минимумом ОВП ст. 9. В течение интервала возмущения ОВП 7–13 января последовало еще два землетрясения на фоне подъема нижней огибающей линии. Землетрясение 23 января случилось между возмущениями ОВП 19–21-го и 24–25-го января. Землетрясения 28 и 29 января приходятся на высокое поднятие огибающей линии ОВП и на интервал между возмущениями ОВП 24–25-го января и 02–03-го февраля 2025 г. Последнее из этих землетрясений было наиболее сильным ($K=11.1$). После него сейсмичность в центральной части БРС утасла. В целом в начале 2025 г. наблюдается низкая сейсмическая активность, по сравнению с сейсмической активностью в начале 2024 г. Возможно, поэтому в 2024 и 2025 гг. прослеживается разный характер соотношений землетрясений с ОВП. В 2024 г. сильное землетрясение 15 января произошедшее при максимуме ОВП, начало серию землетрясений, произошедших на фоне снижения ОВП. В 2025 г., землетрясение 07 января, произошедшее на минимуме ОВП, начало серию землетрясений на фоне возрастания ОВП. Произошедшие изменения в характере соотношений землетрясений с ОВП в 2024 и 2025 гг. будут учитываться в

последующих интерпретациях данных мониторинга.

Заключение

Приведены результаты наблюдений ОВП в подземных водах двух скважин Култукского полигона берега Байкала в режиме реального времени с января до начала марта 2025 г. В январе и феврале выявлены возмущения ОВП, запаздывающие относительно магнитных бурь. В начале марта установлены три последовательно усиливающихся импульса. Механизм ОВП-возмущений, следующих после магнитных бурь, проявился и в начале 2024 г., и в начале 2025 г.

30-дневный контроль ОВП-импульсов лунно-солнечными приливами, выявленный в начале 2024 г., в начале 2025 г. не проявился. В соотношениях землетрясений с ОВП в январе–марте 2024 и 2025 гг. также не соблюдается постоянства. Очевидно, что контролирующая роль этих факторов может иметь решающее значение в рамках ограниченных временных интервалов. Смена контролирующего фактора ведет к установлению новых закономерностей в развитии процесса. Механизмы лунно-солнечных приливов и деформаций коры, сопровождающихся землетрясениями, проявились в

начале 2024 г., но в начале 2025 г. не были достаточно сильными, чтобы контролировать ОВП-импульсы. Смена этих соотношений в 2024–2025 гг. может быть связана с деформациями коры, сопровождающимися относительным снижением сейсмической активности в центральной части Байкальской рифтовой системы.

Перспективы использования результатов

Полученные результаты мониторинга ОВП в режиме реального времени свидетельствует об отсутствии повторяемости процессов, вызываемых лунно-солнечными приливами и деформациями коры, сопровождающимися землетрясениями в начале 2024 и в начале 2025 гг. Эти процессы развиваются с течением времени при переходе процессов земной коры в новое качество. Произошедшие изменения в характере соотношений землетрясений с ОВП имеют практическое приложение. Временные изменения деформаций коры должны будут учитываться в последующих интерпретациях данных гидрогеохимического мониторинга.

Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»). Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>). (Карта..., 2025).

Литература

Асламов И.А., Рассказов С.В., Снопков С.В., Архипенко В.И., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П. Генерация ОВП-импульсов в подземных водах побережья Байкала в феврале-марте 2024 г.: 30-суточный мониторинг в режиме реального времени от зарождения до угасания // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 1. С. 77–89. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.77>

Карта эпицентров землетрясений. Иркутск: Байкальский Филиал Геофизической Службы, 2025. <http://www.seis-bykl.ru>

Рассказов С.В., Асламов И.А., Снопков С.В., Архипенко В.И., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П. Первый опыт мониторинга косейсмических и асейсмических вариаций ОВП, pH и температуры подземных вод Култукского резервуара в режиме реального времени (Байкальская рифтовая система) // Геология и окружающая среда. 2023а. Т. 3, № 4. С. 161–181. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.4.161>

Рассказов С.В., Асламов И.А., Снопков С.В., Архипенко В.И., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П. Мониторинг окислительно-восстановительного потенциала подземных вод в режиме реального времени на Култукском полигоне в конце 2023 – начале 2024 гг.: сопоставление электрических эффектов с землетрясениями в центральной части Байкальской рифтовой системы // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 1. С. 42–60. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.42>

Снопков С.В., Рассказов С.В., Асламов И.А., Архипенко В.И., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П. Экспресс-анализ проявления квазипериодических импульсов окислительно-восстановительного потенциала подземных вод берега Байкала при мониторинге в режиме реального времени (07–14 февраля 2024 г.) // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 1. С. 61–76. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.61>

Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Асламов И.А., Снопков С.В., Архипенко В.И., Ильясова А.М. Серия ОВП-импульсов подземных вод побережья Байкала 20–27 марта 2024 г.: вероятная связь с магнитными бурями // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 1. С. 90–97. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.90>

Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 6. С. 936–937.

https://xras.ru/magnetic_storms.html

<https://world-weather.ru/pogoda/russia/kultuk/february-2024/>

References

Aslamov I.A., Rasskazov S.V., Snopkov S.V., Arkhipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. Generation of ORP pulses in groundwater along the coast of Lake Baikal in February-March 2024: 30-day real-time monitoring from inception to extinction // *Geology and Environment*. 2024. Vol. 4, No. 1. P. 77–89. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.77>

Chebykin E.P., Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Snopkov S.V., Arkhipenko V.I., Ilyasova A.M. Series of ORP pulses of groundwater along the coast of Lake Baikal on March 20–27, 2024: probable connection with magnetic storms // *Geology and Environment*. 2024. Vol. 4, No. 1. P. 90–97. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.90>

Chipizubov A.V., Smekalin O.P. Paleoseis-modislocations and related paleoearthquakes at the Main Sayan Fault zone // *Russian Geology and Geophysics*. 1999. V. 40, No. 6. P. 936–937.

Map of earthquake epicenters. Irkutsk: Baikal Branch of the Geophysical Service, 2025. <http://www.seis-bykl.ru>

Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Snopkov S.V., Arkhipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. The first experience of monitoring coseismic and aseismic variations of ORP, pH, and temperature of groundwater in the Kultuk reservoir in real time (Baikal rift system) // *Geology and Environment*. 2023a. Vol. 3, No. 4. P. 161–181. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.4.161>

Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Snopkov S.V., Arkhipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. Monitoring the redox potential of groundwater in real time at the Kultuk area in late 2023 – early 2024: comparison of electrical effects with earthquakes in the central part of the Baikal rift system // *Geology and Environment*. 2024. Vol. 4, No. 1. P. 42–60. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.42>

Snopkov S.V., Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Arkhipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. Express analysis of the manifestation of quasi-periodic pulses of the oxidation-reduction potential of groundwater on the shore of Lake Baikal during real-time monitoring (February 7–14, 2024) // *Geology and Environment*. 2024. Vol. 4, No. 1. Pp. 61–76. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.61>

https://xras.ru/magnetic_storms.html

<https://world-weather.ru/pogoda/russia/kultuk/february-2024/>

email: rassk@crust.irk.ru

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор,

664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет, геологический факультет,

заведующий кафедрой динамической геологии,

664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

Институт земной коры СО РАН,

заведующий лабораторией изотопии и геохронологии,

тел.: (3952) 51–16–59,

email: rassk@crust.irk.ru

Rasskazov Sergei Vasilievich,

doctor of geological and mineralogical sciences, professor,

664003 Irkutsk, Lenin st., 3,

Irkutsk State University, Faculty of Geology,

Head of Dynamic Geology Char,

664033 Irkutsk, Lermontov st., 128,

Institute of the Earth's Crust SB RAS,

Head of Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies,

tel.: (3952) 51–16–59,

Асламов Илья Александрович,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,

664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,

Лимнологический институт СО РАН,

email: ilya_aslamov@bk.ru

Aslamov Ilya Aleksandrovich,

Candidate of physical and mathematical sciences, Senior Researcher,

664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3,

Limnological Institute SB RAS,

старший научный сотрудник,

email: ilya_aslamov@bk.ru

Снопков Сергей Викторович,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,

664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет, геологический факультет,

доцент,

664074, г. Иркутск, ул. Курчатова, 3,

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Сибирская школа геонаук, ведущий научный сотрудник,
email: snopkov_serg@mail.ru*

Snopkov Sergey Viktorovich,

*Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, assistant professor,
664003 Irkutsk, Lenin st., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
664074, Irkutsk, st. Kurchatova, 3,
Irkutsk National Research Technical University, Siberian School of Geosciences,
Leading Researcher,
email: snopkov_serg@mail.ru*

Архипенко Владислав Иванович,

*главный специалист по электронике,
664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,
Лимнологический институт СО РАН,
email: vladarxip@gmail.com,*

Arkhipenko Vladislav Ivanovich,

*main electronics engineer,
664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3,
Limnological Institute SB RAS,
email: vladarxip@gmail.com*

Ильясова Айгуль Маратовна,

*кандидат геолого-минералогических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,*

*Институт земной коры СО РАН,
ведущий инженер,*

email: ila@crust.irk.ru

Ilyasova Aigul Maratovna,

*candidate of geological and mineralogical sciences,
leading engineer,
664033 Irkutsk, Lermontov st., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
email: ila@crust.irk.ru*

Чебыкин Евгений Павлович,

*кандидат химических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
старший научный сотрудник,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,
Лимнологический институт СО РАН,
ведущий специалист,
email: epcheb@yandex.ru*

Chebykin Eugene Pavlovich,

Candidate of Chemical Sciences, Leading Specialist,

*664033, Irkutsk, st. Lermontova, 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Senior Researcher,
664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3,
Limnological Institute SB RAS,
email: epcheb@yandex.ru*

НЕОТЕКТОНИКА, ГЕОМОРФОЛОГИЯ

УДК 550.42 + 550.845 (51)

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2025.1.129>EDN: [DGSNRD](https://www.edn.ru/)

Современное вовлечение в деформации края Сибирского палеоконтинента в Байкальской рифтовой системе: данные U-H-O-изотопной систематики подземных вод

С.В. Рассказов^{1,2}, А.М. Ильясова¹, Е.П. Чебыкин^{1,3}, О.С. Гутарева¹, С.В. Снопков^{2,4}¹Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия³Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. По изотопам урана, водорода и кислорода подземных вод выявляется разный характер процессов взаимодействия вода–порода в структурах Байкальской рифтовой системы (БРС), унаследовавших зону Главного Саянского разлома (ГСР) и получившего развитие в сопредельном архейском Шарыжалгайском блоке фундамента Сибирского палеоконтинента. Для пресных холодных подземных вод верхнего гидрогеодинамического этажа, в Култукском резервуаре зоны ГСР, обосновывается модель двух-компонентного смешения, первоначально полученная по изотопам U и Sr и подтвержденная в настоящей работе по изотопам H и O. Значения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ возрастают с повышением содержания растворенного кремния. Тренд нижнего гидрогеодинамического этажа представлен термальными водами Баунтовской впадины, в которых значения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ снижаются с повышением содержания растворенного кремния. В U-H-O-изотопной систематике на станциях гидрогеохимического мониторинга сейсмической угрозы в БРС подчеркивается особое значение геохимических характеристик подземных вод, полученных для родника ст. 143А Култукского полигона. В водах этой станции определено более высокое отношение активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (ОА4/8), чем в подземных водах ГСР Култукского резервуара. Геохимические характеристики вод ст. 143А частично соответствуют геохимическим характеристикам подземных вод Култукского резервуара в зоне ГСР, а частично – геохимическим характеристикам подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища. Предполагается, что в подземные воды этих территорий входит компонент глубинных вод Южно-Байкальского резервуара (ЮБР). Отличие U-H-O-изотопных характеристик вод родника ст. 143А от характеристик подземных вод Култукского полигона в зоне ГСР объясняется структурным контролем выхода этого родника дуговым разломом КБЖД, заложенным в архейском Шарыжалгайском блоке края Сибирского палеоконтинента, вдоль Обручевского разлома. Выявленное с течением времени снижение значений ОА4/8 в водах родника ст. 143А свидетельствует о нарастании сжатия в глубинной части дугового разлома, происходящем в настоящее время. Продолжение этого процесса может иметь катастрофические последствия – сход крупного оползня в Южно-Байкальскую впадину по плоскости дугового разлома.

Ключевые слова: Байкал, Тункинская долина, подземные воды, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, эффект Чердынцева–Чалова

Статья получена: 04.03.2025; исправлена: 20.03.2025; принята: 28.03.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рассказов С.В., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П., Гутарева О.С., Снопков С.В. Современное вовлечение в деформации края Сибирского палеоконтинента в Байкальской рифтовой системе: данные U-H-O-изотопной систематики подземных вод // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 1. С. 129-158. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.129. EDN: [DGSNRD](https://www.edn.ru/)

Article received: 04.03.2025; corrected: 20.03.2025; accepted: 28.03.2025.

FOR CITATION: Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chebykin E.P., Gutareva O.S., Snopkov S.V. Present-Day involvement in deformations of the Siberian Palecontinent margin in the Baikal Rift System: evidence from U-H-O-isotope systematics of groundwater // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 129-158. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.129. EDN: [DGSNRD](https://www.edn.ru/)

Present-Day Involvement in Deformations of the Siberian Palecontinent Margin in the Baikal Rift System: evidence from U-H-O isotope Systematics of Groundwater

S.V. Rasskazov^{1,2}, A.M. Ilyasova¹, E.P. Chebykin^{1,3}, O.S. Gutareva¹, S.V. Snopkov^{2,4}

¹*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia*

²*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

³*Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia*

⁴*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

Abstract. Uranium, hydrogen, and oxygen isotopes in groundwater reveal different nature of water-rock interaction processes in structures of the Baikal Rift System (BRS) inherited the Main Sayan Fault (MSF) zone and developed in the adjacent Archean Sharyzhalgay block of the Siberian paleocontinent basement. For fresh cold groundwater of the upper hydrogeodynamic floor, in the Kultuk reservoir of the MSF zone, a two-component mixing model is substantiated, initially obtained from U and Sr isotopes and confirmed by H and O ones in this work. The $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values increase with increasing content of dissolved silicon. The trend of the lower hydrogeodynamic floor is exhibited by thermal waters of the Baunt basin, in which the $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values decrease with increasing content of dissolved silicon. In the U-H-O isotope systematics at the stations of hydrogeochemical monitoring of seismic hazard in the BRS, the special significance of the geochemical signatures of groundwater obtained for the spring at station 143A of the Kultuk area is emphasized. A higher activity ratio of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (AR4/8) was determined for waters from this station as compared with groundwater from the MSF of the Kultuk reservoir. The geochemical signatures of water from station 143A partially correspond to those from the Kultuk reservoir in the MSF zone, and partially to geochemical signatures of the groundwater from the northwestern coast of Lake Baikal and the eastern coast of the Irkutsk reservoir. It is proposed that the groundwater of these areas includes a component of the deep water from the South Baikal reservoir (SBR). The difference in the U-H-O isotope signatures of water from the spring of station 143A and the Kultuk reservoir in the MSF is explained by the structural control of this spring by an arc fault of the Circum-Baikal Railway, arranged in the Archean Sharyzhalgai block of the Siberian paleocontinent margin, along the Obruchev fault. The revealed temporal decreasing in the OA4/8 values in water of the spring indicates present-day increasing in compression in the deep part of the arc fault. Continuation of this process can have catastrophic consequences – a large landslide into the South Baikal basin along the plane of the arc fault.

Keywords: Baikal, Tunka Valley, groundwater, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, Cherdyntsev-Chalov effect

Постановка вопроса

Основной подход к прогнозу землетрясений в настоящее время заключается в отслеживании вариаций интенсивности сейсмического процесса для выявления неустойчивости в его режиме. При значительном объеме опубликованной литературы, ее ценность неодинакова. Во многих работах описываются последствия землетрясений и поведение тех или иных параметров после разгрузки упругих напряжений в коре. Для прогноза же необходимы данные об изменении параметров в процессе подготовки землетрясения, а не после него. М.А. Садовский подчеркивал, что однозначно решить вопрос о прогнозе времени землетрясений можно лишь при постановке режимных наблюдений за

комплексом известных предвестников на широкой сети станций, а также при выяснении механизма сейсмического процесса и физической природы предвестников. Он писал: «...для предсказания сильного землетрясения площадь, покрытая постами наблюдений, должна занимать сотни тысяч квадратных километров... расстояние между пунктами наблюдений не должно превышать 50–100 км» (Садовский, 1978; с. 7). Устойчивый пессимизм, сложившийся к настоящему времени в отношении создания теоретических основ прогноза землетрясений (Geller, 1997; Rodkin, 2008; Koronovskiy, Naimark, 2012, 2013), вовсе не означает, что практика прогноза возможных сейсмических катастроф (Sobolev, 1993; и др.) должна быть приостановлена.

Как правило, какой-либо предвестник является для конкретного сильного землетрясения. Следующее сильное землетрясение происходит без заявленного предвестника. Авторами настоящей работы, вместо бесполезного ожидания «предвестников», принята практика анализа гидрогеохимических изменений в резервуаре подземных вод сейсмоактивной структуры. Для полученных закономерностей эволюции резервуара подземных вод устанавливаются парагенетические отношения с событиями подготовки и реализации сильных землетрясений. Иными словами, проводится гидрогеохимическое исследование резервуара подземных вод, доступного для изучения в верхней части коры, и в случае, если определяются перестройки в его эволюции с пониманием будущих событий в таком резервуаре, рубежи гидрогеохимических перестроек резервуара с элементами прогноза проецируются в информационное поле о пространственно-временном распределении землетрясений различной силы, происходящих в средней части коры. После такого перехода делается прогноз будущих сейсмических событий. Кора рассматривается как объект прямого непрерывного мониторингового исследования подземных вод в ее доступной верхней части с выходом на подготовку и реализацию сейсмических процессов в ее средней части, фактически недоступной для получения прямой информации (Rasskazov et al., 2022; 2024).

Современная изотопная геохимия располагает широким набором методов для изучения природных процессов с констатацией причин их возникновения и определением направленности эволюции. Важнейшую генетическую информацию для подземных и поверхностных вод несут изотопы урана. В результате радиоактивного распада ^{238}U в лабораторных условиях атомное отношение $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 5.47 \times 10^{-5}$ соответствует циклическому равновесию между изотопами ^{234}U и ^{238}U с отношением активностей (ОА4/8) около 1. В природных условиях наблюдаются отклонения от равновесия, известные как эффект Чердынцева-Чалова (Чердынцев, 1969; Чалов и др., 1980). В разных геологических условиях предлагаются различные объяснения этого эффекта. Так, значения ОА4/8 резко увеличиваются или снижаются при землетрясениях (Zverev et al., 1975; Finkel, 1979). Учитывая возможность возникновения такого эффекта в подземных водах активных разломов Байкальской рифтовой системы, в 2012 г. был организован гидрогеохимический

мониторинг сейсмической угрозы на Култукском полигоне. В процессе наблюдений, кроме ОА4/8, определялся широкий спектр химических элементов, а также изотопные отношения Sr (Рассказов и др., 2015; Чебыкин и др., 2015).

По расположению в оси рифтовой структуры эта территория выбрана нами в качестве опорного полигона. Мониторинговые станции находятся в основном в тектонитах Главного Саянского разлома (ГСР) – шовной структуры между архейским Шарыжалгайским блоком фундамента Сибирского палеоконтинента и неопротерозойским Слюдянским метаморфическим субтеррейном Хамардабанского террейна – и частично выходят на фланги этой шовной зоны. В пределах шовной зоны ГСР Култукского полигона значения ОА4/8 не превышают 3.29. Такое максимальное значение определено 04 февраля 2013 г. на ст. 27. При продвижении в Шарыжалгайский блок вдоль Обручевского разлома в роднике ст. 143А выявлены более высокие значения ОА4/8 (до 3.68). Концентрация Si в водах родника ст. 143А с течением времени возрастает подобно возрастанию содержания этого компонента в подземных водах других мониторинговых станций Култукского полигона, поэтому предполагается, что высокие значения ОА4/8 в водах родника ст. 143А имеют тектоническую причину (Ильясова, Снопков, 2023).

Существует, однако, еще одна особенность размещения родника ст. 143А. Он пространственно приурочен к распадку берега Байкала, из которого обломочный материал поступает в виде конуса выноса в прибрежную акваторию озера. Зимой на берегу Байкала образуется наледь. Нельзя исключить вероятности того, что выемка материала из распадка с родником ст. 143А осуществляется в тектонически ослабленной зоне с участием многолетнемерзлых пород. В северных регионах России при таянии древних мерзлых пород ОА4/8 возрастает до 15.7 с возрастанием общей минерализации (Yakovlev et al., 2021).

Если этот процесс действительно имеет место и повышенные значения ОА4/8 в водах родника ст. 143А маркируют остатки многолетнемерзлых пород в распадке на берегу Байкала, эта конкурирующая гипотеза должна быть проверена независимыми гидрогеохимическими данными. О возможном участии компонента многолетнемерзлых пород в подземных водах ст. 143А можно судить по изотопам водорода и кислорода. Для

изучения подземных и поверхностных вод используются сдвиги масс стабильных изотопов, входящих в молекулу воды – дейтерия ($\delta^2\text{H}$) относительно протия (^1H) – $\delta^2\text{H}$ и кислорода-18 (^{18}O) относительно кислорода-16 (^{16}O) – $\delta^{18}\text{O}$.

В настоящей работе определяется изотопный состав водорода и кислорода в воде с наиболее неравновесным ураном ст. 143А в сопоставлении с изотопными данными по водороду и кислороду, полученными для подземных вод других мониторинговых станций опорного Култукского полигона и сопредельных территорий Предбайкалья и Тункинской долины. Для интерпретации привлекаются данные по изотопам U, а также по общей минерализации (ОМ) и содержанию Si в подземных водах.

Объекты и методика исследований

На территории Предбайкалья и Тункинской долины в U-H-O-изотопные исследования вовлечены пробы подземных вод,

отобранные в основном летом и осенью 2022 г. (с 21 июля до 13 ноября). Опробование вод родников и скважин в Больших Котах проводилось годом раньше (17 октября 2021 г.). В отдельную группу объединяются пробы Култукского полигона, в зоне ГСР. По близости к Байкалу эта группа сопоставляется с группой водопунктов, опробованных вдоль северо-западного берега этого озера и берегов Иркутского водохранилища (ст. 136 (Бугульдейка), ст. ВК-2, ВК-11 (Большие Коты), ст. 108 (Большая Речка), ст. 194 (Иркутск, Радищево). Родник ст. 143А, с одной стороны, относится к Култукскому полигону, с другой стороны, он находится за пределами шовной зоны ГСР, в архейском Шарыжалгайском блоке фундамента Сибирского палеоконтинента. Этот родник расположен на берегу Байкала и рассматривается как водопункт из группы СЗ берега Байкала и берегов Иркутского водохранилища. Для сопоставления приводятся данные, полученные для подземных вод территорий, удаленных от Байкала и Иркутского водохранилища (рис. 1).

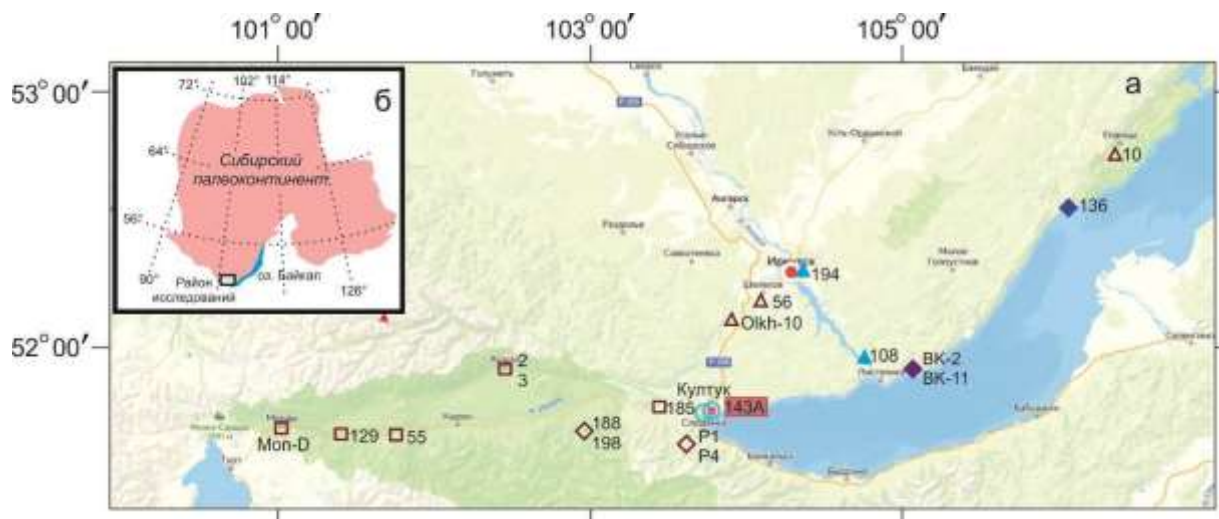


Рис. 1. Схема пространственного положения мониторингового полигона Култук (включая ст. 143А) и распределения опробованных подземных вод Предбайкалья и Тункинской долины (а) и положение района исследований на краю Сибирского палеоконтинента (б). Для обозначения местоположения проб используются значки групп, выделенных на диаграммах рис. 2.

Fig. 1. Schematic map of the location of the Kultuk monitoring area (including station 143A) and the distribution of sampled groundwater in the Pre-Baikal region and Tunka Valley (a) and the position of the research area on the edge of the Siberian paleocontinent (b). The location of samples is indicated by the icons of the groups highlighted in the diagrams of Fig. 2.

Для определения химического элементного состава природная вода фильтруется через шприц-насадки с диаметром пор 0.45 мкм (Minisart 16555-K, ацетат целлюлозы, Sartorius Stedim Biotech GmbH, Германия) в

предварительно взвешенные 2 мл полипропиленовые пробирки Эппендорфа (Axugen Scientific, Cat.-No. MCT-200-C, США, Мексика), содержащие 40 мкл консерванта. В качестве консерванта используется

концентрированная азотная кислота (70 %), дважды очищенная с помощью суббуйлинговой системы перегонки кислот (Savillex DST-1000 sub-boiling distillation system, Япония), в которую добавляется индий (типично 1000 ppb) в качестве внутреннего стандарта. Аликвоты консерванта взвешиваются при добавлении в пробирки. Пробирки с отобранными образцами воды взвешивают и рассчитывают точное содержание азотной кислоты (типично 2 %) и индия (типично 30 ppb). В подготовленных растворах определяют содержание 72 химических элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСПР-МС) на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 (Чебыкин и др., 2007, 2012). Изотопы урана определяются после его выделения на ионно-обменной колонке из отдельной пробы воды. Обычно достаточно 400 мл. Детали методики приведены в работе (Чебыкин и др., 2015).

Для исследований изотопного состава водорода и кислорода пробы воды фильтруются через мембранные фильтры 0.45 мкм в пробирки 2 мл. Пробы измеряются на изотопном анализаторе WS-CRDS Picarro L2140-i по методике спектроскопии поглощения света в многопоточных неаксиальных кюветках при сканировании по длинам волн (WS-CRDS, Wavelength Scanned Cavity Ring-Down Spectroscopy). Используется методика ААНИИ (Екайкин, 2016). В качестве стандарта используется иркутская водопроводная вода "Irk", откалиброванная по стандартам воды USGS-46, USGS-47 и стандартам института Арктики и Антарктики (ААНИИ, Санкт-Петербург) VOS-4 и SPB-2. Значения рабочего стандарта Irk: $\delta^{18}\text{O}$ -15.727, $\delta^2\text{H}$ -122.461. Погрешность измерений: $\delta^{18}\text{O}$ не более 0.05 ‰, $\delta^2\text{H}$ не более 0.8 ‰. Полученные данные приводятся в δ -обозначении относительно Венского стандарта средней океанической воды (VSMOW) (табл. 1).

Таблица 1

Гидрогеохимические данные для подземных вод станций мониторинга БРС

Table 1

Hydrogeochemical data for groundwater of BRS monitoring stations

Станция (номер серии)	Дата отбора	Координаты		ОМ, мг/дм ³	U, мкг/дм ³	Si, мг/дм ³	ОА4/8	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰
8 (191)	02.10.22	N51°43'34.2"	E103°41'55.86"	200	3.2	8.6	2.38	-14.12	-109.11
8 (192)	12.10.22	N51°43'34.2"	E103°41'55.86"	290	3.3	8.6	2.38	-14.39	-109.74
8 (193)	14.10.22	N51°43'34.2"	E103°41'55.86"	200	3.2	8.7	2.39	-14.40	-109.80
8 (194)	27.10.22	N51°43'34.2"	E103°41'55.86"	290	3.2	8.8	2.39	-14.43	-109.60
8 (196)	13.11.22	N51°43'34.2"	E103°41'55.86"	310	3.3	9	2.33	-14.40	-109.70
27 (191)	02.10.22	N51°43'31.26"	E103°42'23.04"	200	0.28	9.5	3.08	-14.56	-110.48
27 (192)	12.10.22	N51°43'31.26"	E103°42'23.04"	260	0.26	8.6	3.07	-14.53	-110.81
27 (193)	14.10.22	N51°43'31.26"	E103°42'23.04"	170	0.26	7.9	3.05	-14.63	-110.94
27 (194)	27.10.22	N51°43'31.26"	E103°42'23.04"	270	0.27	8.5	3.10	-14.55	-110.78
27 (196)	13.11.22	N51°43'31.26"	E103°42'23.04"	260	0.28	8.4	3.12	-14.47	-110.38
40 (191)	02.10.22	N51°43'18"	E103°42'17.46"	350	0.21	12.1	2.39	-13.60	-104.31
40 (193)	14.10.22	N51°43'18"	E103°42'17.46"	350	0.29	12.1	2.35	-13.63	-104.60
40 (194)	27.10.22	N51°43'18"	E103°42'17.46"	350	0.23	12.3	2.36	-13.65	-104.85
40 (196)	13.11.22	N51°43'18"	E103°42'17.46"	350	0.22	12.5	2.33	-13.56	-104.42
184 (191)	02.10.22	N51°43'25.94"	E103°42'00.89"	350	0.33	9.8	2.12	-13.78	-105.71
184 (193)	14.10.22	N51°43'25.94"	E103°42'00.89"	330	0.28	9.1	2.13	-13.78	-105.78
184 (194)	27.10.22	N51°43'25.94"	E103°42'00.89"	350	0.34	10.3	2.14	-13.73	-105.59
184 (196)	13.11.22	N51°43'25.94"	E103°42'00.89"	340	0.33	10.2	2.13	-13.85	-106.11
38 (144)	21.07.21			260	0.32	8.9	1.99	-14.63	-110.32
38 (196)	13.11.22			260	0.31	8.7	1.99	-14.65	-110.81

45 (196)	13.11.22			550	0.5	6.3	1.1	-13.96	-105.56
66A (132)	14.10.20	N51°44'20.28"	E103°41'46.92"	120	0.032	7	2.64	-14.96	-114.54
14к (193)	14.10.22	N51°44'0.06"	E103°39'30"	210	0.77	5.1	1.30	-15.84	-118.51
14к (194)	27.10.22	N51°44'0.06"	E103°39'30"	210	0.86	4.7	1.14	-15.86	-118.47
14к (196)	13.11.22	N51°44'0.06"	E103°39'30"	200	0.94	4.6	1.14	-15.92	-118.72
143A (196)	13.11.22			210	0.086	9	3.51	-15.10	-114.50
ВК-2	17.10.21	N51°54'33.54"	E105°04'31.38"	140	0.188	7	2.53	-15.23	-119.05
ВК-11	17.10.21	N51°54'32.51"	E105°4'24.96"	130	0.141	7.7	1.65	-16.27	-125.48
136 (190)	16.09.22	N52°32'55.44"	E106°04'18.6"	410	11.4	5.2	2.98	-16.32	-122.77
136 (193)	25.10.22	N52°32'55.44"	E106°04'18.6"	410	11.5	5.2	2.98	-16.34	-122.77
D (125-1)	12.05.20	N51°40'31.74"	E101°00'28.86"	170	0.41	2.8	1.61	-14.57	-111.89
129 (160)	17.12.21	N51°38'46.44"	E101°25'11.58"	300	2.1	5.4	1.87	-14.51	-107.91
55 (160)	17.12.21	N51°38'18.12"	E101°43'6.18"	290	4.6	9.5	1.81	-14.78	-109.08
3 (194)	27.10.22	N51°55'19.68"	E102°25'33.06"	220	1.45	2.7	1.28	-17.03	-125.66
2 (194)	27.10.22	N51°55'12.84"	E102°25'32.52"	3 500	7	40	1	-17.25	-126.45
185 (154)	22.10.21	N51°44'16.92"	E103°25'45.78"	210	0.0069	6.8		-15.84	-116.73
188 (131)	06.10.20	N51°37'39.90"	E102°58'26.20"	54	0.073	4.8	1.42	-13.96	-106.81
198 (151)	19.09.21			65	0.012	7		-16.09	-118.22
P4	08.08.22			130	0.166	4	1.20	-16.64	-121.38
P1	08.08.22			18	0.013	1.9		-16.91	-124.27
56 (185)	21.06.22			3 100	0.53	5	15.66	-17.68	-132.84
Oikh-10	01.07.22	N52°02'52.5"	E103°56'11.4"	89	0.024	3.9		-16.47	-122.41
194 (161)	29.12.21	N52°16'59.46"	E104°23'12.9"	410	0.0015	4.8		-16.70	-127.41
108_down(160)	20.12.21			140	0.014	6.8	2.02	-17.31	-128.91
108_up(160)	14.05.22			120	0.014	6.3	1.79	-17.33	-128.92
10 (190)	16.09.22	N52°44'25.74"	E106°18'25.26"	470	10.5	10.7	1.70	-15.72	-119.97
10 (193)	25.10.22	N52°44'25.74"	E106°18'25.26"	470	10.5	10.7	1.66	-15.76	-120.14
ЮБР*				100	0.5	0.6	1.95	-15.88	-126.21

К Култукскому полигону относятся станции: 8, 27, 40, 184, 38, 45, 66A, 14к и 143A.

*Состав ЮБР приводится для района Култук по данным (Оганесянц и др., 2021).

Результаты

Значения ОА4/8 для основных станций Култукского полигона (зона ГСР) меняются от 1.1 (ст. 14к) до 3.3 (ст. 27). В октябре и ноябре 2022 г. значения этого показателя не меняются, за исключением ст. 14к, для которой 14 октября 2022 г. получено значение 1.30, а позже, 27 октября и 13 ноября – более низкое значение (1.14). Эта станция представляет собой родник в палеосейсмодислокации ГСР, в котором наблюдаются сезонные вариации концентрации U и ОА4/8 (Ильясова и др., 2022).

Значения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ также существенно меняются от станции к станции, но на каждой станции остаются на одном уровне в октябре и ноябре 2022 г. Максимальные величины обоих параметров получены для ст. 40, минимальные – для ст. 14к. Между изотопными составами урана и водорода–кислорода станций 8, 27, 40 и 184 соответствия в относительных вариациях не наблюдается, тогда как минимальное значение ОА4/8 для ст. 14к для всего Култукского полигона соответствует минимальным значениям $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ этой станции (рис. 2).

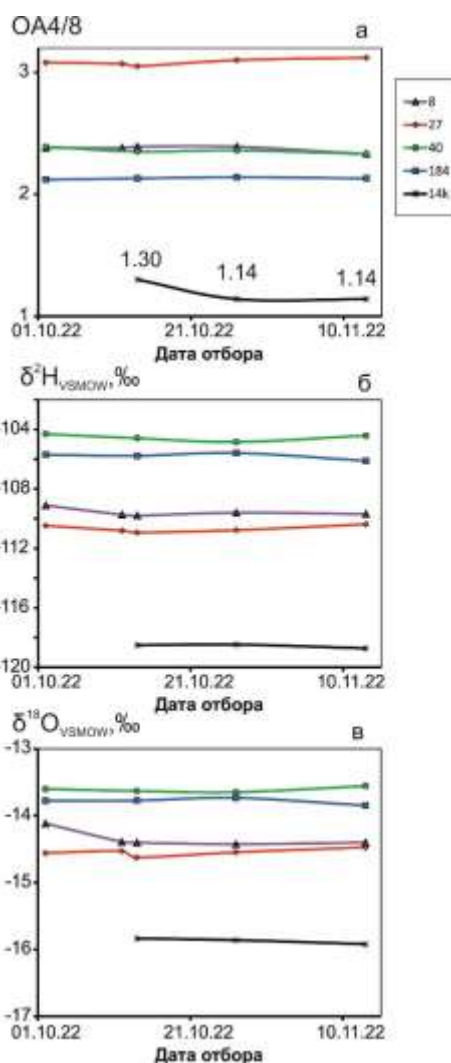


Рис. 2. Диаграммы значений OA4/8, $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ на шкале времени. Данные получены для основных мониторинговых станций подземных вод Култукского полигона в октябре и ноябре 2022 г. Характеристика станций приведена в работах (Рассказов и др., 2015, 2022).

Fig. 2. Diagrams of AR4/8, $\delta^2\text{H}$, and $\delta^{18}\text{O}$ values on a time scale. The data are obtained for the main groundwater monitoring stations of the Kultuk area in October and November 2022. The stations are described in (Rasskazov et al., 2015, 2022).

Для подземных вод Култукского полигона получены в целом более высокие значения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ чем для подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища. На диаграммах $\delta^2\text{H}$ – OA4/8 и $\delta^{18}\text{O}$ – OA4/8 (рис. 3а,в) для подземных вод Култукского полигона обозначаются компоненты Е (с равновесным ураном, equilibrium U) и NE (с неравновесным ураном, nonequilibrium U). Первый из них представлен низким значением $\delta^2\text{H}$ подземных вод ст. 14к (около -120 ‰) и более высоким значением подземных вод ст. 45 (около -105 ‰), второй имеет

промежуточное значение $\delta^2\text{H}$ подземных вод ст. 27 (около -110 ‰).

Фигуративная точка пробы воды ст. 143А выходит за пределы фигуративных поля подземных вод Култукского полигона (зоны ГСР) и находится на верхнем окончании тренда подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища. Нижнему окончанию тренда соответствуют точки подземных вод ст. 108 (Большая Речка). К тренду относятся точки подземных вод Больших Котов (ст. БК-2 и БК-11) и Бугульдейки (ст. 136).

На диаграммах $\delta^2\text{H}$ – OA4/8 и $\delta^{18}\text{O}$ – OA4/8 (рис. 3б,г) для подземных вод Тункинской

долины и удаленных от оз. Байкал и Иркутского водохранилища, получены группы точек с повышенными значениями $\delta^2\text{H}$ (–107–112 ‰) и $\delta^{18}\text{O}$ (–14–15 ‰) при умеренном значении ОА4/8 (1.4–2.0) и с низкими значениями $\delta^2\text{H}$ (–115–120 ‰) и $\delta^{18}\text{O}$ (–16.0–16.5 ‰) при более низких значениях ОА4/8 (0.97–1.3). Отдельно располагаются фигуративные точки подземных вод Предбайкалья (ст. 56 и

10). Высокое значение ОА4/8 (около 15) минеральной воды ст. 56 (Олхинская скважина) отражает особый состав ее источника. Для этой воды получены наиболее низкие значения $\delta^2\text{H}$ (–132.84 ‰) и $\delta^{18}\text{O}$ (–17.68 ‰) среди всех исследованных подземных вод территории исследований.

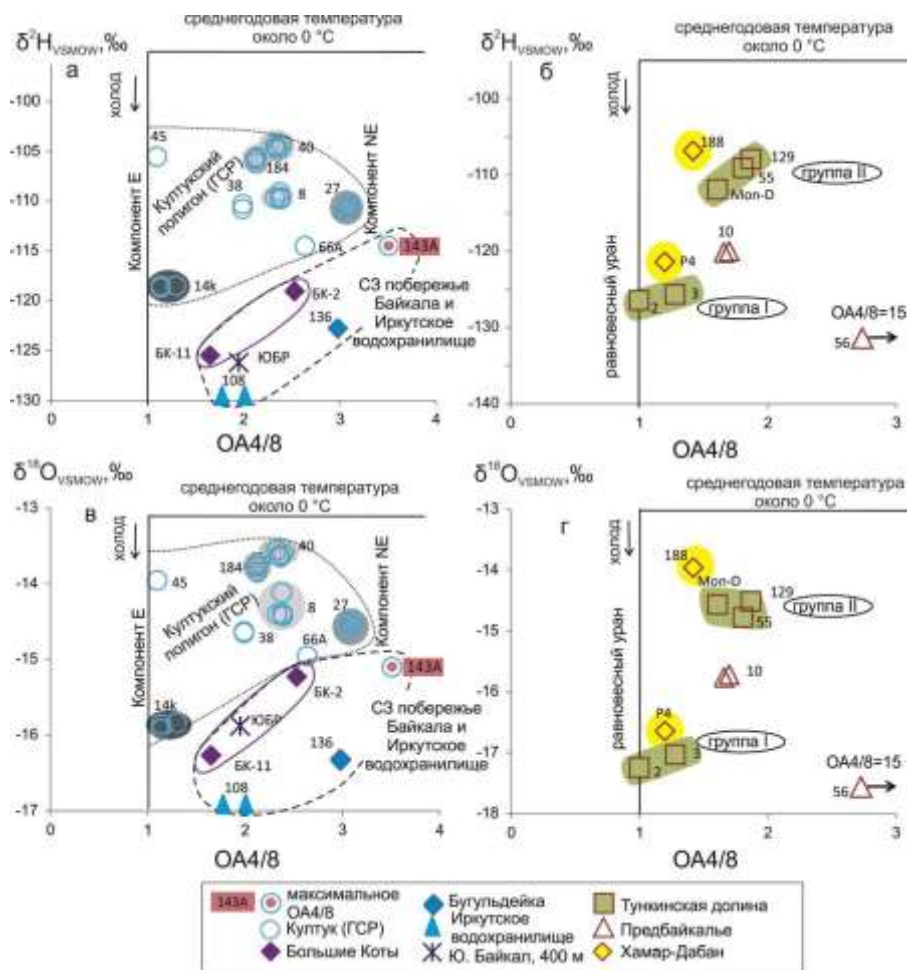


Рис. 3. Диаграммы $\delta^2\text{H}$ – ОА4/8 (а) и $\delta^{18}\text{O}$ – ОА4/8 (в) для подземных вод Култукского полигона, северо-западного побережья Байкала и восточного берега Иркутского водохранилища и сопредельных территорий Предбайкалья и Тункинской долины, удаленных от оз. Байкал и Иркутского водохранилища, и диаграммы $\delta^2\text{H}$ – ОА4/8 (б) и $\delta^{18}\text{O}$ – ОА4/8 (г) для подземных вод, соответственно, этих же территорий (выделены группы I и II). Точки опробования см. на рис. 1. Значения $\delta^2\text{H} = -126.21 \pm 0.08$ и $\delta^{18}\text{O} = -15.88 \pm 0.17$ глубинной воды ЮБР приняты по результату измерения пробы байкальской воды с глубины 400 м в районе Култука (Оганесянц и др., 2022).

Fig. 3. Diagrams $\delta^2\text{H}$ vs AR4/8 (a) and $\delta^{18}\text{O}$ – AR4/8 (в) for groundwater of the Kultuk are, northwest coast of Lake Baikal, and eastern shore of the Irkutsk Reservoir and adjacent territories of the Pre-Baikal region and Tunka Valley, remote from Lake Baikal and the Irkutsk Reservoir, and diagrams $\delta^2\text{H}$ vs AR4/8 (б) and $\delta^{18}\text{O}$ – AR4/8 (г) for groundwater, respectively, of the same territories (groups I and II are highlighted). Sampling sites are shown on Fig. 1. The values of $\delta^2\text{H} = -126.21 \pm 0.08$ and $\delta^{18}\text{O} = -15.88 \pm 0.17$ of the deep water composition of the South Baikal Reservoir are plotted for the Baikal water sample taken from a depth of 400 m in the Kultuk area (Oganesyants et al., 2022).

На диаграмме $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ (рис. 4а) фигуративные точки подземных вод Култукского полигона относятся к единому тренду от состава ст. 14к до состава ст. 40. Тренд смещен ниже глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) с некоторым наклоном. Подземные воды полигона объединяются в единую генетическую совокупность. Точки подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища также смещены ниже линии ГЛМВ. Самые низкие значения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$, соответствующие ГЛМВ, имеет вода ст. 108 (Большая Речка берега Иркутского водохранилища). Вблизи точки этой станции на диаграмме рис. 4а находится точка ст. 194 – родника, газифицирующего сероводородом (Радищево, г. Иркутск). Точки подземных вод северо-западного побережья Байкала сдвинуты вверх и вправо. В целом точки подземных вод

северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища рассеяны между составами ЮБР и ГЛМВ. Составу ЮБР наиболее близок состав подземной воды ст. БК-11 (Большие Коты). Точка воды ст. 143А принадлежит тренду подземных вод Култукского полигона и в то же время может интерпретироваться в рамках гипотезы общего рассеяния точек подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища.

На рис. 4б точки подземных вод территорий Предбайкалья и Тункинской долины, удаленных от оз. Байкал образуют две группы с относительным смещением вдоль ГЛМВ (I и II). Для проб, отобранных в районе Олхи (ст. Olkh-10 и 56), проявляется тенденция смещения точек правее ГЛМВ.

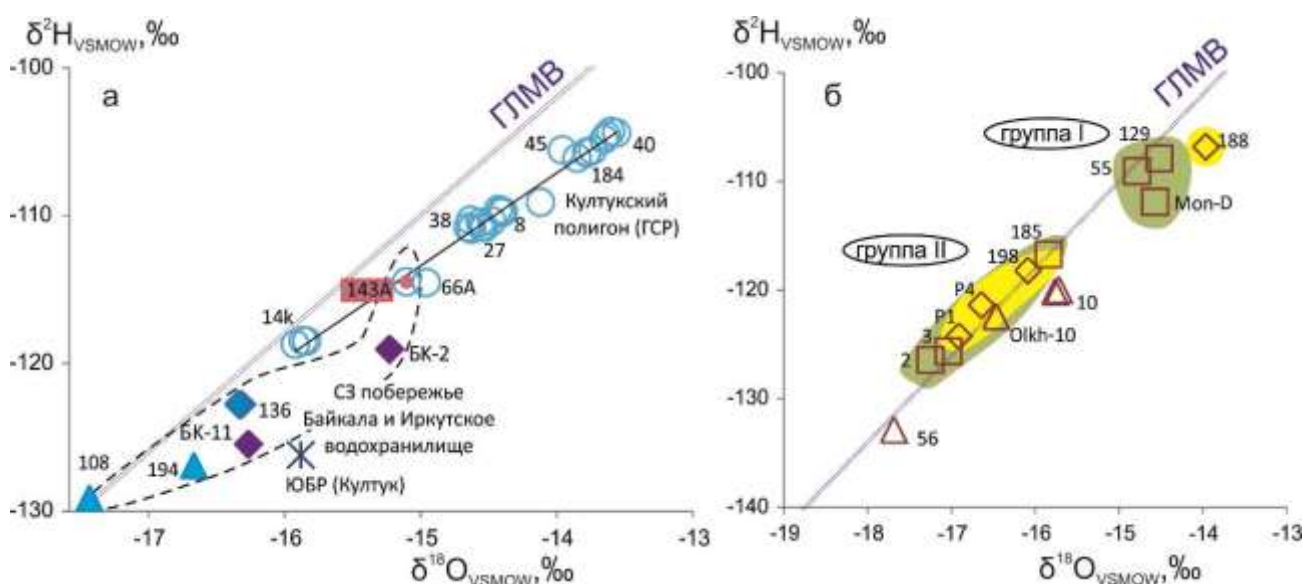


Рис. 4. Диаграммы $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ для подземных вод Култукского полигона, северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища (а) и сопредельных территорий Предбайкалья и Тункинской долины, удаленных от оз. Байкал (б). Точки опробования см. на рис. 1, условные обозначения – на рис. 3. Положение глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) из работы (Craig, 1961).

Fig. 4. Diagrams $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ for groundwater of the Kultuk area, northwestern coast of Lake Baikal, and eastern coast of the Irkutsk reservoir (a) and adjacent territories of the Pre-Baikal region and Tunka Valley, remote from Lake Baikal (b). Sampling sites are shown in Fig. 1, symbols – in Fig. 3. The Global Line of Meteoric Waters (GLMW) is shown after (Craig, 1961).

На диаграмме ОА4/8 – ОМ (общая минерализация) (рис. 5а) значения ОМ меняются в подземных водах Култукского полигона (в

зоне ГСР) от 130 до 560 мг/дм³ при вариациях значений ОА4/8 от 1.1 до 3.2. Максимальный разброс значений ОМ дает компонент Е. С

возрастанием ОА4/8 разброс значений ОМ последовательно уменьшается и в компоненте NE (ст. 27) составляет интервал от 180 до 280 мг/дм³. В этот интервал попадает значение ОМ воды ст. 143А (200 мг/дм³). Точка этой станции фактически продолжает тренд ОА4/8 – ОМ подземных вод Култукского полигона (зоны ГСР). Точки подземных вод Иркутского водохранилища (ст. 108) и Больших Котов (ст. БК-2 и БК-11) смещены левее фигуративного поля подземных вод Култукского полигона, к составу ЮБР, а точка воды Бугульдейки (ст. 136) смещена, наоборот, правее этого фигуративного поля.

На диаграммах $\delta^2\text{H} - \text{ОМ}$ и $\delta^{18}\text{O} - \text{ОМ}$ (рис. 5в,д) точки подземных вод имеют иной характер распределения, что подчеркивает резкие различия генетической информации ОА4/8 (изотопов U, растворенного в воде) и параметров $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ (термального фракционирования изотопных компонентов молекулы воды). Значение ОМ в резервуаре Южного Байкала минимальное (около 100 мг/дм³). Тренды возрастания ОМ с повышением $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в подземных водах Култукского полигона начинаются от состава ЮБР и образуют дуги. С началом тренда совпадают точки подземных вод Больших Котов (ст. БК-2 и БК-11). Точки подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища рассеяны правее состава ЮБР с относительным возрастанием ОМ при снижении $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$. Точка воды ст. 143А занимает

промежуточное положение. Она входит не только в фигуративные поля подземных вод Култукского полигона (зоны ГСР), но и в фигуративные поля подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища.

На диаграмме ОА4/8 – ОМ подземных вод территорий Предбайкалья и Тункинской долины, удаленных от Байкала и Иркутского водохранилища (рис. 5в), минимальной минерализаций характеризуются воды Хамар-Дабана (ст. 188 и Р4). В Тункинской долине и Олхинском Предбайкалье ОМ подземных вод возрастает. В измерения изотопов включены пробы минеральной воды курорта Аршан в Тункинской долине (ст. 2) с почти изотопно-равновесным U (ОА4/8 = 0.97) и высоким значением ОМ (3.5 г/дм³), а также минеральной воды Олхинской скважины с резко неравновесным U (ОА4/8 = 15) и высоким значением ОМ (3.1 г/дм³).

На диаграммах $\delta^2\text{H} - \text{ОМ}$ и $\delta^{18}\text{O} - \text{ОМ}$ подземных вод территорий Предбайкалья и Тункинской долины, удаленных от Байкала и Иркутского водохранилища (рис. 5г,е), наблюдается рассеяние фигуративных точек групп I и II. Распределение точек подземных вод группы I в целом подобно рассеянию точек подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища. Распределение точек подземных вод группы II частично совпадает с трендом подземных вод Култукского полигона.

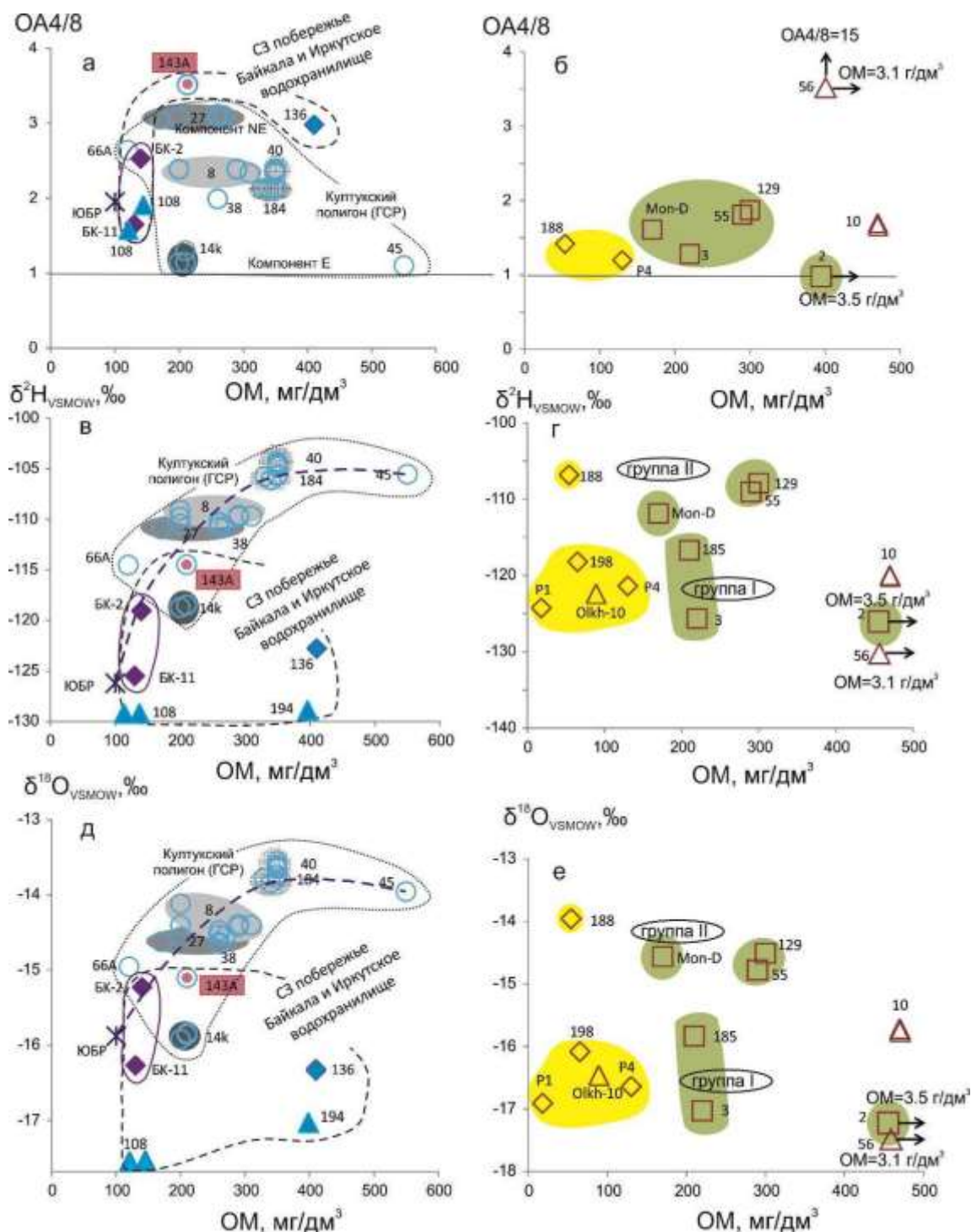


Рис. 5. Диаграммы OA4/8 – OM (а, б), $\delta^2\text{H}$ – OM (в, г) и $\delta^{18}\text{O}$ – OM (д, е) для подземных вод Култукского полигона и сопредельных территорий Предбайкалья и Тункинской долины. Точки опробования см. на рис. 1, условные обозначения – на рис. 3.

Fig. 5. Diagrams AR4/8 vs salinity (OM) (a, б), $\delta^2\text{H}$ vs salinity (в, г), and $\delta^{18}\text{O}$ vs salinity (д, е) for groundwater of the Kultuk area and adjacent territories of the Pre-Baikal region and the Tunka Valley. Sampling sites are shown in Fig. 1, symbols – in Fig. 3.

В подземных водах Култукского полигона значения $\delta^2\text{H}$ имеют фактически линейную зависимость от содержания Si (рис. 6). На панели а фигуративные точки подземных вод

этой территории смещаются с возрастанием $\delta^2\text{H}$ от состава ЮБР. На панели в фигуративные точки подземных вод Култукского полигона смещаются с возрастанием значений

$\delta^{18}\text{O}$ от состава ст. 14к. Изотопный состав кислорода имеет линейную зависимость от содержания кремния. Температурный механизм фракционирования проявляется в

изотопах кислорода так же как в изотопах водорода. Точка ЮБР сдвинута, однако, влево относительно тренда точек подземных вод Култукского полигона.

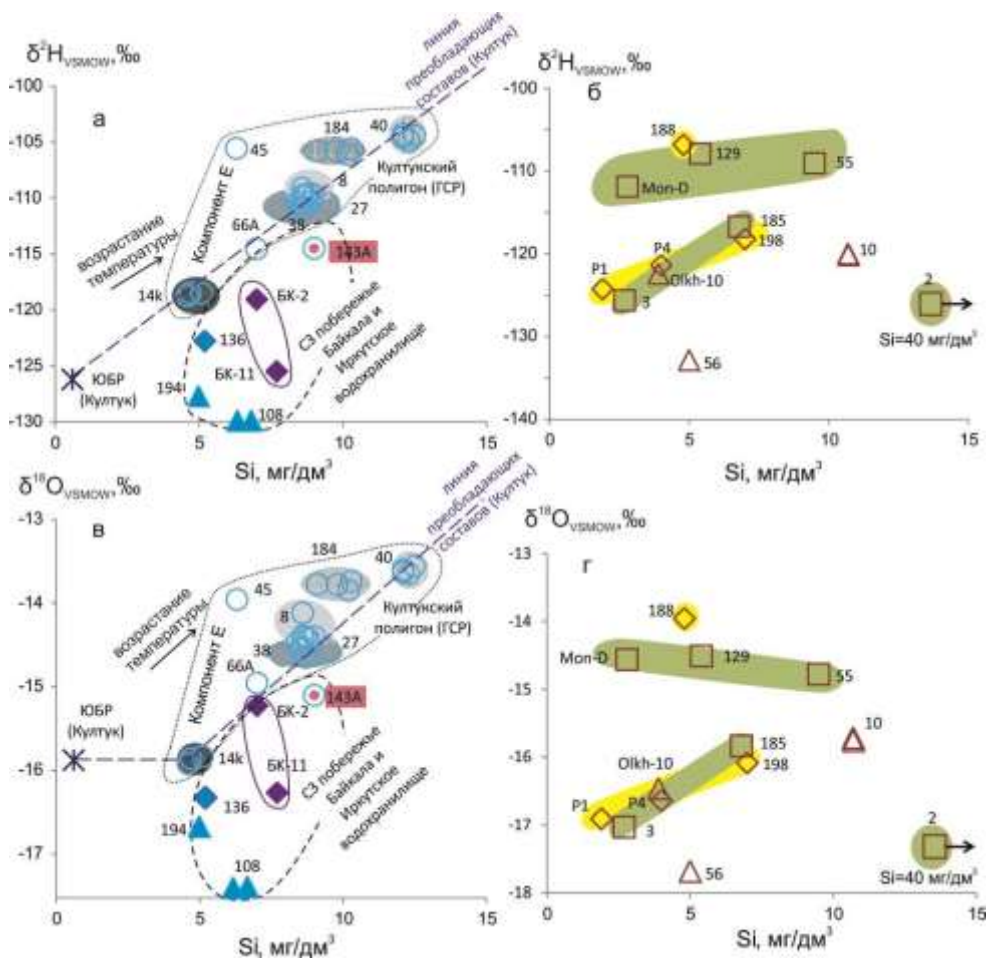


Рис. 6. Диаграммы $\delta^2\text{H}$ – Si для подземных вод Култукского полигона, северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища (а) и сопредельных территорий Предбайкалья и Тункинской долины, удаленных от оз. Байкал (б), $\delta^{18}\text{O}$ – Si для этих же подземных вод, соответственно (в, г). Точки опробования см. на рис. 1, условные обозначения – на рис. 3.

Fig. 6. Diagrams $\delta^2\text{H}$ vs Si for groundwater of the Kultuk area, northwest coast of Lake Baikal, and Irkutsk reservoir (a) and adjacent territories of the Pre-Baikal region and Tunka Valley, remote from Lake Baikal (б), $\delta^{18}\text{O}$ vs Si for the same groundwaters, respectively (в, г). Sampling sites are shown in Fig. 1, symbols – in Fig. 3.

На диаграммах рис. ба,в фигуративные поля подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища в целом смещены правее и ниже фигуративных полей подземных вод Култукского полигона. Следовательно, условия в резервуаре подземных вод Култукского полигона как осевой части БРС в зоне ГСР действительно различаются с условиями в резервуарах подземных вод, для

которых, также как для Култукского резервуара, предполагается вхождение компонента ЮБР. Такое же смещение точек подземных вод ст. 143А лишний раз подчеркивает отличие подземных вод этой станции от подземных вод Култукского резервуара (зоны ГСР). На диаграммах рис. бб,г изотопы водорода и кислорода не имеют явной зависимости от содержания Si.

Сопоставления

Фигуративные точки изотопных составов кислорода и водорода поверхностных и подземных вод Тункинской долины в целом соответствуют направлению ГЛМВ (рис. 7). По данным, приведенным в работе (Дриль и др., 2005), речные воды этой долины условно разделяются на 2 группы по преобладающему типу питания – существенно дождевого (группа I) и существенно ледникового (группа II). Для группы I характерны более

высокие значения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$, что связано с преобладанием в их питании дождевых вод. К этой группе относятся поверхностные воды р. Иркут и его притоков на абсолютных высотах 700–900 м. Группа речных вод II отличается более низкими значениями $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$, которые объясняются значительной ролью талых ледниковых вод в их питании. К ним относятся воды р. Иркут и его притоков в верхнем течении, на абсолютных высотах 1000–2000 м.

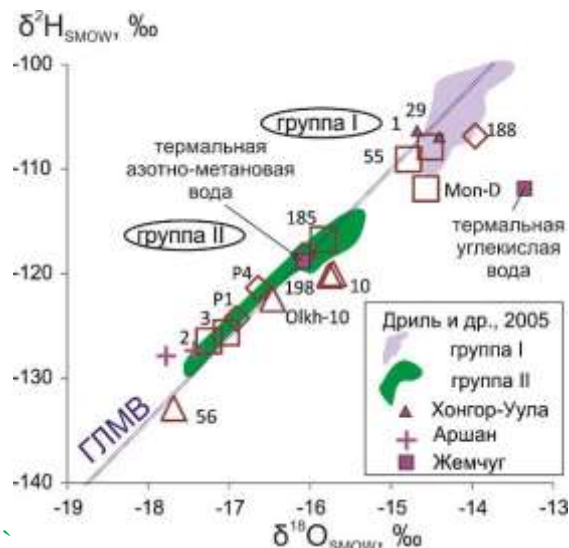


Рис. 7. Диаграмма $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ сравнения данных, полученных для подземных вод территорий Предбайкалья и Тункинской долины, удаленных от оз. Байкал с данными о поверхностных и минеральных водах Тункинской долины Байкальской рифтовой системы. Группы изотопных составов поверхностных вод (реки: Иркут, Ихе-Угунь, Кынгарга, Халагун, Большой и Малый Зангисан, Харагун, Зун-Мурин) на различных гипсометрических уровнях (I – 700–900 м и II – 1000–2000 м) (Дриль и др., 2005) дополняются новыми данными авторов по подземным водам. Точки опробования см. на рис. 1, условные обозначения – на рис. 3.

Fig. 7. Diagram $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ comparing the data obtained for groundwater in the Pre-Baikal region and the Tunka Valley, located far from Lake Baikal with the data on surface and mineral waters in the Tunka Valley of the Baikal Rift System. The groups of isotope compositions of surface waters (rivers: Irkut, Ikhe-Ugun, Kyngarga, Khalagun, Bolshoi and Maly Zangisan, Kharagun, Zun-Murin) at different hypsometric levels (I – 700–900 m and II – 1000–2000 m) (Dril' et al., 2005) are supplemented by the authors' new data. Sampling sites are shown in Fig. 1, symbols – in Fig. 3.

Минеральные источники обнаруживают отчетливую связь с поверхностными водами в зоне разгрузки. Например, воды родников Хонгор-Ула («Почечный» и «Общеукрепляющий») принадлежат к группе I поверхностных вод, а подземные воды месторождения Аршан принадлежат к группе II (см. рис. 6). Воды месторождения Жемчуг характеризуются резко различным изотопным составом воды. Азотно-метановая термальная вода имеет изотопный состав, соответствующий группе II поверхностных вод, тогда как

углекислая термальная вода имеет более высокие значения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$. Существенный сдвиг вправо от линии метеорных вод точки углекислого состава интерпретируется как результат изотопного обмена при повышенной температуре с карбонатными породами, для которых определен интервал значений $\delta^{18}\text{O}$ от +17.6 до +27.2 ‰ (Дриль и др., 2005).

Группирование поверхностных вод по преобладающему типу питания в целом подтверждается представленными результатами определений изотопного состава водорода и

кислорода в подземных водах станций Предбайкалья и Тункинской долины, удаленных от оз. Байкал. В подземных водах отсутствуют аналоги речных вод с наиболее легкими изотопными составами водорода и кислорода. Минеральная вода ст. 56 (Олхинской скважины) не имеет изотопного аналога в поверхностных водах.

Новые данные характеризуют в основном подземные воды верхнего гидрогеодинамического этапа коры на глубинах до 1.6 км. В работу включена единственная проба ст. 2 с большей глубины (с нижнего

гидрогеодинамического этапа) – проба холодной углекислой минеральной воды курорта Аршан. Фигуративная точка этой минеральной воды соответствует тренду термальных вод Баунтовской впадины БРС. В отличие от трендов возрастания $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ с возрастанием Si (т.е. с повышением температуры) в Култукском резервуаре верхнего гидрогеодинамического этапа, в Баунтовском резервуаре термальных вод нижнего гидрогеодинамического этапа наблюдаются тренды падения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ с возрастанием Si (т.е. с повышением температуры) (рис. 8).

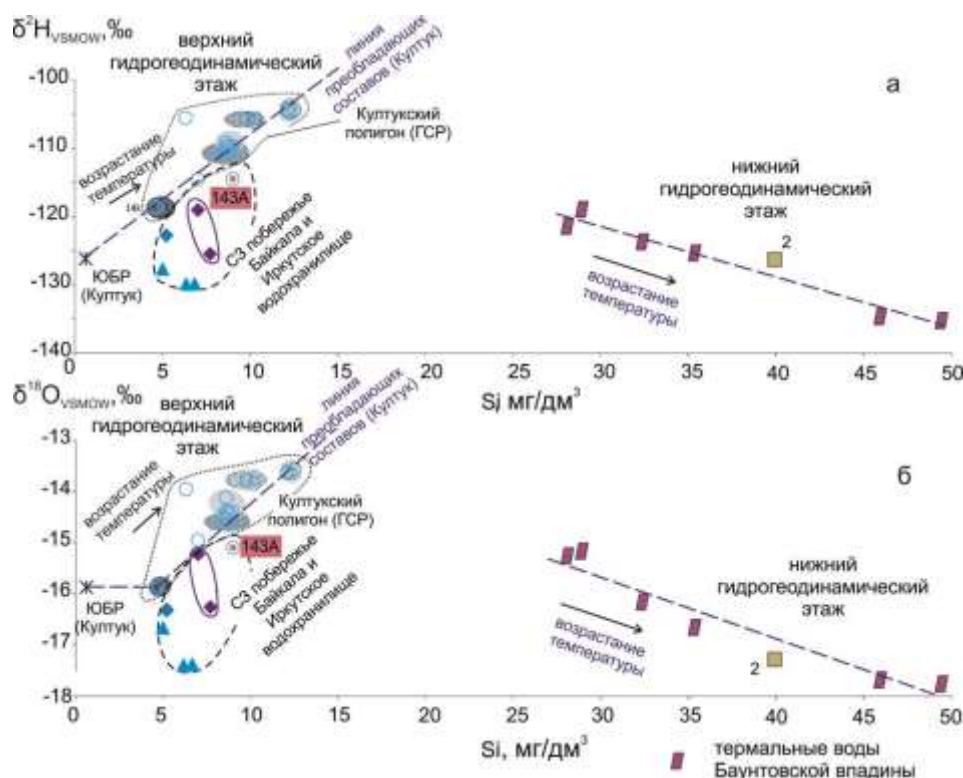


Рис. 8. Диаграммы $\delta^2\text{H}$ – Si (а) $\delta^{18}\text{O}$ – Si (б) сравнения данных, полученных для подземных вод Култукского полигона, северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища (см. рис. 5а) с данными о термальных водах Баунтовской впадины БРС (Замана, 2011). Условные обозначения см. на рис. 3.

Fig. 8. Diagrams $\delta^2\text{H}$ vs Si (а) $\delta^{18}\text{O}$ vs Si (б) comparing the data obtained for groundwater of the Kultuk area, northwest coast of Lake Baikal, and Irkutsk reservoir (Fig. 5а) with the data on thermal waters of the Baunt basin of the BRS (Zamana, 2011). Sampling sites are shown in Fig. 1, symbols – in Fig. 3.

Обсуждение результатов

Подземные воды ст. 143А частично соответствуют геохимическим параметрам Култукского резервуара подземных вод, а частично – геохимическим параметрам подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского

водохранилища. В подземные воды этих территорий предполагается вхождение компонента ЮБР (Рассказов и др., 2020а). В обсуждении результатов дается определение двухкомпонентного смешения подземных вод Култукского резервуара с выделением роли состава ЮБР, особо подчеркивается приложение результатов определения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$

для интерпретации происхождения подземных вод Култукского полигона в сопоставлении с подземными водами сопредельных территорий БРС и приводится обоснование специфики изотопных характеристик подземных вод ст. 143А с позиций определения их структурного контроля дуговым разломом.

Модель двух-компонентного смешения подземных вод Култукского резервуара

В результате существенных тектонических движений берегов шовной зоны ГСР ее породы переработаны с усреднением состава тектонитов, поэтому растворы взаимодействия вода–порода Култукского резервуара в этой зоне характеризуются смешением двух компонентов, один из которых имеет

высокое $OA4/8$ (3.3) и низкое отношение $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.70534), другой дает равновесное значение $OA4/8$, близкое к 1 при высоком отношении $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.7205). С выходом на фланги шовной зоны ГСР модель смешения изотопов U и Sr в подземных водах меняется из-за резкого возрастания отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ в древнейших метаморфических породах (гнейсах) Шарыжалгайского блока и относительного снижения этого отношения в более молодых породах Слюдянского блока. В качестве одного из компонентов в Култукский резервуар подземных вод входит глубинная вода Южно-Байкальского резервуара (ЮБР) с характеристиками: $OA4/8 = 1.96$, $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.708629$ (рис. 9).

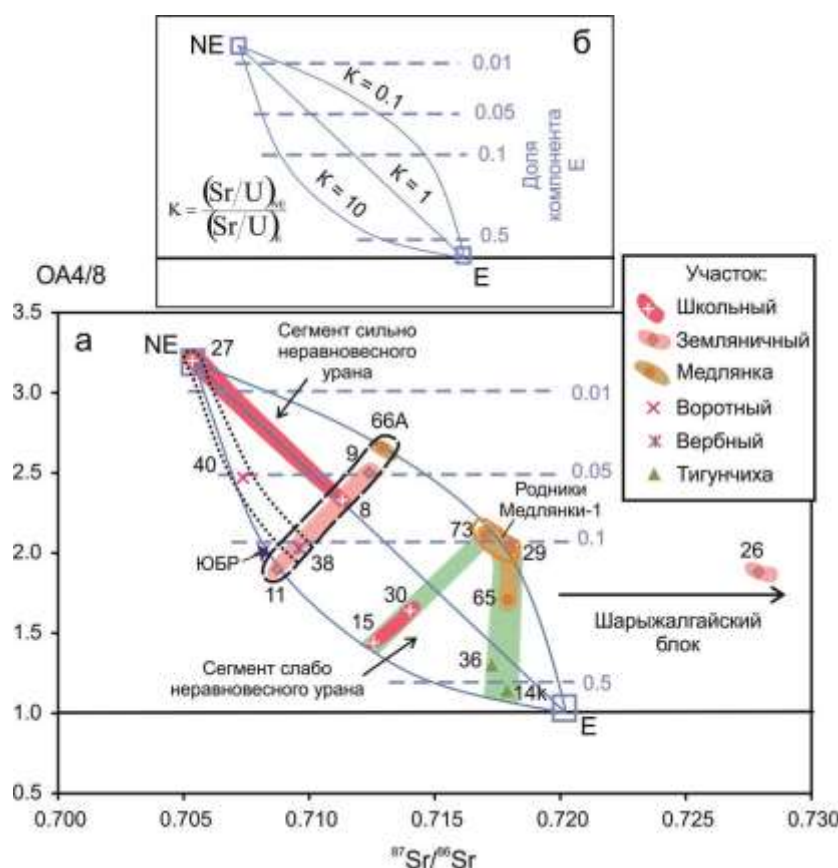


Рис. 9. Диаграмма $OA4/8 - ^{87}Sr/^{86}Sr$ подземных вод Култукского полигона. На врезке б приведена детерминированная двухкомпонентная модель. Конечные компоненты: E – с равновесным ураном (equilibrium U), NE – с неравновесным ураном (nonequilibrium U), $U_E > U_{NE}$. Воды Байкала и родников р. Медлянка-1 соответствуют содержаниям около 10 % компонента E. В сегменте сильно неравновесного урана доля этого компонента ниже, а в сегменте слабо неравновесного урана – выше. Характеристика станций Култукского полигона приведена в работе (Рассказов и др., 2015), обоснование компонента глубинной воды Южно-Байкальского резервуара ($OA4/8 = 1.96$; $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.70863$) – в работах (Рассказов и др., 2020а; Rasskazov et al., 2020б).

Fig. 9. Diagram $AR4/8$ vs $^{87}Sr/^{86}Sr$ of groundwater of the Kultuk area. Inset б shows a deterministic two-component model. Final components: E – with equilibrium uranium, NE – with nonequilibrium uranium, $U_E > U_{NE}$. Waters of Lake Baikal and springs of the Medlyanka-1 river correspond to ~10% of component

E. In the segment of strongly nonequilibrium uranium, the share of this component is lower, and in the segment of slightly nonequilibrium uranium, it is higher. Stations of the Kultuk area are described in (Rasskazov et al., 2015), the substantiation of the deep water component of the South Baikal Reservoir ($AR4/8 = 1.96$; $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.70863$) is given in the works (Rasskazov et al., 2020a; Rasskazov et al., 2020b).

На диаграммах $\delta^2H - OA4/8$ и $\delta^{18}O - OA4/8$ (рис. 3а,в) большинство фигуративных точек подземных вод Култукского полигона находится между точками ст. 45 и 27. Единственная точка ст. 66А попадает между точками ст. 14к и 27. Такое распределение точек подземных вод этих станций в общем согласуется с их пространственным разделением на диаграмме $OA4/8 - ^{87}Sr/^{86}Sr$ (рис. 9). Таким образом, данные по изотопам водорода и кислорода (входящие в молекулу воды) подземных вод Култукского полигона (зоны ГСР) служат дополнительным подтверждением принятой двухкомпонентной модели смешения растворенных компонентов. При этом подземные воды компонента Е (с У, близким изотопному равновесию) на ст. 45 дает меньший температурный сдвиг (δ^2H и $\delta^{18}O$), а на ст. 14к – больший. Фигуративная точка ЮБР находится ниже фигуративных полей подземных вод Култукского полигона (зоны ГСР); значение $\delta^{18}O$ (-15.88) сопоставимо с этим показателем подземных вод ст. 14к, тогда как

значение δ^2H (-126.21) существенно ниже значения подземных вод ст. 14к.

Механизмы фракционирования изотопов водорода и кислорода в подземных водах

Если подпитка глубинными флюидами отсутствует, подземные воды территории формируются за счет метеорных осадков и имеют инфильтрационное происхождение. Исходные изотопы вод, выпавших на поверхность Земли, в основном фракционируют в зависимости от температур. В теплых климатических условиях изотопный состав вод облегчается, в холодных – утяжеляется. Изотопы заметно фракционируют при испарении вод с фазовым переходом в водяной пар и при замерзании с фазовым переходом в лед. Линия замерзания (ЛЗ) пересекает глобальную линию метеорных вод (ГЛМВ) при низких значениях δ^2H и $\delta^{18}O$, линия испарения (ЛИ) – при повышенных значениях δ^2H и $\delta^{18}O$ (рис. 10).

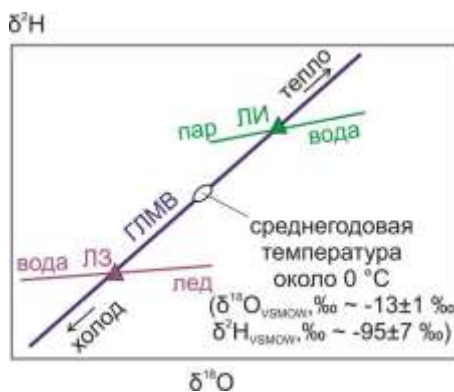


Рис. 10. Вариации изотопного состава водорода и кислорода в воде в зависимости от среднегодовой температуры воздуха. Начальный изотопный состав воды линий испарения (ЛИ) и замерзания (ЛЗ) соответствует глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ). При испарении уходящий пар по изотопам водорода и кислорода облегчается – «пар», а остаточная вода утяжеляется – «вода». При замерзании остаточная вода по изотопам водорода и кислорода облегчается – «вода», а лед утяжеляется – «лед». Из работы (Токарев, 2025) с изменениями.

Fig. 10. Variations in isotopic compositions of hydrogen and oxygen in water depending on the average annual air temperature. The initial isotopic composition of water of the evaporation (ЛИ) and freezing (ЛЗ) lines corresponds to the Global Line of Meteoric Waters (ГЛМВ). During evaporation, the outgoing steam becomes lighter in hydrogen and oxygen isotopes – “steam”, and the residual water becomes heavier – “water”. During freezing, the residual water becomes lighter in hydrogen and oxygen isotopes – “water”, and the ice becomes heavier – “ice”. Modified after (Tokarev, 2025).

Для водно-ледниковых объектов предполагается, что величины ОА4/8 в подземных водах, превышающие 3, являются следствием таяния многолетнемерзлых пород (Токарев, 2025). Этот механизм принимается как универсальный для выделения территорий подземных вод с высоким ОА4/8, в которых, как предполагается, когда-то распространялись мерзлые породы.

Тренд преобладающих составов подземных вод Култукского полигона на диаграмме $\delta^2\text{H} - \text{Si}$ (рис. 6а) отражает температурное фракционирование изотопов водорода. Растворение Si в подземных водах зависит от температуры. Из линейного согласования повышения значений $\delta^2\text{H}$ и содержания Si в подземных водах следует, что изотопный состав водорода меняется в зависимости от температуры в результате фракционирования изотопов при взаимодействии вода–порода непосредственно в Култукском резервуаре подземных вод. Таким образом, изотопный состав водорода в подземных водах может существенно отличаться от первичного состава метеорных вод (если они проникали в кору) и отражать градиент температур и фазовые переходы, существующие в резервуаре подземных вод. Смещение точки ЮБР влево относительно тренда точек подземных вод Култукского полигона на диаграмме $\delta^{18}\text{O} - \text{Si}$ (рис. 6б) в сравнении с ее положением на тренде диаграммы $\delta^2\text{H} - \text{Si}$ (рис. 6а) свидетельствует о разной роли компонентов изотопов водорода и кислорода в подземных водах полигона.

Поток газов–восстановителей (включая водород) усиливается при активизации разломов, приводящей к землетрясениям, что отражается в резком косейсмическом снижении окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) подземных вод и возрастанию роли атомарной ртути (Чебыкин и др., 2022; Рассказов и др., 2023). Согласованность тренда подземных вод Култукского полигона с составом ЮБР на диаграмме $\delta^2\text{H} - \text{Si}$ отражает (рис. 6а), таким образом, восстановленный характер флюидных потоков, которые преобладают в ходе сейсмической активизации разломов.

Интересно, что в метане газогидратов определен интервал $\delta^2\text{H}$ от -200 до -300 (Nashikubo et al., 2013). Пока не ясно, может ли повлиять разрушение газогидратов в донных отложениях Байкала на измеренные значения $\delta^2\text{H}$ в глубинной байкальской воде.

На примере трендов понижения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ с повышением Si в термальных водах

Баунтовской впадины Л.В. Замана (2011, с. 90) приходит к выводу о том, что «...данные по изотопному составу воды изученных термальных источников (Баунтовской впадины ред.) не расходятся с выводом о ее метеогенном происхождении, но в то же время корреляция изотопных отношений с концентрациями растворенной кремнекислоты дает основание предполагать возможность фракционирования изотопов и кислорода, и водорода в процессе взаимодействия воды с вмещающими породами». Рассмотрение причин образования разнонаправленных трендов $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ с возрастанием Si в подземных водах Култукского полигона и Баунтовской впадины выходит за рамки настоящей статьи. Заметим только, что за этими различиями кроются разные механизмы образования трендов. Термальные воды представляют собой открытую систему. Они характеризуются изотопным составом урана, близким к равновесию (Рассказов и др., 2024). Утяжеление изотопных составов водорода и кислорода термальных вод может быть следствием увеличения роли отделившейся газовой фазы при высокой (возрастающей) температуре (показатель – растворение Si) на нижнем гидротектоническом этаже.

Из выявленных зависимостей изотопных составов водорода и кислорода от содержания кремния (растворенной кремнекислоты) в подземных водах Култукского полигона и Баунтовской впадины следует, что подземные воды этих территорий получают сильные сигналы от вмещающих пород, вносящие искажения в их первоначальное состояние (зависимое или независимое от климатических условий). Этот вывод важен для подземных вод Култукского полигона с точки зрения мониторинговых наблюдений для оценки угрозы землетрясений. В подземных водах полигона выявляются изменения различных гидрогеохимических параметров. Изотопный состав водорода и кислорода также подвержен изменениям, свидетельствующим о существенных отличиях процессов глубинного Култукского резервуара от резервуаров других территорий БРС.

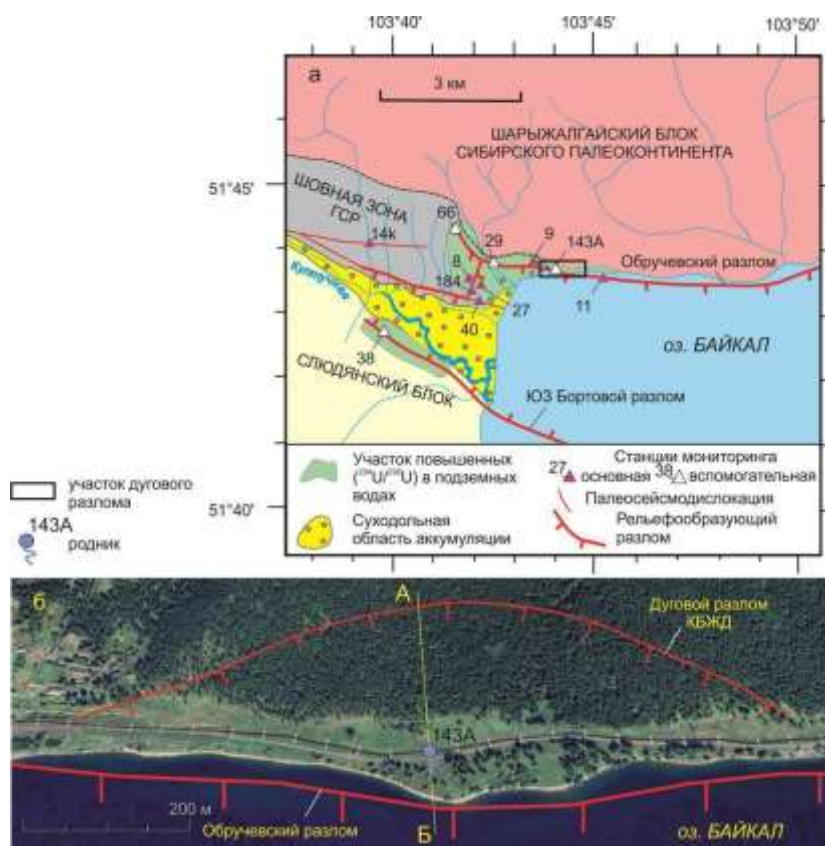
Структурный контроль выхода подземных вод в архейских породах Шарыжалгайского блока

Гипотеза о причинах повышения ОА4/8 в подземных родниковых водах ст. 143А укладывается в рамки интерпретации структуры территории как сочленения шовной зоны ГСР с Обручевским разломом, отсекающим

от Шарьжалгайского блока сегмент, опущенный за кайнозойское время в Южном Байкале не менее чем на 4 км (Rasskazov et al., 2020b). Соответственно, возрастание ОА4/8 вызвано более интенсивной отдачей ядер ^{234}U из области микротрещиноватости архейских шарьжалгайских пород по сравнению с отдачей из области микротрещиноватости тектонитов шовной зоны ГСР в Култукском резервуаре подземных вод.

Роднику ст. 143А пространственно соответствует дуговой разлом КБЖД, протягивающийся вдоль Обручевского разлома, приблизительно на 1 км (рис. 11а). Расстояние от родника ст. 143А до центральной части дуги составляет 220 м. Глубина резервуара, питающего этот родник, оценивается в 1.4 км по

температуре $34\text{ }^{\circ}\text{C}$, рассчитанной по концентрации $\text{Si } 9\text{ мг/дм}^3$ в воде этой станции с использованием халцедонового геотермометра (Amorsson et al., 1983) и регионального геотермического градиента $25\text{ }^{\circ}\text{C/км}$ (Голубев, 2007). Малое расстояние от дугового разлома до родника ст. 143А предполагает субвертикальное погружение дугового разлома до резервуара с последующим выполаживанием плоскости и переходом в листрический разлом. С учетом вероятного площадного нарушения геотермического градиента под впадиной оз. Байкал (Голубев, 2007), эта оценка глубины резервуара вод ст. 143А (1.5 км), скорее всего, занижена. Резервуар должен находиться несколько глубже (рис. 11б).



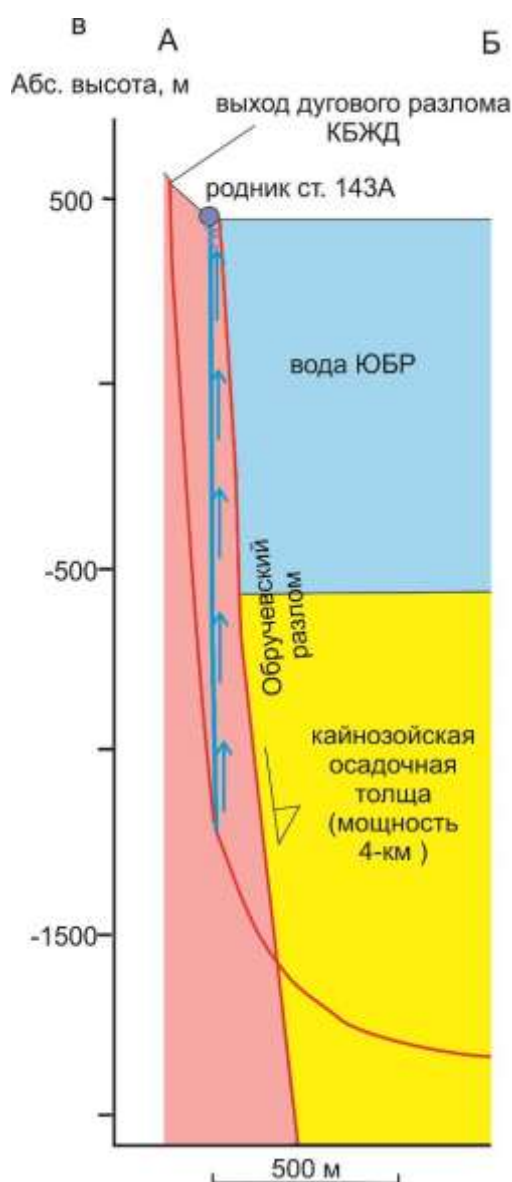


Рис. 11. Схема выхода родника (станция 143А) на восточной окраине Култукского мониторингового полигона с его структурным контролем дуговым разломом КБЖД на береговом склоне (а) и субмеридиональный профиль АБ предполагаемой глубинной структуры, контролирующей подземные воды (б). На панели а разлом выражен в рельефе уступами и западинами. Расстояние от родника до центральной части дуги – 220 м, до ее западного окончания на окраине пос. Култук – 500 м, до восточного окончания – 520 м. На панели б вода поднимается в структуре дугового разлома от области перехода его субвертикального падения к листрической части.

Fig. 11. Scheme of a spring outlet (station 143A) on the eastern margin of the Kultuk monitoring area with its structural control by the arc fault of the Circum-Baikal Railway on the coastal slope (a) and the north-south profile АБ of the supposed deep structure controlling groundwater (b). In panel a the fault is expressed in the relief by benches and depressions. The distance from the spring to the central part of the arc is 220 m, to its western end on the outskirts of the village of Kultuk is 500 m, to the eastern end is 520 m. In panel б the water rises in the structure of the arc fault from the area of transition from its subvertical dip to the listric one.

Активность дугового разлома КБЖД, контролирующего родник ст. 143А при подготовке Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации 2020–2023 гг., отражается в вариациях содержания Si подземных вод (рис. 12а). В 2016 г. в воде родника содержалось

около 7 мг/дм³ растворенного кремния. Содержание Si возросло с течением времени и 18 июня 2016 г. составляло около 8 мг/дм³. В последующие 2.5 месяца содержание Si еще возросло более чем на 1 мг/дм³ и 02 сентября 2019 г. вошло в диапазон значений 9.0–9.5

мг/дм³, характерный для Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации. Максимальное значение концентрации Si (9.5 мг/дм³) определено 21 июля 2021 г., после запускающих землетрясений (Быстринского, Кударинского и Хубсугульского). Проба воды, отобранная 18 февраля 2023 г., показала значение 9.1 мг/дм³ в диапазоне значений, характеризующих активизацию, но следующая проба, отобранная 05 апреля 2024 г.,

имела более низкое значение (8.6 мг/дм³). Спад концентрации Si обозначил завершение сейсмической активизации.

В досейсмический временной интервал 2016–2019 гг. значения ОА4/8 подземных вод были повышенными (3.57–3.68) и во время Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации снизились до интервала 3.48–3.54. Последнее значение, измеренное 18 февраля 2023 г., опустилось до 3.41 (рис. 12б).

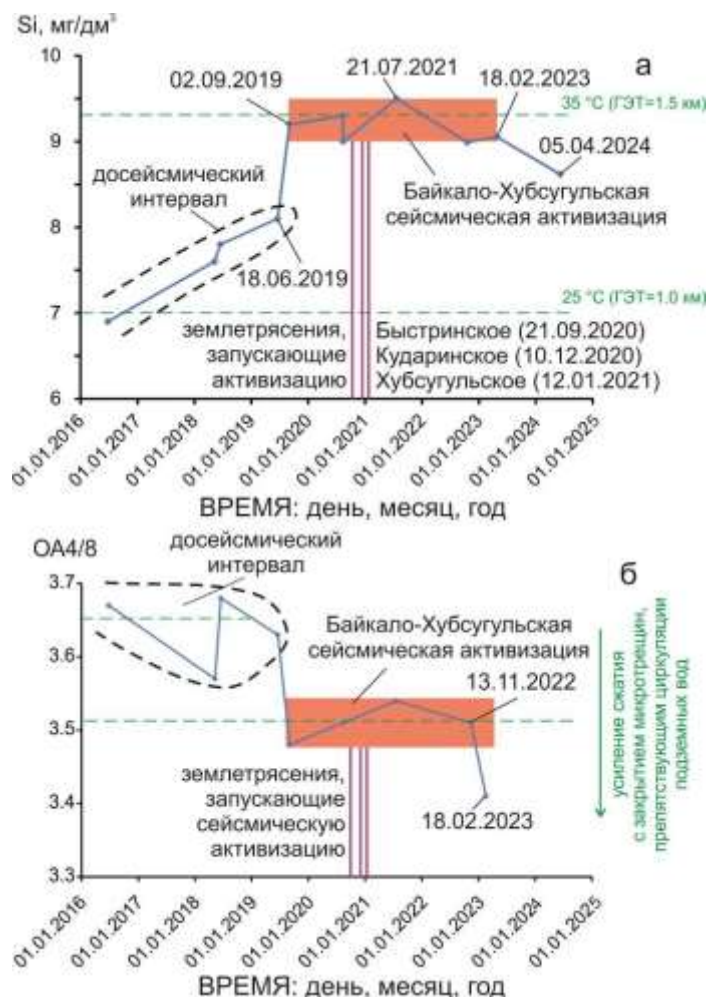


Рис. 12. Диаграммы временных вариаций (в 2016–2024 гг.) Si (а) и ОА4/8 (б) в подземных водах ст. 143А. Температура в резервуаре подземных вод рассчитывается по халцедоновому геотермометру (Arnorsson et al., 1983). ГЭТ – глубинный эквивалент температуры, оценивается по региональному геотермическому градиенту 25 °С/км (Голубев, 2007).

Fig. 12. Diagrams of temporal variations (in 2016–2024) of Si (a) and AR4/8 (б) in groundwater at station 143A. The temperature in the groundwater reservoir is calculated using a chalcedony geothermometer (Arnorsson et al., 1983). ГЭТ – the deep equivalent of temperature, estimated using a regional geothermal gradient of 25 °C/km (Golubev, 2007).

Перед Байкало-Хубсугульской сейсмической активизацией источник вод родника ст. 143А в резервуаре последовательно заглублялся от 1.0 до 1.2 км и во время этой

сейсмической активизации стабилизировался на глубине около 1.5 км, а после ее завершения источник проявил слабую тенденцию возвращения к досейсмическому состоянию с

относительным уменьшением глубины питающего резервуара. Высокое ОА4/8 в воде родника до сейсмической активизации интерпретируется как показатель сильного растяжения зоны развития микротрещиноватости в резервуаре подземных вод (на глубине 1.0–1.2 км). Снижение ОА4/8 во время Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации соответствует процессу закрытия микротрещин, препятствующему циркуляции подземных вод при продвижении их источника на глубину около 1.5 км. В конце сейсмической активизации (18 февраля 2023 г.) процесс закрытия микротрещин усиливается.

Феноменология образования оползней по дуговым разломам: сопоставления

На современном этапе структурного развития центральной части БРС землетрясения сосредоточены в основном в акватории Байкала и редко распространяются на его берега. Упругие напряжения накапливаются с сильными сейсмическими событиями вдоль Приморской и Главной Саянской шовных границ Сибирского палеоконтинента (рис. 13). Деформации Приморского шва реализовались в

Южно-Байкальском землетрясении 25 февраля 1999 г. ($M_w=6.0$) (Радзиминович и др., 2006). В очаговой области активизировался поперечный разрыв, параллельный Обручевскому разлому с почти вертикальным и горизонтальным положением нодальных плоскостей. Это указывает на контроль раздвига впадины субгоризонтальным слоем низкой вязкости. Более слабый афтершок 31 мая 2000 г. ($M_w=5.3$) имел сбросовый фокальный механизм слегка наклоненных нодальных плоскостей. В сейсмическом толчке Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. ($M_w=6.3$) опущенной (байкальской) части Главного Саянского шва реализовался сбросо-сдвиговый механизм подвижки поперечного к ней (северо-восточного) разрыва, параллельного Приморской шовной границе. В Быстринском землетрясении 2020 г. его поднятой (тункинской) части получили развитие сдвиговые смещения (Семинский и др., 2021). Тем не менее, общее северо-восточное растяжение сохранилось и в Южно-Байкальской впадине, и в сопредельной восточной части Тункинской долины.

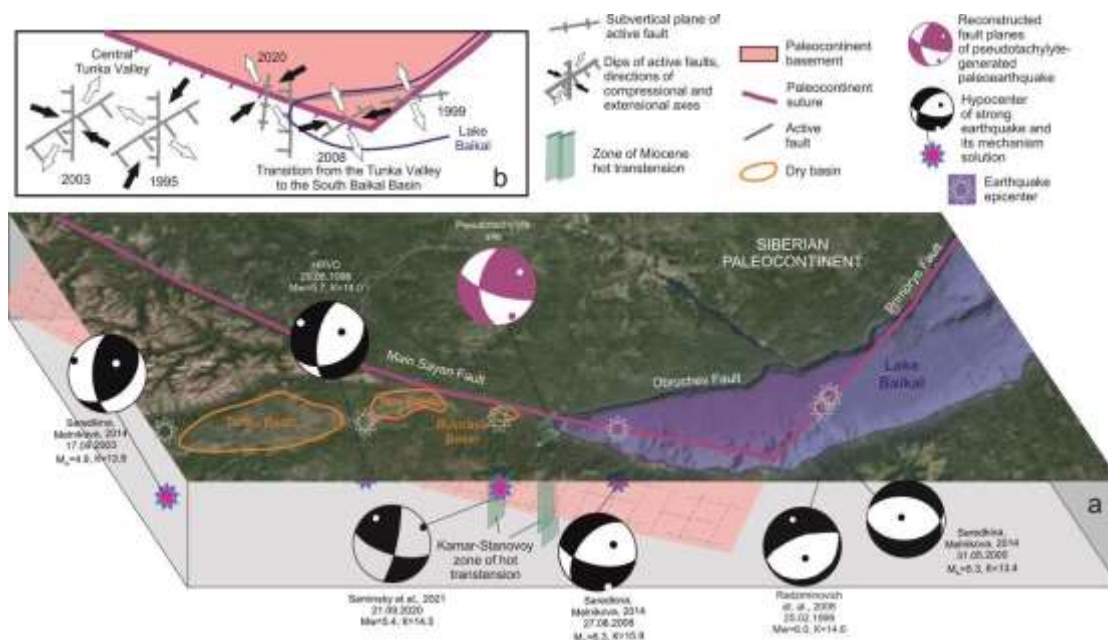


Рис. 13. Схематичная блок-диаграмма Тункинской долины и Южно-Байкальской впадины (а) и схематичная смена сил сжатия и растяжения в активных разломах Тункинской долины и Южно-Байкальской впадины (b) (Rasskazov et al., 2021).

Fig. 13. Schematic block-diagram of the Tunka Valley and South Baikal Basin (a) and schematic change in compression and extension forces in active faults of the Tunka Valley and South Baikal Basin (b) (Rasskazov et al., 2021).

Глубинная листрическая часть дугового разлома КБЖД входит в донные отложения оз. Байкал (см. рис. 11в). Отложения слабо литифицированы, поэтому имеют малую прочность и, очевидно, могут деформироваться при меньших тектонических нагрузках, чем архейские кристаллические породы Шарыжалгайского блока. Дуговой разлом КБЖД, сфокусированный на глубине в листрическое проникновение в донные отложения, отчленяет блок кристаллического фундамента от берега и создает опасность оползания отчлененного блока в Южно-Байкальскую впадину. Процесс смещения усугубляется насыщенностью плоскости дугового разлома КБЖД подземными водами, играющими в его глубинной части роль смазки. Нарастание активности этого дугового разлома может иметь катастрофические последствия.

Подобные смещения береговых блоков Байкала по дуговым разломам привели к образованию заливов Лиственничный и

Провал. Первое смещение известно как позднеплейстоценовое событие, повлекшее за собой начало стока из оз. Байкал через р. Ангару, второе – как событие сильнейшего землетрясения 1862 г.

Зарождающийся дуговой разлом КБЖД приурочен к юго-западному краю поднятого Шарыжалгайского блока на входе зоны ГСР в Южно-Байкальскую впадину. Здесь закладывается Обручевский разлом. Лиственничный дуговой разлом находится на юго-восточном краю поднятого Шарыжалгайского блока. Часть Шарыжалгайского блока отчленена Обручевским разломом и погружена в Южно-Байкальскую впадину. Береговая юго-восточная часть Шарыжалгайского блока испытала сильные деформации с надвиганием отложений юрского Иркутского бассейна на поднятый архейский фундамент палеоконтинента. В кайнозое деформированный фундамент палеоконтинента был тектонически ослаблен. Свершилось позднеплейстоценовое оползание блока (рис. 14).

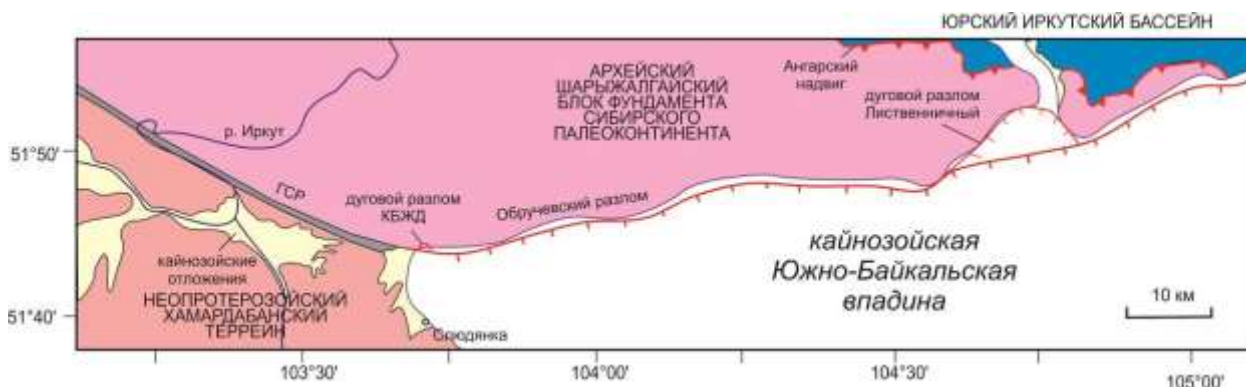


Рис. 14. Структурное положение дуговых разломов КБЖД и Лиственничный. Небольшой дуговой разлом КБЖД только зарождается. Более крупный дуговой разлом Лиственничный проявился в существенном позднеплейстоценовом смещении крупного берегового блока в Южно-Байкальскую впадину.

Fig. 14. Structural position of the Circum-Baikal Railway and Listvennichny arc faults. The small Circum-Baikal Railway arc fault is just emerging. The larger Listvennichny one was displayed in a significant late Pleistocene displacement of a large coastal block into the South Baikal Basin.

Залив Лиственничный образуют два опущенных блоковых фрагмента, каждому из которых соответствует дуговой разлом (рис. 15а). Один из них (восточный) пространственно приходится на исток р. Ангары. Протяженность дуги 9.5 км. Другой (западный) протягивается на 6.7 км. Общая протяженность дуг составляет 16.2 км. Дуги фокусируются в акватории Байкала, ориентировочно,

на расстоянии 6.5–7.5 км. Залив Провал ограничен единым дуговым разломом протяженностью 20.5 м с фокусированием от середины на расстоянии, приблизительно, 7.5 км. Расстояние от фокуса до концов дугового разлома составляет порядка 10.5 км. Дуговой разлом Провала является частью совокупности активных разломов дельты Селенги (рис. 15б).

В глубинном фокусе дуговых разломов, ограничивающих оба залива, могли находиться (возможно, находятся и сейчас) основные резервуары подземных вод, которые контролировались (возможно, продолжают

контролироваться) разломами, круто погружающимися от берегов с переходом в листрические в осадочном наполнении Южно-Байкальской впадины.

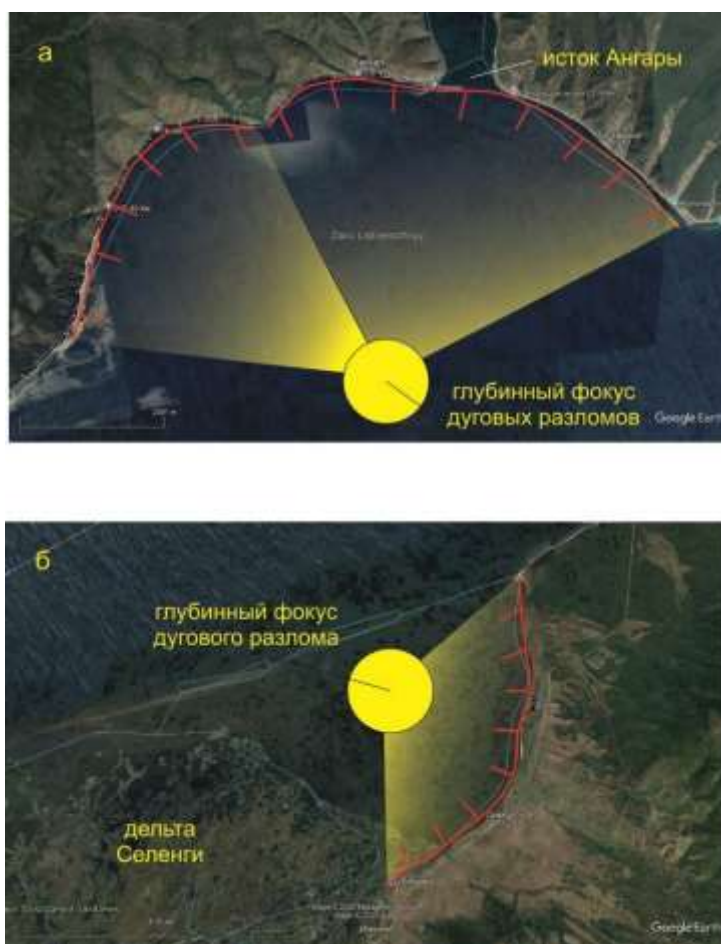


Рис. 15. Схемы структурного контроля образования крупных оползней дуговыми разломами заливов Лиственничный (а) и Провал (б).

Fig. 15. Schemes of structural control of the formation of large landslides by arc faults in the Listvennichnyy (a) and Proval (b) bays.

Мы предполагаем, что небольшой (1 км в сухопутной части) зарождающийся дуговой разлом КБЖД, сфокусированный на роднике ст. 143А, имеет аналогичные структуры во впадинах оз. Байкал с таким же (оползневым) механизмом образования, более протяженные (первые десятки км) и с совершившимися катастрофическими подвижками.

Между тем, дуговые разломы, находящиеся, подобно разлому КБЖД, на стадии зарождения, контролируют две группы родников Хонгор-Уула в северных отрогах хр. Ургудеевский к югу от Тункинской долины (Рассказов и др., 2025). Севернее обеих групп, на склонах речной долины,

наблюдаются наклоненные плоскости разломов, погружающихся к югу, в сторону выходов родников (рис. 16). Расстояние от выхода плоскости разлома на земную поверхность до родника НУ-1 северо-восточной группы составляет 360–380 м, расстояние до родника НУ-3 увеличивается до 1020 м, а до родника НУ-2 – до 1450 м. На юго-западе различаются три дуговых наклоненных разлома. Наиболее отчетливо наклонен средний разлом, расстояние от которого до родников НУ-4–НУ-8 составляет 980–1220 м. Расстояние до родников относительно наиболее северного наклоненного разлома увеличивается до 1270 м, а относительно южного – уменьшается до 800 м.

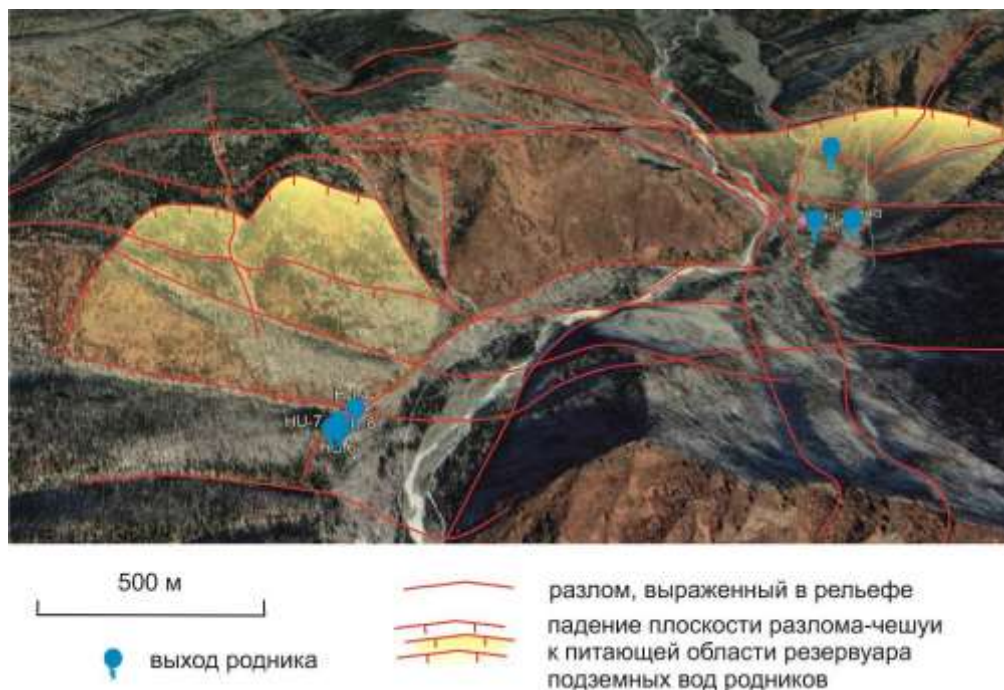


Рис. 16. Пространственные соотношения выходов родников Хонгор-Уула с дуговыми разломами, выраженными в рельефе. На правом берегу р. Харагун находится северо-восточная группа родников НУ-1–НУ-3, на левом – юго-западная группа родников НУ-4–НУ-8. Дуговые разломы, падающие к югу, фокусируются под родниками.

Fig. 16. Spatial relationships between outlets of the Khongor-Uula springs and faults expressed in relief. The northeastern group of springs НУ-1–НУ-3 occur on the right (eastern) bank of the Kharagun River, the southwestern group of springs НУ-4–НУ-8 is on the left (western) one. The arc faults, dipping to the south, are focused under the springs.

Кривые плоскостей дуговых наклоненных разломов, контролирующих глубины резервуара Хонгор-Уула, питающего родники, оцениваются по температуре подземных вод, рассчитанной по халцедоновому геотермометру (Arnorsson et al., 1983) и по региональному геотермическому градиенту 25 °С/км (Голубев, 2007). Для родников северо-восточной группы получается крутое падение плоскости разлома вблизи земной поверхности с ее выполаживанием на глубине около 1.6 км. Реконструируется листрический разлом. Родники юго-западной группы находятся практически в одной точке, но их питающий резервуар представлен двумя уровнями, один из которых (родники НУ-5–НУ-8) сопоставляется с уровнем 1.6 км листрического разлома, контролирующего поступление вод из резервуара северо-восточной группы родников, другой (родник НУ-4) находится на глубине 2.1 км. Поскольку юго-западной группе родников пространственно

соответствуют три дуговых разлома, предполагается основной контроль поступления вод из резервуара подземных вод наиболее ярко выраженным средним разломом и дополнительное поступление вод родника НУ-4 из более глубокой плоскости северного разлома. В обоих случаях проявляется листрическая конфигурация разломных плоскостей.

Заключение

Култукский резервуар подземных вод выбран в качестве опорного для отслеживания изменений, происходящих в БРС. Воды этого резервуара характеризуются моделью двухкомпонентного смешения по изотопам U и Sr – компонентов растворенных в подземных водах. Модель в общем подтверждается изотопами Н и О – компонентов, входящих в молекулу воды. Результаты определения $\delta^{2}\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ показывают отчетливую корреляцию этих параметров в подземных водах Култукского полигона с содержанием

растворенного кремния. Следовательно, изотопный состав водорода и кислорода фракционирует в зависимости от температуры, устанавливающейся в верхней части коры. Климатические показатели вод стираются и уступают место показателям, характеризующим эволюцию резервуара подземных вод. Разные геохимические показатели подземных вод Култукского резервуара меняются одновременно с развитием сейсмических процессов в коре. В отличие от култукского тренда подземных вод, сходство контрастных групп $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ поверхностных и подземных вод Тункинской долины может свидетельствовать об унаследовании подземными водами исходных изотопных характеристик поверхностных вод.

В U-H-O-изотопной систематике компонентов подземных вод на станциях гидрогеохимического мониторинга сейсмической угрозы в Байкальской рифтовой системе подчеркивается особое значение характеристик, полученных для ст. 143А Култукского полигона, которые частично соответствуют геохимическим характеристикам подземных вод Култукского резервуара, а частично – геохимическим характеристикам подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища. Предполагается, что в подземные воды всех этих территорий входит компонент ЮБР.

Отличие U-H-O-изотопных характеристик вод родника ст. 143А от характеристик подземных вод зоны ГСР Култукского полигона объясняется структурным контролем выхода этого родника зарождающимся дуговым разломом КБЖД, заложенным в породах архейского Шарыжалгайского блока фундамента Сибирского палеоконтинента. В водах родника ст. 143А наблюдается более высокое ОА4/8, чем в подземных водах ГСР Култукского резервуара. Данные гидрогеохимического мониторинга 2016–2024 гг. показывают снижающееся ОА4/8 с течением времени вследствие нарастания сжатия в глубинной части разлома. Продолжение этого процесса может иметь катастрофические последствия – сход крупного оползня в Южно-Байкальскую впадину по плоскости дугового разлома.

Изотопные тренды верхнего гидрогеодинамического этажа в Култукском резервуаре подземных вод резко отличаются от трендов нижнего гидрогеодинамического этажа, полученных для термальных вод Баунтовской впадины. С повышением содержания растворенного кремния значения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в верхнем гидрогеодинамическом этаже возрастают, а в нижнем, наоборот, снижаются. Это различие предполагает разные механизмы кинетического фракционирования изотопов.

Благодарности

Аналитические исследования выполнялись на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500se в центре коллективного пользования «Ультрамикрoанализ» (ЛИН СО РАН, г. Иркутск) и на изотопном анализаторе WS-CRDS Picarro L2140-i в центре коллективного пользования «Геодинамика, геохронология» (ИЗК СО РАН, г. Иркутск).

Литература

Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО», 2007. 222 с.

Дриль С.И., Чуканова В.С., Дубинина Е.О., Сандимиров И.В., Владимирова Т.А., Складорова О.А., Иконникова Т.А. Изотопная Sr-O-H-U систематика и генезис поверхностных и минеральных вод Тункинской впадины Байкальской рифтовой системы // Проблемы геохимии эндогенных процессов и окружающей среды. Мат-лы конференции. Т. 1. Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2007. Т. 1. С.158–162.

Екайкин А.А. Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии. Методическое пособие. Санкт-Петербург: Государственный научный центр РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, 2016. 63 с.

Замана Л.В. Дейтерий и кислород-18 воды азотных терм Баунтовской группы (Байкальская рифтовая зона) // Вестн. Бурятского гос. ун-та. 2011. № 3. С. 87–90.

Ильясова А.М., Снопков С.В. Косейсмические временные вариации термофильного элемента Si подземных вод западного побережья оз. Байкал в 2012–2022 гг. // Геология и окружающая среда.

2023. Т. 3, № 1. С. 72–105. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.72>

Ильясова А.М., Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Борняков С.А., Снопков С.В., Чувашова И.С., Тубанов Ц.А., Герман Е.И., Бартанова С.В. Тестирование эффекта Чердынцева–Чалова с использованием сейсмодвижителя ЦВО-100 и мониторинг подобных U-гидроизотопных откликов на подготовку землетрясений на Култукском полигоне, Южный Байкал // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 4. № 4. С. 7–25. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.7

Короновский Н., Наймарк А. Непредсказуемость землетрясений как фундаментальное следствие нелинейных геодинамических систем // Вестник Моск. ун-та. 2012. № 6. С. 3–12

Короновский Н., Наймарк А. Землетрясение: возможен ли прогноз? // Наука и жизнь. 2013. № 3. С. 37–43

Оганесянц Л.А., Севостьянова Е.М., Кузьмина Е.И., Ганин М.Ю., Чебыкин Е.П., Сутурин А.Н. Изучение изотопного и химического состава глубинной воды озера Байкал // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51, № 4. С. 723–732. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-723-732>.

Рассказов С.В., Ильясова А.М., Борняков С.А., Снопков С.В., Чувашова И.С., Чебыкин Е.П. Гидрогеохимические отклики подземных вод ст. 184 в 2020–2021 гг. на сейсмогенные деформации Байкало-Хубсугульской активизации // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 4. С. 26–52. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.26

Рассказов С.В., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Оргильянов А.И., Коваленко С.Н., Семинский А.К., Попов Е.П., Чебыкин Е.П. Гидрогеохимическая зональность изотопов урана ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) на юге Сибирского палеоконтинента: роль резервуара Южного Байкала в формировании подземных вод // Геодинамика и тектонофизика. 2020а. Т. 11, № 3. С.:632–650. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496>

Рассказов С.В., Снопков С.В., Борняков С.А. Соотношение времени землетрясений Байкало-Хубсугульской активизации с вариациями окислительно-восстановительного потенциала в подземных водах Култукского полигона // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 181–201. doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.181

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Сунь Йи-минь, Снопков С.В. Переход от

Култукского сейсмического цикла к Байкало-Хубсугульскому в 2014–2015 гг.: Тренды U компонентов и Si–Na/Li температур в подземных водах южного фланга Южно-Байкальской впадины и Тункинской долины // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 2 (в печати).

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А. Разработка Култукского сейсмопрогностического полигона: вариации ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, № 4. С. 519–554.

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Чувашова И.С., Ильясова А.М., Снопков С.В., Сунь Йи-минь. Мониторинг урановых компонентов в подземных водах Аршана в 2012–2024 гг.: отслеживание парагенетических (гидрогеохимических и сейсмических) процессов в Байкальской рифтовой системе // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 3. С. 65–112. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.3.65>

Родкин М. Прогноз непредсказуемых катастроф // Вокруг Света. 2008. № 6 (2813). С. 88–92

Садовский М.А. Предсказание времени землетрясений // Земля и Вселенная. 1978. № 6. С. 6–9.

Семинский К.Ж., Борняков С.А., Добрынина А.А., Радзиминович Н.А., Рассказов С.В., Саньков В.А., Миалле П., Бобров А.А., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Семинский А.К., Чебыкин Е.П., Шагун А.Н., Герман В.И., Тубанов Ц.А., Улзибат М., 2020. Быстринское землетрясение в Южном Прибайкалье (21.09.2020г., Mw=5.4): основные параметры, признаки подготовки и сопровождающие эффекты // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 5. С. 727–743.

Середкина А.И., Мельникова В.И. Тензор сейсмического момента землетрясений Прибайкалья по амплитудным спектрам поверхностных волн // Физика Земли. 2014. Т. 50, № 3. С. 103–114. Doi: 10.7868/S0002333714030090

Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.

Токарев И.В. Изотопная реконструкция происхождения, эволюции и оценка текущего состояния водно-ледниковых объектов. Диссертация на соискание уч. степени доктора геол.-мин. наук. Т. 1. Санкт-Петербург, 2025. 224 с.

Чалов П.И., Тузова Т.В., Алехина В.М. Изотопные параметры вод разломов земной коры в

- сейсмически активной зоне. Фрунзе: Илим, 1980. 105 с.
- Чебыкин Е.П., Гольдберг Е.Л., Куликова Н.С., Жученко Н.А., Степанова О.Г., Малопевная Ю.А. Метод определения изотопного состава аутигенного урана в донных отложениях озера Байкал // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 6. С. 604–616.
- Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Снопков С.В., Рассказов С.В. Сигналы ртути подземных вод Култукского полигона во время подготовки и реализации Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации 2020–2021 гг. // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 1. С. 7–9. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2022.1.7>
- Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В. Первые результаты мониторинга $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // Доклады академии наук. 2015. Т. 460, № 4. С. 464–467.
- Чебыкин Е.П., Сороковикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В., Грачев М.А. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20. С. 613–631.
- Чердынцев В.В. Уран–234. М.: Атомиздат, 1969. 308 с.
- Arnorsson S., Gunnlaugsson E., Svavarsson H. The chemistry of geothermal waters in Iceland-II. Mineral equilibria and independent variables controlling water compositions // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1983. V. 47. P. 547–566.
- Craig H. Isotopic variation in meteoric waters // *Science*. 1961. V.133. P. 1702–1703.
- Finkel R.C. Uranium concentrations and $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratios in fault-associated groundwater as possible earthquake precursors // *Geophysical Research Letters*. 1981. Vol. 8, No. 5. P. 453–456.
- Geller R.J. Earthquake prediction: a critical review // *Geophys. J. Int.* 1997. Vol. 131. P. 425–450.
- Hachikubo A., Khlystov O., Krylov A., Sakagami H., Minam H., Nunokawa Y., Yamashita S., Takahashi N., Shoji H., Nishio S., Kida M., Ebinuma T., Kalmychkov G., Poort J. Molecular and isotopic characteristics of gas hydrate-bound hydrocarbons in southern and central Lake Baikal // *Geo-Mar. Lett.* 2013. Vol. 30. P. 321–329. <https://doi.org/10.1007/s00367-010-0203-1>
- HRVD (<http://www.seismology.harvard.edu/>) – Department of Geological Sciences, Harvard University, 20 Oxford St., Cambridge, MA 02138, U.S.A.
- Radziminovich N.A., Melnikova V.I., San'kov V.A., Levi K.G. Seismicity and seismotectonic deformations of the crust in the Southern Baikal basin // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2006. Vol. 42, No. 11. P. 904–920. <http://dx.doi.org/10.1134/S1069351306110048>.
- Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Sнопков S.V., Bornyakov S.A., Chuvashova I.S. Change of seismic hazard levels in complete 12-year seismogeodynamic cycle of the South Baikal Basin: Results of hydroisotopic ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) monitoring // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 2. P. 7–21. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.7
- Rasskazov S., Chuvashova I., Yasnygina T., Saranina E., Gerasimov N., Ailow Y., Sun Y.-M. Tectonic generation of pseudotachylytes and volcanic rocks: Deep-seated magma sources of crust-mantle transition in the Baikal Rift System, Southern Siberia // *Minerals*. 2021. Vol. 11, No 5. P. 487.
- Rasskazov S., Ilyasova A., Bornyakov S., Chuvashova I., Chebykin E. Responses of a $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio in groundwater to earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia // *Front. Earth Sci.* 2020b. V. 14 (4): 711–737; doi.org/10.1007/s11707-020-0821-5
- Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Sнопков S.V., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Chebykin E.P. Chemical hydrogeodynamics of the Kultuk groundwater reservoir versus paragenetically related large earthquakes in the central Baikal Rift System, Siberia // *Journal of Earth System Science*. 2024. Vol. 133, 190. <https://doi.org/10.1007/s12040-024-02392-2>
- Yakovlev E. Tokarev, I., Zykov S., Iglovsky S., Ivanchenko N. Isotope signs ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, ^2H , ^{18}O) of groundwater: An investigation of the existence of paleo-permafrost in European Russia (Pre-Volga Region) // *Water*. 2021. Vol. 13. P. 1838. <https://doi.org/10.3390/w13131838>
- Zverev V.L., Dolidze N.I., Spiridonov A.I. Anomaly of even isotopes of uranium in groundwater of seismically active regions of Georgia // *Geochemistry International*. 1975. No. 11. P. 1720–1724.

References

Arnorsson S., Gunnlaugsson E., Svavarsson H. The chemistry of geothermal waters in Iceland-II.

Mineral equilibria and independent variables controlling water compositions // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1983. V. 47. P. 547–566.

Chalov P.I., Tuzova T.V., Alekhina V.M. Isotopic parameters of water from faults of the Earth's crust in a seismically active zone. Ilim, Frunze, 1980. 105 p.

Chebykin E.P., Goldberg E.L., Kulikova N.S., Zhuchenko N.A., Stepanova O.G., Malopevnaya Yu.A. Method for determining the isotopic composition of authigenic uranium in bottom sediments of Lake Baikal // *Geology and Geophysics*. 2007. Vol. 48, No. 6. P. 604–616.

Chebykin E.P., Rasskazov S.V., Vodneva E.N., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Borneyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V. First results of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ monitoring in water from active faults on the western coast of South Baikal // *Doklady Earth Sciences*. 2015. Vol. 460, Part 2. P. 142–145.

Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Vodneva E.N., Rasskazov S.V., Khodzher T.V., Grachev M.A. Current state of the Selenga River waters on the territory of Russia by main components and trace elements // *Chemistry for Sustainable Development*. 2012. Vol. 20. P. 613–631.

Cherdyntsev V.V. Uranium–234. Atomizdat Press, Moscow. 1969. 308 p.

Golubev V.A. Conductive and convective heat removal in the Baikal rift zone. Novosibirsk: Academic Publishing House "GEO", 2007. 222 p.

Craig H. Isotopic variation in meteoric waters // *Science*. 1961. V. 133. P. 1702–1703.

Dril' S.I., Chukanova V.S., Dubinina E.O., Sandimirov I.V., Vladimirova T.A., Sklyarova O.A., Ikonnikova T.A. Isotope SR-O-H-U systematics and genesis of surface and mineral waters of the Tunka depression of the Baikal rift system // *Problems of geochemistry of endogenous processes and the environment. Conference materials*. Vol. 1. Irkutsk: Publishing House of the V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 2007. Vol. 1. P. 158–162.

Geller R.J. Earthquake prediction: a critical review // *Geophys. J. Int.* 1997. Vol. 131. P. 425–450.

Ekaikin A.A. Stable isotopes of water in glaciology and paleogeography. Methodological manual. St. Petersburg: State Research Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, 2016. 63 p.

Finkel R.C. Uranium concentrations and $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratios in fault-associated groundwater as possible earthquake precursors // *Geophysical Research Letters*. 1981. Vol. 8, No. 5. P. 453–456.

HRVD (<http://www.seismology.harvard.edu/>) – Department of Geological Sciences, Harvard University, 20 Oxford St., Cambridge, MA 02138, U.S.A.

Hachikubo A., Khlystov O., Krylov A., Sakagami H., Minam H., Nunokawa Y., Yamashita S., Takahashi N., Shoji H., Nishio S., Kida M., Ebinuma T., Kalmychkov G., Poort J. Molecular and isotopic characteristics of gas hydrate-bound hydrocarbons in

southern and central Lake Baikal // *Geo-Mar. Lett.* 2013. Vol. 30. P. 321–329. <https://doi.org/10.1007/s00367-010-0203-1>

Ilyasova A.M., Snopkov S.V. Coseismic temporal variations of thermophilic element Si in groundwaters from the SW coast of Lake Baikal in 2012–2022 // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 3, No. 1. P. 72–105. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.72>

Ilyasova A.M., Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Borneyakov S.A., Snopkov S.V., Chuvashova I.S., Tubanov Ts.A., German E.I., Bartanova S.V. Testing the Cherdyntsev–Chalov effect using a seismic vibrator ЦБО-100 and monitoring of similar U-hydroisotopic responses to earthquake preparation in the Kultuk test site, Southern Baikal // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 4. P. 7–25. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.7

Koronovskiy N., Naimark A. Unpredictability of earthquakes as a fundamental consequence of nonlinear geodynamic systems // *Vestnik Moskov. Univ.* 2012. No. 6. P. 3–12.

Koronovskiy N., Naimark A. Earthquake: is the prediction possible? // *Science and life*. 2013. No. 3. P. 37–43.

Oganesyants L.A., Sevostianova E.M., Kuzmina E.I., Ganin M.Yu., Chebykin E.P., Suturin A.N. Isotopic and chemical composition of the deep water of Lake Baikal // *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021. Vol. 51, No. 4. P. 723–732. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-723-732>.

Radziminovich N.A., Melnikova V.I., San'kov V.A., Levi K.G. Seismicity and seismotectonic deformations of the crust in the Southern Baikal basin // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2006. Vol. 42, No. 11. P. 904–920. <http://dx.doi.org/10.1134/S1069351306110048>.

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Chuvashova I.S., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Sun Yi-min. Monitoring of uranium components and Si – Na/Li temperatures in the Arshan groundwater reservoir of Tunka Valley in 2012–2024: Tracing paragenetic relationships between hydrogeochemical and seismic processes in the Baikal Rift System // *Geology and Environment*. 2024. Vol. 4, No. 3. P. 65–112. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.3.65>

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Borneyakov S.A., Chuvashova I.S. Change of seismic hazard levels in complete 12-year seismogeodynamic cycle of the South Baikal Basin: Results of hydroisotopic ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) monitoring // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 2. P. 7–21. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.7

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Sun Yi-min, Snopkov S.V. Transition from the Kultuk seismic cycle to the Baikal-Khubsugul one in 2014–2015: Trends in U components and Si–Na/Li temperatures in groundwater of the southern flank of the South Baikal basin and Tunka valley // *Geology*

and Environment. 2022. Vol. 5, No. 2. (in preparation).

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Vodneva E.N., Chuvashova I.S., Borneyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V., Chechel'nitsky V.V., Gileva N.A. Creating the Kultuk polygon for earthquake prediction: variations of ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in groundwater from active faults at the western shore of Lake Baikal // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2015. Vol. 6, No. 4. P. 519–553. doi:10.5800/GT-2015-6-4-0192.

Rasskazov S., Chuvashova I., Yasnygina T., Saranina E., Gerasimov N., Ailow Y., Sun Y.-M. Tectonic generation of pseudotachylytes and volcanic rocks: Deep-seated magma sources of crust-mantle transition in the Baikal Rift System, Southern Siberia // *Minerals*. 2021. Vol. 11, No 5. P. 487.

Rasskazov S., Ilyasova A., Borneyakov S., Chuvashova I., Chebykin E. Responses of a $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio in groundwater to earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia // *Front. Earth Sci.* 2020b. V. 14 (4): 711–737; doi.org/10.1007/s11707-020-0821-5

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Borneyakov S.A., Snopkov S.V., Chuvashova I.S., Chebykin E.P. Hydrogeochemical responses of groundwater from station 184 in 2020–2021 on seismogenic deformations of the Baikal-Khubsugul reactivation // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 4. P. 26–52. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.26

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Borneyakov S.A., Orgilyanov A.I., Kovalenko S.N., Seminsky A.K., Popov E.P., Chebykin E.P. Hydrogeochemical zoning of uranium isotopes ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) in the Southern Siberian paleocontinent: the role of the South Baikal reservoir in the groundwater formation // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2020a. Vol. 11, No. 3. P. 632–650. https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Chuvashova I.S., Borneyakov S.A., Chebykin E.P. Chemical hydrogeodynamics of the Kultuk groundwater reservoir versus paragenetically related large earthquakes in the central Baikal Rift System, Siberia // *Journal of Earth System Science*. 2024. Vol. 133, 190. <https://doi.org/10.1007/s12040-024-02392-2>

Rasskazov S.V., Snopkov S.V., Borneyakov S.A. Relationship between timing of earthquakes of the

Baikal-Khubsugul reactivation and oxidation–redox potential in groundwaters from the Kultuk polygon // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 181–201. doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.181

Rodkin M. Prediction unpredictable catastrophes // *Around the World*. 2008. Vol. 6, No. 2813. P. 88–92.

Sadovskiy M.A. Prediction of earthquake timing // *The Earth and Universe*. 1978. No. 6. P. 6–9.

Seminsky K.Zh., Borneyakov S.A., Dobrynina A.A., Radziminovich N.A., Rasskazov S.V., Sankov V.A., Mialle P., Bobrov A.A., Ilyasova A.M., Salko D.V., Sankov A.V., Seminsky A.K., Chebykin E.P., Shagun A.N., German V.I., Tubanov Ts.A., Ulzibat M. Earthquake Bystraya in the South Baikal region (09.21.2020, Mw = 5.4): main parameters, signs of preparation, and accompanying effects // *Russian Geology and Geophysics*. 2021. Vol. 62, No. 5. P. 727–743.

Seredkina A.I., Melnikova V.I. Seismic moment tensor of Pribaikalye earthquakes from the surface-wave amplitude spectra // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2014. Vol. 50, No. 3. P. 403–414. Doi: 10.7868/S0002333714030090

Sobolev G.A. Fundamentals of earthquake prediction. M: Nauka, 1993. 313 p.

Tokarev I.V. Isotope reconstruction of the origin, evolution and assessment of the current state of fluvioglacial objects. Dissertation for the academic degree of Doctor of Geological and Mineral Sciences. Vol. 1. St. Petersburg, 2025. 224 p.

Yakovlev E., Tokarev, I., Zыkov S., Iglovsky S., Ivanchenko N. Isotope signs ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, ^2H , ^{18}O) of groundwater: An investigation of the existence of paleo-permafrost in European Russia (Pre-Volga Region) // *Water*. 2021. Vol. 13. P. 1838. <https://doi.org/10.3390/w13131838>

Zamana L.V. Deuterium and oxygen-18 waters of nitrogen thermal springs of the Baunt group (Baikal rift zone) // *Bulletin of the Buryat State University*. 2011. No. 3. P. 87–90.

Zverev V.L., Dolidze N.I., Spiridonov A.I. Anomaly of even isotopes of uranium in groundwater of seismically active regions of Georgia // *Geochemistry International*. 1975. No. 11. P. 1720–1724.

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор,
664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет, геологический факультет,
заведующий кафедрой динамической геологии,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
заведующий лабораторией изотопии и геохронологии
тел.: (3952) 51–16–59,
email: rassk@crust.irk.ru

Rasskazov Sergei Vasilievich,

doctor of geological and mineralogical sciences, professor,
664025, Irkutsk, st. Lenina, 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Head of Dynamic Geology Char,
664033, Irkutsk, st. Lermontova, 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Head of the Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies,
tel.: (3952) 51–16–59,
email: rassk@crust.irk.ru

Ильясова Айгуль Маратовна,

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
email: ila@crust.irk.ru

Цыасова Аигул Маратовна,
candidate of geological and mineralogical sciences, leading engineer,
664033, Irkutsk, st. Lermontova, d. 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
email: ila@crust.irk.ru

Чебыкин Евгений Павлович,
кандидат химических наук,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
старший научный сотрудник,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,
Лимнологический институт СО РАН,
ведущий специалист,
email: epcheb@yandex.ru

Chebykin Eugene Pavlovich,
Candidate of Chemical Sciences,
Leading Specialist,
664033, Irkutsk, st. Lermontova, d. 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Senior Researcher
664033, Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3,
Limnological Institute SB RAS,
email: epcheb@yandex.ru

Гутарева Оксана Сергеевна,

младший научный сотрудник, аспирант,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
email: oxanagutareva@gmail.com

Gutareva Oksana Sergeevna,
Junior Researcher, Postgraduate Student,
664033, Irkutsk, st. Lermontova, d. 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
email: oxanagutareva@gmail.com

Снопков Сергей Викторович,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
664003, Россия, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Иркутский государственный университет,
доцент,
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 91,
Сибирская школа геонаук, Иркутский национальный
исследовательский технический университет,
научный сотрудник,
email: snopkov_serg@mail.ru

Snopkov Sergey Viktorovich,
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor,
Karl Marx st., 1, Irkutsk, 664003, Russia,
Irkutsk State University,
Associate Professor,
91 Lermontov st., Irkutsk, 664033, Russia,
Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University,
Researcher,
email: snopkov_serg@mail.ru

Гляциальные морфоскульптуры пика Черского (хр. Хамар-Дабан). Статья 1: введение в проблему

С.Н. Коваленко

Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. В статье дается характеристика гляциальных форм рельефа горной территории в районе пика Черского на Хамар-Дабане, образованных разновозрастными ледниками разного морфологического типа: Хамар-Дабанским, Северным и Черского. На территории последнего, после полевых исследований 2024 г., были выделены и описаны гляциальные морфологические комплексы (ГМК) четырех среднестатистических высотных уровней каров и трогов дополнительных новых локальных ледников, сопоставимых с подобными ледниками с аналогичными высотными уровнями в горном массиве Мунку-Сардык (Восточный Саян), на происхождение которых выдвинуто две гипотезы: стадийного отступления покровно-долинного ледника Черского и дискретного повышения региональной снеговой линии после полного стаивания покровно-долинного ледника.

Ключевые слова: *хр. Хамар-Дабан, пик Черского, горно-долинное оледенение, стадии оледенения, осцилляции, гляциальные морфоскульптуры, кары, локальные карово-троговые ледники*

Glacial Morphosculptures of Chersky Peak (Khamar-Daban Ridge). Article 1: Introduction to the Problem

S.N. Kovalenko

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Abstract. The article characterizes glacial landforms of the mountain terrain in the area of Chersky Peak on the Khamar-Daban with linkage to similar formations of the Munku-Sardyk mountain massif. In the area of Khamar-Daban a similar Khamar-Daban glacier of the same age as the Oka cover glacier was identified, which in the subsequent history of glaciation first split into two mountain-valley glaciers (the Northern and the Central) and then into even smaller cover-valley-rock glaciers (the Central into Utulik-Snezhninsky, and the Northern into Tumusunsky, Bystrinsky and Chersky). In the Chersky Glacier localization area, after field studies in 2024, four average levels of kars and troughs of the retreating stage of this glacier's evolution were identified and described.

Keywords: *Khamar-Daban Ridge, Chersky Peak, mountain-valley glaciation, glaciation stages, oscillations, glacial morphosculptures, kars, localized cow-trog glaciers*

Статья получена: 29.01.2025; исправлена: 10.02.2025; принята: 14.02.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Коваленко С.Н. Гляциальные морфоскульптуры пика Черского (хр. Хамар-Дабан). Статья 1: введение в проблему // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 1. С. 159-182. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.159. EDN: DMHWCL

Article received: 29.01.2025; corrected: 10.02.2025; accepted: 14.02.2025.

FOR CITATION: Kovalenko S.N. Glacial morphosculptures of chersky peak (Khamar-Daban Ridge). Article 1: introduction to the problem // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 159-182. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.159. EDN: DMHWCL

Введение

Используя опыт разработки системы и морфоструктурный анализ детального изучения гляциального рельефа горного массива Мунку-Сардык (Коваленко, 2011, 2011а, 2013, 2014, 2014а, 2019, 2023; Коваленко, Акулова, 2022; Коваленко, Гергенов, 2022, 2022а), представилась возможность выделить и описать исторически последовательные стадии и элементы строения гляциального рельефа северной части Хамар-Дабана в районе пика Черского. Материалы исследования можно использовать для целей обучения студентов геологов Иркутского госуниверситета на полевой учебной практике по геокартированию.

Небольшие долинные и каровые ледники в Слюдянском районе были выделены исследованиями В.А. Обручева, С.В. Обручева, В.Н. Олюнина, Л.Н. Ивановского. Ни один из них не достигал Байкала, и все они оканчивались высоко в горах (Ивановский, 1979, 1985). В бассейне р. Слюдянки было четыре ледника. Длина самого крупного из них во время последнего оледенения составляла 5.5 км, и он оканчивался ниже 1300 м. На высоте 1200–1400 м лежат стадияльные морены второго четвертичного оледенения, а морены первой фазы хорошо сохранились в 14 км выше устья р. Слюдянки на высоте 1000 м. А мореноподобные валы и бугры, имеющиеся в долине р. Слюдянки ниже этих отметок созданы селевой деятельностью. Примеров таких селевых паводков по реке Слюдянке предостаточно. Так, В.А. Обручев (1934, с. 71) «описал катастрофическое наводнение в районе г. Слюдянки, которое произошло в ночь на 28–29 июля 1934 г. из-за трёхдневного ливня в горах, которое продолжалось 8–10 часов. В результате паводка в пос. Слюдянке были принесены селевым потоком валуны диаметром до 1.5–2 м» (Цит. по Олюнин, 1969, с. 177). Такие же наблюдения были сделаны и в другие годы селевых паводков в

Прибайкалье (Селевый паводок..., 1963; Макаров, 2012).

Постановка проблемы

Основные формы рельефа этой части хр. Хамар-Дабан (основные водоразделы и отдельные отроги хребтов, долины крупных рек Большой и Малой Быстрой, Слюдянки, Подкомарной,левой и Правой Безымянки, Утулика, Шубутуя и Снежной) были сформированы в результате деятельности самых древних ледников первого оледенения второй половины среднего плейстоцена — зырянского и сартанского (рис. 1). Этот ледник имел прогрессивный покровно-долинный тип и максимальных размеров достиг, вероятно, во время первого зырянского оледенения. Элементы строения этого ледника на Хамар-Дабане образовывали обширный Хамар-Дабанский покровный ледник, со временем в каргинское межледниковье (к сартанскому времени) распавшийся на ряд частных более мелких по площади покровно-долинных образований локализовавшихся в районах Маргасанской сопки (за пределами карты рис. 1), в верховьях р. Снежной (за пределами карты), а в интересующем нас районе на водоразделе рр. Утулик – Иркут (ледник Северный, № 1 см. рис. 1) и на водораздельном пространстве рр. Утулик – Снежная (ледник Центральный, № 2 см. рис. 1). Ледник первого центра оледенения на нашей территории во время заключительных стадий стаивания скорее всего превратился в небольшие шапки ледников покровно-долинного типа (рис. 2): 1а — в верховьях р. Тумусун, 1б — в верховьях р. Бол. Быстрой, 1в — в районе пиков Черского и Чекановского. Элементы последнего были нами подробно исследованы при полевых работах на учебной практике по геокартированию 2024 г. (Коваленко и др., 2024).

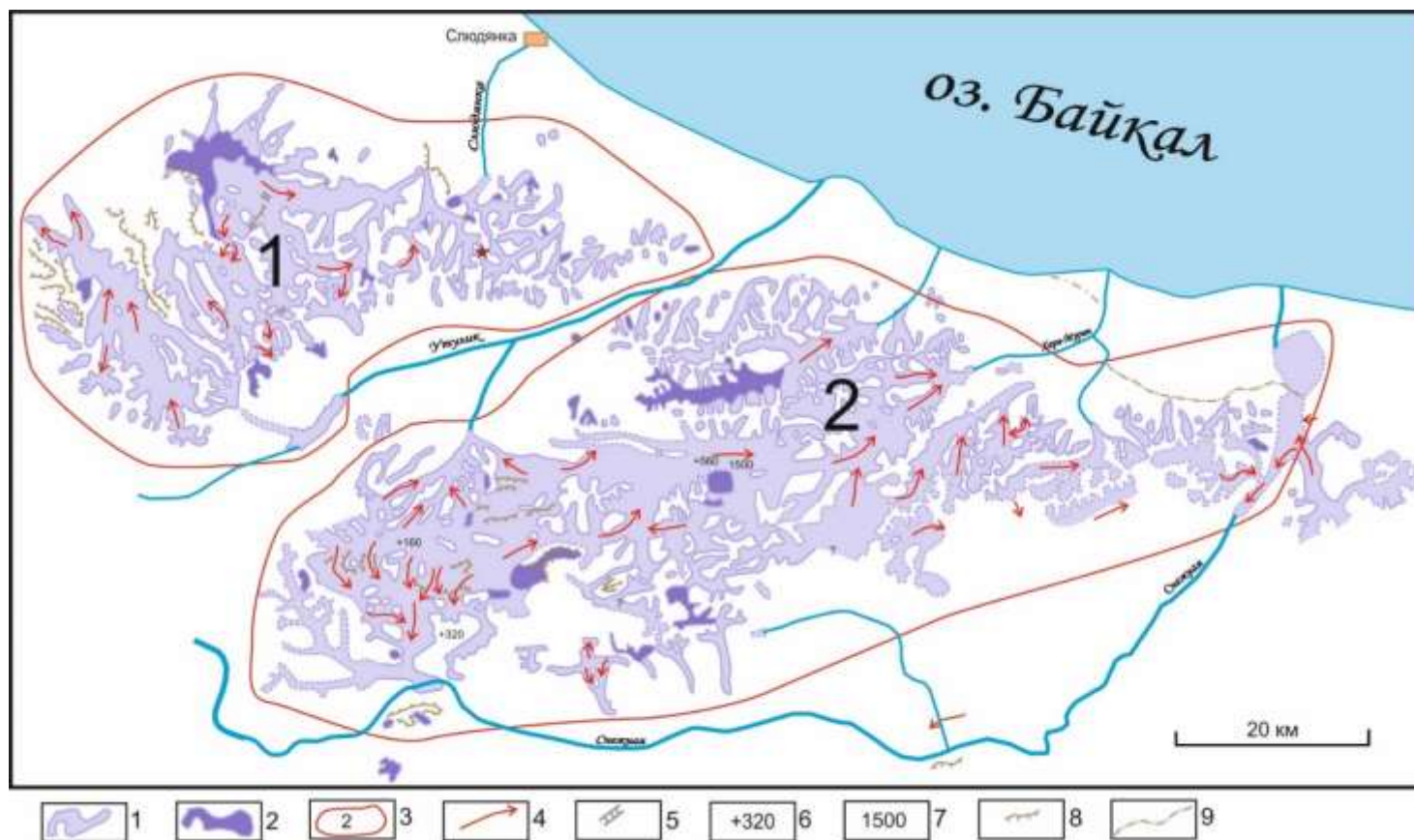


Рис. 1. Схема реконструкции ледников позднеплейстоценового оледенения Хамар-Дабана (Олюнин, 1969, с изменениями и дополнениями).

1 – древние ледники, 2 – древние снежники, 3 – границы покровных ледников: 1 – Северный, 2 – Утулик-Снежинский, 4 – направление движения ледников, 5 – каналы стока ледниковых вод, 6 – мощности ледников, 7 – абсолютные высоты, наверное, подошвы ледников, 8 – уступы плато, 9 – подножия гор.

Fig. 1. Scheme of glacier reconstruction of the Late Pleistocene glaciation of the Khamar-Daban (Olyunin, 1969, with modifications and additions).

1 – ancient glaciers, 2 – ancient snow glaciers, 3 – boundaries of cover glaciers: 1 – Severny, 2 – Utulik-Snezhninsky, 4 – direction of glacier movement, 5 – glacier water flow channels, 6 – glacier thicknesses, 7 – absolute heights, probably glacier soles, 8 – plateau scarps, 9 – foothills of mountains.

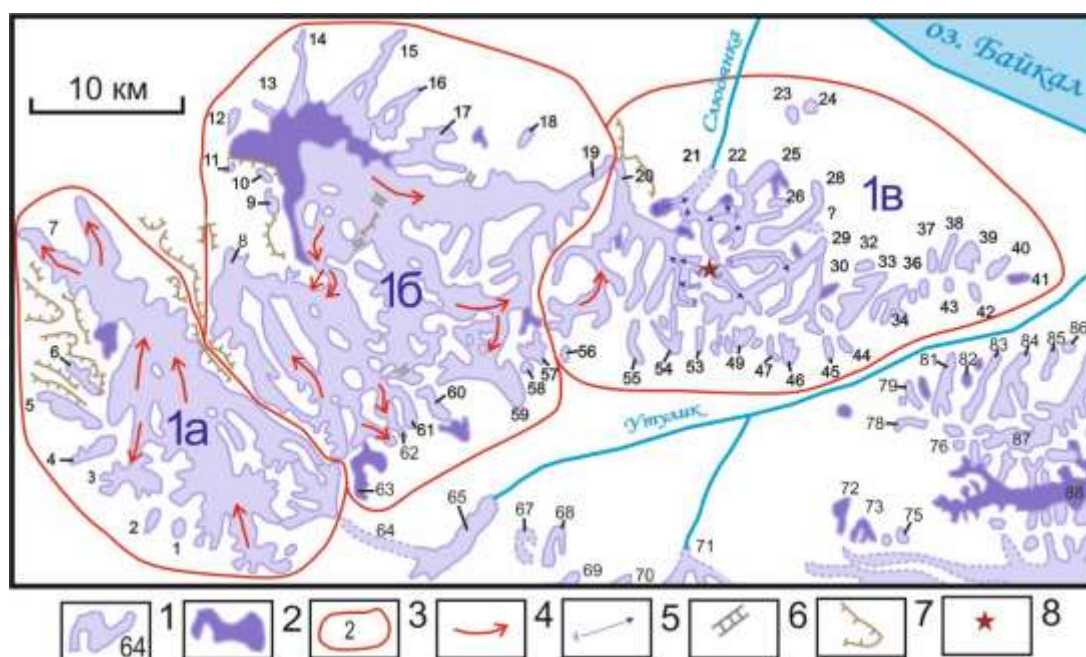


Рис. 2. Схема реконструкции ледников позднеплейстоценового оледенения Хамар-Дабана (Олюнин, 1969, с сокращениями и дополнениями).

1 – карово-троговые ледники и их порядковые номера (см. табл. 1), 2 – древние снежники, 3 – границы покровно-долинных ледников: 1а – Тумусунский, 1б – Быстринский, 1в – Черского, 4 – направление движения ледников, 5 – направление движения ледников обследованных в 2024 г., 6 – каналы стока ледниковых вод, 7 – уступы плато, 8 – пик Черского.

Fig. 2. Scheme of glacier reconstruction of the Late Pleistocene glaciation of the Khamar-Daban (Olyunin, 1969, with modifications and additions).

1 – ancient glaciers, 2 – ancient snow glaciers, 3 – boundaries of cover glaciers: 1 – Severny, 2 – Utulik-Snezhninsky, 4 – direction of glacier movement, 5 – glacier water flow channels, 6 – glacier thicknesses, 7 – absolute heights, probably glacier soles, 8 – plateau scarps, 9 – foothills of mountains.

Т а б л и ц а 1

Список и характеристика ледников рис. 2, выделенных В.Н. Олюниным (1969)

Table 1

List and characterization of Fig. 2 glaciers identified by V.N. Oliunin (1969)

№ ледника	Ледник	Тип ледника	Длина, км	Площадь, кв. км	Мощность, м	Абсолютная высота конца ледника, м	Долина реки
Северный склон хр. Хамар-Дабан Бассейн р. Иркут							
1	Ихэнарынский	к	1.4	0.7	–	1800	Ихэ-Нарын
2	Дункагорхонский	к	1.8	1.9	–	1580	Дунка-Горхон
3	Агнульский главный	д	3.5	2.8	до 100	1580	Агнуль
4	Агнульский правый	д	3.4	2.0	–	1460	— // —
5	Зубкогонский	д	4.2	3.5	до 150	1450	Большой Зубкогон
6	Нутразубкогонский	д	2.4	1.4	–	1420	Нурта Зубкогон
7	Тумусунский	д	17.0	92.0	200–300	1240	Тумусун

7а	Тот же, северный язык	д	4.6	5.1	100–150	1100	Маргасан
8	Маргасанский	д	14.3	58.4	150–200	1330	— // —
9	Маргасанский вост.	в	1.2	0.9	–	1500?	— // —
10	Маргасанский сев.–вост.	в	0.5	0.4	–	1400?	— // —
11	Маргасанский северный	в	0.6	0.4	–	1460?	— // —
12	Харгунский	в	1.6	0.6	–	1500?	Харгун
13	Мартинский	д	3.9	1.0	<100	1440	Марта
14	Тибельтинский	д	6.7	3.0	<100	880	Средняя Тибельти
15	Тултуйский	д	7.6	7.3	<100	860	Тултуй
16	Лазурский	д	4.8	2.7	–	1020	Лазурская
17	Малобыстринский	д	4.2	4.5	–	1340	Малая Быстрая
18	Безымянный	к	1.4	0.7	–	1240?	Левый приток Бол. Быстрой
18а	Быстринское снежное поле	с	–	23.5	–	1600–1770	Большая Быстрая
19	Быстринский	д	25.3	105.2	150–250	940	То же
20	Подкомарнинский*	д	11.7	24.0	150–200	940	Подкомарная
21	Слюдянский* (от вершины 2090 м)	д	5.5	4.8	100–150	1000 ¹	Слюдянка
22	Безымянный*	к	1.2	0.3	–	–	Правый приток р. Слюдянки
23	То же*	к	0.6	0.1	–	1300?	То же
24	— // —*	к	0.7	0.1	–	1200?	— // —
Бассейн р. Безымянной							
25	Правобезымянский*	д	6.8	5.1	до 150	1200	Правая Безымянная
26	Безымянный	к	1.2	0.4	–	1500	Правый приток р. Челимиhi
27	— // —	к	0.9	0.3	–	1500	То же
28	Челимихенский*	д	5.4	2.7	80–150	1080	Челимиха
29	Левобезымянский*	д	8.0	12.2	до 1500	1100	Левая Безымянная
30	Исаковский	д	2.3–4.6	2.7	–	1300?	Ключ Исаковка
31	Безымянный	к	0.9	0.3	–	1500(?)	Правый приток Кл. Исаковка
32	— // —	к	1.3	0.4	–	1040	Правый приток р.левой Безымянной
33	— // —	д	3.9	3.3	~100	950	— // —
34	Поперчинский	д	2.1	1.8	–	1040?	Ключ Поперечный
35	Безымянный	к	1.1	0.4	–	1080	Правый приток Ключа Поперечного
36	— // —	д	1.2	0.6	–	1080	То же
37	— // —	д	1.4	0.5	–	1040	Правый приток р.левой Безымянной
38	Западный Мангатайский	д	2.5	0.9	–	850	Бол. Мангатай
39	Восточный Мангатайский	к	1.9	1.8	–	1000	То же
Бассейн р. Утулик							
40	Безымянный	к	1.6	0.8	–	1300	Левый приток р. Утулик
41	Снежное поле	с	1.5	–	–	1080	То же
Южный склон хр. Хамар-Дабан							

¹ Приводится по данным Е.В. Павловского (Павловский, 1948).

Бассейн р. Утулик							
42	Безымянный	к	1.0	0.2	—	1200?	— // —
43	— // —	к	0.8	0.2	—	1440?	— // —
44	— // —	к	1.3	0.4	—	1200?	— // —
45	— // —	д	1.5	0.3	—	1300?	— // —
46	Восточный Березовский	д	1.1	1.1	—	1240	Ключ Березовый
47	Западный Березовский	д	0.9	0.4	—	1360?	То же
48	Снежное поле	с	0.7	0.2	—	1600?	Ключ Мясникова
49	Восточный Мясниковский	в	1.3	0.9	—	1350?	То же
50	Западный Мясниковский	к	0.8	0.1	—	1400?	— // —
51	Безымянный	к	0.3	<0.1	—	—	— // —
52	— // —	к	0.7	0.1	—	—	Левый приток р. Утулик
53	— // —	к	1.3	0.7	—	1300?	Спускосвая
54	Спускосвой*	д	3.3	2.2	—	1160	— // —
55	Западный Голореченский	д	2.7	1.1	—	1180	Голая
56	Безымянный	к	1.0	0.4	—	1520?	Правый приток р. Корниловка
57	— // —	д	2.0	1.3	—	1380	Левый приток р. Салбак
58	— // —	к	0.8	0.5	—	1540	То же
59	Большой Салбакский	д	6.5	9.0	200–250	1760	— // —
60	Восточный Салбакский	к	2.7	1.7	—	1500	— // —
61	Центральный Салбакский	к	3.1	3.7	80–100	1540	Салбак
62	Западный Салбакский	д	3.6	0.6	100–150	1350	— // —
63	Снежное поле	с	4.2 ²	3.7	—	1540	Левый приток р. Утулик
64	Левая ветвь р. Утуликского	д	4.5	7.5	~100	1350	То же
Северный склон хр. Большой Хамар-Дабан Бассейн р. Утулик							
65	Утуликский	д	20.5	30.0	150–200	1140	Утулик
66	Безымянный	д	10.5?	19.5	—	1360?	Правый приток р. Утулик
67	— // —	к	2.5	0.8	—	1360?	То же
68	— // —	д	2.8	0.8	—	1380	— // —
69	— // —	д	6.7	5.4	~100	1320?	— // —
70	Ледник Сухой Пади	д	6.8	3.2	~100	1280	Падь Сухая
71	Северный Шубутуйский	д	13.5 ³	~64.0	до 200	1000?	Шубутуй
72	Снежное поле	с	2.2	~2.5	—	1200?	Россоха
73	— // —	с	1.7	~1.5	—	1200?	— // —
74	Безымянный	к	0.5	~0.1	—	1440	— // —
75	— // —	к	0.5	~0.1	—	1480	— // —

² Ширина снежного поля

³ От Патового озера

76	Южный Хвоевой	к	0.6	~0.2	–	1440	Ключ Хвоевой
77	Северный Хвоевой	к	0.8	0.6	–	1440	То же
78	Потайной	д	1.9	0.7	–	1240	Ключ Потайной
79	Безымянный	к	1.5	0.3	–	1200?	Правый приток р. Утулик
80	Снежное поле	с	1.2	0.6	–	~1200?	То же
81	Безымянный	д	4.6	3.5	–	840	— // —
82	— // —	к	0.3	0.1	–	–	— // —
83	— // —	д	5.1	2.3	–	840	— // —
84	— // —	д	4.3	3.8	–	840	— // —
85	— // —	д	3.0	2.6	–	1080	— // —
86	— // —	к	2.0	0.3	–	1100	— // —
Бассейн р. Бабха							
87	Западный Бабха	д	13.0	13.5	>150	820	Бабха
Бассейн р. Солзан							
88	Западный Солзан	д	21.0	54.7(?)	250–350	640(?)	Солзан

Примечание. Названия со звездочкой — палеоледники выделены и описаны в 2024 г. Типы ледников: к – каровые, д – долинные, в – височные, с – фирновые поля.

Окончательно современный гляциальный рельеф района был сформирован благодаря последовательной деятельности разновременных и разновысотных локальных палеоледников, объединенных в систему каров и трогов (лестницы из более чем восьми среднестатистических высотных уровней каров и трогов (СВУК), в районе Мунку-Сардык и четырех в пределах описываемого района) и деятельности флювиогляциальных и подледниковых вод, а также незначительной деятельности склоновых процессов во внеледниковой (перигляциальной) зоне. Нашими геоморфологическими исследованиями 2024 г. в описываемом районе Хамар-Дабана были установлены следующие среднестатистические высотные уровни каров (СВУК), на которых формировались палеоледники: 1–5 СВУК — на описываемой территории нет; остальные с 6 по 9 СВУК приведены в табл. 3 (табл. 3)⁴.

Такие же стадии деградации последнего оледенения почти в каждом горном хребте Сибири выделяет Е.В. Максимов (1965, 1968, 1970, 1972). Он сопоставляет каровые уступы в Восточном Саяне со стадиями последнего оледенения. Но для доказательства этого необходимо детальный геоморфологический анализ каровой лестницы одной из или близкорасположенных долин однонаправленной экспозиции. Это совершенно необходимо для исключения предполагаемой и доказываемой в некоторых случаях многими исследователями возможности ошибочного включения в регрессивную лестницу каров предыдущей покровно-долинной стадии оледенения. Детальным морфологическим анализом вначале необходимо доказать последовательность развития каров, а потом привязывать их к различным стадиям оледенений. Этот принцип и был положен в основу наших исследований.

⁴ Нумерацию возрастной последовательности СВУК и ГМК (карам и трогам в троговой лестнице долины) лучше всего давать в обратной последовательности, т. е. от современных к древним, как это принято в обозначении речных террас. Это позволяет легко привязать любую лестницу каров и конечных моренных образований к наиболее достоверному уровню — современному, и в дальнейшем легко наращивать их при обнаружении более древних образований.

Древнее оледенение в районе пика Черского

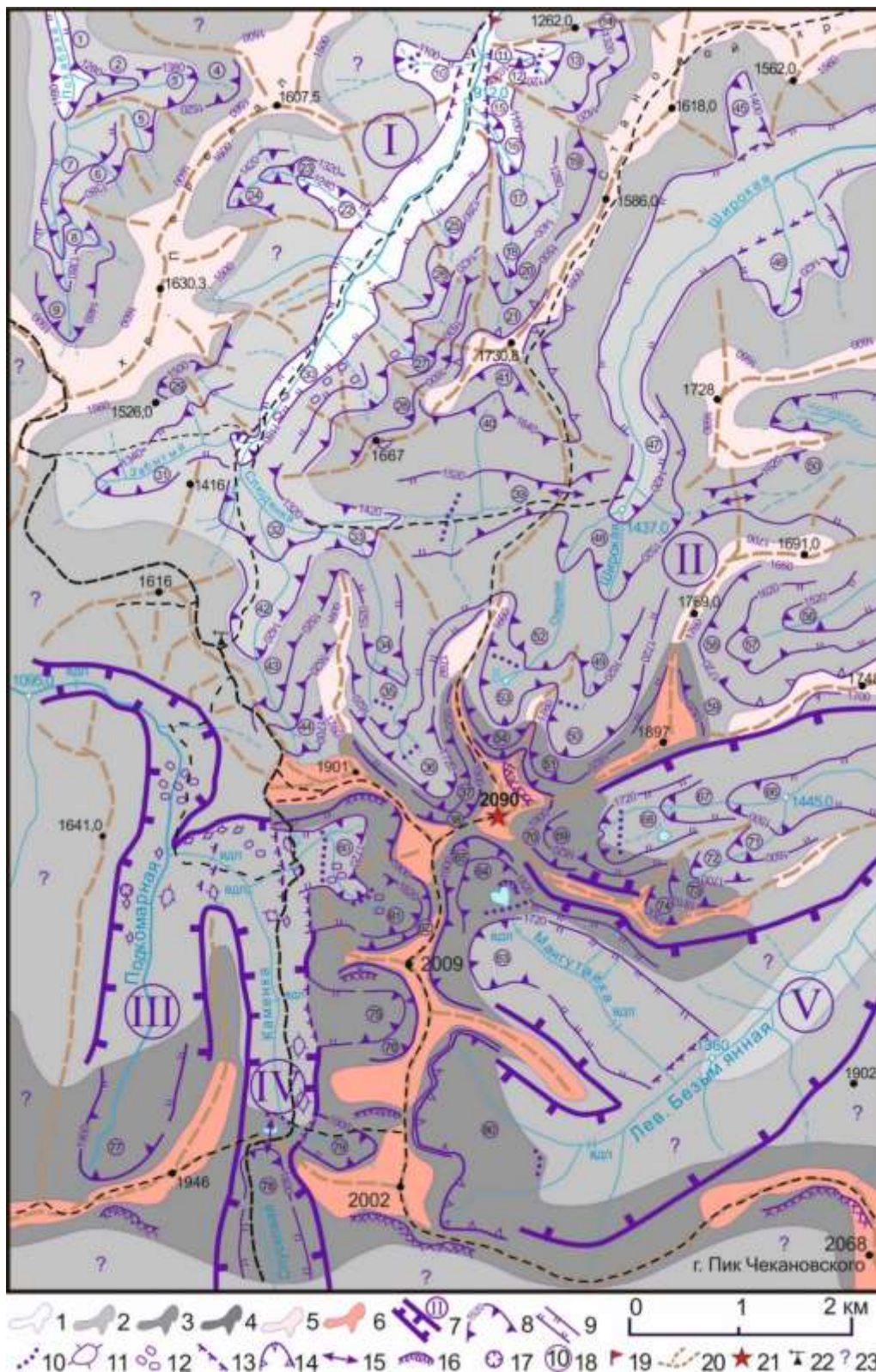


Рис. 3. Некоторые гляциальные формы рельефа в районе пика Черского на Хамар-Дабане, выявленные в 2024 году.

1 – площади распространения максимальной прогрессивной стадии девятого СВУК; 2–4 – регрессивных стадий наступания – отступания (осцилляций); 2 – восьмого СВУК (сартанской 1 фазы), 3 –

седьмого СВУК (сартанской 2 фазы), 4 – шестого СВУК перед гипертермальным интергляциалом; 5–6 – поверхностей выравнивания: 5 – после межсартанского интергляциала, 6 – после гипертермального интергляциала 7–5.5 тыс. лет; 7 – борта трогов и номера языков покровно-долинных ледников прогрессивной стадии сартанского оледенения; 8–16 – морфоскульптуры регрессивной стадии: 8 – стенки каров с отметками абсолютных высот дна каров, 9 – трог, 10 – ригели, 11 – бараньи лбы и курчавые скалы, 12 – крупно-глыбовые осыпные морены, 13 – устья висячих трогов (уступы), 14 – нивальные ниши, 15 – долины прорыва, 16 – современные снежники; 17 – суффозионные термоворонки; 18 – номера высотных уровней каров (см. табл. 2); 19 – крайняя точка распространения конечной морены ледника Черского по долине р. Слюдянка; 20 – хребты и отроги; 21 – пик Черского; 22 – метеостанция Хамар-Дабан; 23 – необследованные долины.

Числа в кружках: 1–80 — номера высотных уровней каров палеоледников: 1 – Похабихский, 2 – Боковой-1, 3 – Боковой-2, 4 – Верхнебоковой (висячий), 5 – Двойной-1, 6 – Двойной-2, 7 – Двойной-3, 8 – Двойной-4, 9 – Ягодный, 10 – Левый, 11 – Правый-1, 12 – Правый-2, 13 – Становой-1, 14 – Становой-2, 15 – Рабочий-1, 16 – Рабочий-2, 17 – Лазуритовый-1, 18 – Лазуритовый-2, 19 – Лазуритовый-3 (снежная ниша), 20 – Глухой-1, 21 – Глухой-2, 22 – Узкий, 23 – Поворотный-1, 24 – Поворотный-2, 25 – Веерный-1, 26 – Веерный-2, 27 – Крутой-1, 28 – Крутой-2, 29 – Надгорельный, 30 – Горельный, 31 – Забытый, 32 – Верхнеслюдянский-1, 33 – Верхнеслюдянский-2, 34 – Долгий-1, 35 – Долгий-2, 36 – Долгий-3, 37 – Северо-Западный-1, 38 – Северо-Западный-2, 39 – Северный-1, 40 – Северный-2, 41 – Северный-3, 42 – Казачий, 43 – Надказачий-1, 44 – Надказачий-2, 45 – Прямой, 46 – Парный, 47 – Кривой, 48 – Широкий-1, 49 – Широкий-2, 50 – Широкий-3, 51 – Северо-Восточный-1, 52 – Озерный-1, 53 – Озерный-2, 54 – Северный, 55 – Верхнечелимихенский, 56 – Дальний-1, 57 – Дальний-2, 58 – Дальний-3, 59 – Висячий, 60 – Посетительский, 61 – 3-го Гольца-1, 62 – 3-го Гольца-2, 63 – Мангутайский, 64 – Озера Сердце-1, 65 – Озера Сердце-2, 66 – Тихий-1, 67 – Тихий-2, 68 – Тихий-3, 69 – Восточный-1, 70 – Восточный-2, 71 – Мини-1, 72 – Мини-2, 73 – Короткий-1, 74 – Короткий-2, 75 – Зимний-1, 76 – Зимний-2, 77 – Верхнеподкомарнинский, 78 – Верхнепусковой, 79 – Верхнекаменский, 80 – Верхнебезымянский; I–V — номера языков покровно-долинного ледника Черского: I – Слюдянский, II – Правобезымянский, III – Подкомарнинский, IV – Каменский, V – Левобезымянский.

Fig 3. Some glacial landforms in the area of Chersky Peak on Khamar-Daban identified in 2024.

1 – areas of distribution of the maximum progressive stage of the ninth IED; 2–4 – regressive stages of advance – retreat (oscillations): 2 – the eighth IEDC (Sartan 1 phase), 3 – the seventh IEDC (Sartan 2 phase), 4 – the sixth IEDC before the hyperthermal interglacial; 5–6 – leveling surfaces: 5 – after the Sartan interglacial, 6 – after the hyperthermal interglacial 7–5. 5 thousand years; 7 – sides of troughs and tongue numbers of cover-valley glaciers of the progressive stage of the Sartan glaciation; 8–16 – morphoscultures of the regressive stage: 8 – walls of troughs with marks of absolute heights of trough bottoms, 9 – trogs, 10 – ledges, 11 – ram's foreheads and curly rocks, 12 – large clayey scree moraines, 13 – mouths of hanging troughs (scarps), 14 – nival niches, 15 – breakthrough valleys, 16 – modern snowfalls; 17 – suffusion thermoholes; 18 – numbers of trough height levels (see Table 2); 19 – numbers of trough height levels (see Table 2); 20 – ridges and spurs; 21 – Chersky peak; 22 – Khamar-Daban meteorological station; 23 – unexplored valleys.

Numbers in circles: 1–80 are numbers of altitude levels of paleoglacial caravans: 1 – Pohabikhsky, 2 – Bokovoy-1, 3 – Bokovoy-2, 4 – Verkhnebokovoy (hanging), 5 – Dvoynoy-1, 6 – Dvoynoy-2, 7 – Dvoynoy-3, 8 – Dvoynoy-4, 9 – Yagodny, 10 – Left, 11 – Right-1, 12 – Right-2, 13 – Stanovy-1, 14 – Stanovy-2, 15 – Worker-1, 16 – Worker-2, 17 – Lazuritovy-1, 18 – Lazuritovy-2, 19 – Lazuritovy-3 (snow niche), 20 – Glukhoy-1, 21 – Glukhoy-2, 22 – Narrow, 23 – Povorotny-1, 24 – Povorotny-2, 25 – Veerny-1, 26 – Veerny-2, 27 – Steep-1, 28 – Steep-2, 29 – Nadgorely, 30 – Gorely, 31 – Forgotten, 32 – Verkhnesludyansky-1, 33 – Verkhnesludyansky-2, 34 – Dolgiy-1, 35 – Dolgiy-2, 36 – Dolgiy-3, 37 – Severo-Zapadny-1, 38 – Severo-Zapadny-2, 39 – Severny-1, 40 – Severny-2, 41 – Severny-3, 42 – Cossack, 43 – Nadkazachiy-1, 44 – Nadkazachiy-2, 45 – Straight, 46 – Parny, 47 – Krivoy, 48 – Shiroky-1, 49 – Shiroky-2, 50 – Shiroky-3, 51 – Severo-Vostochny-1, 52 – Ozerny-1, 53 – Ozerny-2, 54 – Northern, 55 – Verkhnechelimikhensky, 56 – Dalny-1, 57 – Dalny-2, 58 – Dalny-3, 59 – Hanging, 60 – Visitor, 61 – 3rd Goltsa-1, 62 – 3rd Goltsa-2, 63 – Mangutaysky, 64 – Lakes Heart-1, 65 – Lakes Heart-2, 66 – Tikhiy-1, 67 – Tikhiy-2, 68 – Tikhiy-3, 69 – Vostochny-1, 70 – Vostochny-2, 71 – Mini-1, 72 – Mini-2, 73 – Korotkiy-1, 74 – Korotkiy-2, 75 – Zimny-1, 76 – Zimny-2, 77 – Verkhnepodkomarninsky, 78 – Verkhnespuskovoy, 79 – Verkhnekamensky, 80 – Verkhnelevo-bezemyansky; I–V – numbers of tongues of the Chersky glacier: I – Slyudyansky, II – Pravobezemyansky, III – Podkomarninsky, IV – Kamensky, V – Levobezemyansky.

Формирование гляциальных морфоскульптур района пика Черского

Установленные нами карово-троговые лестницы районов г. Мунку-Сардык и пика Черского удобнее и логически правильно описывать на данном уровне сбора информации, пользуясь морфологическим или структурным подходом, выделяя и описывая **формы локального оледенения** — вещественные образования и морфологические формы рельефа, обусловленные деятельностью локального, в частности горного, оледенения прогрессивной наступающей стадии и регрессивной, отступающей. Кроме того, для удобства описания всех наблюденных (задокументированных) экзарационных и аккумулятивных гляциальных форм рельефа и вещественных образований в пределах какой-либо долины, склона хребта (также могущих быть результатом оледенений ранних стадий) мы предлагаем воспользоваться еще несколькими понятиями, использованных при описании гляциального рельефа горного массива Мунку-Сардык. **Гляциальные морфологические парагенезисы (ГМП)** — это одновозрастные генетически связанные и взаимообусловленные одним ледником формы локального оледенения. В случае же объединения разновозрастных гляциальных форм или при возникновении затруднений и сомнений в соотношении каких-либо структур одному леднику, мы будем пользоваться понятием **гляциального морфологического комплекса (ГМК)**. Совокупность же всех ГМК, созданных ледниками одной долины, одного отдельного горного элемента или небольшого горного отрога, мы предлагаем называть **гляциальной морфологической системой (ГМС)**, а совокупность всех гляциальных форм района с многочисленными ГМС — **гляциальным рельефом**.

В состав каждого выделенного нами ГМК (см. табл. 3), как правило, входит определенный набор форм локального оледенения: 1) формы активного льда (отрезок трога в виде расширения современной речной долины с относительно выположенным дном; псевдотеррасы или плечи трогов, иногда нескольких уровней — вложенные трогов, устьевой ригель, сопровождающийися ГМК притоков; крутой, как правило, скальный уступ, в некоторых случаях, служащий или являющийся реликтовой стенкой кара возрожденного ледника данного ГМК, бараньи лбы и курчавые скалы); 2) аккумулятивные или моренные (береговые, конечные, срединные морены абляционного, абляционно-осыпного и осыпного типов (последние преобладают, в основном, в наиболее гипсометрически высоких ГМК); 3) супрагляциальные (наледниковые, аструктурные и подледниковые) формы пассивного или мертвого льда (термокарст, бугры, конуса и валы морен так называемого инверсионного рельефа, 4) созданные подледниковыми водами (ярусные долины или маргинальные каналы, которые более характерны для древних ГМК седьмого или восьмого СВУК, эпигенетические ущелья, трех морфологических типов: а) берущих свое начало из притоков и текущих вдоль главной долины вблизи нее, б) долины прорыва, пересекающие водоразделы, в) ложбины подледникового стока, формирующиеся водными потоками, текущими от края ледников вниз к центру трога.

Частные гипсометрические различия структур одного и того же среднестатистического высотного уровня в одной долине, объясняется рисунком 4, а также частичным врезанием или моренным перекрытием более молодым, выше расположенным, ледником структур более древнего ниже расположенного.

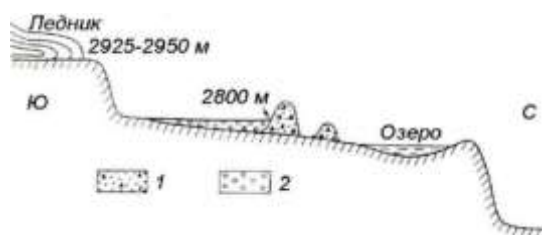


Рис. 4. Образование в рельефе двух разноуровневых ступеней одного и того же среднестатистического высотного уровня (по Ивановскому, 1981, с. 131).

1 — конечные морены, 2 — озерно-речные отложения.

Fig. 4. Formation in the relief of two different-level steps of the same average height level (according to Ivanovsky, 1981, p. 131).

1 – terminal moraines, 2 – lake-river sediments.

Т а б л и ц а 2

Возраст и последовательность ГМК долин рек бассейна р. Слюдянка

Table 2

Age and sequence of MMC of river valleys of the Slyudyanka River basin

Среднестатистический высотный уровень каров (СВУК)	n	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Время экзарационной активности ледников, тыс. лет тому назад	80	>24?	24	11	8	5.5	2.4	0.56	0.31	0.11
Продолжительность последующего абляционного периода тыс. лет	56	12?	13	3	2.5	3.1	1.84	0.25	0.20	0.15
Название ГМК	Хамар-Дабанский	Левый, Правый-1, Правый-2, Становой-1, Становой-2, Рабочий-1, Рабочий-2, Горелый	Забытый, Верхнеслюдянский, Казачий и еще 10 шт., показанных на рис. 3	Долгий, Северный, Налгопельный	Северо-Западный	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Тип ледников	Покровно-долинный	Карово-троговой			Карово-короткотроговой			Каровый		

Примечание: палеоледники 5–1 СВУК описаны в Восточном Саяне и могут быть встречены в Центральном Хамар-Дабане, где имеются абсолютные отметки выше 2200 м.

Т а б л и ц а 3

Характеристика древних ГМК района пика Черского

Table 3

Characteristics of ancient CMCs of the Chersky Peak area

№ на карте рис. 3	СВУК	Время максимального развития (тыс. лет)	Название	Экспозиция	Абсолютная высота (м)	Максимальная длина каров (км)	Максимальная длина трогов (км)	Дополнительная характеристика
Казанцевское межледниковье								
Зырянское покровное оледенение								
	Нет	80	Хамар-Дабанский	С	2400	>25	>35	
Каргинское межледниковье								
Сартанское покровно-долинное оледенение, первая стадия								
		>24	Ледник Черского		>2000	8–10	10–15	Район пика Черского
Сартанское карово-троговое оледенение, вторая стадия								
1	9	24	Похабихский	С	1180	0.5	1.5	р. Похабиха
10	9	24	Левый	ЮВ	1100	0.25	0.5	Левый приток р. Слюдянки
11-12	9	24	Правый	ЗСЗ	1020-1120	0.25	0.5	Правый приток р. Слюдянки
15-16	9	24	Рабочий	С	1000-1100	0.25	0.75	— // —
22	9	24	Узкий	ЮВ	1240	0.25	0.75	Левый приток р. Слюдянки
30	9	24	Горелый	СВ	1160	0.5	>2.0	Кар в ущелье р. Слюдянки

								ниже устья руч. Забытый
47	8	<24	Кривой	С	1420	0.75	2.5	Среднее течение р. Широкой
42	8	<24	Казачий	ССВ	1420	1.0	2.1	Ур. Казачья Поляна
32-33	8	<24	Верхнеслюдянский	З→С	1320-1420	1.5	3.0	р. Слюдянка
31	8	<24	Забытый	ВСВ	1320	0.75	2.0	руч. Забытый
2-3	8	<24	Боковой	З	1280	0.5	1.0	р. Похабиха, правый борт
5-8	8	<24	Двойной	С→СЗ	1380	0.5	0.5	— // —
13-14	8	<24	Становой	З	1320-1420	0.25	0.75	р. Слюдянка, под Становым хр.
17-18	8	<24	Лазуритовый	С	1280-1420	0.75	1.25	Правый приток р. Слюдянки
23-24	8	<24	Поворотный	В	1320-1420	0.5	1.0	Левый приток р. Слюдянки
25-26	8	<24	Веерный	СЗ	1280-1420	0.5	0.5	Висячие, по правому борту р. Слюдянки
45	8	<24	Прямой	ЮЮВ	1400	0.75	0.75	Левый борт р. Широкой
46	8	<24	Парный	ССЗ	1420	0.75	1.0	Правый борт р. Широкой
4	7	11	Верхнебоковой	З	1520	0.25	0.5	р. Похабиха под хр. Перевал
9	8	11	Ягодный	С	1460	0.5	1.0	Истоки р. Похабиха
19-21	7	11	Глухой	ССВ	1510-1700	0.5	1.5	Правый приток р. Слюдянки
27-28	7	11	Крутой	СЗ	1530-1600	0.25	0.25	Висячие, по правому борту р. Слюдянки
29	7	11	Надгорелый	ЮВ	1500	0.25	0.25	Над Горелой Поляной
71-72	7	11	Мини	ВСВ	1600-1700	0.75	>1.25	Ручей к востоку от пика Черского
66-68	7	11	Тихий	В	1520-1620-1720	0.75	3.25	— // —
63	7	11	Мангутайский	ЮВ	1720	0.5	2.25	руч. Мангутайский
60	7	11	Посетительский	З	1720	0.25	>1.0	руч. Посетительский
56-58	7	11	Дальний	ВСВ	1520-1620-1720	1.25	2.0	Правый приток руч. Челимиha
55	7	11	Верхнечелимихенский	В	1620	0.5	>2.0	Верховья руч. Челимиha
52-53	7	11	Озерный	ССВ	1620-1720	1.0	2.0	р. Озерная
48-50	7	11	Широкий	СВ	1520-1620-1720	2.25	3.5	р. Широкая
43-44	7	11	Надказачий	ССЗ	1520-1620-1700	0.75	1.25	Выше ур. Казачья Поляна
39-41	7	11	Подпокровный	З→Ю	1520-1620-1720	1.75	2.5	В верховьях р. Слюдянки, мог быть перехвачен Северным ледником
34-36	7	11	Долгий	ССЗ	1520-1620-1720	1.5	2.5	К северо-западу от пика Черского
После сартанское межледниковье, отмеченное поверхностью выравнивания на высотах 1760–1500 м								
80	6	8	Верхнелевобезьянский	В→СВ	1900	1.5	>6.5	Детально не обследовался
79	6	8	Верхнекаменский	СЗ→С	1900	1.0	3.25	Впадал в Верхнеподкомаринский
47	6	8	Верхнепускковой	Ю	1900	0.75	2.0	Верховья р. Пусковой
77	6	8	Верхнеподкомаринский	С	1900	1.0	5.5	Впадал в Большебыстринский, детально не обследовался
75-76	6	8	Зимний	З	1820-	0.5	1.25	Приток Каменского

73-74	6	8	Короткий	СВ	1810-1900	1.0	1.75	К востоку от пика Черского
69-70	6	8	Восточный	В	1820-1900	0.5	>2.0	— // —
64-65	6	8	Озера Сердца	ЮВ	1820-1900	0.55	0.70	Впадал в Верхнелевобезымянский
61-62	6	8	3-го Гольца	СЗ	1820-1900	1.25	1.5	Впадал в Верхнекаменский
59	6	8	Висячий	ВСВ	1820	0.5	0.5	К северо-востоку от пика Черского
54	6	8	Северный	С	1820	1.5	>2.0	К северу от пика Черского
51	6	8	Северо-Восточный	СВ	1820	2.5	>3.0	Север-северо-восточнее пика Черского
37-38	6	8	Северо-Западный	СЗ	1820-1900	0.1	0.75	Карово-короткотроговый
Климатический оптимум (термический максимум, интергляциал), поверхность выравнивания на высотах 2000–1900 м, могучий лес рос до современной высоты 2150 м								

В данной статье мы рассматриваем только ГМК. Выявление и описание ГМП, задача более сложная и пока решена нами только для ГМП 1–5 среднестатистических высотных уровней горного массива Мунку-Сардык в Восточном Саяне. Выявление и описание более древних ГМП будет решаться нами по мере сбора и обработки полевых материалов в последующих статьях.

Существует мнение М.Г. Гросвальда, В.Н. Олюнина и С.А. Архипова, что все ледники Восточного Саяна, являются остатками позднеплейстоценового сартанского оледенения. Возраст этого оледенения был определен с помощью радиоуглеродного и термолюминесцентного методов и составляет 10–23 тыс. лет.

Развитие гляциального рельефа территории, прилегающей к пику Черского в Хамар-Дабане, шло до 6-го СВУК (8 тыс. лет) на одинаковых высотных уровнях с горным массивом Мунку-Сардык, как и во всем Восточном Саяне. На Хамар-Дабане, как и на Мунку-Сардык до этого времени еще могли существовать остатки покровно-долинных ледников аналогичные Окинскому. Они интенсивно выравнивали территорию Хамар-Дабана до высот 2400–2800 м. Ниже них развивались локальные ледники, представляющие или стадияльные отступающие регрессивные ледники, в той или иной мере питаемые этими покровными ледниками или же они могли быть самостоятельными ледниками, развивающимися по мере скачкообразного повышения уровня региональной

снежной границы. Так или иначе на изучаемой территории были сформированы морфоскульптуры 9–6-го среднестатистического высотного уровня каров и трогов (СВУК) 9 – 8 – 7 и 6-го уровня.

Главными реперами относительного определения одновозрастных высот или рубежей (уровней) в районах Хамар-Дабана и Мунку-Сардык могут являться выровненные абразионные поверхности покровных ледников зырянского (в районе Мунку-Сардык — окинского) оледенения с максимумом в 80 тыс. лет, остатки которого по ряду полученных нами косвенных факторов могли сохраняться до 8 тыс. лет, т. е. до конца сартанского оледенения. Это значительно может понижать их возраст с 80 тыс. лет (Коваленко, 2011) до 24–11 тыс. лет и позволяет увязывать многие факты палеогляциальных процессов в районе Мунку-Сардык с этими реликтовыми остатками.

Гляциальные формы с южной экспозицией резко отличаются от аналогичных форм с северной. Первые более пологие, протяженные, имеют более высокие значения абсолютных высот, а северные резче выраженные, несколько круче и не столь протяженные. К последним можно отнести и формы, имеющие как правило высоты 1420–1720 м и развивающиеся на пологих, выровненных поверхностях (см. формы с южной экспозицией верхний р. Слюдянка, а с северной — по р. Широкой).

Пик Черского представлял собой центр покровно-долинного ледника, языки с которого

устремлялись на север в долину современной Слюдянки, на запад в долину Подкомарной и Бол. Быстрой, на восток и юго-восток в долину современнойлевой Безымянной. Это крайняя северная вершина меридионального отрога хр. Хамар-Дабан, соединяющегося через 4 км на юге с серединой большого широтного хребта, простирающегося на 40 км от г. Вершина Босан (2275 м) на западе, до г. Мангутай (1856 м) на востоке.

Сравнивая амплитуды отступления локальных карово-троговых ледников и, учитывая, что последним оледенением на Мунку-Сардык, которые развивались до термального максимума, были ледники 6-го СВУК, вертикальный размах морфоскульптур карово-троговых ледников составлял: $2300\text{max} - 2220\text{min} = 80$ м, а в Хамар-Дабане это были локальные ледники с абсолютным размахом высот морфоскульптур тоже 80 м ($1900\text{max} - 1820\text{min} = 80$ м), получаем прекрасное совпадение данных, что позволяет коррелировать

их между собой и считать последние хамардабанские карово-троговые ледники одновозрастными шестому уровню СВУК Мунку-Сардык. Далее сравнивая высоту границы леса в районе Мунку-Сардык равной 2100 м, и в Хамар-Дабане равной 1700 м, мы получим разницу в 400 м ($2100 - 1700 = 400$ м). Такую же величину мы получаем сравнивая максимальные и минимальные высоты каров 6-го СВУК этих районов (для Мунку-Сардык — $2300\text{max} - 1900\text{max} = 400$ м и для Хамар-Дабана — $2220\text{min} - 1820\text{min} = 400$ м), что еще раз доказывает их полную идентичность как по возрасту, так и по высоте формирования с той лишь поправкой, что высоты хамардабанских морфоскульптур надо уменьшать на 400 м при сравнении с мунку-сардыкскими.

Далее, проведя такое же сравнение для остальных СВУК на Мунку-Сардык и Хамар-Дабане, мы тоже получим близко совпадающие данные (табл. 4).

Таблица 4

Сравнение гляциальных морфоскульптур Мунку-Сардык и Хамар-Дабана (район пика Черского)

Table 4

Comparison of glacial morphosculptures of Munku-Sardyk and Khamar-Daban (Chersky Peak area)

№ п/п	Сравниваемый признак	Мунку-Сардык	Хамар-Дабан	Процент совпадения (с учетом 400-метровой разницы абсолютных высот)
1	Вертикальный размах морфоскульптур 9 СВУК	$1540 - 1270 = 270$ м	$1240 - 970 = 270$ м	100
2	Вертикальный размах морфоскульптур 8 СВУК	$1640 - 1540 = 100$ м	$1460 - 1280 = 160$ м	137.5
3	Разница максимальных высот 8 и 9 СВУК	$1540 - 1280 = 260$ м		
4	Разница минимальных высот 8 и 9 СВУК	$1270 - 1000 = 270$ м		
5	Вертикальный размах морфоскульптур 7 СВУК	$2120 - 1880 = 240$ м	$1720 - 1500 = 220$ м	91.7
6	Вертикальный размах морфоскульптур 6 СВУК	$2300 - 2220 = 80$ м	$1900 - 1820 = 80$ м	100
7	Разница максимальных высот 6 и 7 СВУК	$2300 - 1900 = 400$ м		100
8	Разница минимальных высот 6 и 7 СВУК	$2220 - 1820 = 400$ м		100
9	Разница максимальных высот 7 и 8 СВУК	$2120 - 1720 = 400$ м		100
10	Разница минимальных высот 7 и 8 СВУК	$1520 - 1280 = 240$ м		60
11	Разница высот поверхностей выравнивания по максимальным высотам	$2160 - 1760 = 400$ м		100
12	Абсолютный вертикальный размах морфоскульптур регрессивной стадии	$2300 - 1270 = 1030$ м	$1900 - 970 = 930$ м	90.3
13	Абсолютный вертикальный размах палеоледников (Окинского и Черского)	$2400 - 1270 = 1130$ м	$2000 - 860 = 1140$ м	99.1

14	Уровень конечных морен	Абс. высота 1260 м	Абс. высота 860 м	100
15	Поверхность выравнивания после 7-го СВУК (максимальные высоты)	2160	1760	100
16	Экзарационная подошва покровно-долинного палеоледника Черского	Окинского — 2400 м	Черского — 2000 м	100
17	Разница высот экзарационных подошв покровно-долинных ледников	2400 – 2000 = 400 м		100
18	Абсолютная высота границы леса	2100	1700	100
19	Разница высот границы леса	2100 – 1700 = 400 м		

Из табл. 4 видно, что морфометрические данные одновозрастных форм гляциального рельефа Хамар-Дабана и Мунку-Сардык в большинстве своем совпадают, а незначительные отличия, на наш взгляд, являются недоработками или ошибками в фиксации данных первого полевого сезона 2024 г. и, которые при дальнейших исследованиях, скорее всего, могут быть скорректированы более точно.

Отсюда следует ряд интересных заключений и выводов.

1. Хамар-Дабанский блок, как и Саянский (Мунку-Сардыкский), до рубежа 8 тыс. лет тому назад развивались одинаково.

2. После гипертермического интергляциала гляциальные процессы в Хамар-

Дабанском регионе, по крайней мере в районе пика Черского, прекратились, что связано с тем, что блок опустился на 400 м (или поднялся на ту же величину мунку-сардыкский блок, что сути дела не меняет) и его абсолютные высоты стали значительно ниже региональной снеговой границы последующих оледенений 1–5-го СВУК (табл. 5). Следует заметить, что высот снеговых линий 1–5-го СВУК хватает для абсолютных отметок самых высоких гор центральной части Хамар-Дабана (2400–2600), где вероятно можно будет обнаружить гляциальные морфоскульптуры этих среднестатистических уровней при дальнейших исследованиях.

Т а б л и ц а 5

Количественные и возрастные параметры гляциально-нивалных форм рельефа горного массива Мунку-Сардык и района пика Черского Хамар-Дабана

Table 5

Quantitative and age parameters of glacial-nival landforms of the Munku-Sardyk mountain massif and the Chersky Peak area of Khamar-Daban

	Среднестатистические высотные уровни (СВУК)							
	Мунку-Сардык				Черского			
	8	7	6	Гиперинтергляциал	8	7	6	Гиперинтергляциал
Средняя высота дна каров (м)	1615	1978	2271	3755*	1373	1619	1862	3355**
Высота региональной снежной границы (м)	1551*	1898*	2182*	3607*	1309**	1541**	1773**	3207**
Граница леса (м)	1118*	1368*	1572*	2600	876**	1011**	1163**	2200**

Примечание. Данные полученные: 1615 — измерениями в поле опытным путем; 1551* — расчетным путем в районе Мунку-Сардык (Коваленко, Гергенов, 2022а; 1151** — расчетным путем по данным района Мунку-Сардык (с учетом 400-метровой разницы абсолютных высот)

При этом на практике в действительности могло быть реализовано множество вариантов развития тектонических событий: 1) поднялся на 400 м Саянский блок, 2) опустился на 400 м Хамар-Дабанский блок, 3) Саянский

блок поднялся на 200 м, а Хамар-Дабанский на эту же величину опустился — в итоге будет все равно 400 м, и т. д. Блоки могли подниматься или опускаться в любом направлении, но получившийся итог, который мы

сейчас имеем — это все та же разность в абсолютных отметках основных морфологических структур, учитывая которую можно легко проводить корреляционные связи различных процессов: ландшафтных, гидрогеологических, палеогеографических, нивальных и пр. между Хамар-Дабанским и Мунку-Сардыкским блоками.

Формы рельефа покровного оледенения

Первые покровные ледники по сибирской шкале вероятно соответствовали самаровскому ледниковому периоду (135–100 тыс. лет назад). Подробно оледенение этого возрастного уровня рассматривает В.Н. Олюнин в книге «Неотектоника и оледенение Восточного Саяна» (1965). По его мнению, это оледенение в Восточном Саяне было значительным по площади и носило преимущественно долинно-каровый характер, местами переходя в покровное оледенение. Наступившее потепление казанцевского межледниковья явилось причиной интенсивной деградации этого ледника.

Следующее зырянское покровное оледенение произошло 80 тыс. лет назад (окинское в районе Мунку-Сардык и хамар-дабанское на Хамар-Дабане. Ледниковый покров последнего в каргинское межледниковье распался на отдельные покровы-шапки, увенчавшие в Хамар-Дабане наиболее высокие горные территории ледниками, названные нами: Северным и Центральным. В этот интергляциал заложилась или продолжили свое формирование главные речные долины: Снежная, Утулик, Слюдянка, Иркут. Центральный покров из-за своего довольно большого размера, сохранил свое единство, обширный характер и локализацию, и после каргинского межледниковья, а Северный, во время сартанского оледенения с максимумом развития 24 тыс. лет тому назад, распался на ряд более мелких, локальных покровно-долинных ледников: Тумусунский, Быстринский, Черский (см. рис. 3). Максимальные контуры ледника Черского в пределах изучаемой территории картируются по линии максимального развития конечных морен ледников 9-го СВУК, вероятных приемников и продолжателей процессов оледенения территории (см. рис. 3). В

конце периода абляции ледников 9-го СВУК по долине р. Слюдянки они отступили до абсолютной высоты 1050–1060 м в современном исчислении.

Морфологические формы гляциального рельефа верхних течений рек Слюдянки, Подкомарной, Бол. и Мал. Быстрых,левой и Правой Безымянных созданы были скорее всего Хамар-Дабанским покровно-долинным палеоледником зырянского оледенения (70–80 тыс. лет назад). Этот ледник на севере Хамар-Дабана имел площадное водораздельно-долинное распространение и из центральных областей хребта спускался в сторону Байкала и в долину Иркут. Этот ледник был прогрессивного типа оледенения и довольно быстро стаял, оставив на нашей территории лишь минимальное количество аккумулятивных форм, и выровненные (сглаженные) водоразделы всех хребтов и отрогов. Местоположение конечных остатков деградированного ледника перед окончательным стаиванием показаны на рис. 1, 2 и 3. На нашей территории в районе пика Черского из центра ледника, располагавшегося непосредственно над пиком, им прорабатывались основные направления речных долин вдоль главных долинных языков I–V (см. рис. 3): I — Слюдянский, II — Правобезымянский, III — Подкомарнинский, IV — Каменский, V — Левобезымянский. Границей между первым и вторым языком является Становой хребет, заходящий своей юго-западной оконечностью на нашу территорию, западной же границей Слюдянского языка является хр. Комар. Границы распространения остальных ледников хорошо оконтурены крутыми курчавыми стенками склонов долин крупных рек, обработанные льдом этих ледников. Расплывчатый характер контуров Слюдянского языка и относительно плохая сохранность морфоскульптур этого языка объясняется его северной экспозицией, весьма способствующей длительной его абляции, создающей благоприятные условия для развития осцилляционных процессов отступающих регрессивных ледников разнообразной направленности экспозиций от широтного до северного и южного направлений. В результате на территории развития этого языка

сформировалась плоскогорная наклонная поверхность в междуречье верховий рек Слюдянки и Челимихи. Высота конечных морен этого ледника в абсолютном значении 1000 м была определена еще Е.В. Павловским в 1948 г. (Павловский, 1948). По нашим данным нижний вертикальный предел распространения морен этого ледника составляет 860 м, а верхний предел распространения экзарационных морфоскульптур как 2000 м, что соответствует вертикальному размаху развития краевых (самых дальних и самых древних) морфоскульптур ледника в 1140 м. При этом нижние пределы распространения языков покровно-долинного ледника Черского не поддается точному практическому определению из-за наложившегося на его внешние границы стадияльных локальных карово-троговых ледников, в частности ледников 9-го СВУК.

Локальные карово-троговые формы рельефа

К гляциальным морфоскульптурам локальных стадияльных оледенений на территории Хамар-Дабана в районе пика Черского относятся все формы рельефа от 9 до 6-го СВУК, морфометрическая характеристика которых приведена в табл. 6 и на рис. 4. Близкие морфометрические данные всех ГМК Хамар-Дабана могут указывать на однотипность протекавших гляциальных процессов на всем их временном отрезке развития. Морфологический анализ не дает однозначного ответа на их происхождение. Согласно нашим исследованиям здесь можно предположить две гипотезы.

Первой гипотезы мы придерживались при описании гляциальных форм рельефа в пределах горного массива Мунку-Сардык (Коваленко, 2011, 2011а, 2013). Она предполагает генетическую связь с остатками покровно-долинного ледника предыдущего оледенения (в горном массиве Мунку-Сардык — Окинского, а на изучаемой территории на Хамар-Дабане — ледника Черского) — источниками ледового питания разновозрастных и разновысотных локальных ледников-стадиалов. Долинные языки покровно-

долинных ледников, продолжая отступать в горы, формируют трудно объяснимые кароподобные уступы по долинам основных рек (рис. 4) и подпитывают обломочным материалом морены локальных, скорее всего возрожденных ледников, выходящих из этих каров. Скопления этого материала в виде конечных бугров в центре каров вблизи ригелей способствует разветвлению долин: зарождению двух направлений каровых лестниц выше каров и двух ледовых стоков ниже ригелей этих каров (Коваленко, 2023). Последние подвижки льдов из вышележащих областей питания этих ледников освободили крутые склоны мегакаров от обломочного материала, предопределив значительно более меньшие объемы морен последующих ледников 1–5-го СВУК, которые уже развивались согласно второй гипотезы.

Таким образом, все ледниковые формы рельефа с 8-9 до 6-го СВУК⁵ включительно (табл. 2, 3) являлись реликтовыми сартанского оледенения, а при абляции и отступании эти ледники всегда гипсометрически выше имели мощные области питания. Отступали они в межледниковые периоды потеплений, а наступали или прекращали отступать и останавливались, иногда на длительное время, в периоды похолоданий, когда происходило формирование своеобразных форм ледникового рельефа — каров и трогов — в современном рельефе в виде своеобразных расширений речных долин с выположенными руслами и аккумулятивным характером рек и широким развитием признаков флювиогляциальных процессов — своеобразные зандровые площадки стагнационного ледника. При таких остановках или небольших осцилляциях, на конце отступающих языков льда формировались уступы и отлагались мощные морены абляционно-осыпного типа. Большие мощности льда или длительное стояние концов ледников на одном месте приводило к классическому формированию осыпной морены, которая создавала условия для образования двух стоков-прорывов в этих обрывах (стенках каров) — зарождению двух однопорядковых долин (в районе

⁵ СВУК — среднестатистический высотный уровень каров и трогов.

Мунку-Сарлык) или двух каров (в районе Хамар-Дабана). В качестве многочисленных примеров можно указать на образование двух долин в каре п/л Усть-Иркутного, когда были заложены долины Среднего и Белого Иркутов; в каре п/л Портулановского, когда были заложены долины рр. Белого Иркута и Мугувека; в каре п/л Лесного, когда возникла долина руч. Горелого и была продолжена долина р. Мугувека; в каре п/л Лесного, когда были заложены стоки п/л. Сухого и Пристенного (Коваленко, 2014, с. 57 и цветная вклейка), а в описываемом районе: п/л Озёрный, 3-го Гольца, Озера Сердца, Восточного и Верхнелевобезымянского (см. рис. 3). Формирование как минимум двух стоков льда — яркий и постоянный признак каровых ледников — их визитная карточка, указывающая на явный гляциальный, а не нивальный, характер процессов происходящих в данном каре. Никаких двух стоков, кроме центрального, часто переуглубленного, в снежных или нивально-эрозионных нишах и нагорных террасах не образуется (Коваленко, Гергенов, 2022а).

После термического интергляциала 7–5.5 тыс. лет тому назад вся масса реликтового льда, оставшегося от сартанского оледенения, стаяла, и масштабы последующих ледников в нашем районе значительно уменьшились. После этого времени, гляциальные формы древних, более мощных ледников, стали хорошо сохраняться в палеоформах в виде высоких плечей (псевдотеррас) трогов на бортах основных долин и в виде выровненных водоразделов горных отрогов. Большинство из них характеризуется экзарационным

характером, т. к. их аккумуляционные части из-за их прогрессивного характера находились гипсометрически ниже. Они сохранились благодаря тому, что мощностей (высот) более молодых карово-троговых ледников не хватало их уничтожить. Это, как правило, сплошные поля оригинальных курчавых скал на крутых высоких частях бортов долин древних трогов. Детально исследуя разновозрастные морфоскульптуры, можно определить величину охвата территории и продолжительность каждой осцилляции. Так по самым удаленным конечным моренам определяем величину максимального распространения ледников, а по размерам выровненных площадок относительное время межстадиального потепления, ширину которых последующие ледники следующего этапа похолодания даже иногда и не могли преодолеть и уничтожить морфоскульптуры предыдущего этапа похолодания.

На последнем этапе отступления покровно-долинных ледников и во время гипертермального интергляциала 7.5–5 тыс. лет назад, последние ледяные языки и шапки покровно-долинного ледника из-за резкого повышения температуры очень быстро стаяли, обеспечив большой объем многоводных флювиогляциальных потоков, которые, смешиваясь с моренным материалом предыдущих стадий, сформировали катастрофические сели (Коваленко, Гергенов, 2022) прокатившиеся по всем речным долинам, а в северных отрогах Хамар-Дабана достигавшие оз. Байкал. Это доказывается многими исследователями для более северных районов.

Т а б л и ц а 6

Данные для построения гипотетической лестницы каров ледников горного массива Мунку-Сардык и Хамар-Дабана

Table 6

Data for constructing a hypothetical staircase of glacier carr ladders of the Munku-Sardyk and Khamar-Daban mountain ranges

	Среднестатистические высотные уровни (СВУК)							
	Мунку-Сардык				Черского			
	6	7	8	9	6	7	8	9
Средняя высота дна каров (м)	2280	1978	1627	1540	1862	1619	1373	1115

Прирост высоты от более древнего уровня (м)	+302	+351	+87	—	+243	+246	+258	—
Средняя длина (м)	2146	1944	1366	>2000	1236	2555	2000	1333
Прирост длины от более древнего уровня (м)	+202	+578	-634	—	-1319	+555	+667	—
Общая сумма средних длин = 7456 м					Общая сумма средних длин = 7197 м			

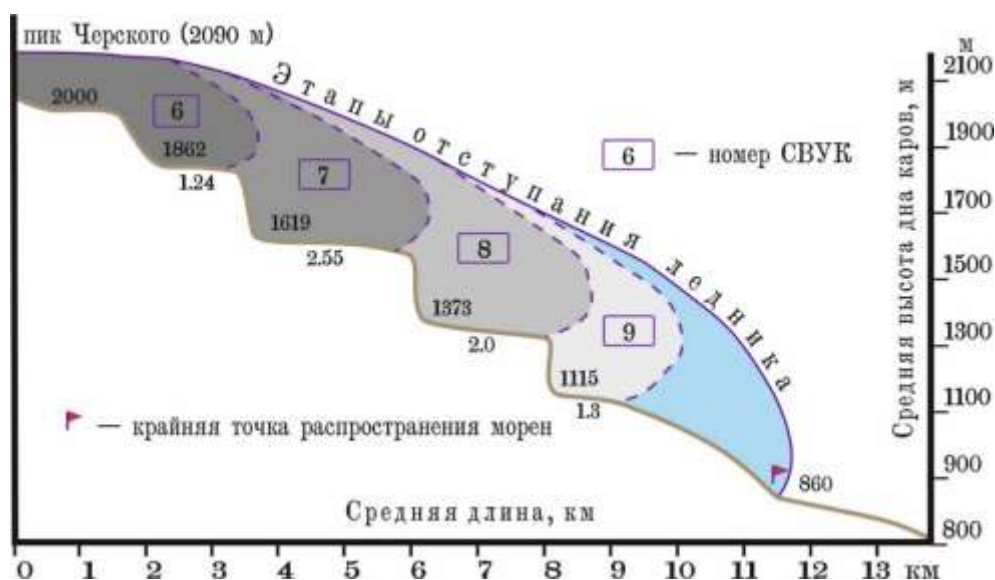


Рис. 4. Гипотетическая лестница развития ГКМ (каров и трогов) района пика Черского с предполагаемым отступанием языков ледника Черского по первой гипотезе.

Условные обозначения см. рис. 3.

Fig. 4. Hypothetical ladder of MMC development (karrows and trogs) of the Chersky Peak area with presumed retreat of the Chersky Glacier tongues according to the first hypothesis.

For notation see Fig. 3.

По второй гипотезе никаких регрессивных, отступающих все выше в горы ледников в связи с повышением уровня снеговой линии при наличии остатков покровных ледников никогда не существовало, т. к. объяснить развитие каров при такой схеме невозможно, доказательством чего служат все существующие схемы их образования у многочисленных авторов разных регионов мира. Согласно этой гипотезе гипотетическая лестница каров и трогов локальных палеоледников 6–9-го СВУК образовалась без наличия более древнего покровно-долинного ледника в результате только скачкообразного повышения уровня региональной снеговой линии. При

этом уровень региональной снеговой линии каждого локального оледенения всегда находится ниже уровня формирования гляциального льда (рис. 5). По этой гипотезе формирование самого нижнего уровня лестницы каров после каргинского межледниковья могло начаться с резкого похолодания, которое понизило уровень снежной региональной линии до высоты 1034 м (9-й СВУК), а закончиться достижением уровней (каров и снежной линии) значительно превышающих максимальные абсолютные высоты хребтов Хамар-Дабана в районе пика Черского (6-й СВУК).

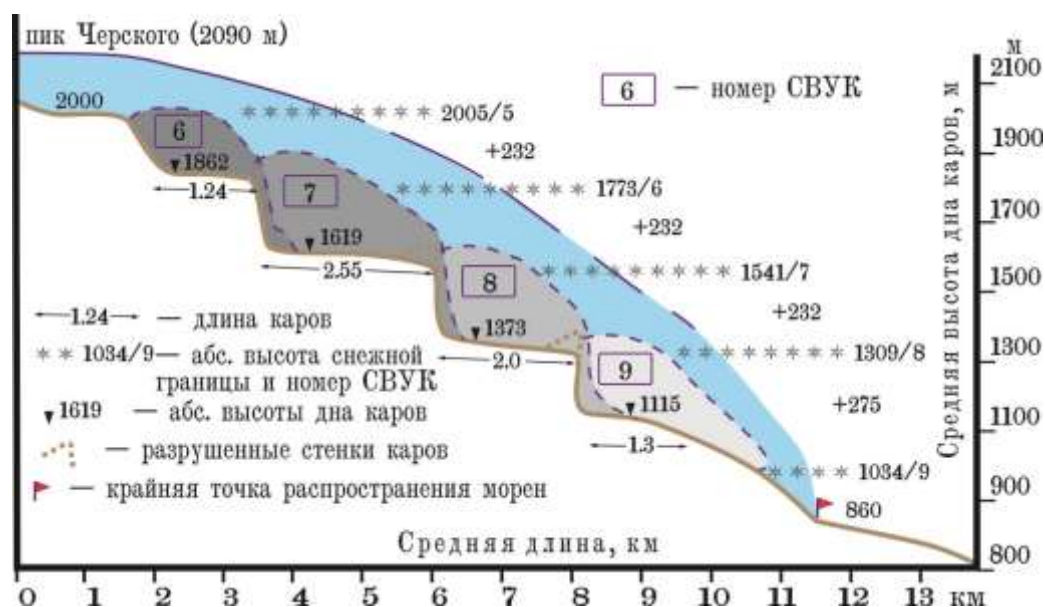


Рис. 5. Гипотетическая лестница развития ГМК (каров и трогов) района пика Черского с предположительным повышением абсолютных высот региональной снеговой линии по второй гипотезе.

Условные обозначения см. рис. 3.

Fig. 5. Hypothetical ladder of MMC development (karrows and troughs) of the Chersky Peak area with presumed increase in absolute heights of the regional snow line according to the second hypothesis.

For notation see Fig. 3.

Карово-троговые гляциально-морфологические комплексы девятого СВУК

К морфоскульптурам девятого СВУК относится шесть ГМК: Похабихский (1)⁶, Левый (10), Правый (11–12), Рабочий (15–16), Узкий (22), Горелый (30). Возрастные рамки развития и морфометрические параметры ГМК приведены на рис. 3-4 и табл. 2-4 и 6. Абсолютная высота верхнего предела распространения гляциальных морфологических комплексов этого СВУК составляет 1240 м, а нижний 1000 м.

Карово-троговые гляциально-морфологические комплексы восьмого СВУК

По возрасту этот комплекс по сибирской шкале, вероятно, отвечал первой фазе сартанского оледенения (24–22 тыс. лет назад) и в нашей лестнице соответствует восьмому СВУК в общем количестве 12 ГМК: Кривой (47), Казачий (42), Верхнеслюдянский (32–33), Забытый (31), Боковой (2–3), Двойной

(5–8), Становой (13–14), Лазуритовый (17–18), Поворотный (23–24), Веерный (25–26), Прямой (45), Парный (46). Возрастные рамки развития и морфометрические параметры ГМК приведены на рис. 3-4 и в табл. 2-4 и 6. Абсолютная высота верхнего предела распространения гляциальных морфологических комплексов этого СВУК составляет 1460 м, а нижнего — 1280 м.

Карово-троговые гляциально-морфологические комплексы седьмого СВУК

К морфоскульптурам седьмого СВУК относится 16 ГМК: Верхнебоковой (4), Ягодный (9), Глухой (19–21), Крутой (27–28), Надгорелый (29), Мини (71–72), Тихий (66–68), Мангутайский (63), Посетительский (60), Дальний (56–58), Верхнечелимихенский (55), Озерный (52–53), Широкий (48–50), Надказачий (43–44), Подпокровный (39–41), Долгий (34–36). Возрастные рамки развития и морфометрические параметры ГМК приведены на рис. 3-4 и табл. 2-4 и 6. Абсолютная высота

⁶ Числа в скобках — номера ледников на рис. 3 и в табл. 3.

верхнего предела распространения гляциальных морфологических комплексов этого СВУК составляет 1720 м, а нижнего 1500 м.

Оледенение 7-го СВУК, вероятно, было самым длительным с формированием поверхности выравнивания в верхней покровной части на высотах 1760–1500 м. Морфоскульптуры этого оледенения на территории исследований занимают самые большие площади распространения.

Возраст основных структур ГМК, соответствовал второй фазе сарганского оледенения (11–10 тыс. лет назад) и относится к седьмому среднестатистическому высотному уровню.

Карово-троговые гляциально-морфологические комплексы шестого СВУК

К морфоскульптурам шестого СВУК относятся 13 ГМК: Верхнелевобезымянский (80), Верхнекаменский (79), Верхнепускковой (47), Верхнеподкомарнинский (77), Зимний (75–76), Короткий (73–74), Восточный (69–70), Озера Сердца (64–65), 3-го Гольца (61–62), Висячий (59), Северный (54), Северо-Восточный (51), Северо-Западный (37–38). Возрастные рамки развития и морфометрические параметры ГМК приведены на рис. 3-4 и табл. 2-4 и 6. Абсолютная высота верхнего предела распространения гляциальных морфологических комплексов этого СВУК составляет 1900 м, а нижний 1810 м.

Заключение

В этой первой статье мы рассмотрели основные элементы строения гляциального рельефа северной части хр. Хамар-Дабан в районе пика Черского Сюдянского района Иркутской области, выявленные во время полевого сезона 2024 года путем сравнения с аналогичными гляциальными морфологическими комплексами горного массива Мунку-Сардык, исследованию которых автором было посвящено более 20 лет. В последующих статьях на основе полевого сезона 2025 г. мы подробно остановимся на деталях геоморфологического строения описываемого района и приведем статистические данные по основным параметрам гляциальных форм.

Литература

Геологические памятники Байкала / сост. Г.В. Рязанов. Новосибирск: ВО Наука, Сибирская издательская фирма, 1993. 160 с.

Ивановский Л.Н. Особенности развития долин на южном побережье Байкала в антропогене // История развития речных долин и проблемы мелиорации земель. Сибирь и Дальний Восток. Новосибирск: Наука. 1979. С. 55–62.

Ивановский Л.Н. Значение селей в формировании отложений плейстоцена южного побережья Байкала // География и природные ресурсы. 1985. № 3. С. 35–42.

Ивановский Л.Н. Основные вопросы древнего оледенения Прибайкалья // География и природные ресурсы. 1993. № 3. С. 148–155.

Имбри Д., Имбри К.П. Тайны ледниковых эпох. Москва: Прогресс, 1988. 263 с.

Коваленко С.Н. Гляциальная геоморфология района г. Мунку-Сардык. Статья 1. Формы локального оледенения долин рек Мугувек и Белого Иркутка // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. гос. академии образования. 2011. № 1 (2). С. 38–62. Электрон. версия печат. публ. Режим доступа: <http://www.twirpx.org/file/701108/> (дата обращения: 11 марта 2025).

Коваленко С.Н. Гляциальная геоморфология района г. Мунку-Сардык. Статья 2. Формы локального оледенения долин рек Бугота, Буговек, Средний Иркут и Жохой // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. гос. академии образования. 2011а. № 2 (3). С. 48–59.

Коваленко С.Н. Гляциальная геоморфология района г. Мунку-Сардык. Статья 3. Статистический геоинформационный анализ форм локального оледенения // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. государственной академии образования. 2013. № 1-2 (7). С. 47–62. Электрон. версия печат. публ. Режим доступа: <http://www.twirpx.org/file/1691935/> (дата обращения: 11 марта 2025).

Коваленко С.Н. К возрасту рельефа в районе горы Мунку-Сардык (Восточный Саян) // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. государственной академии образования. 2014б. № 4 (11). С. 56–65. Электрон. версия печат. публ. Режим доступа: <http://www.twirpx.org/file/1691910/> (дата обращения: 11 марта 2025).

Коваленко С.Н. К уточнению параметров карово-трогового комплекса в районе горы Мунку-Сардык // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб.

государственной академии образования. 2014а. № 2–3 (10). С. 70–72. Электрон. версия печат. публ. Режим доступа: <http://www.twirpx.org/file/1691916/> (дата обращения: 11 марта 2025).

Коваленко С.Н. О границах и объемах современного оледенения района г. Мунку-Сардык (Восточный Саян) // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. государственной академии образования. 2014. № 1 (9). С. 19–31.

Коваленко С.Н. Орогенез в количественных параметрах гляциальной геоморфологии горного массива Мунку-Сардык // Рифтогенез, орогенез и сопутствующие процессы: материалы IV Всероссийского симп. с участием иностранных ученых, посвящ. 90-летию со дня рождения академика Н.А. Логачева. Иркутск, 14–15 октября 2019 г. Иркутск: Изд. ИЗК СО РАН, 2019. С. 75–77.

Коваленко С.Н. Некоторые особенности и геоморфологические признаки палеоледников и палеоснежников горного массива Мунку-Сардык // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 4. С. 182–196. DOI 10.26516/2541-9641.2023.4.182

Коваленко С.Н., Акулова Ю.В. Каменные глетчеры горного массива Мунку-Сардык // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 1. С. 135–153. DOI 10.26516/2541-9641.2022.1.135

Коваленко С.Н., Гергенов И.И. К вопросу об источниках рыхлого материала, причин и мест зарождения катастрофических селей в районе горного массива Мунку-Сардык // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 3. С. 120–132. DOI 10.26516/2541-9641.2022.3.120

Коваленко С.Н., Гергенов И.И. Опыт выделения современных и древних снежников горного массива Мунку-Сардык // Геология и окружающая среда. 2022а. Т. 2, № 3. С. 133–148. DOI 10.26516/2541-9641.2022.3.133

Коваленко С.Н., Гергенов И.И. Высокогорные формы рельефа горного массива Мунку-Сардык // Геология и окружающая среда. 2022б. Т. 2, № 4. С. 122–140. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.122

Коваленко С.Н., Найданов Н.Д., Бондаренко А.М., Тугарёв С.Д., Трубачева Е.А., Орлов Г.М., Богданова И.А. Геолого-геоморфологическая основа полевой учебной практики по геокартированию на Хамар-Дабане // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 3. С. 152–189. DOI 10.26516/2541-9641.2024.3.152

Макаров С.А. Сели Прибайкалья. Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2012. 111 с.

Максимов Е.В. Кары, как основной показатель динамики снеговой линии в горах // Докл. на ежегодных чтениях памяти Л.С. Берга. Т. 8 (14). Ленинград, 1968. С. 93–117.

Максимов Е.В. Новые данные о ритмичности природных процессов в горно-ледниковых районах // Докл. отд. и комис. Геогр. об-ва СССР. Ленинград, 1970. Т. 30, вып. 16. С. 119–130.

Максимов Е.В. О происхождении террас Мондинской котловины в Восточном Саяне // Изв. ВГО. 1965. Т. 97, вып. 4. С. 370–373.

Максимов Е.В. Проблемы оледенения Земли и ритмы в природе. Ленинград, 1972. 295 с.

Обручев В.А. Необычный стиль в Хамар-Дабане // Природа. 1934. № 9. С. 70–71.

Олюнин В.Н. Древнее оледенение Хамар-Дабана // География и геоморфология Азии. Москва: Наука, 1969. С. 174–191.

Олюнин В.Н. Неотектоника и оледенение Восточного Саяна. Москва: Наука, 1965. 126 с.

Олюнин В.Н. Основные особенности геоморфологического строения Хамар-Дабана и южного побережья Байкала // Записки Забайкальского отд. Географ. о-ва СССР. Чита, 1963. Вып. 22. С. 58–70.

Павловский Е.В. О четвертичном оледенении Южного Прибайкалья // Изд. АН СССР. Сер. геол. 1948. № 5. С. 156–160.

Селевый паводок в г. Слюдянке 20 июня 1960 г. Москва: изд-во АН СССР. 1963. 72 с.

Уфимцев Г.Ф. Морфотектоника Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1992. 216 с.

References

Geological monuments of Baikal / compiled by G.V. Ryazanov. G.V. Ryazanov. Novosibirsk: VO Nauka, Siberian Publishing Company, 1993. 160 p.

Ivanovsky L.N. Features of valley development on the southern coast of Baikal in the Anthropogeny // History of river valley development and problems of land reclamation. Siberia and the Far East. Novosibirsk: Nauka. 1979. P. 55–62.

Ivanovsky L.N. The importance of mudflows in the formation of Pleistocene sediments of the

southern coast of Baikal // *Geography and Natural Resources*. 1985. No. 3. С. 35–42.

Ivanovskiy L.N. Main questions of the ancient glaciation of the Baikal area // *Geography and Natural Resources*. 1993. No. 3. P. 148–155.

Imbri D., Imbri K.P. *Secrets of Glacial Epochs*. Moscow: Progress, 1988. 263 p.

Kovalenko S.N. Glacial geomorphology of the Munku-Sardyk area. Article 1. Forms of local glaciation of the valleys of the Muguvek and White Irkut rivers // *Bulletin of the Department of Geography, Vost.-Sib. State Academy of Education*. 2011. No. 1 (2). P. 38–62. Electronic version of the printed version. Access mode: <http://www.twirpx.org/file/701108/> (date of access: 11 March 2025).

Kovalenko S.N. Glacial geomorphology of the Munku-Sardyk area. Article 2. Forms of local glaciation of the valleys of the Bugota, Bugovek, Sredny Irkut and Zhokhoi rivers // *Bulletin of the Department of Geography, Vost.-Sib. State Academy of Education*. 2011a. No. 2 (3). P. 48–59.

Kovalenko S.N. Glacial geomorphology of the Munku-Sardyk area. Article 3. Statistical geoinformational analysis of the forms of local glaciation // *Bulletin of the Department of Geography, Vost.-Sib. State Academy of Education*. 2013. No. 1-2 (7). P. 47–62. Electron. version printed. publ. access mode: <http://www.twirpx.org/file/1691935/> (date of access: 11.03.2025).

Kovalenko S.N. To the age of relief in the area of Munku-Sardyk Mountain (Eastern Sayan) // *Bulletin of the Department of Geography of the Vost.-Sib. State Academy of Education*. 2014b. No. 4 (11). P. 56–65. Electron. version printed. publ. access mode: <http://www.twirpx.org/file/1691910/> (date of access: 11.03.2025).

Kovalenko S.N. To clarify the parameters of the cow-tree complex in the area of Mount Munku-Sardyk // *Bulletin of the Department of Geography of the Vost.-Sib. State Academy of Education*. 2014a. No. 2-3 (10). P. 70–72. Electronic version of printed publ. access mode: <http://www.twirpx.org/file/1691916/> (date of access: 11.03.2025).

Kovalenko S.N. On the boundaries and volumes of the modern glaciation of the Munku-Sardyk area (Eastern Sayan) // *Bulletin of the Department of Geography of the East Siberian State Academy of Education*. 2014. No. 1 (9). P. 19–31.

Kovalenko S.N. Orogeny in quantitative parameters of glacial geomorphology of the Munku-Sardyk mountain massif // *Riftogenesis, orogeny and related processes: Proceedings of the IV All-Russian Symp. with participation of foreign scientists, dedicated to the 90th anniversary of the birth of Academician*

N.A. Logachev. Irkutsk, 14-15 October 2019 Irkutsk: Izd. IZK SB RAS, 2019. P. 75–77.

Kovalenko S.N. Some peculiarities and geomorphological features of paleoglaciers and paleosnowfields of the Munku-Sardyk mountain massif // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 4. P. 182–196. DOI 10.26516/2541-9641.2023.4.182

Kovalenko S.N., Akulova Y.V. Stone glaciers of the Munku-Sardyk mountain massif // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 1. P. 135–153. DOI 10.26516/2541-9641.2022.1.135

Kovalenko S.N., Gergenov I.I. To the question about the sources of loose material, causes and places of origin of catastrophic mudflows in the area of the Munku-Sardyk mountain massif // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 3. P. 120–132. DOI 10.26516/2541-9641.2022.3.120

Kovalenko S.N., Gergenov I.I. Experience in the identification of modern and ancient snowfields of the Munku-Sardyk mountain massif // *Geology and Environment*. 2022a. Vol. 2, No. 3. P. 133–148. DOI 10.26516/2541-9641.2022.3.133

Kovalenko S.N., Gergenov I.I. High-altitude relief forms of the Munku-Sardyk mountain massif // *Geology and Environment*. 2022b. Vol. 2, No. 4. P. 122–140. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.122

Kovalenko S.N., Naidanov N.D., Bondarenko A.M., Tugarev S.D., Trubacheva E.A., Orlov G.M., Bogdanova I.A. Geological and geomorphological basis of field training practice on geomapping on Khamar-Daban // *Geology and Environment*. 2024. Vol. 4, No. 3. P. 152–189. DOI 10.26516/2541-9641.2024.3.152

Makarov S.A. *Selie Pribaikalya*. Irkutsk: Izd-vo In-ta geografiya im. V.B Sochava SB RAS, 2012. 111 p.

Maksimov E.V. Kary as the main indicator of snow line dynamics in the mountains // *Dokl. at the annual readings in memory of L.S. Berg*. Vol. 8 (14). Leningrad, 1968. P. 93–117.

Maksimov E.V. New data on the rhythmicity of natural processes in mountain-glacial areas // *Dokl. of the Department and Commiss. of the Geogr. Geogr. Society of the USSR*. Leningrad, 1970. Issue. 30, vol. 16. P. 119–130.

Maksimov E.V. On the origin of the Monda Basin terraces in the Eastern Sayan // *Izv. VGO*. 1965. Issue. 97, vol. 4. P. 370–373.

Maksimov E.V. *Problems of Earth glaciation and rhythms in nature*. Leningrad, 1972. 295 p.

Obruchev V.A. Unusual sil in Khamar-Daban // *Nature*. 1934. No. 9. P. 70–71.

Olyunin V.N. Ancient glaciation of Khamar-Daban // *Geography and Geomorphology of Asia*. Moscow: Nauka, 1969. P. 174–191.

Olyunin V.N. Neotectonics and glaciation of the Eastern Sayan. Moscow: Nauka, 1965. 126 p.

Olyunin V.N. Main features of the geomorphological structure of the Khamar-Daban and the southern coast of Baikal // Notes of the Transbaikalian Branch of the Geographical Society of the USSR. Chita, 1963. Issue. 22. P. 58–70.

Pavlovskiy E.V. About the Quaternary glaciation of the Southern Pribaikalia // Izd. of the USSR Academy of Sciences. Ser. Geol. 1948. No. 5. P. 156–160.

Mudflow in the town of Slyudyanka on 20 June 1960. Moscow: Izd vo AS USSR. 1963. 72 p.

Ufimtsev G.F. Morphotectonics of the Baikal rift zone. Novosibirsk: Nauka. Sib. department, 1992. 216 p.

Коваленко Сергей Николаевич,

кандидат геолого-минералогических наук,

664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет, геологический факультет,

доцент кафедры динамической геологии,

тел.: (3952)20-16-39,

email: igpug@mail.ru

Kovalenko Sergey Nikolaevich,

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,

664025, Irkutsk, Lenin st., 3,

Irkutsk State University, Faculty of Geology,

Associate Professor of the Department of Dynamic Geology,

tel.: (3952)20-16-39,

email: igpug@mail.ru

УЧЕНЫЕ-ПЕРВОПРОХОДЦЫ

УДК 55; 93

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2025.1.183>

EDN: [EJINBN](#)

Вклад Ленинградского горного института в развитие геологического образования и изучение геологии Сибири во время Великой Отечественной войны

С.В. Снопков^{1,2}

¹*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*

²*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

Аннотация. С началом Великой Отечественной войны ряд высших учебных западных и центральных областей Советского Союза были отправлены в эвакуацию. Ленинградский горный институт разместился в г. Черемхово Иркутской области. Педагоги ЛГИ не только организовали образовательный процесс в военное время, но и проводили поиски и разведку стратегических минеральных ресурсов в Сибири.

Ключевые слова: Ленинградский горный институт, эвакуация центральных ВУЗов в Сибирь, геологическое образование, геофизические исследования, Ботокольское графитовое месторождение

The Contribution of the Leningrad Mining Institute to the Development of Geological Education and the Study of the Geology of Siberia during the Great Patriotic War

S.V. Snopkov^{1,2}

¹*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

²*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

Abstract. With the outbreak of World War II, a number of higher education institutions in the western and central regions of the Soviet Union were evacuated. The Leningrad Mining Institute is located in Cheremkhovo, Irkutsk region. LGI teachers not only organized the educational process during the war, but also conducted searches and exploration of strategic mineral resources in Siberia.

Keywords: Leningrad Mining Institute, evacuation of central universities to Siberia, geological education, geophysical research, Botogol graphite deposit

Статья получена: 19.01.2025; исправлена: 22.01.2025; принята: 31.01.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Снопков С.В. Вклад Ленинградского горного института в развитие геологического образования и изучение геологии Сибири во время Великой Отечественной войны // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 1. С. 183-195. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.183. EDN: EJINBN

Article received: 19.01.2025; corrected: 22.01.2025; accepted: 31.01.2025.

FOR CITATION: Snopkov S.V. The contribution of the Leningrad mining institute to the development of geological education and the study of the geology of Siberia during the Great Patriotic war // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 183-195. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.183. EDN: EJINBN

Введение

В 2025 году исполняется 80 лет с дня Победы в Великой Отечественной войне. Победа была достигнута не только на поле боя, но и в тылу. В суровых военных условиях работали заводы и фабрики, обеспечивались транспортные потоки, добывались необходимые минеральные ресурсы.

О вкладе иркутских геологов в приближение Победы хорошо описано в ряде публикаций (Все для фронта..., 2011; Вузовская..., 2015; Иркутские..., 2009; Корольков, 2024; Снопков и др., 2024).

Большая заслуга в обеспечении сырьевой базы промышленности страны принадлежала ученым-геологам университета, горно-металлургического института и областного геологоуправления. В Сибири шли поиски золота, слюды, мрамора, редких металлов, графита, алмазов, радиоактивных руд. В апреле 1944 г. в Иркутске на 1-й областной геологической конференции были подведены итоги работы геологов во время войны и определены задачи изучения и использования минеральных богатств для промышленности и сельского хозяйства. Родина высоко оценила работу иркутских геологов: в 1944 г. 16 ведущих геологов области были награждены орденами и медалями (Все для фронта..., 2011, с. 67). В 1946 г. многим иркутским геологам, в том числе, ставшим позднее знаменитыми учеными Н.А. Флоренсову, М.М. Одинцову, Е.В. Павловскому, медали «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.» (Вузовская..., 2015).

Менее известна деятельность в военное время в Сибири геологов Ленинградского горного института, который находился в Иркутской области в эвакуации. В данной работе описана история деятельности горного института во время его нахождения в эвакуации в Сибири.

Эвакуация высших учебных заведений во время войны

В период с 1941 по 1944 годы были эвакуированы на восток страны многие вузы

СССР. Всего из районов, подвергшихся угрозе оккупации или захваченных немецкими войсками, было перевезено в Среднюю Азию, Сибирь и на Урал 147 институтов и университетов. Приоритет отдавался вузам технического профиля, способным быстро возобновить подготовку инженерных кадров для оборонной промышленности.

В 1930-х годах в стране занимались подготовкой геологов большинство университетов Советского Союза: Московский, Петербургский, Казанский, Киевский, Харьковский, Новороссийский (Одесса), Ташкентский, Иркутский и др. Кроме того, инженеров-геологов готовили технические ВУЗы: горные – Московский, Днепропетровский имени Артёма, Свердловский имени В. В. Вахрушева, Уральский, Иркутский; Казахский горно-металлургический, Томский технологический, Новочеркасский политехнический и др. институты. Наиболее старейшим центром подготовки горных инженеров с геологическим образованием (основанный в 1773 г.) являлся Ленинградский горный институт имени Г.В. Плеханова (ЛГИ). Из его стен вышли выдающиеся русские геологи: А.П. Карпинский (первый президент Академии наук СССР), Ф.Н. Чернышев, И.В. Мушкетов, Е.С. Федоров, В.А. Обручев, И.М. Губкин и др. (Большая..., 1947).

Многие из них во время войны вынуждены были эвакуироваться, но продолжали учебную деятельность и работу по поиску месторождений ценных полезных ископаемых. Так, например, один из ведущих геологических вузов страны – Московский геологоразведочный институт в 1941–1942 годах был эвакуирован в Семипалатинск, где в 1943–1945 гг. структурно входил в состав геологического факультета Московского государственного университета. А ведущий советский вуз по геологическому образованию – Ленинградский горный институт был в 1942 г. эвакуирован в Иркутскую область в г. Черемхово (Большая..., 1947).

Таким образом, в годы войны Иркутская область являлось наиболее крупным центром по подготовке инженеров-геологов – к двум

иркутским вузам, занимающихся геологическим образованием, присоединился ведущий геологический вуз – ЛГИ.

Ленинградский горный институт в эвакуации

В начале 1942 года ЛГИ был эвакуирован из блокадного Ленинграда сначала на Северный Кавказ, а затем в город Черемхово. Занятия студентов начались в ноябре 1942 года и продолжались до лета 1944 года (Иванов и др., 2004, с. 7–12).

Институт размещался в нескольких учреждениях Черемхова. Занятия велись в помещениях Черемховского горного техникума, который размещался в усадьбе купца I гильдии П.К. Щелкунова. Кроме того, занятия шли в школах № 1 и 3, в последней проводились вечерние курсы по подготовке лиц, окончивших девятилетку. Ряд административных служб института располагались в тресте «Востсибуголь».

Для того чтобы институт начал учебную и научную работу руководству необходимо было выполнить большую работу по комплектации ВУЗа педагогическими и научными кадрами; подготовке учебных помещений, студенческих общежитий и квартир для преподавателей; обеспечению учебного процесса необходимыми материалами и оборудованием; набору студентов и т. д. Это была сложная задача. Большую помощь и содействие Горному институту в этот период оказали Иркутский областной и Черемховский городской комитеты партии и руководство треста «Востсибуголь». Институт обращался с призывами о помощи в том, числе и к горожанам. Например, в черемховской районной газете было объявление о том, что институт срочно закупает у населения чертежные готвальни.

В Государственном музее политической истории России г. Санкт-Петербург хранится записка директора института одной из сотрудниц по поводу организации ремонта помещений для учебных занятий (Фонд документальных источников. № Ф.П-42093), которая показывает то, как шла подготовка работы к началу учебного процесса:

«Тов. Ермолаева с 5/XI – 42 г. в школе ФЗО надо начать самые интенсивные работы. С

т. Поповым договоритесь о максимальной помощи треста. У меня были тт. Федорин и прораб. Передайте мое распоряжение и контролируйте его:

1. К 8 часам 5/XI подать две лошади с возчиками к ФЗО.

2. Явиться на работу к ФЗО к 8 ч. Утра нашим штатным монтерам тт. Цварину и Шурику. Проинструктировать их, что им придется работать не только как монтерам, но и как слесарям.

3. Подобрать ещё двух мужчин из студентов, договориться об оплате их (написать наряд) и пусть они тоже явятся завтра к 8 утра к ФЗО (возьмите Шиловера и Боровкова).

4. Вам самим надо быть в ФЗО к 8 утра.»

Учебный процесс в институте был запущен уже в ноябре. Работало 5 факультетов: горный, горно-механический, маркшейдерский, геологоразведочный, металлургический, в рамках которых проходила подготовка по 13 специальностям. Геологоразведочный факультет готовил инженеров по 4 специальностям:

- геолого-съёмочная поисковая – подготовка «специалистов по изучению геологии нашей страны и поискам в ней месторождений полезных ископаемых»;

- геолого-разведочная – подготовка «специалистов разведчиков, занимающихся детальной разведкой как вновь открытых месторождений, так и уточнением условий залегания рудных тел на действующих предприятиях»;

- геофизические методы разведки – подготовка «специалистов по применению геофизики при проведении разведочных работ»;

- инженерная геология и гидрогеология – изучение «подземных вод, имеющих крупнейшее значение в народном хозяйстве, ...охватывает вопросы водоснабжения, изучения грунтов при возведении сооружений, тоннелей и пр.» (Из объявления о наборе студентов).

В объявлении указывалось: «Изучение недр нашего Союза – такова увлекательная задача горных инженеров, оканчивающих одну из специальностей геолого-разведочного факультета».

Студентам преподавали такие известные ученые как: **Михаил Михайлович Тетяев** (геолог-тектонист, доктор геолого-минералогических наук, профессор) (рис. 1, 2); **Юрий Аполлонович Жемчужников** (специалист в области геологии и петрографии угля, доктор геолого-минералогических наук, профессор, будущий член-корреспондент АН СССР) (рис. 3); **Семён Васильевич Кумпан** (профессор, специалист по методике разведочного дела угля и горючих сланцев); **Николай Александрович Елисеев** (петрограф, доктор геолого-минералогических наук, профессор, будущий член-корреспондент АН СССР) (рис. 4); **Владимир Степанович Соболев** (петролог, доктор геолого-минералогических наук, профессор, будущий академик АН СССР) (рис. 5); **Леонид Яковлевич Нестеров** (ученый-геофизик, один из создателей отечественной школы разведочной геофизики, доктор геолого-минералогических наук, профессор) (рис. 6) и др.



Рис. 2. Д.В. Наливкин (слева) и М.М. Тетяев (справа) во время подготовки 17-й сессии Международного геологического конгресса в 1937 г. (Фото из свободного доступа в сети интернет).

Fig. 2. D.V. Nalivkin (left) and M.M. Tetyaev (right) during the preparation of the 17th session of the International Geological Congress in 1937 (Photo from free Internet access).



Рис. 1. Михаил Михайлович Тетяев, заведующий кафедрой общей геологии и декан геологоразведочного факультета ЛГИ. (Фото из свободного доступа в сети интернет).

Fig. 1. Mikhail Mikhailovich Tetyaev, Head of the Department of General Geology and Dean of the Geological Exploration Faculty of Leningrad Mining Institute. (Photo from free Internet access)



Рис. 3. Юрий Аполлонович Жемчужников, профессор ЛГИ. (Фото из свободного доступа в сети интернет).

Fig. 3. Yuri Apollonovich Zhemchuzhnikov, Professor of Leningrad Mining Institute. (Photo from free Internet access)



Рис. 4. Николай Александрович Елисеев, заведующий кафедры петрографии ЛГИ в 1945–1947 гг. (Фото из свободного доступа в сети интернет).

Fig. 4. Nikolai Alexandrovich Eliseev, Head of the Petrography Department of Leningrad Mining Institute in 1945–1947 (Photo from free Internet access).



Рис. 5. Владимир Степанович Соболев, профессор ЛГИ (Фото из свободного доступа в сети интернет).

Fig. 5. Vladimir Stepanovich Sobolev, Professor of Leningrad Mining Institute (Photo from free Internet access)



Рис. 6. Леонид Яковлевич Нестеров, заведующий кафедрой геофизических методов разведки ЛГИ (Фото из свободного доступа в сети интернет).

Fig. 6. Leonid Yakovlevich Nesterov, Head of the Leningrad Mining Institute Department of Geophysical Exploration Methods (Photo from free Internet access).

Единицы советских вузов имели в своем составе такое количество выдающихся ученых. Без преувеличения можно утверждать, что студенты, учившиеся во время войны в г. Черемхово, получали геологическое образование высочайшего уровня.

Начать учебный процесс в эвакуации оказалось непросто, в том числе, сложности возникли с набором студентов, который продолжался ещё несколько месяцев после начала занятий. Например, в газете «Черемховский рабочий» было объявление о том, что «ЛГИ продолжает прием студентов на 1 курс. Начало занятий 8 февраля 1943 г.» Производился также прием студентов из других вузов на обучение на 2, 3, 4 и 5 курсы всех специальностей.

В Российской национальной библиотеке (г. Санкт-Петербург) сохранилось объявление о наборе студентов на 1944 год (шифр документа П $\frac{Лз-330л/24}{5-1}$) (рис. 7).



Рис. 7. Объявление о наборе студентов Ленинградским горным институтом.

Fig. 7. Announcement of the recruitment of students by the Leningrad Mining Institute.

Этот документ раскрывает условия работы вуза. В объявлении указывается, что «Ленинградский Горный Институт, отметивший 1 ноября 1943 г. свой 170-летний юбилей, является старейшим высшим техническим учебным заведением в СССР и во всем мире» объявляет прием на все курсы и специальности:

«1) В Институт принимаются, лица в возрасте от 17 до 35 лет, имеющие законченное среднее образование.

2) Без вступительных экзаменов принимаются лица, имеющие аттестаты об окончании десятилетки (училища, техникума) в 1943 и 1944 гг. с отметками «отлично».

3) Все принятые в Институт студенты бронируются от призыва по мобилизации на все время обучения в Институте.

4) Все студенты обеспечиваются стипендией. Размер стипендии на горном, горно-механическом, металлургическом и маркшейдерском факультетах установлен от 315 до 500 р., а на остальных специальностях от 210 до 400 рублей в месяц.

5) Все студенты обеспечиваются продовольственным и промтоварным снабжением по нормам промышленных рабочих и дополнительным питанием сверх установленных норм (трехразовое питание в столовой Института).

6) Иногородние студенты обеспечиваются общежитием.

7) Все студенты освобождаются от платы за обучение и за общежитие.

8) Предприятиям и учреждениям разрешается принимать на работу студентов на 4–6 часовой рабочий день; можно совмещать работу и учебу.

9) Студенты обеспечиваются чертежными принадлежностями и учебниками.

10) Бывшие студенты других ВУЗов восстанавливаются в правах студентов и принимаются в Институт на соответствующие курсы.

11) Принятые в Институт получают уведомление-вызов на занятия, дающее возможность уволиться с работы и получить разрешение на проезд по железной дороге, на основании постановления Государственного Комитета Обороны от 4 июля 1943 г.

12) Прием заявлений в Институт с 20 июня. Приемные экзамены — с 1 сентября. Начало занятий—с 1 октября.

13) Заявления с приложением аттестата об окончании средней школы и автобиографии направлять по адресу: г. Черемхово, Иркутской области, Ленинградский Горный Институт. Приемная комиссия.»

Научная работа института

За два года пребывания института в г. Черемхово его сотрудники занимались не только учебным процессом, но провели большой цикл научных работ.

П.И. Городецкий – начальник научно-исследовательского сектора ЛГИ, в статье газеты «Восточно-Сибирская правда» писал: «Находясь в городе Черемхово, в центре

угольной промышленности Иркутской области, коллектив профессоров и преподавателей института направил свою научную деятельность на оказание помощи производству и на проблемы более полного использования естественных богатств нашей Советской Родины.

Научные исследования института за период пребывания в Черемхово охватили широкий круг геологических изысканий. Оказана техническая помощь шахтам и горнорудным предприятиям востока страны.

Наибольший объем работ был выполнен для Черемховского угольного бассейна. В 1943 г. для Черембасса было закончено 8 научно-исследовательских работ; в 1944 г. из 46 разрабатываемых тем 21 относится непосредственно к Черемховскому бассейну. Восемь из них также закончены и переданы тресту «Востсибуголь», Наркомату угольной промышленности и другим учреждениям для внедрения на производство. Научные работники института принимали активное участие в технических конференциях, организованных трестом «Востсибуголь» и в совещании по вопросам рационального использования углей Иркутского бассейна, созванном по инициативе Всесоюзной комиссии по запасам полезных ископаемых...

Задачей Горного института является успешное завершение ведущихся научных тем и внедрение уже законченных. Выполнение этой задачи – дело чести нашего орденоносного института» (Городецкий, 1944).

Институт решал не только научные задачи, но и производственные. Например, В июне 1944 года Черемховский городской комитет партии дал институту задание — добыть 1000 тонн угля. В течение 10 дней бригады из сотрудников института работали на шахте Храмцовского месторождения и выполнили задание.

В научных и производственных изысканиях активно участвовали и геологи ЛГИ. Так, например, специалист в области геологии и петрографии углей Ю.А. Жемчужников провёл комплексное изучение угленосных толщ Иркутского угольного бассейна.

Выдающийся петролог В.С. Соболев в 1941–1943 годах был консультантом Сибирского геологического управления, и

участвовал в изучении Ботогольского графитового месторождения. Благодаря его вкладу в изучении горных пород и руд месторождения был решен вопрос о генезисе оруденения (Выдающийся..., 1978; Снопков и др., 2024).

Один из основателей советской разведочной геофизики Л.Я. Нестеров занимался разработкой методики геофизических поисков и разведки медно-никелевых и медно-колчеданных месторождений. В 1943 г. под его научным руководством проводились геофизические исследования на Гутайском месторождении молибденита (село Гутай, среднее течение реки Чикой, Красночикойский район, Забайкалье). Его труды «Методика геофизических работ при поисках и разведке линз колчеданов» и «Методика поисково-разведочных геофизических работ на медно-никелевых сульфидных месторождениях» были защищены Нестеровым в 1944 г. как докторская диссертация. В 1943–1944 гг. он консультировал геофизические работы Восточно-Сибирского геологического управления по поискам редких металлов и треста «Востсибгеолнеруд» — по поискам и разведкам слюды; руководил геофизическими работами на Ботогольском месторождении графита (Научная..., 1961).

Геофизические исследования ЛГИ на Ботогольском графитовом месторождении

Одним из направлений научно-производственной деятельности ЛГИ в Сибири стало внедрение в практику геологоразведочных работ геофизических методов исследований. Разведочная геофизика в тот период являлась молодой отраслью геологоразведки, быстро завоевывающая популярность. Л.Я. Нестеров так охарактеризовал появление нового геологического инструмента: *«Страна наша настолько экономически и технически выросла, что может дать геологу, в дополнение к имеющимся у него молотку, компасу, кайлу, буровому станку, микроскопу, ещё ряд точных приборов для того, чтобы он ещё быстрее мог найти, ввести в эксплуатацию и ускорить добычу разнообразнейших полезных ископаемых, необходимых для дальнейшего развития строительства и обороны страны. А геолог, в свою очередь, понял, что*

без введения в обиход новых приёмов исследования, ускоряющих его работу и удешевляющих её, он не сможет выполнить требований промышленности по подготовке для неё твёрдой сырьевой базы» (Научная..., 1961).

Наиболее ярким примером эффективности нового геологического метода стало проведение геофизических работ сотрудниками и студентами ЛГИ на Ботогольском графитовом месторождении. Эти работы стали одним из первых применением геофизических методов в Сибири.

Изучением Ботогольского графитового месторождения занимался Государственный Восточно-Сибирский геологоразведочный трест нерудных ископаемых «Сибгеолнеруд». В начале войны Ботогольский рудник находился в состоянии близкому к полному истощению разведанных залежей графита, и решение вопроса о дальнейшей судьбе месторождения было первостепенной задачей, так как графит был стратегическим сырьем для оборонной промышленности. В протоколе партсобрании треста от 14 января 1942 г. указывалось, что: «*Вся экономика страны подчиняется интересам фронта ... Украинские месторождения графита временно вышли из строя, поэтому мы должны в этом году подготовить большие запасы по Ботогольскому месторождению*» (ГАНИЮ. Ф. 2177. Оп. 1. Д. 1).

Приказом Народного Комиссариата промышленности строительных материалов СССР за № 1-44/с тресту «Сибгеолнеруд» было предписано сформировать геологоразведочную партию и начать изучение месторождения. В трехлетнем проекте работ (утвержденном 25 мая 1942 года) указывалось, что неясность промышленных перспектив, в первую очередь, связаны с недостаточной изученностью месторождения (особенно его структуры и генезиса). Работа по решению этих сложнейших задач была выполнена в 1942–1943 гг. группой талантливых геологов и ученых Н.А. Флоренсовым, В.С. Соболевым, В.П. Солоненко (Снопков и др., 2024).

Кроме топографических, геологосъемочных, разведочных и гидрогеологических работ, в проект были включены геофизические исследования. Летом 1943 года на

месторождении работал геофизический отряд ЛГИ, который был состоял из трех студентов: начальника отряда – студента 4 курса Н.И. Шувал-Сергеева, операторов – студента 3 курса Ю.Н. Сытина и студентки 2 курса Т.Н. Сироткиной. Научное руководство геофизических работ осуществлял профессор Л.Я. Нестеров (Флоренсов и др., 1943).

Главным итогом работ Ботогольской экспедиции 1942 г. стала разработка Н.А. Флоренсовым основных поисковых критериев графитовых залежей. Далее, опираясь на эти критерии, нужно было осуществить поиски рудных тел. Единственным способом выполнить эту задачи (без геофизики) были трудоемкие и затратные горные работы (проходка шурфов и канав, бурение неглубоких скважин). Без преувеличения можно утверждать, что применение геофизических методов спасло ситуацию и позволило в сроки выполнить задание государства.

Основной целью проводимых геофизических работ являлся поиск новых графитовых тел на участках, определенных геологами как перспективные. Геофизики ЛГИ на тот момент не имели опыта изучения графитовых месторождений. В 1939–1941 гг. Сибгеолнерудом на месторождение уже проводились опытные электроразведочные работы методами симметричного электропрофилирования, срединного градиента и заряда, но заметного эффекта в поиске рудных тел они не дали. Причиной этого было, с одной стороны, не определенность перспектив территорий, с другой – неправильно выбранная методика проведения работ (Флоренсов и др. 1943, с. 577; Глазов, 1951, с. 21). Геофизическому отряду необходимо было одновременно с проведением производственных работ выполнять опытно-методические исследования и корректировать методику геофизических измерений. И это все легло на плечи трех студентов (!).

Выполняемый отрядом ЛГИ комплекс включал следующие геофизические методы (Флоренсов и др. 1943, с. 576-577):

- магниторазведка – метод измерения индукции земного магнитного поля, с помощью которого предполагалось выявить контакты сиенитов и известняков, как одного из

рудоконтролирующего фактора; измерение магнитной индукции выполнялось магнитными Z-весами (Z-магнитометром) (рис. 8);

- электроразведка методом естественного поля (ЕП) – метод измеряющего разность потенциалов электрического поля, возникающего за счет физико-химических процессов на поверхности объектов с электронной проводимостью (графитовых залежей); большую роль в образовании электрических окислительно-восстановительных потенциалов играет уровень грунтовых вод, который на участке был изучен слабо;

- электрическое профилирование на постоянном токе (ЭП) – метод измерения удельного электрического сопротивления горных пород, нацеленный на выявление и оконтуривание высокопроводящих графитовых тел (рис. 9).



Рис. 8. Выполнение измерений магнитной индукции с помощью Z-магнитометра. (Фото из свободного доступа в сети интернет).

Fig. 8. Performing magnetic induction measurements using a Z-magnetometer. (Photo from free Internet access).



Рис. 9. Выполнение измерений методами сопротивлений. (Фото из свободного доступа в сети интернет).

Fig. 9. Performing measurements by resistance methods. (Photo from free Internet access).

Выбранный комплекс методов и методика их выполнения учитывали опыт электроразведочных работ треста «Сибгеолнеруд». Сеть 30x10 м была признана недостаточно детальной, так как пропускала крупные тела до 3000 тонн (Глазов, 1951, с. 21). Кроме того, применяемые электроразведочные методы (срединного градиента и заряда) в условиях

Ботогольского гольца были подвержены влиянию сильных помех.

Предложенный Л.Я. Нестеровым комплекс геофизических методов работал следующим образом. Сначала на участке проводились измерения методом ЕП способом потенциала по сети 5x10 м. Аномалии ЕП грубо выявляли места скопления графитового оруденения (Глазов, 1951, с. 26).

Затем на аномальных участках проводилось двухразное несимметричное профилирование по сети 2x5 м. Разнос приемной установки – MN был выбран 2 м. Разнос АО, который определял глубинность исследований, составлял 5 и 7 м (Глазов, 1951, с. 26). Применение ЭП в модификации несимметричного профилирования позволяла, с одной стороны, снизить погрешности измерения за счет некачественного заземления электродов, с другой – повысить уровень сигнала за счет близкого расположения к измерительной установке одного из питающих электродов. Двухразные измерения позволяли не только более детально выявлять положение проводящего тела, но и определять направление его падения.

Предпосылками применения ЭП являлось низкое удельное электрическое сопротивление руд по сравнению со свойствами горных пород: сиенит – $1,7 \cdot 10^7$ Ом*м; известняки – $2,5 \cdot 10^7$ Ом*м; наносы – $50\text{--}5 \cdot 10^7$ Ом*м; графитизированный сиенит – $0,5\text{--}3 \cdot 10^4$ Ом*м; графитовая руда – $3\text{--}7$ Ом*м (Глазов, 1951, с. 21).

Магниторазведка проводилась по отдельным профилям, расположенным в зоне контакта сиенитов и известняков.

В ходе полевых исследований 1943 года предусматривались следующие объемы работ: магниторазведка – 1000 изм.; метод ЕП – 8000 изм., метод ЭП – 3500 изм. Электроразведочными измерениями была покрыта площадь 3 км².

Главным достижением работ 1943 г. стало выявление электроразведкой более 20 аномалий низкого сопротивления, часть из которых в том же году была заверена горно-буровыми работами. В результате были открыты новые графитовые залежи: шток «Большой» (8000 тонн); 2-й южный (1800 тонн); Юго-восточный (1300 тонн); Ильинская залежь (8000 тонн); Гнездо № 2 (400 тонн); 2-й юго-западный (40000 тонн) (Глазов, 1951, с. 25). Это было самое значительное открытие графитовых тел за один полевой сезон за всю историю изучения месторождения (рис. 10)!

Магниторазведка не дала ожидаемого эффекта: намагниченность сиенитов оказалась

низкой и поэтому их контакт с известняками в магнитном поле проявлялся крайне слабо.

Летом 1944 г. геофизическое изучение месторождения геофизиками ЛГИ было продолжено. Электроразведочные работы под руководством инженера Нестеровой проводилась в восточной и западной части гольца на площади 0.4 км².

Опираясь на опыт предшествующих работ, была скорректирована методика электроразведочных измерений. Поиск графитовых залежей проводился методом ЕП (способом потенциала) по сети 20x20 м. Затем выполнялась детализация границ обнаруженных залежей с помощью двухразного несимметричного профилирования по сети 10x2 или 10x5 м (Глазов, 1951, с. 27–28). На изучаемых территориях было обнаружено несколько незначительных аномалий, связанных с небольшими рудными телами.

Кроме того, в полевой сезон 1944 г. впервые на месторождении были проведены вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ). Максимальный разнос питающих электродов зондирования достигал 100 м. Работы проводились в районе одной из открытых залежей – «Большой шток», с целью проследить графитовое тело (мощностью 3 м), вскрытое одной из скважин на глубине 13 м. Все полученные кривые ВЭЗ оказались однотипными – двухслойными (вверху породы с высоким сопротивлением, внизу – с низким). В отчете указывалось, что «*правильной расшифровки кривых дать не удалось*» (Глазов, 1951, с. 28).

В полевой сезон 1945 г. геофизические работы были продолжены уже геофизиками «Сибгеолнеруд». Электроразведочные исследования, под руководством инженера-геофизика Иванова А.И., были проведены на площади 0.123 км². С помощью несимметричного электропрофилирования выполнялась детализация аномалий естественного поля, полученных в 1943–44 гг., по сети 10x5 м (Глазов, 1951, с. 29).

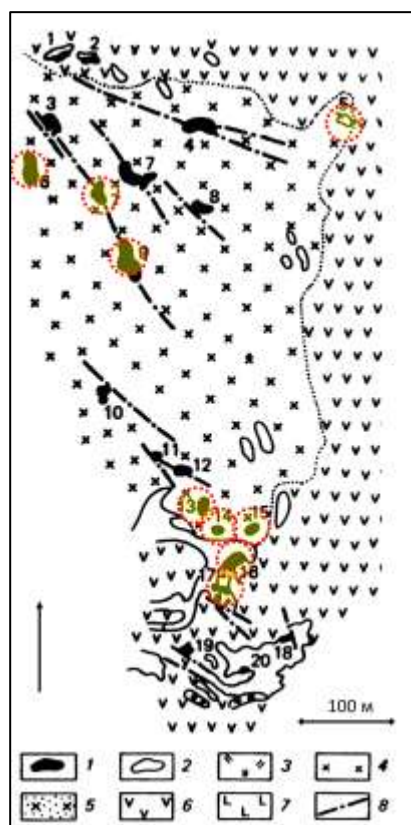


Рис. 10. Схема размещения графитовых залежей Ботогольского месторождения (по Р.В. Лобзовой, 1975). 1 – графитовые залежи (1 – Верхняя; 2 – Северная, 3 – Петровская, 4 – Корнельевский шток, 5 – Аномалия № 4, 6 – Аномалия № 18–19, 7 – Юго-западная, 8 – Некрасовский шток, 9 – Аномалия № 17, 10 – Пермикинский шток, 11 – шток Новый, 12 – Алиберовский шток, 13 – Большой шток, 14 – Второй южный шток, 15 – Юго-восточный шток, 16 – Ильинская, 17 – Жила, 18 – Клемешевский шток, 19 – Южный шток, 20 – гнездо Шарик); 2 – ксенолиты известняков; 3 – скарновые породы; 4 – лейкократовые нефелиновые сиениты; 5 – нефелиновые сиениты; 6 – пироксеновые сиениты; 7 – апокарбонатные фениты; 8 – разрывные нарушения. Красным пунктирным контуром отмечены залежи, открытые при заверке геофизических аномалий.

Fig. 10. The layout of graphite deposits of the Botogolskoye deposit (according to R.V. Lobzova, 1975). 1 – graphite deposits (1 – Verkhnyaya; 2 – Severnaya; 3 – Petrovskaya; 4 – Kornelevsky stock; 5 – Anomaly No. 4; 6 – Anomaly No. 18–19; 7 – South-Zapadnaya; 8 – Nekrasovsky stock; 9 – Anomaly No. 17; 10 – Permikinsky stock; 11 – Novy stock, 12 – Aliberovsky stock, 13 – Bolshoy stock, 14 – The Second Southern stock, 15 – The Southeastern stock, 16 – Ilyinskaya, 17 – Vein, 18 – Klemeshevsky stock, 19 – Southern stock, 20 – Sharik nest); 2 – limestone xenoliths; 3 – skarnov rocks; 4 – leukocratic nepheline syenites; 5 –

nepheline syenites; 6 – pyroxene syenites; 7 – apocarbonate phenites; 8 – discontinuous faults. The red dotted contour marks the deposits discovered during the verification of geophysical anomalies.

Заключение

27 января 1944 года блокада Ленинграда была снята, и Горный институт начал процесс эвакуации. Первая партия студентов и преподавателей была отправлена из Черемхово в Ленинград 11 июля 1944 года. Процесс возвращения института в Ленинград растянулся до начала 1945 г.

В 1944 году Указом Президиума Верховного Совета СССР Ленинградский горный институт за выдающиеся заслуги в области подготовки в годы войны кадров для геологии, горного дела и металлургии, и развитие науки был награждён Орденом Ленина. Орденами и медалями за трудовые подвиги были награждены многие преподаватели института, в том числе геологоразведочного факультета. За выдающиеся заслуги в области подготовки инженерных кадров для горной промышленности Орденами Трудового Красного Знамени в июне 1944 года был награжден декан факультета М.М. Тетяев и заведующий кафедрой геофизических методов разведки Л.Я. Нестеров. Медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.» был награжден В.А. Соболев.

Ученые-геологи Ленинградского горного института, выполняющие во время войны геологические исследования в Сибири, внесли большой вклад в создание минерально-сырьевой базы нашей страны. Одним из важных достижений ленинградских ученых стало их участие в изучении Ботогольского графитового месторождения, на котором не только были открыты новые рудные залежи, но и опробован и внедрен новый инструмент геологических исследований – разведочная геофизика.

Литература

Большая Советская энциклопедия. Союз Советских Социалистических республик. М.: ОГИЗ, 1947.

Всё для фронта, всё для победы! Сборник документов из фондов ГАНИИО. Иркутск: Оттиск, 2011. 512 с.

Вузовская наука в годы Великой Отечественной войны: Иркутский государственный университет. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2015. 100 с.

Выдающийся ученый и педагог // За науку в Сибири. 1978. № 21 (25 мая). С. 55–70.

Глазов Ю.Н. Ботокольское месторождение графита в Окинском аймаке БМАССР. Отчет о геологоразведочных работах в 1950 г. Том 3. Иркутск: 1951. Рукопись.

Городецкий П.И. Ленинградские ученые в Черемхово // Восточно-Сибирская правда. 23 декабря 1944 г.

Иванов С.Л., Козырук А.Е., Кулешов А.А., Семенов М.А. Горно-электромеханический факультет Санкт-петербургского горного института // Записки горного института. Т. 157. СПб: 2004. С. 7–12.

Иркутские геологи в Великой Отечественной войне / Сост. В.В. Андреев и др. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2009. 180 с.

Корольков А.Т. Роль геологов Иркутского государственного университета в открытии Якутской алмазонасной провинции // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 4. С. 58–66.

Лобзова Р.В. Графит и щелочные породы Ботокольского массива. М.: Наука, 1975.

Научная деятельность Леонида Яковлевича Нестерова (1903–1959). / Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В. Плеханова. т. XXXIX, вып. 2. Л.: 1961. С. 3–6.

Снопков С.В., Хобта А.В., Богданова И.А., Швалева Н.И. Вклад геологов ИГУ в изучение Ботокольского графитового месторождения (Восточные Саяны) // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, №. 4. С. 37–57.

Флоренсов Н.А., Соболев В.С., Блинные И.И., Солоненко В.П. Ботокольское месторождение графита. Отчет за 1943 г. (НКПСМ. Восточно-Сибирский геологоразведочный трест нерудных ископаемых «Сибгеолнеруд»). Геологоразведочная экспедиция № 2. Иркутск: 1943. Рукопись.

References

The Great Soviet Encyclopedia. The Union of Soviet Socialist Republics, Moscow: OGIZ Publ., 1947.

Everything for the front, everything for victory! Collection of documents from the funds of the GANIO. Irkutsk: Ottisk Publ., 2011. 512 p.

University science during the Great Patriotic War: Irkutsk State University. Irkutsk: IGU Publishing House, 2015. 100 p.

An outstanding scientist and teacher // For science in Siberia. 1978. No. 21 (May 25). P. 55–70.

Glazov Yu.N. Botogol graphite deposit in the Okinsky aimag of the BMASSR. Report on geological exploration in 1950 Volume 3. Irkutsk: 1951. The manuscript.

Gorodetsky P.I. Leningrad scientists in Chermkhovo // East Siberian truth. December 23, 1944.

Ivanov S.L., Kozyaruk A.E., Kuleshov A.A., Semenov M.A. Mining and Electromechanical Faculty of St. Petersburg Mining Institute. // Notes of the Mining Institute. Vol. 157. St. Petersburg: 2004. P. 7–12.

Irkutsk geologists in the Great Patriotic War. /Comp. V.V. Andreev et al. Irkutsk: Publishing House of IGU, 2009. 180 p.

Korolkov A.T. The role of geologists of Irkutsk State University in the discovery of the Yakutsk diamond province // Geology and the environment. [Electronic edition] 2024. Vol. 4, No. 4. P. 58–66.

Lobzova R.V. Graphite and alkaline rocks of the Botogol Massif, Moscow: Nauka Publ., 1975.

Scientific activity of Leonid Yakovlevich Nesterov (1903–1959) / Notes of the Leningrad Order of Lenin and the Red Banner of Labor of the Plekhanov Mining Institute. vol. XXXIX, issue 2. L.: 1961. P. 3–6.

Snopkov S.V., Hobta A.V., Bogdanova I.A., Shvaleva N.I. Contribution of IGU geologists to the study of the Botogol graphite deposit (Eastern Sayans) // Geology and the environment. 2024. Vol. 4, No. 4, pp. 37–57.

Florensov N.A., Sobolev V.S., Blinnikov I.I., Solonenko V.P. Botogolskoye graphite deposit. Report for 1943 (NKPSM. East Siberian Geological Exploration Trust for non-metallic minerals "Sibgeolnerud". Geological exploration expedition No. 2. Irkutsk: 1943. The manuscript.

Снопков Сергей Викторович,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,

664003, Россия, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,

Иркутский государственный университет,

доцент,

664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 91,

Сибирская школа геонаук Иркутский национальный исследовательский технический университет,

научный сотрудник,

email: snopkov_serg@mail.ru.

Snopkov Sergey Viktorovich,

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor,

Karl Marx st., 1, Irkutsk, 664003, Russia,

Irkutsk State University,

Associate Professor,

91 Lermontov st., Irkutsk, 664033, Russia,

Siberian School of Geosciences Irkutsk National Research Technical University,

Researcher,

email: snopkov_serg@mail.ru.

УДК 550.42(51)

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2025.1.196>

EDN: [FFPCUQ](#)

От изобретения нового микрофона к фундаментальным разработкам в радиоизотопной геологии: человек науки Сергей Борисович Брандт (к 110-летию со дня его рождения)

С.В. Рассказов^{1,2}

¹*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия*

²*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*

Аннотация. 25 мая 2025 г. исполняется 110 лет со дня рождения человека науки С.Б. Брандта. Он как физик–практик внес изобретением нового микрофона большой вклад в победу нашей страны в Великой Отечественной войне и в послевоенной время организовал радиоизотопные исследования в Восточной Сибири. В статье представлены работы, которые он проводил в Институте земной коры СО РАН в 1996–2010 гг.

Ключевые слова: физика, радиоизотопная геология, радиогенные изотопы, ⁴⁰Ar, Сибирь

From New Microphone Invention to Fundamental Developments in Radiogenic Isotope Geology: Man of Science Sergei Borisovich Brandt (to the 110th Anniversary of His Birth)

S.V. Rasskazov^{1,2}

¹*Institute of Earth Crust SB RAS, Irkutsk, Russia*

²*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

Abstract. May 25, 2025 marks the 110th anniversary of the birth of the scientist S.B. Brandt. As a practical physicist, he made a great contribution to our country's victory in the Great Patriotic War by inventing a new microphone and, in the post-war period, organized radioisotope research in Eastern Siberia. The paper presents the work he performed at the Institute of the Earth's Crust SB RAS in 1996–2010.

Keywords: physics, radiogenic isotope geology, radiogenic isotopes, ⁴⁰Ar, Siberia

Если вы в состоянии измерить и выразить то, о чем вы говорите, в числах, то вы кое-что об этом знаете; но, если вы не можете измерить это и выразить в числах, ваши знания скудны и неудовлетворительны.

Лорд Кельвин

Статья получена: 10.10.2024; исправлена: 12.11.2024; принята: 14.03.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рассказов С.В. От изобретения нового микрофона к фундаментальным разработкам в радиоизотопной геологии: человек науки Сергей Борисович Брандт (к 110-летию со дня его рождения) // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 1. С. 196-216. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.196. EDN: FFPCUQ

Article received: 10.10.2025; corrected: 12.11.2024; accepted: 14.03.2025.

FOR CITATION: Rasskazov S.V. From New Microphone Invention to Fundamental Developments in Radiogenic Isotope Geology: Man of Science Sergei Borisovich Brandt (to the 110th Anniversary of His Birth) // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 196-216. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.196. EDN: FFPCUQ

Введение

Новые направления в науке часто рождаются на стыке разных дисциплин. Физики Пьер Кюри и Эрнест Резерфорд впервые осознали возможность использования радиоактивных часов в геологии в 1902–1904 гг. Физик Сергей Борисович Брандт пришел в радиоизотопную геологию в послевоенные годы как теоретик и практик – организатор изотопно-геохимических исследований. Сначала, в 1955–1964 гг., С.Б. организовал изотопные исследования в Институте физики Дагестанского филиала АН СССР в Махачкале, затем, в 1964–1972 гг., – в Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения АН СССР в Иркутске с рекомендацией председателя Комиссии по определению абсолютного возраста геологических формаций при ОНЗ АН СССР, академика Д.И. Щербакова от 28 сентября 1963 г. В 1972 г. он перешел в другую научную организацию Иркутска – Институт земной коры Сибирского отделения АН СССР, в которой организовал лабораторию изотопии и геохронологии и 16 лет руководил работами этой лаборатории.

С.Б. много внимания уделял исследованиям К–Аг-изотопной системы и ее применению в геохронологии. Одно из его главных научных достижений – разработка теоретических проблем в области диффузии аргона в кристаллических структурах. В 1950-х годах для измерений радиогенного аргона С.Б. разработал метод изотопного разбавления на двухканальной конструкции масс-спектрометра, явившейся прообразом современной многоканальной масс-спектрометрической аппаратуры. В 1960–1970 гг. он оснастил лабораторию оборудованием и подготовил высококвалифицированные кадры. Под его руководством развивались К–Аг, Rb–Sr и Pb–Pb методы радиоизотопного датирования. На базе устаревших приборов он со своими учениками сконструировал масс-спектрометр для измерения изотопного состава кислорода и углерода в водах и карбонатах, а также установку для определения дейтерия в природной воде и кристаллизационной воде

минералов. Он определил возраст трубки «Удачная» по приконтактовой вторичной минерализации Rb–Sr-изохронным методом, выстроил изотопную систематику Sr–Pb–O–C кимберлитов, а также систематику $\delta^2\text{H}$ (δD) в серпентинах кимберлитов и слюдяных месторождений Сибири, определил низкое $\delta^2\text{H}$ (δD) в гидрокристаллах, впервые доказал с использованием радиоизотопных методов архейский возраст гранулитов Алданского и Анабарского щитов, разработал теорию фракционирования изотопов в системе Вандер-Ваальса.

На волне перестройки СССР, в 1988 г., все аналитические подразделения института были объединены в лабораторию физических методов исследования. Позже С.Б. оценивал эту реорганизацию в институте как большую ошибку. В одном подразделении оказались рутинные методы анализа горных пород и тонкие изотопные методы, требующие разработки нестандартных подходов и решений с глубоким знанием теоретической физики. Все время пребывания в этой объединенной аналитической структуре он считал потерянным для себя.

Положение С.Б. изменилось в 1996 г., когда статус лаборатории изотопии и геохронологии был восстановлен. В состав возрожденной лаборатории вошли физики, химики и геологи, объединенные общей работой по новейшему вулканизму Земли с использованием методов радиоизотопной геологии. С самого начала нашего объединения в лабораторию в июле 1996 г. я взял себе за правило, приходить к С.Б. каждый день в 10 часов утра, чтобы делиться с ним назревшими вопросами и получать от него уроки мудрости. В нашем неформальном общении для меня постепенно открывались подробности не только радиоизотопной геологии, но и его житейских удач и неудач, его личного участия в событиях, которые переживала наша страна. Здесь мне хотелось бы передать мое личное отношение к человеку науки Сергею Борисовичу Брандту, вспомнить его таким, каким я его воспринимал долгое время, каким помню сейчас (рис. 1). Мы прошли вместе с ним трудные испытания конца 1990-х и 2000-

х гг., но именно этот период оказался самым плодотворным и для С.Б., и для меня.



Рис. 1. Сергей Борисович Брандт в 2008 г., в возрасте 93 лет.

Fig. 1. Sergei Borisovich Brandt in 2008, at the age of 93.

25 мая 2025 г. исполняется 110 лет со дня рождения С.Б. Брандта. Он внес большой вклад в победу нашей страны в Великой Отечественной войне своим изобретением нового микрофона, который использовался в войсках. Позже он сменил инженерную работу на научные фундаментальные исследования изотопов для решения геологических задач и фактически организовал систематическое изучение изотопов геологических объектов в Восточной Сибири. Цель статьи – показать работы С.Б., которые он проводил в Институте земной коры СО РАН в 1996–2010 гг.

Первый важный шаг: соединение данных экспериментов с теорией диффузии радиогенных изотопов

С образованием лаборатории изотопии и геохронологии ИЗК СО РАН началось комплексное детальное геологическое и изотопно-геохимическое изучение

кайнозойских вулканических пород Азии, Африки и Северной Америки. В 1996 г. в рамках совместных работ с американскими коллегами я провел измерения возраста базальтов бассейна р. Джиды Байкальской рифтовой системы (БРС) методом $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ со ступенчатым нагревом в Рестонском федеральном центре Геологической службы США. Сергей Борисович приступил к работе во вновь созданной лаборатории изотопии и геохронологии ИЗК СО РАН вместе со своим сыном Иваном Сергеевичем (рис. 2). Они датировали часть образцов территории Джидинского Забайкалья К–Аг методом с использованием масс-спектрометра МИ-1201 по оригинальной методике с параллельным измерением масс аргона-40 и аргона-36. По вулканическим породам одного из ключевых районов БРС были получены первые радиоизотопные датировки в рестонской и иркутской лабораториях с точной воспроизводимостью результатов.



Рис. 2. Сергей Борисович Брандт и его сын Иван Сергеевич за работой.

Fig. 2. Sergei Borisovich Brandt and his son Ivan Sergeevich at work.

Иван Сергеевич был главной движущей силой в измерениях радиогенного аргона. Он рассчитал оптимальный режим тренировки пробы исходя из разной кинетики выделения радиогенного аргона, прочно связанного в кристаллической структуре, и слабо связанного воздушного аргона (рис. 3). Чтобы подготовить пробу к измерению, нужно было удалить воздушный аргон из пробы. Он проводил ее термическую тренировку в высоком вакууме в течение нескольких дней. Иван Сергеевич включал форвакуумный насос и садился за стол, на котором у него были заготовлены листы ватмана. Большими буквами и цифрами он писал черным маркером математические формулы. С.Б. говорил: «Ванюшка в школе увлекся математикой». Он закончил аспирантуру в МГУ и защитил диссертацию кандидата физ.-мат. наук по математическому конструированию сложных поверхностей. Часто на компьютере он моделировал какую-нибудь поверхность удивительной конфигурации. Плавку пробы делал сам С.Б. Наступал самый трогательный момент – рассчитывалась концентрация радиогенного аргона и возраст образца. В наступившем хаосе середины 1990-х гг. сотрудникам ИЗК платили только 25 % заработной платы. Выживали за счет дачных участков. С.Б. и И.С. боялись больше всего, если в

институте отключат электричество и измерения нужно будет остановить. Этого не случилось.

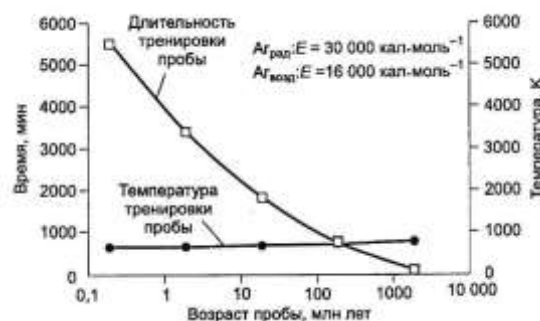


Рис. 3. Время и температура термической тренировки пробы, при которых содержание атмосферного аргона ($Ar_{\text{возд}}$), первоначально равное 1 нмм^3 , снижается до величины, равной радиогенному.

Fig. 3. Time and temperature of thermal treatment of a sample, at which the content of atmospheric argon, originally equal to 1 нмм^3 , decreases to that of radiogenic argon.

Геологическая интерпретация полученных данных по вулканическим породам Джидинского Забайкалья была представлена нами в статье 1996 г., опубликованной в журнале «Геология и геофизика». Впервые был сделан вывод об угасании вулканизма на Джидинском и Витимском вулканических полях центральной части БРС около 600 тыс. лет назад и о продолжении вулканизма до

голоцена включительно на ее окончаниях – на хр. Удокан СВ части и на полях Восточных Саян и Центральной Монголии ЮВ части. Этот вывод не опровергался последующими работами, влившимися в основной поток геологии по датированию вулканических пород БРС, которые, в сущности, уже не несли новой геологической интерпретации, а лишь повторяли вывод, сделанный в работе 1996 г.

Между тем, в 1996 г. в лаборатории США были получены таблицы выделения порций изотопов аргона при ступенчатом нагреве от начальной температуры 400 °С до конечной температуры 1600 °С с полным плавлением материала в реакторе. Таблицы полученных данных были восприняты С.Б. Брандтом с огромным интересом и послужили в качестве фактического материала для расчета кинетики экспериментального выхода газа в терминах уравнений Фика и Аррениуса в случае проявления минимума в аргоновом спектре, который соответствует геологическому возрасту породы. Результаты формальной обработки данных были опубликованы в 1996 г. в журнале «Isotopes in Environmental and Health Studies». Так было положено начало нашим многочисленным совместным работам, в которых постановка геологической задачи и ее решение с использованием К–Аг-изотопной системы соединялась с теоретическими работами по диффузии радиогенного аргона в породах и минералах.

**Второй важный шаг:
приобретение масс-спектрометра
Finnigan MAT-262**

В 1990-х гг. исследования изотопов в горных породах и минералах в институтах СО РАН проводились на масс-спектрометрах,

производившихся в Сумах, на Украине, хотя в центральных институтах РАН уже были установлены масс-спектрометры западного образца. В ноябре 1996 г. Немецкий банк выделил кредит Академии наук России на приобретение научного оборудования в Германии. С.Б. предложил приобрести масс-спектрометр. Я убедил директора ИЗК Н.А. Логачева в необходимости этой покупки. 21 ноября мы с С.Б. позвонили в головной офис фирмы Финниган, находившийся в Бремене (Германия), с переговорного пункта Академгородка Иркутска. С.Б. общался с менеджером фирмы около получаса на немецком языке, выясняя необходимые элементы спецификаций. Когда все детали прояснились, менеджер с германского конца провода спросил: «Вы немец?». Совершенное знание немецкого языка С.Б. удивило его носителя. Утром следующего дня мы получили факс из московского представительства фирмы Technika с калькуляцией стоимости 1 193 790 немецких марок.

Денег у одного Института земной коры было явно недостаточно, но прибор был нужен именно в рабочей конфигурации. После переговоров Н.А. Логачева с председателем Бурятского научного центра И.В. Гордиенко и руководством Института геохимии было решено объединить средства трех институтов для общей покупки масс-спектрометра и его совместного использования. Об этом решении было заявлено в комиссию по оборудованию Сибирского отделения РАН. Затем было несколько ценовых итераций. Поскольку одновременно приобреталось много оборудования, переговоры с фирмой способствовали скидкам. В окончательной согласованной версии покупки 20 марта 1997 г. фигурировала цена 785 000 немецких марок (рис. 4).

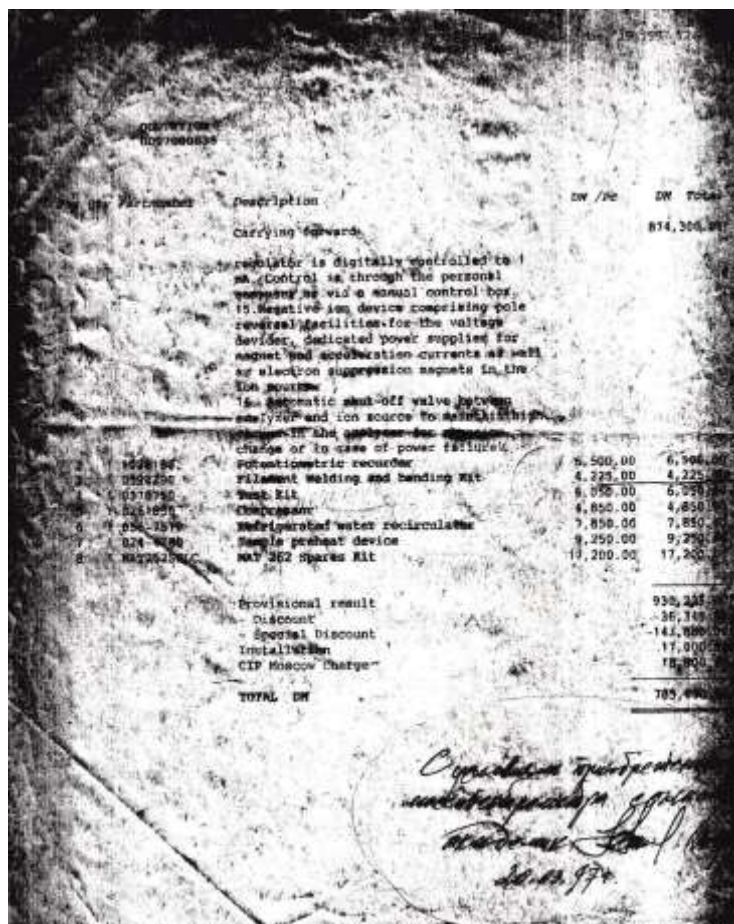


Рис. 4. Факс согласования покупки масс-спектрометра Finnigan-MAT 262 для Аналитического ЦКП Иркутского научного центра (базовая организация ИЗК СО РАН).

Fig. 4. Fax of approval for the purchase of a Finnigan-MAT 262 mass spectrometer for the Analytical Collective Use Center of the Irkutsk Scientific Center (basic institution is the Institute of the Earth's crust).

Более 2-х лет у нас с С.Б. ушло на оборудование помещений для установки масс-спектрометра с соблюдением всех технических требований. Были подготовлены чистые комнаты для подготовки проб к изотопному анализу. 1 июля 1999 г. прибор был запущен в эксплуатацию инженером фирмы Textronika М.В. Муравьевым. Это был первый базовый прибор Аналитического ЦКП в Иркутском научном центре. Мной было разработано Положение о Центре коллективного пользования масс-спектрометром Finnigan – MAT 262, введенное в действие 24 января 2000 г. подписями директоров трех институтов. Качественное обслуживание прибора и прецизионные измерения на нем обеспечивались опытными масс-спектрометристами – учеником С.Б. снс, кандидатом геол.-мин. наук Николаем Николаевичем Фефеловым, инженером Института геохимии Юрием Александровичем Пахольченко и инженером Геологического института Бурятского

научного центра Виктором Федоровичем Посоховым. Ежегодно в приборную комиссию Сибирского отделения РАН подавались подробные отчеты о результатах деятельности ЦКП с указанием опубликованных работ и финансируемых грантов.

С.Б. Брандт навсегда остался физиком

Мышление физика отличается от мышления геолога хотя бы тем, что физик стремится представить развитие любого процесса в виде математического выражения. С.Б. следил за успехами физики, был поклонником физика-теоретика Льва Ландау, часто его цитировал. В самом начале нашего общения он привел мне наблюдение Ландау, которое я воспроизвожу со слов С.Б. на рис. 5. Сотрудник имеет в науке перспективы, если у него острый ум и есть усидчивость (панель 1) или есть усидчивость, но он тупой (панель 2). Перспектив

нет, если у сотрудника острый ум, но нет усидчивости (панель 3) или, тем более, когда отсутствует и то, и другое (панель 4).



Рис. 5. Перспективные сотрудники в науке 1 и 2 и лишенные перспектив сотрудники 3 и 4 (по Л. Ландау).

Fig. 5. Promising employees in science 1 and 2 and employees without prospects 3 and 4 (according to L. Landau).

Однажды я, как обычно, зашел к С.Б. утром. Он сидел перед компьютером, несколько потерянный. Когда я спросил, что случилось, он ответил: «Ушел последний». Умер физик-теоретик Виталий Гинзбург.

Глубокий след войны

С.Б. рассказывал, как он встретил войну. В Ленинграде было ясное безмятежное утро, на Неве шла регата. Ощущение полного счастья. Вдруг все закончилось. Он не любил Ленинград и никогда не возвращался в этот город, потому что во время блокады у него умерли 14 родственников.

С.Б. работал во время войны главным инженером военного завода в Уфе. Время было суровое. И.В. Сталин работал по ночам. Если он звонил директору завода и того не было на месте, следовал оргвывод с его снятием.

После победы С.Б. направили в Берлин для демонтажа оборудования немецких заводов и транспортировки этого оборудования на Урал. В Берлине он серьезно заболел, неделю лежал и выжил чудом. Задание было выполнено. С.Б. показывал мне с гордостью грамоту, подписанную И.В. Сталиным. Он сказал: «Это – моя самая дорогая награда».

Подготовка лабораторных монографий

В связи с введением в исследование современного масс-спектрометра и отлаженными прецизионными измерениями изотопов Sr, Nd и Pb в лаборатории были поставлены методики измерения микроэлементов методом ICP-MS с использованием масс-спектрометра PQ2+, приобретенного Лимнологическим институтом СО РАН. Появилась необходимость обучения молодого персонала. С.Б. никогда не занимался преподавательской деятельностью, хотя выступал с

лекциями перед строителями БАМа. Я пошел преподавать на геологический факультет Иркутского госуниверситета в 2002 г. К этому времени в лаборатории изотопии и геохронологии уже появились разработки, сделанные по разным направлениям геологии на основе различных изотопных методов. Мне пришлось с нуля разрабатывать курс «Современные методы аналитических исследований в геологии» в активном режиме аналитических работ лаборатории.

Популярностью пользовался учебник по радиоизотопной геологии Гюнтера Фора в переводе на русский язык третьего издания в 1989 г., но это издание уже превратилось в раритет. Книга была слабо доступной. В 1997 г. была издана новая книга по радиоизотопной геологии на английском языке Алана Дикина, использование которой для студентов также было не возможным. В 2000 г. по федеральной целевой программе «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997–2000 годы» в лаборатории изотопии и геохронологии ИЗК была подготовлена монография «Геохронология и геодинамика позднего кайнозоя (Южная Сибирь – Южная и Восточная Азия)». В этой книги основная роль в датировании вулканических пород позднего кайнозоя отводилась калий-аргоновой изотопной системе в различных модификациях методов. Было выполнено теоретическое и экспериментальное обоснование применяемых методических подходов.

С моим подключением к преподавательской деятельности появилась необходимость в систематическом изложении основ радиоизотопной геологии в более широком контексте с использованием лабораторных наработок по геологическим объектам Сибири и других территорий. Было важно, чтобы эту дисциплину восприняли молодые научные

сотрудники и аспиранты лаборатории. С этой целью мы с С.Б. инициировали подготовку второй лабораторной монографии «Радиоизотопная геология в задачах и примерах». В едином книжном формате были представлены разделы «Основные модели, понятия и определения», «Радиоизотопная термохронология», «Радиоизотопная геохронология» и «Изотопно-геохимическая гетерогенность мантии и коры». В этой книге в полной мере был реализован опыт С.Б. в радиоизотопной геологии. В разделах книги были объединены наши наработки в теории диффузии радиогенного аргона и результаты изотопно-геохимических исследований, основанные на новых лабораторных данных, рассеянные в журнальных статьях.

При деятельном участии С.Б. были подготовлены менее значимые лабораторные монографии. Одна из них касалась систематического изложения материалов по позднекайнозойским вулканическим породам конкретной территории Восточной Тувы (Эволюция позднекайнозойского магматизма Восточной Тувы: выражение границы Тувино-Монгольского массива), другая – изложения материалов по изотопному составу рудных свинцов и разработки подходов к их интерпретационной модели на золотых месторождениях (Прогнозирование золотого оруденения на юге Восточной Сибири и Дальнего Востока: геологический и изотопно-геохимический аспекты).

Подготовка монографии в издательстве Шпрингер – главный итог жизни человека науки С.Б. Брандта

В 2007 г. я захватил с собой в Вену, на Генеральную ассамблею Европейского союза геофизических исследований, экземпляр лабораторной монографии 2025 г. «Радиоизотопная геология в задачах и примерах». Показал этот экземпляр Жилиан Фулджер. Она пообещала мне найти международное издательство, в котором можно опубликовать подобную книгу на английском языке. Такое издательство нашлось – Springer с центральным офисом в Нидерландах. После переписки с главным редактором издательства по геологическим наукам Петрой ван Стинберген, я встретился с ней на следующей Генеральной ассамблее Европейского союза геофизических исследований в 2008 г. Она меня попросила уточнить название новой монографии. После преодоления технических формальностей, мы втроем (Рассказов С.В., Брандт С.Б. и Брандт И.С.) 19 июня 2008 г. подписали соглашение с издательством Шпрингер о подготовке монографии «Radiogenic isotopes in geologic processes» в течение следующего года.

Работа была на подъеме (рис. 6). И.С. Брандт подготовил автореферат докторской диссертации. Он должен был выходить на защиту сразу после сдачи монографии в издательство Шпрингер.



Рис. 6. Мы с Сергеем Борисовичем Брандтом в его кабинете в 2008 г.

Fig. 6. Sergei Borisovich Brandt and me in his office in 2008.

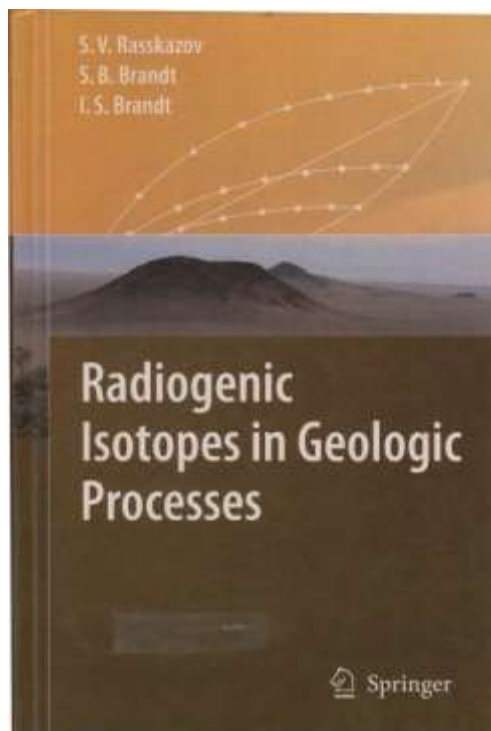


Рис. 7. Обложка книги «Радиогенные изотопы в геологических процессах», опубликованной в издательстве Шпрингер.

Fig. 7. Cover of the book “Radiogenic Isotopes in Geologic Processes”, published by Springer.

Случилось непредвиденное. Иван Сергеевич вдруг пожаловался на боль в животе. Я принес ему смекту, от которой ему стало хуже. Он никогда не обращался к врачам, но из-за болей вынужден был пойти. Выяснилось, что у него рак в последней стадии. Через неделю он ушел из жизни. С.Б. глубоко переживал смерть сына. У него опустились руки. Он уже не мог работать с текстом. Я каждый день докладывал С.Б. о том, как продвигается моя работа над шпрингеровской монографией. Он смотрел текст, одобрял его. К концу срока, отпущенного редакцией на подготовку по контракту, я смог подготовить лишь половину запланированной работы. Вынужден был написать о сложившейся ситуации в издательство и получил ответ: «Срок сдачи монографии можно отодвинуть настолько, насколько потребуется». Петра предложила поместить фотографию И.С. Брандта и короткую справку о нем на первой странице книги. Мы это сделали.

Для работы по аргоновой тематике в лабораторию пришел Сергей Сергеевич Брандт. Вместе с С.Б. он продолжил масс-спектрометрические измерения аргона. Я

работал над текстом. Каждый день С.Б. задавал мне один и тот же вопрос: «Когда будет закончена монография?». Наконец, весной 2010 г. монография была полностью готова и отправлена в издательство (рис. 7).

В начале мая 2010 г. я получил по почте 12 авторских экземпляров, сразу позвонил С.Б. домой и принес ему одну книгу. Он взял ее в руки, полистал и сказал: «Ради этого стоило жить». Через неделю его не стало. Он ушел, когда его миссия на Земле как человека науки была выполнена.

Список работ С.Б. Брандта, опубликованных в 1996–2010 гг.

Монография в международном издательстве Springer:

Rasskazov S.V., Brandt S.B., Brandt I.S. Radiogenic isotopes in geologic processes. Springer, 2010. 306 p.

Монографии в отечественных издательствах:

Рассказов С.В., Логачев Н.А., Брандт И.С., Брандт С.Б., Иванов А.В. Геохронология и

геодинамика позднего кайнозоя (Южная Сибирь – Южная и Восточная Азия). Новосибирск: Наука, 2000. 288 с. [Rasskazov S.V., Logatchev N.A., Brandt I.S., Brandt S.B., Ivanov A.V. Geochronology and geodynamics of the late Cenozoic (Southern Siberia – South and East Asia). Novosibirsk: Nauka, 2000. 288 p.]

Рассказов С.В., Брандт И.С., Брандт С.Б., Иванов А.В., Ясныгина Т.А., Демонтерова Е.И., Ильясова А.М. Радиоизотопная геология в задачах и примерах. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2005. 268 с. [Rasskazov S.V., Brandt I.S., Brandt S.B., Ivanov A.V., Yasnygina T.A., Demonterova E.I., Ilyasova A.M. Radiogenic isotope geology in problems and examples. Novosibirsk: Academic Publishing House "Geo", 2005. 268 p.]

Тверитинов Ю.И., Тверитинова Т.Ю., Брандт С.Б., Рассказов С.В., Брандт И.С. Прогнозирование золотого оруденения на юге Восточной Сибири и Дальнего Востока: геологический и изотопно-геохимический аспекты. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2006. 224 с. [Tveritinov Yu.I., Tveritina T.Yu., Brandt S.B., Rasskazov S.V., Brandt I.S. Forecasting gold mineralization in the south of Eastern Siberia and the Far East: geological and isotope-geochemical aspects. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS, 2006. 224 p.]

Рассказов С.В., Демонтерова Е.И., Иванов А.В., Брандт И.С., Брандт С.Б. Эволюция позднекайнозойского магматизма Восточной Тувы: выражение границы Тувино-Монгольского массива. Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2007. 161 с. [Rasskazov S.V., Demonterova E.I., Ivanov A.V., Brandt I.S., Brandt S.B. Evolution of late Cenozoic magmatism of Eastern Tuva: expression of the boundary of the Tuva-Mongolian massif. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS. 2007. 161 p.]

Статьи в журналах:

Рассказов С.В., Кунк М.Дж., Лур Дж.Ф., Бауринг С.А., Брандт И.С., Брандт С.Б., Иванов А.В. Эпизоды извержений и вариации состава четвертичных лав Байкальской рифтовой системы (Ar–Ar и K–Ar датирование вулканизма бассейна Джиды) // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 6. С. 3–15. [Rasskazov S.V., Kunk M.J., Luhr J.F., Bowring

S.A., Brandt I.S., Brandt S.B., Ivanov A.V. Eruption episodes and variations in the composition of Quaternary lavas of the Baikal rift system (Ar–Ar and K–Ar dating of volcanism in the Dzhida basin) // Geology and Geophysics. 1996. Vol. 37. No. 6. P. 3–15.]

Brandt S.B., Rasskazov S.V., Brandt I.S., Ivanov A.V., Kunk M.J. The inverse problem of argon diffusion from minerals: determination of kinetic parameters from stepwise-heating experiments // Isotopes Environ. Health Stud. 1997. V. 33, N 4. P. 399–409.

Рассказов С.В., Иванов А.В., Брандт И.С., Брандт С.Б. Миграция позднекайнозойского вулканизма Удоканского поля в структурах Байкальской и Олекмо-Становой систем // Доклады академии наук. 1998. Т. 360, № 3. С. 378–382. [Rasskazov S.V., Ivanov A.V., Brandt I.S., Brandt S.B. Migration of Late Cenozoic volcanism of the Udokan field in the structures of the Baikal and Olekma-Stanovoy systems // Doklady of Earth Sciences. 1998. Vol. 360, No. 3. P. 378–382.]

Rasskazov S.V., Logatchev N.A., Brandt I.S., Brandt S.B., Ivanov A.V., Misharina V.A., Chernyaeva G.P. Uplift of the Baikal rift system and change of vegetation in its flanks as inferred from variations of spores, pollen, and diatoms in sediments // Terra Nostra, 2000 (9). P. 148–163.

Иванов А.В., Рассказов С.В., Брандт С.Б., Брандт И.С., Пунзалан Л.Е., Бовен А.А. Хронология позднепалеозойских и мезозойских событий на хребте Удокан: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование первичных и наложенных минералов интрузивных пород // Геология и геофизика, 2000, № 5. С. 686–695. [Ivanov A.V., Rasskazov S.V., Brandt S.B., Brandt I.S., Punzalan L.E., Boven A.A. Chronology of Late Paleozoic and Mesozoic Events on the Udokan Ridge: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating of Primary and Superimposed Minerals of Intrusive Rocks // Geology and Geophysics, 2000, No. 5. Pp. 686–695.]

Рассказов С.В., Логачев Н.А., Брандт И.С., Брандт С.Б., Иванов А.В., Демонтерова Е.И., Смагунова М.А. Импульсная миграция четвертичного вулканизма Восточнотувинского поля // Доклады академии наук. 2000. Т. 373, № 5. С. 655–659. [Rasskazov S.V., Logatchev N.A., Brandt I.S., Brandt S.B., Ivanov A.V., Demonterova E.I., Smagunova M.A. Pulse Migration of Quaternary Volcanism of the East

Tuva Field // *Doklady of Earth Sciences*. 2000. Vol. 373, No. 5. P. 655–659.]

Рассказов С.В., Логачев Н.А., Иванов А.В., Бовен А.А., Масловская М.Н., Саранина Е.В., Брандт И.С., Брандт С.Б. Магматический эпизод Западного рифта 19–17 млн лет назад в контексте начала рифтогенеза Восточной Африки // *Доклады академии наук*. 2001. Т. 281, № 6. С. 230–233. [Rasskazov S.V., Logatchev N.A., Ivanov A.V., Boven A.A., Maslovskaya M.N., Saranina E.V., Brandt I.S., Brandt S.B. Magmatic episode of the Western Rift 19–17 Ma in the context of the onset of rifting in East Africa // *Doklady of Earth Sciences*. 2001. Vol. 281, No. 6. P. 230–233.]

Рассказов С.В., Логачев Н.А., Иванов А.В., Мишарина В.А., Черняева Г.П., Брандт И.С., Брандт С.Б., Скобло В.М., Лямина Н.А. Палинологический и диатомовый анализ осадков из позднекайнозойской долины Праамалата (Западное Забайкалье) // *Геология и геофизика*, 2001. Т. 42, № 5. С. 773–785. [Rasskazov S.V., Logatchev N.A., Ivanov A.V., Misharina V.A., Chernyaeva G.P., Brandt I.S., Brandt S.B., Skoblo V.M., Lyamina N.A. (2001). Palynological and diatom analyses of sediments from the Late Cenozoic Amalat Valley (Western Transbaikalia) // *Geology and Geophysics*. Vol. 42, No. 5. P. 773–785.]

Брандт И.С., Рассказов С.В., Иванов А.В., Брандт С.Б. Влияние распределения радиогенного аргона внутри минерала на определение диффузионных параметров // *Геохимия*, 2002, № 1. С. 63–69. [Brandt I.S., Rasskazov S.V., Ivanov A.V., Brandt S.B. Influence of the distribution of radiogenic argon inside a mineral on the determination of diffusion parameters // *Geochemistry*. 2002. No. 1. P. 63–69.]

Логачев Н.А., Брандт И.С., Рассказов С.В., Иванов А.В., Брандт С.Б., Конев А.А., Ильясова А.М. Определение К–Аг-возраста палеоценовой коры выветривания Прибайкалья // *Доклады академии наук*, 2002. Т. 385, N 6. С. 797–799. [Logatchev N.A., Brandt I.S., Rasskazov S.V., Ivanov A.V., Brandt S.B., Konev A.A., Ilyasova A.M. Determination of the K–Ar age of the Paleocene weathering crust of the Baikal region // *Doklady of Earth Sciences*. 2002. Vol. 385, No. 6. P. 797–799.]

Рассказов С.В., Саранина Е.В., Логачев Н.А., Иванов А.В., Демонтерова Е.И., Масловская М.Н., Брандт С.Б. Мантийная аномалия DUPAL Тувино-Монгольского массива и ее палеогеодинамическое значение // *Доклады академии наук*. 2002. Т. 382, N 1. С. 110–114. [Rasskazov S.V., Saranina E.V., Logatchev N.A., Ivanov A.V., Demonterova E.I., Maslovskaya M.N., Brandt S.B. Mantle anomaly DUPAL of the Tuva-Mongolian massif and its paleogeodynamic significance // *Doklady of Earth Sciences*. 2002. Vol. 382, No. 1. P. 110–114.]

Брандт И.С., Рассказов С.В., Брандт С.Б., Иванов А.В. Thermal-field propagation in an exocontact zone of a magmatic body and its impact on radiogenic isotope concentrations in minerals // *Isotopes Environ. Health Stud*. 2002. Vol. 38, No. 1. P. 47–58.

Иванов А.В., Рассказов С.В., Масловская М.Н., Демонтерова Е.И., Брандт И.С., Брандт С.Б., Саранина Е.В., Маркова М.Е., Кошков Ю.В., Пипич А.В. Раннеюрский возраст и средне-позднеюрское тектоническое экспонирование гранитоидов фундамента Амуро-Зейской впадины: Rb–Sr и К–Аг-изотопные данные // *Тихоокеанская геология*. 2003. Т. 22, № 4. С. 83–92. [Ivanov A.V., Rasskazov S.V., Maslovskaya M.N., Demonterova E.I., Brandt I.S., Brandt S.B., Saranina E.V., Markova M.E., Koshkov Yu.V., Pipich A.V. Early Jurassic age and Middle-Late Jurassic tectonic exposure of the Amur-Zeya Depression basement granitoids: Rb–Sr and K–Ar isotope data // *Pacific Geology*. 2003. Vol. 22, No. 4. P. 83–92.]

Рассказов С.В., Логачев Н.А., Иванов А.В., Бовен А.А., Масловская М.Н., Саранина Е.В., Брандт И.С., Брандт С.Б. Магматический эпизод Западного рифта Восточной Африки 19–17 млн лет назад // *Геология и геофизика*, 2003. Т. 44, № 4. С. 317–324. [Rasskazov S.V., Logatchev N.A., Ivanov A.V., Boven A.A., Maslovskaya M.N., Saranina E.V., Brandt I.S., Brandt S.B. Magmatic episode of the West Rift of East Africa 19–17 million years ago // *Geology and Geophysics*, 2003. Vol. 44, No. 4. P. 317–324.]

Рассказов С.В., Приходько В.С., Саранина Е.В., Брандт И.С., Брандт С.Б., Масловская

М.Н., Ясныгина Т.А., Семенова В.Г., Травин А.В. Пространственно-временные вариации мантийных и коровых компонентов в позднекайнозойских вулканических породах Средне-Амурской впадины, Юго-Восток России // Тихоокеанская геология. 2003. Т. 22, № 3. С. 3–27. [Rasskazov S.V., Prikhodko V.S., Saranina E.V., Brandt I.S., Brandt S.B., Maslovskaya M.N., Yasnygina T.A., Semenova V.G., Travin A.V. Spatial-temporal variations of mantle and crustal components in Late Cenozoic volcanic rocks of the Middle Amur Basin, South-East of Russia // Pacific Geology. 2003, vol. 22, no. 3, pp. 3–27.]

Рассказов С.В., Саранина Е.В., Мартынов Ю.А., Чащин А.А., Максимов С.О., Брандт И.С., Брандт С.Б., Масловская М.Н., Коваленко С.В., 2003. Развитие позднекайнозойского магматизма активной континентальной окраины Южного Приморья // Тихоокеанская геология. 2003. № 1. С. 92–109. [Rasskazov S.V., Saranina E.V., Martynov Yu.A., Chashchin A.A., Maksimov S.O., Brandt I.S., Brandt S.B., Maslovskaya M.N., Kovalenko S.V. Evolution of Late Cenozoic magmatism in the active continental margin of Southern Primorye. Pacific Geology. (1): 92–109.]

Brandt S.B., Brandt I.S., Rasskazov S.V., Ivanov A.V. Formal considerations on argon–argon diagrams in $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronometry // Wissenschaftliche Mitteilungen Institut für Geologie. 2003. В. 24. Р. 19–26.

Ivanov A.V., Boven A.A., Brandt S.B., Brandt I.S., Rasskazov S.V. Achievements and limitations of the K–Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ methods: What's in it for dating the Quaternary sedimentary deposits // Berliner paläobiologische abhandlungen. В. 4. 2003. Р. 65–75.

Rasskazov S.V., Luhr J.F., Bowring S.A., Ivanov A.V., Brandt I.S., Brandt S.B., Demontorova E.I., Boven A.A., Kunk M., Housh T. & Dungan M.A. Late Cenozoic volcanism in the Baikal Rift system: evidence for formation of the Baikal and Khubsugul basins due to thermal impacts on the lithosphere and collision-derived tectonic stress // Berliner paläobiologische abhandlungen. 2003. В. 4. Р. 33–48.

Брандт С.Б., Рассказов С.В., Брандт И.С., Иванов А.В. Формальное исследование изохронных построений в $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -геохронометрии // Геохимия. 2004. № 8. С. 835–842.

[Brandt S.B., Rasskazov S.V., Brandt I.S., Ivanov A.V. Formal consideration of isochron constructions in $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronometry // Geochemistry. 2004. No. 8. P. 835–842.]

Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Саранина Е.В., Масловская М.Н., Фефелов Н.Н., Брандт С.Б., Брандт И.С., Коваленко С.В., Мартынов Ю.А., Попов В.К. Средне-позднекайнозойский магматизм континентальной окраины Япономорского бассейна: импульсное плавление мантии и коры Юго-Западного Приморья // Тихоокеанская геология. 2004. Т. 23, № 6. С. 3–31. [Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Saranina E.V., Maslovskaya M.N., Fefilov N.N., Brandt S.B., Brandt I.S., Kovalenko S.V., Martynov Yu.A., Popov V.K. Middle-Late Cenozoic magmatism of the continental margin of the Sea of Japan basin: pulsed melting of the mantle and crust of Southwestern Primorye // Pacific Geology. 2004. Vol. 23, No. 6. Pp. 3–31.]

Rasskazov S.V., Bekhtur B., Ivanov A.V., Brandt I.S., Brandt S.B. Holocene volcanism in the Orkhon-Taryat area, Mongolia within the context of the Cenozoic volcanism evolution in Central and East Asia // Geophysics & Astronomy, N 2, 2004. P. 71–79.

Рассказов С.В., Мельников О.А., Рыбин А.В., Гурьянов В.А., Ясныгина Т.А., Брандт И.С., Брандт С.Б., Саранина Е.В., Масловская М.Н., Фефелов Н.Н., Жаров А.Э. Пространственная смена глубинных источников кайнозойских вулканических пород западного побережья Южного Сахалина // Тихоокеанская геология. 2005. Т. 24, № 2. С. 10–32. [Rasskazov S.V., Melnikov O.A., Rybin A.V., Guryanov V.A., Yasnygina T.A., Brandt I.S., Brandt S.B., Saranina E.V., Maslovskaya M.N., Fefelov N.N., Zharov A.E. Spatial change of deep sources for Cenozoic volcanic rocks on the western coast of South Sakhalin // Pacific Geology. 2005. Vol. 24, No. 2. P. 10–32.]

Рассказов С.В., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Саранина Е.В., Фефелов Н.Н., Брандт И.С., Брандт С.Б. Слэбовые и надслэбовые позднекайнозойские выплавки в зонах конвергентных границ Азии и Восточном Хангае, Центральная Монголия // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2008. № 1. С. 43–67. [Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Yasnygina T.A., Saranina E.V., Fefelov N.N., Brandt I.S.,

Brandt S.B. Late Cenozoic slab and supra-slab melts in the zones of convergent boundaries of Asia and the Eastern Hangay, Central Mongolia // Bulletin of Irkutsk State University. Earth Sciences Series. 2008. No. 1. P. 43–67.].

Брандт И.С., Рассказов С.В., Попов В.К., Брандт С.Б. Калиевая специфика базальтов Синеутесовской впадины: геохимические корреляции и проблемы калий–аргонового датирования (Южное Приморье) // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28, № 4. С. 75–89. [Brandt I.S., Rasskazov S.V., Popov V.K., Brandt S.B. Potassic specificity of basalts of the Sineutes Basin: geochemical correlations and problems of potassium–argon dating (Southern Primorye) // Pacific Geology. 2009. Vol. 28, No. 4. P. 75–89.].

Рассказов С.В., Брандт С.Б. Рудные свинцы Гарганского блока и южного края Сибирского кратона: параметры сопряженной модели Холмса–Хаутерманса и конкордии–дискордии // Известия Иркутского государственного университета. Серия наук о Земле. 2009. Т. 2, № 1. С. 127–143. [Rasskazov S.V., Brandt S.B. Ore Leads of the Gargan Block and the Southern Margin of the Siberian Craton: Parameters of the Coupled Holmes–Houtermans and Concordia–Discordia Models // Bulletin of Irkutsk State University. Earth Sciences Series. 2009. Vol. 2, No. 1. P. 127–143.].

Рассказов С.В., Приходько В.С., Ясныгина Т.А., Фефелов Н.Н., Саранина Е.В., Войнова И.П., Брандт С.Б. Мантийные источники кайнозойских вулканических пород района оз. Кизи (Восточный Сихотэ-Алинь) // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29, № 5. С. 94–121. [Rasskazov S.V., Prikhodko V.S., Yasnygina T.A., Fefelov N.N., Saranina E.V., Voinova I.P., Brandt S.B. Mantle Sources of Cenozoic Volcanic Rocks in the Lake Kizi Region (Eastern Sikhote-Alin) // Pacific Geology. 2010. Vol. 29, No. 5. P. 94–121.].

Чувашова И.С., Рассказов С.В., Брандт С.Б. Циклические вариации калия в позднекайнозойских лавах Центральной Монголии // Известия Иркутского государственного университета. Серия наук о Земле. 2010. Т. 3, № 1. С. 159–176. [Chuvashova I.S., Rasskazov S.V., Brandt S.B. Cyclic variations of potassium in late Cenozoic lavas of Central Mongolia //

Bulletin of Irkutsk State University. Earth Sciences Series. 2010. Vol. 3, No. 1. P. 159–176.].

Статьи в сборниках и материалах конференций, популярные статьи

Иванов А.В., Рассказов С.В., Брандт И.С., Брандт С.Б., Бовен А., Андре Л. Время извержений и источники магм Рунгве и Удокана Восточно-Африканской и Байкальской рифтовых систем // Закономерности эволюции земной коры. Т. II. Тезисы докл. Международной конференции. Санкт-Петербург: ИЗК СПиГУ, 1996. С. II-90.

Рассказов С. В., Иванов А.В., Брандт И.С., Брандт С.Б. Миграция позднекайнозойского вулканизма на северо-востоке Байкальской рифтовой системы и ее геодинамическое значение // Земная кора. Материалы научной сессии. Иркутск: ИЗК СО РАН, 1996. С. 122–124.

Рассказов С.В., Иванов А.В., Брандт И.С., Брандт С.Б., Ломыга В.П. Развитие магматизма при ослаблении рифтогенеза (Результаты детального изучения позднекайнозойского Береинского вулканического ареала на Витимском плоскогорье) // Земная кора – 1996. Материалы научной сессии. Иркутск: ИЗК СО РАН, 1996. С. 56–58.

Рассказов С.В., Логачев Н.А., Брандт И.С., Брандт С.Б., Иванов А.В. Эпизодичность четвертичного вулканизма Байкальской рифтовой системы в приложении к геодинамике юго-восточной части Евразийской плиты // Геодинамика и эволюция Земли. Мат-лы к научной конференции РФФИ. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1996. С. 93–95.

Brandt S., Rasskasow S., Brandt I., Iwanow A. Betrachtungen zur anspeicherung radiogenen argons in mineralen bei gleichzeitiger deffusion // Freiburger Isotopen Kolloquium 1996 Proceedings. Freiberg: Technische Universität Bergakademie, 1996. P. 35–46.

Rasskazov S.V., Ivanov A.V., Boven A., André L., Brandt I.S., Brandt S.B. Evolution of the Late Cenozoic Udokan magmatism in the structures of the Baikal and Olekma-Stanovaya mobile systems // Eds. N. Dobretsov, J. Klerkx, M. Buslov. Continental rift tectonics and evolution of

sedimentary basins. International workshop. Novosibirsk, 1996. P. 36–37.

Rasskazov S.V., Ivanov A.V., Brandt I.S., Brandt S.B., Misharina V.A. Palinology of sediments and K-Ar dating of basaltic lavas in the Baikal Rift System // 30th International Geological Congress Abstracts. V. 1. Beijing, China, 1996. P. 77.

Рассказов С.В., Логачев Н.А., Брандт И.С., Брандт С.Б., Иванов А.В. Вулканизм как показатель особенностей позднекайнозойского рифтогенеза в Байкальской и Периордосской рифтовых системах // Геологическая среда и сейсмический процесс. Материалы Всероссийской межрегиональной конференции. Иркутск, 1997. С. 31–33.

Брандт С.Б., Брандт И.С., Рассказов С.В., Иванов А.В. Применение теоретических моделей кинетики аргона для прецизионного K–Ar определения возраста // XV симпозиум по геохимии изотопов. М.: ГЕОХИ РАН, 1998.

Рассказов С.В., Брандт И.С., Брандт С.Б. Вулканическая квазипериодичность 0,4 и 0,1 млн. лет как показатель условий четвертичного рифтогенеза в Прибайкалье // Металлогения, нефтегазоносность и геодинамика Северо-Азиатского кратона и разновозрастных орогенных поясов его обрамления. Тезисы докладов. Иркутск, 1998.

Brandt S., Pissarsky B., Rasskazov S., Brandt I., Ivanov A. The $4\text{He}/40\text{Ar}$ ratio in groundwaters: model estimates of a virtual criterium of radioactive pollution // Uranium Mining and Hydrology. B. Merkel, C. Helling (Hrsg.). Proceedings of the International Conference and Workshop, Freiberg, 1998. P. 537–541.

Rasskazov S.V., Brandt I.S., Brandt S.B. 5, 0.4, and 0.1 My volcanic quasi-periods in southeastern Asia and their bearing on conditions of Late Cenozoic rifting in the Baikal region // Active tectonic continental basins. Abstracts. Gent, Belgium, 1998. P. 69.

Rasskazov S., Logatchev N.A., Brandt I., Brandt S. New data on the Quaternary volcanism and tectonics in the Tunka basin, the Baikal Rift System // Active tectonic continental basins. Abstracts. Gent, Belgium, 1998. P. 97.

Рассказов С.В., Брандт И.С., Брандт С.Б., Иванов А.В. Современное геодинамическое состояние юго-восточной части Евразийской плиты в свете временной

последовательности четвертичного вулканизма // Геохимия ландшафтов, палеоэкология человека и этногенез. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1999. С. 53–56.

Ivanov A.V., Rasskazov S.V., Boven A., Punzalan L., Brandt I.S., Brandt S.B., Fernandez-Alonso M. Timing of Late Cenozoic volcanic activity and rift basin formations in the Rungwe province of Tanzania substantiated by K–Ar and $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ dating // Rifting in intracontinental setting: Baikal Rift System and other Continental Rifts, Irkutsk, 1999. P. 75–79.

Rasskazov S.V., Bowring S.A., Harris N., Brandt I.S., Brandt S.B., Ivanov A.V., Lhur J.F., Coleman D., Housh T. Lithospheric domains in East Sayan: Pb, Sr, and Nd isotope constraints on sources of the Late Cenozoic magmatism in the northern segment of the Riphean Tuva-Mongolian massif // Rifting in intracontinental setting: Baikal Rift System and other Continental Rifts, Irkutsk, 1999. P. 163–166.

Rasskazov S.V., Logatchev N.A., Brandt I.S., Brandt S.B., Ivanov A.V., Misharina V.A., Chernyaeva G.P. Variations of spore-pollen assemblages from the Late Cenozoic sediments of the Baikal region: age control by K–Ar dating of volcanic layers // Symposium “Geotectonic activities and climate change in the Baikalian region: a search for climatic fingerprints in lake sediments” jointly with 1-st Baikal SED International Workshop on Sedimentology of Lake Baikal “Recent and Subrecent Sedimentation”. Berlin, 1999. P. 42.

Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Fefelov N.N., Brandt S.B., Skopintsev V.G. Geodynamics of the continental lithosphere: Comparisons of magmatism in Rocky Mountains, USA and East Sayan, Russia // Rifting in intracontinental setting: Baikal Rift System and other Continental Rifts, Irkutsk, 1999. P. 173–179.

Брандт И.С., Брандт С.Б., Рассказов С. В., Иванов А.В. Радиогенный аргон в остывающей дайке // Геохимические процессы и полезные ископаемые. Вестник ГЕО ИГУ N 2. Иркутск: Изд-во Иркут. госуниверситета, 2000. С. 173–184.

Брандт И.С., Брандт С.Б., Рассказов С.В., Иванов А.В., Резницкий Л.З. Распределение радиогенного аргона в минерале при диффузионных потерях: 1. Теоретическое обоснование. XIX семинар Геохимия магматических

пород. Тезисы докладов. М.: ГЕОХИ РАН, 2000, с. 31.

Брандт И.С., Брандт С.Б., Рассказов С.В., Иванов А.В., Резницкий Л.З. Распределение радиогенного аргона в минерале при диффузионных потерях: 2. Эксперимент. XIX семинар Геохимия магматических пород. Тезисы докладов. М.: ГЕОХИ РАН, 2000, с. 32.

Брандт С.Б., Брандт И.С., Рассказов С.В., Резницкий Л.З., Иванов А.В. Метод определения остаточного и главного аргона в зерне минерала // Изотопное датирование геологических процессов: новые методы и результаты. Тезисы докл. I Российской конференции по изотопной геохронологии. М.: ГЕОС, 2000. С. 70–72.

Иванов А.В., Брандт С.Б., Брандт И.С., Рассказов С.В. Накопление и диффузионные потери радиогенных изотопов в остывающих кристаллических структурах: истинная и кажущаяся температуры закрытия // Изотопное датирование геологических процессов: новые методы и результаты. Тезисы докл. I Российской конференции по изотопной геохронологии. М.: ГЕОС, 2000. С. 152–154.

Рассказов С.В., Демонтерова Е.И., Иванов А.В., Брандт И.С., Брандт С.Б., Бауринг С.А., Колеман Д., Харрис Н. Развитие позднекайнозойского магматизма Восточной Тувы // Петрография на рубеже XXI века. Итоги и перспективы. Том II. Мат-лы Второго Всероссийского петрографического совещания. Сыктывкар, 2000. С. 87–90.

Рассказов С.В., Саранина Е.В., Мартынов Ю.А., Чашин А.А., Брандт И.С., Брандт С.Б. О синхронных вариациях изотопов Pb, Sr и Nd в позднекайнозойских базальтах Байкальской и Япономорской подвижных систем // Петрография на рубеже XXI века. Итоги и перспективы. Том II. Мат-лы Второго Всероссийского петрографического совещания. Сыктывкар, 2000, с. 91–94.

Рассказов С. В., Саранина Е.В., Мартынов Ю.А., Чашин А.А., Брандт И.С., Брандт С.Б. О синхронном развитии магматизма Байкальской и Япономорской подвижных систем // Геохимические процессы и полезные ископаемые. Вестник ГЕО ИГУ N 2. Иркутск: Изд-во Иркут. госуниверситета, 2000. С. 229–240.

Рассказов С.В., Брандт И.С., Брандт С.Б., Масловская М.Н., Саранина Е.В., Иванов А.В., Кравчинский В.А. Комплексование данных при геохронологических исследованиях кайнозойского магматизма // Изотопное датирование геологических процессов: новые методы и результаты. Тезисы докл. I Российской конференции по изотопной геохронологии. М.: ГЕОС, 2000. С. 285–288.

Рассказов С.В., Демонтерова Е.И., Саранина Е.В., Масловская М.Н., Брандт И.С., Брандт С.Б., Иванов А.В. Пространственная смена мантийных источников позднекайнозойских вулканических пород Восточной Тувы по изотопным составам Nd и Sr // Изотопное датирование геологических процессов: новые методы и результаты. Тезисы докл. I Российской конференции по изотопной геохронологии. М.: ГЕОС, 2000. С. 288–291.

Рассказов С.В., Мартынов Ю.А., Чашин А.А., Брандт И.С., Брандт С.Б. Миграция позднекайнозойского вулканизма как показатель глубинной геодинамики на юге Сибири и Дальнего Востока // Геология и горное дело в Приморье в прошлом, настоящем и будущем. Тезисы докладов. Владивосток, Дальнаука, 2000, с. 63–65.

Рассказов С.В., Масловская М.Н., Скопинцев В.Г., Брандт И.С., Брандт С.Б., Саранина Е.В., Ильясова А.М. Rb–Sr-изотопная систематика гранитоидов Гарганской и Окинской зон Восточного Саяна // Изотопное датирование геологических процессов: новые методы и результаты. Тезисы докл. I Российской конференции по изотопной геохронологии. М.: ГЕОС, 2000. С. 291–293.

Рассказов С.В., Саранина Е.В., Мартынов Ю.А., Чашин А.А., Брандт И.С., Брандт С.Б., Масловская М.Н. Sr-изотопная систематика средне-позднемиоценовых магматических источников Южного Приморья // Изотопное датирование геологических процессов: новые методы и результаты. Тезисы докл. I Российской конференции по изотопной геохронологии. М.: ГЕОС, 2000. С. 294–296.

Черняева Г.П., Рассказов С.В., Брандт И.С., Брандт С.Б. Палеолимнология миоценовых озер Витимского плоскогорья (Забайкалье)// Третья Верещагинская Байкальская

конференция. Тезисы докладов и стендовых сообщений. Иркутск, ЛИИ СО РАН, 2000. С. 268–269.

Ivanov A.V., Brandt S.B., Brandt I.S., Rasskazov S.V., Boven A. Closure temperature in terms of classic theory of diffusion // *Geoph. Res. Abs.* V. 2, 2000. P. 172–173.

Рассказов С.В., Саранина Е.В., Иванов А.В., Демонтерова Е.И., Масловская М.Н., Брандт С.Б. Мантийная аномалия DUPAL – индикатор гондванского происхождения Тувино-Монгольского массива // *Суперконтиненты в геологическом развитии докембрия. Мат-лы научного совещания*, Иркутск, 2001. С. 221–226.

Рассказов С.В., Саранина Е.В., Мартынов Ю.А., Чашин А.А., Брандт И.С., Брандт С.Б., Масловская М.Н. Эволюция средне-позднемиоценового магматизма Южного Сихотэ-Алия // *Геодинамика Центрально-Азиатского складчатого пояса*. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2001. С. 167–192.

Рассказов С.В., Скопинцев В.Г., Масловская М.Н., Брандт И.С., Брандт С.Б., Саранина Е.В., Ильясова А.М. Rb–Sr-изотопная систематика гранитоидов Гарганской и Окинской зон Восточного Саяна // *Геодинамические режимы формирования Центрально-Азиатского складчатого пояса*. Иркутск: Изд-во Иркут ун-та, 2001. С. 106–136.

Rasskazov S.V., Ivanov A.V., Demonterova E.I., Sankov V.A., Miroshnichenko A.I., Brandt I.S., Brandt S.B. Late Cenozoic tectonic and magmatic pulses in the southeastern Eurasian plate: preliminary data on the Khubsugul rift basin development // *2001 International workshop for the baikal & Novsgol drilling project in Ulaanbaatar*. Abstracts, Ulaanbaatar, Mongolia, 2001. P. 19–20.

Рассказов С.В., Ащепков И.В., Брандт И.С., Брандт С.Б., Демонтерова Е.И., Иванов А.В., Коваленко С.В., Логачев Н.А., Масловская М.Н., Мартынов Ю.А., Травин А.В., Приходько В.С., Саранина Е.В., Семенова В.Г., Чашин А.А., Ясныгина Т.А. Геохронология континентального магматизма позднего фанерозоя в обстановках быстрого, замедляющегося и квазиравномерного медленного движения плит // *Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков. Мат-лы Всероссийской научной конференции*,

посвященной 10-летию Российского фонда фундаментальных исследований. Иркутск, 2002. С. 390–392.

Ivanov A.V., Boven A.A., Brandt S.B., Brandt I.S., Rasskazov S.V. Dating the Quaternary by K–Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ methods: achievements and limitations // *Ancient lakes: speciation, development in time and space, natural history*. Abstracts of the Third International Symposium, Irkutsk, 2002. P. 65.

Rasskazov S.V., Ivanov A.V., Saranina E.V., Brandt I.S., Brandt S.B., Demonterova E.I., Boven A.A. Middle-Late Cenozoic volcanism in the Baikal Rift System: evidence on formation of ancient lake basins due to episodic deep thermal impacts on the lithosphere // *Ancient lakes: speciation, development in time and space, natural history*. Abstracts of the Third International Symposium, Irkutsk, 2002. P. 143.

Rasskazov S.V., Prikhodko V.S., Saranina E.V., Brandt I.S., Brandt S.B., Maslovskaya M.N., Yasnygina T.A., Semenova V.G., Travin A.V. Space-time variations of mantle and crustal components in Late Cenozoic volcanic rocks from the Middle Amur basin // *Structure, geodynamics and metallogeny of the Okhotsk region and adjacent parts of the north-western Pacific plate: international scientific symposium, Yuzhno-Sakhalinsk, Institute of Marine Geology & Geophysics*, 2002. P. 248–251.

Rasskazov S.V., Saranina E.V., Ivanov A.V., Brandt I.S., Brandt S.B., Demonterova E.I., Yasnygina T.A., Boven A.A. Middle-Late Cenozoic magmatism in the Baikal and Japan Sea mobile systems: evidence on coeval episodic thermal impacts on the lithosphere // *Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов*. Бишкек, 2002.

Брандт И.С., Брандт С.Б., Рассказов С.В., Иванов А.В. Диффузия в режиме Лапласа: эволюция калий-аргоновой изотопной системы пород западного побережья оз. Байкал // *Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза. II Российская конференция по изотопной геологии*. Санкт-Петербург: ИГГД РАН, 2003. С. 78–81.

Брандт С.Б., Брандт И.С., Рассказов С.В., Иванов А.В., Сизых Ю.И., Ущеповская З.Ф., Травин А.В. Синтетическое исследование спектров выделения аргона при ступенчатом отжиге андезибазальтовой пробы с

нейтронной активацией и без нее // Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза. II Российская конференция по изотопной геологии. Санкт-Петербург: ИГГД РАН, 2003. С. 81–85.

Рассказов С.В., Брандт И.С., Брандт С.Б., Иванов А.В. О региональном проявлении вулканизма танетского века в юго-восточной части Евразийской плиты // Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза. Материалы II Российской конференции по изотопной геологии. Санкт-Петербург: ИГГД РАН, 2003. С. 383–387.

Рассказов С.В., Брандт И.С., Брандт С.Б., Иванов В.В., Фефелов Н.Н., Саранина Е.В. Определение возраста отторженных свинцов J-типа в галенитах из рудных месторождений восточной окраины Азии // Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза. Материалы II Российской конференции по изотопной геологии. Санкт-Петербург: ИГГД РАН, 2003. С. 392–396.

Рассказов С.В., Иванов А.В., Травин А.В., Брандт И.С., Брандт С.Б., Кириллова Г.Л., Агафоненко С.Г., Пипич А.В., Рогова В.П., Митрофанов Е.А. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и K–Ar датирование вулканических пород альба Приамурья и Забайкалья // Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза. Материалы II Российской конференции по изотопной геологии. Санкт-Петербург: ИГГД РАН, 2003. С. 410–413.

Рассказов С.В., Мельников О.А., Рыбин А.В., Гурьянов В.А., Брандт И.С., Брандт С.Б., Ясныгина Т.А., Саранина Е.В., Жаров А.Э. Развитие средне-позднекайнозойского вулканизма западного побережья Южного Сахалина: результаты K–Ar датирования вулканических пород // Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза. Материалы II Российской конференции по изотопной геологии. Санкт-Петербург: ИГГД РАН, 2003. С. 405–409.

Брандт И.С., Брандт С.Б., Рассказов С.В., Иванов А.В. Изотопно-геохронометрическое уравнение термальной волны интрузии – подход к исследованиям геохронометрической зональности метаморфических поясов // XVII Симпозиум по геохимии изотопов имени

академика А.П. Виноградова. М.: ГЕОХИ РАН, 2004.

Брандт С.Б., Рассказов С.В., Брандт И.С., Иванов А.В., Фефелов Н.Н. Соотношения радиогенных и рудных свинцов // «Минералогия во всем пространстве сего слова» X съезд Российского минералогического общества. Санкт-Петербург, 2004. С. 7.

Рассказов С.В., Иванов А.В., Брандт И.С., Брандт С.Б., Бэхтур Б. Временная систематика четвертичного вулканизма Азии: вероятные ближайшие извержения // Современная геодинамика и опасные процессы в Центральной Азии. Иркутск: ИЗК СО РАН–ИрГТУ, 2004. С. 71–83.

Pisarsky B.I., Brandt I.S., Brandt S.B., Ivanov A.V., Rasskazov S.V., Orgil'yanov A.I., Badminov P.S. Different behavior of crustal helium in ground waters of extensional and compressional settings: Case study of the Baikal Rift Zone // *Angewandte isotopenhydrogeologische Untersuchungen* / B. Merkel, P.G. Deitrich (Hrsg.) *Wissenschaftliche Mitteilungen Institut für geologie* 27, Freiberg, 2004. S. 13–17.

Pisarsky B.I., Brandt I.S., Brandt S.B., Ivanov A.V., Rasskazov S.V., Orgil'yanov A.I., Badminov P.S. Different behavior of helium in ground waters of the Baikal and Mongolia regions // *Proceedings of hydrological symposium, Mexico*, 2004.

Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Saranina E.V., Maslovskaya M.N., Fefelov N.N., Brandt I.S., Brandt S.B., Kovalenko S.V., Martynov Yu.A., Popov V.K. Magmatism in the Southwestern Primorye: from variable crust–mantle impulses within 46 and 32 ma to subduction-dominated and mantle-derived processes within 23 and 13–9 Ma // *Metallogeny of the Pacific Northwest: tectonics, magmatism and metallogeny of active continental margins. Proceedings of the INTERIM IAGOD Conference*. Vladivostok, Dalnauka, 2004. P. 59–62.

Брандт И.С., Брандт С.Б., Рассказов С.В. Вариации изотопов контаминирующего аргона в вулканических породах: влияние средних и верхних уровней тропосферы с низким $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ // Благородные и редкие металлы Сибири и Дальнего Востока: рудообразующие системы месторождений комплексных и нетрадиционных типов руд. Т. I. Мат-лы

научной конференции. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2005. С. 209–210.

Попов В.К., Рассказов С.В., Чекрыжов И.Ю., Брандт И.С., Брандт С.Б. Калий–аргоновые датировки и геохимические характеристики кайнозойских трахибазальтов и трахиандезитов Приморья // Геохимия магматических пород. Труды Всероссийского семинара с участием стран СНГ. Щелочной магматизм Земли. М.: ГЕОХИ РАН, 2005.

Брандт И.С., Брандт С.Б., Рассказов С.В., Попов В.К. Тепловая модель искажения К–Аг датировок базальтов при возгорании угля в осадочных отложениях олигоцен-нижнемиоценовой синеутесовской свиты Приморья // Изотопное датирование процессов рудообразования, магматизма. Мат-лы III Российской конференции по изотопной геохронологии. Т. 1. М.: ГЕОС, 2006. С. 120–125.

Брандт С.Б. Рассказов С.В. Реформы, реформы... // Наука в Сибири. № 3. 2006.

Брандт С.Б., Брандт И.С., Рассказов С.В., Иванов А.В. Прямые и обратные задачи в радиоизотопной геологии // Изотопное датирование процессов рудообразования, магматизма. Мат-лы III Российской конференции по изотопной геохронологии. Т. 1. М.: ГЕОС, 2006. С. 125–128.

Попов В.К., Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Брандт И.С., Брандт С.Б. Геохимия позднекайнозойских кислых вулканических пеплов Юго-Западного Приморья и геодинамические обстановки проявления вулканизма // III Всероссийский симпозиум по вулканологии и палеовулканологии «Вулканизм и геодинамика». Т. 1. Улан-Удэ, 2006. С. 273–276.

Рассказов С.В., Мордвинова В.В., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Саранина Е.В., Фефелов Н.Н., Брандт И.С., Брандт С.Б., Ершов К.В. Кайнозойский вулканизм локальных низкоскоростных мантийных аномалий Центральной Монголии и Юго-Западного Прибайкалья // Вулканизм и геодинамика: Мат-лы III Всероссийского симпозиум по вулканологии и палеовулканологии. Т.1. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра, 2006. С. 280–283.

Рассказов С.В., Саранина Е.В., Ясныгина Т.А., Брандт И.С., Брандт С.Б., Приходько В.С., Фефелов Н.Н., Ершов К.В. Среднепозднекайнозойский рифтогенез и роль

мантийных источников с «надсубдукционными» характеристиками в развитии магматизма Татарского пролива // Изотопное датирование процессов рудообразования, магматизма, осадконакопления и метаморфизма. Т. 2. Мат-лы III Российской конференции по изотопной геохронологии. М.: ГЕОС, 2006. С. 145–150.

Рассказов С.В., Чувашова И.С., Мордвинова В.В., Брандт И.С., Брандт С.Б., Ершов К.В. Развитие кайнозойского магматизма Центральной Азии как выражение процессов образования Саяно-Монгольского низкоскоростного мантийного домена // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2006. С. 95–98.

Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С., Брандт И.С., Брандт С.Б., Демонтерова Е.И., Бехтур Б. Динамика плавления мантии под Центральной Монголией в интервале последних 4 млн лет: соотношения редких земель в лавах Хануйского вулканического поля // VI Российско-Монгольская конференция по астрономии и геофизике. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2006. С. 150–164.

Чувашова И.С., Рассказов С.В., Брандт И.С., Брандт С.Б., Ясныгина Т.А., Саранина Е.В., Фефелов Н.Н., Иванов А.В. Изотопно-геохимическая характеристика разновозрастных вулканических пород позднего кайнозоя Тарятской впадины, Центральная Монголия // Изотопное датирование процессов рудообразования, магматизма, осадконакопления и метаморфизма. Т. 2. Мат-лы III Российской конференции по изотопной геохронологии. М.: ГЕОС, 2006. С. 401–405.

Брандт С.Б., Рассказов С.В., Брандт И.С., Саранина Е.В., Фефелов Н.Н., Ханчук А.И., Иванов В.В., Горячев Н.А., Округин В.М., Абрамович Г.Я. Отражение расплавной геодинамики в изотопном составе рудных свинцов золотых месторождений Востока Азии: сопряженная модель Холмса–Хаутерманса и «конкордии–дискордии» (Brandt S.B., Rasskazov S.V., Brandt I.S., Saranina E.V., Fefelov N.N., Khanchuk A.I., Ivanov V.V., Goryachev N.A., Okrugin V.M., Abramovich G.Ya. Reflection of melting geodynamics in

isotopic compositions of ore leads from gold deposits in East Asia: a conjugated model of Holmes–Houtermans and Concordia–Discordia) // Тектоника и металлогения Северной Циркум-Пацифики и Восточной Азии: Мат-лы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти памяти Л.М. Парфенова. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2007. С. 54–57.

Рассказов С.В., Брандт И.С., Брандт С.Б., Чувашова И.С. Позднекайнозойская магматическая динамика Центральной Монголии: воздействие плюмов на литосферу или влияние Индо-Азиатской коллизии? // Геодинамика формирования подвижных поясов Земли. Мат-лы международной научной конференции. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2007. С. 245–248.

Рассказов С.В., Брандт С.Б., Брандт И.С., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Саранина Е.В., Фефелов Н.Н., Ершов К.В. Соотношения кайнозойской магматической активности Саяно-Монгольского и Забайкальского низкоскоростных доменов // Проблемы геохимии эндогенных процессов и окружающей среды. Материалы Всероссийской научной конференции. Т. 1. Иркутск: Институт геохимии СО РАН, 2007. С. 63–67.

Рассказов С.В., Чувашова И.С., Брандт И.С., Брандт С.Б., Ясныгина Т.А. Кратонные и внекратонные источники глубинного мантийного калиевого магматизма континентов последних 45 млн лет (Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Brandt I.S., Brandt S.B., Yasnygina T.A. Craton and off-craton sources of deep-seated mantle K-rich magmatism in continents of the past 45 Ma) // Тектоника и металлогения Северной Циркум-Пацифики и Восточной Азии: Мат-лы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти Л.М. Парфенова. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2007. С. 288–292.

Рассказов С.В., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Брандт И.С., Брандт С.Б., Писарский Б.И. Температурные характеристики мантийного магматизма для оценки перспектив теплоснабжения населения Восточного Хангая Центральной Монголии // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к

континенту). Т. 2. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2007. С. 40–42.

Чувашова И.С., Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Брандт И.С., Брандт С.Б., Саранина Е.В., Фефелов Н.Н. Син- и посткинематические декомпрессионные и флюидные мантийные выплавки в извержениях юных вулканов Центральной и Восточной Азии (Chuvashova I.S., Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Brandt I.S., Brandt S.B., Saranina I.V., Fefelov N.N. Sin- and post-kinematical decompressional and fluid mantle melts in eruptions of Holocene volcanoes from Central and East Asia) // Тектоника и металлогения Северной Циркум-Пацифики и Восточной Азии: Мат-лы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти памяти Л.М. Парфенова. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2007. С. 393–397.

Brandt I., Brandt S., Rasskazov S. Variations of contaminating argon isotopes in volcanic rocks: impact of medium and upper levels of the troposphere with low⁴⁰Ar/³⁶Ar ratios // 3rd Alexander von Humboldt international conference on the East Asian Monsoon, past, present and future. Beijing: EGU, Institute of Geology and Geophysics CAS, 2007. P. 33–34.

Brandt S.B., Rasskazov S.V., Brandt I.S., Saranina E.V., Fefelov N.N. Conjugate Holmes–Houtermans and Concordia–Discordia model for common lead: application for ore-generation processes in the south of Eastern Siberia // Large igneous provinces of Asia, mantle plumes and metallogeny. International Symposium abstracts. Novosibirsk: Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2007. P. 128–130.

Chuvashova I., Rasskazov S., Modvinova V., Yasnygina T., Brandt I., Brandt S., Saranina E., Fefelov N., Ershov K. Magmatic and seismic evidence on late Cenozoic dynamics of drowning mantle block beneath the East Hangay range, Central Mongolia: comparisons with data on the Tibetan Plateau // 3rd Alexander von Humboldt international conference on the East Asian Monsoon, past, present and future. Beijing: EGU, Institute of Geology and Geophysics CAS, 2007. P. 16–17.

Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Brandt I.S., Brandt S.B., Yasnygina T.A. Important

boundaries in late Cenozoic tectonic evolution of Asia: expression in coeval K-rich magmatism in Central Mongolia and Tibet // 3rd Alexander von Humboldt international conference on the East Asian Monsoon, past, present and future. Beijing: EGU, Institute of Geology and Geophysics CAS, 2007. P. 15–16.

Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Brandt I.S., Brandt S.B., Yasnygina T.A. Cyclic Cenozoic magmatism in Central Mongolia: development of crack propagation model // Large igneous provinces of Asia, mantle plumes and metallogeny. International Symposium abstracts. Novosibirsk: Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2007. P. 54–57.

Рассказов С.В., Брандт И.С., Брандт С.Б., Чувашова И.С. Согласованные временные вариации калия в кайнозойских базальтах Тибета и Центральной Монголии: резонанс процессов зоны Индо-Азиатской коллизии и Внутренней Азии // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Т. 2. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2008.

Рассказов С.В., Чувашова И.С., Саранина Е.В., Фефелов Н.Н., Ясныгина Т.А., Брандт И.С., Брандт С.Б. Время поднятия, вулканизм и глубинная динамика Восточно-Хангайской орогенной провинции, Центральная Монголия // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы ХLI Тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС, 2008. С. 143–146.

Усольцева М.В., Воробьева С.С., Фирсова А.Д., Масленникова М.М., Рассказов С.В., Брандт И.С., Брандт С.Б. Кремнистые микрофоссилии в верхнемиоценовых отложениях Забайкалья // XII Всероссийская палинологическая конференция «Палинология: стратиграфия и геоэкология». Тез. докладов. С-Пб: ВСЕГЕИ, 2008.

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор,
664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет, геологический факультет,

заведующий кафедрой динамической геологии,

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

Институт земной коры СО РАН,

заведующий лабораторией изотопии и геохронологии,

Brandt S.B., Rasskazov S.V., Brandt I.S., Saranina E.V., Fefelov N.N., Ivanov V.V. Conjugate Holmes–Houtermans and Concordia–Discordia model for common lead: Constraints for geological history of terrains with ore deposits in East Asia // Geophysical Research Abstracts. Vol. 10, 05786, 2008. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-05786.

Рассказов С.В., Брандт С.Б., Фефелов Н.Н., Саранина Е.В. Отторженные свинцы как показатели изотопной гетерогенности источников рудного вещества юга Восточной Сибири. Изотопные системы и время геологических процессов. Материалы IV Российской конференции по изотопной геологии. Том II. Санкт-Петербург: ИП Каталкина, 2009. С. 105–108.

Рассказов С.В., Чувашова И.С., Брандт С.Б. Роль высоко- и умереннокалиевого континентального магматизма в кайнозойских процессах конвергенции и рифтогенеза // Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя. Т. 2. Мат-лы XLIII Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2010. С. 190–193.

Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Приходько В.С., Фефелов Н.Н., Саранина Е.В., Чувашова И.С., Брандт С.Б. Мантийные источники лав и глубинная динамика среднего–позднего кайнозоя на востоке Азии // Тезисы Всероссийского петрографического совещания. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УРО РАН, 2010. С. 166–167.

Чувашова И.С., Рассказов С.В., Брандт С.Б. Циклические вариации калия в кайнозойских лавах Центральной Монголии: Восточно-Хангайская противофаза на рубеже миоцена и плиоцена // Кайнозойский континентальный рифтогенез. Мат-лы симпозиума, посвященного 80-летию со дня рождения академика Н.А. Логачева. Т. 2. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2010. С. 213–217.

тел.: (3952) 51–16–59,

email: rassk@crust.irk.ru

Rasskazov Sergei Vasilievich,

doctor of geological and mineralogical sciences, professor,

664025, Irkutsk, st. Lenina, 3,

Irkutsk State University, Faculty of Geology,

Head of Dynamic Geology Char,

664033, Irkutsk, st. Lermontova, 128,

Institute of the Earth's Crust SB RAS,

Head of the Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies,

tel.: (3952) 51–16–59,

email: rassk@crust.irk.ru

ЭКСПЕДИЦИИ

УДК 910.2(079.3)

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2025.1.217>EDN: [FWOPEZ](#)

Летняя научно-исследовательская экспедиция клуба Портулан в район Пика Топографов

А.Д. Китов¹, П.С. Бадминов²¹*Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, Россия*²*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Аннотация. Подводятся итоги летней экспедиции 2024 года и Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (также как представителя студенческо-преподавательского клуба «Портулан») и Института земной коры СО РАН в район Пика Топографов (Восточный Саян), в рамках которых были проведены полевые научные исследования нивально-гляциальных образований, водных объектов по долинам рек Ока, Тисса, Хэлгин и их притоков. Традиционно проводился мониторинг погоды и температурного режима на всём вертикальном размахе рельефа, оценивалось летнее состояние ледника Ячевского, а также снежников, брались пробы воды в широком спектре показателей для оценки доли вносимой ледниками, подземными и поверхностными водами.

Ключевые слова: хребет Окинский, Пик Топографов, снежники, нивально-гляциальные образования, научно-исследовательские работы, наблюдения погоды, пробы воды

Summer Research Expedition of the Portulan Club to the Area of the Peak of Topographers

A.D. Kitov¹, P.S. Badminov²¹*Sochava Institute of Geography, SB RAS, Irkutsk, Russia*²*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia*

Abstract. The results of the summer expeditions of 2024 and the V.B. Sochava Institute of Geography of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (as well as a representative of the student and teaching club "Portulan") and the Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences to the area of the Peak of Topographers (Eastern Sayan) are summed up, within the framework of which field scientific studies of nival-glacial formations, water bodies along the valleys of the Oka, Tissa, Helgin rivers and their tributaries were carried out. Traditionally, weather and temperature conditions were monitored over the entire vertical range of the relief, the

Статья получена: 11.02.2025; исправлена: 22.02.2025; принята: 28.02.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Китов А.Д., Бадминов П.С. Летняя научно-исследовательская экспедиция клуба Портулан в район Пика Топографов // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 1. С. 217-241. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.217. EDN: FWPEZ

Article received: 11.02.2025; corrected: 22.02.2025; accepted: 28.02.2025.

FOR CITATION: Kitov A.D., Badminov P.S. Summer research expedition of the Portulan club to the area of the peak of Topographers // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 217-241. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.217. EDN: FWPEZ

summer state of the Yachevsky glacier, as well as snowfields, was assessed, water samples were taken in a wide range of indicators to assess the share of glaciers, groundwater and surface water.

Keywords: *Okinsky Ridge, Topographers Peak, snowfields, nival-glacial formations, research works, weather observations, water samples*

В этой экспедиции участвовал один член клуба Портулан.

Руководитель: Прокопий Сократович Бадминов, науч. сотр. ИЗК СО РАН (гидрогеолог).

Члены экспедиции: Александр Данилович Китов, ст. науч. сотр. ИГ СО РАН (член клуба Портулан, ГИС-специалист, гляциолог). Евгений Николаевич Белобородов, бывший работник ИГУ (кафедра геоморфологии, работал по теме Литоморфные ступени выравнивания Восточных Саян).

Водитель: Бадминов П.С. (ИЗК СО РАН) на личной машине Toyota Land Cruiser.

Цель экспедиции. Это внеплановая экспедиция, проводимая в период максимальной абляции нивально-гляциальных образований, в основном ледников. Необходимо было исследовать ледники в истоках р. Хэлгин (№ 18, Топографов; № 20, Ячевского), оценить их динамику, степень покрытия моренным чехлом, смещение верхней и нижней границ, размер открытой части ледников (Каталог ледников..., 1973). Также необходимо было взять пробы льда и воды для анализа на изотопы газов H_2 и O_2 : фоновый показатель – атмосферные осадки; лед с ледников, воды из стоков этих ледников, из ледниковых озер, и рек Ока, Тисса, Хэлгин. Это позволит определить долю воды ледников, подземных и поверхностных вод.

Прокопий и Евгений заядлые рыбаки, Евгений опытный сплавщик по горным рекам на лодках типа ЛАС.

1 августа, среда, день заезда

Александр ожидал приезда коллег к обеду в районе устья р. Бел. Иркут после экспедиции к ледникам Перетолчина и Радде в районе горного массива Мунку-Сардык. Но коллеги задержались и приехали только к вечеру. Оказывается, они от знакомых в Орлике получили заказ, вырезать им стекла, пришлось долго искать, где это сделать, да и ехали не спеша, осторожно. Александр уже собрался ставить палатку у кафе, договорился положить вещи храниться в бане, которая выстроена в виде чума. Только положил вещи в склад кафе, и геологи подъехали. После загрузки вещей всей командой переехали выше ущелья, там, где песчаный берег и Черный Иркут бьет в скалу (рис. 1). 20⁰⁰-22⁰⁰ установили палатки, развели костер, приготовили ужин (каша гречневая, хлеб черный, растительное масло, чай, конфеты, сухари). 22²⁰-22³⁰ тН 1440, 1609 м. Отбой. Погода ясная, тихая, по спортивным часам барометрическое давление (БД) 1018 гПа, или 759 мм рт. ст., растет; $t^\circ=14$ С; атмосферное давление (АД) 625 мм рт. ст.

Первая экспедиция для Александра закончилась, началась вторая.



Рис. 1. Черный Иркут. Немного ниже в районе кафе Белый Иркут втекает в Черный и называется просто Иркут. Фото 08524, 01.08.2024.

Fig. 1. Black Irkut. A little lower, in the area of the café, the White Irkut flows into the Black and is simply called Irkut. Photo 08524, 01.08.2024.

*2 августа, четверг, второй день, перевал
Черный Иркут – п. Орлик – д. Балакта*

Лагерь на песчаном берегу Черного Иркута, 1620 м.

$6^{00}-7^{30}$ $t=14$ С; БД 751.4 мм рт. ст., АД 625.1 мм рт. ст., растет.

Сбор лагеря, костер, завтрак (гречневая каша, сыр). Александру отложили только одной каши, так как он вегетарианец, а Прокопий и Евгений добавили банку монгольской тушенки.

$7^{30}-9^{30}$ перевал до брода в д. Баксан (1544 м). По пути остановились на перевале водоразделов Иркута и Оки, около оз. Окинского, откуда начинается свое течение река Ока, называемая местным населением Аха.

Деревня Боксон расположена на левом, другом, берегу р. Ока, на правом берегу у брода стоит несколько машин и трактор Белорусь для буксировки машин, большая вода,

брод не работает (рис. 2). Здесь есть связь, Прокопий сообщает в Орлик, что мы благополучно движемся.



Рис. 2. Брод через реку Ока у деревни Боксан. Фото 08533, 02.08.2024.

Fig. 2. Ford across the Oka River near the Boxan village. Photo 08533, 02.08.2024.

$10^{00}-11^{50}$ перевал в Орлик, примерно до окраины, где остановились недалеко

источник для лечения печени Шутхулай-Нур. По пути в центре заехали в магазин и купили некоторые продукты.

11⁵⁰-13⁰⁰ в Орлике. Заехали к знакомым Прокопия. Саня – пекарь Орлика, печет хлеб для всего поселка. Раньше у него была каменная печь на 50 булок, а хлеб получался очень вкусный. Теперь он приобрел армейскую печь на 150 булок. Хлеб тоже очень вкусный, но старожилы говорят, что раньше был еще вкуснее. Это промысел семьи Дальжиновых, Александра и Раджаны.

Утром он развозит хлеб по магазинам, вечером собирает выручку. Во дворе суется, построили дом и теперь будут справлять новоселье, забили барана и свежуют. Нам некогда, и их не стоит отвлекать, готовим переправу, созвонились с нашими провожатыми.

13⁰⁰-13⁴⁵ переправа через реку Ока. Мы на своем берегу накачали лодки ЛАС-300 и ЛАС-500, отсортировали вещи, взяли самое необходимое и продукты. С другой стороны, подъехали наши проводники из Балакты на УАЗ (бобик) тоже с лодками. Пришлось зайти вверх по течению (рис. 3).



Рис. 3. На правом берегу р. Ока, подготовка лодок перед переправой. Фото 08542, 02.08.2024.

Fig. 3. On the right bank of the Oka River, preparation of boats before crossing. Photo 08542, 02.08.2024.

Нас сносило, но удачно выгребли на галечную косу на левом берегу Оки. 13⁴⁵-14⁰⁰ свернули лодки, погрузили все вещи в УАЗ и переехали за деревню Балакта на правый берег Тиссы (приток Оки). 14⁰⁰-15⁰⁰. 1380 м. Здесь

на лугу переукомплектовали вещи как поклажу для лошадей, необходимое взяли в маленькие рюкзаки. День хороший, но где-то над хребтом собираются облака, возможна гроза. Ясно, $t^{\circ}=18^{\circ}\text{C}$; БД 756.4 мм рт. ст., АД 640.3 мм рт. ст., падает.

15⁰⁰-15²⁰ на газовой горелке сварили чай и перекусили, это наш обед (ролтон, огурцы, сыр, чай с сахаром, сухари, конфеты).

15²⁰-16⁰⁰ подъехали наши проводники и началось выючение лошадей. Они оказались строптивые, сбрасывали вьюки и наши рюкзаки. Неудачное выючение лошадей продолжалось почти час до 16⁵⁰. Пробовали загрузить то одну лошадь, то другую, все неудачно. Один только конь Кузя был покладистый. Его первого навьючили, дали повод Прокопию, и мы пошли вперед. Проводники остались оседлывать самых строптивых.

Мы заказывали одного проводника и 3 лошади, это можно было обойтись по 5000 руб./день за лошадь на 3 дня, всего 45 000 руб. Но Виктор Владимирович Ошоров взял себе товарища Маланова Женбэ Содномовича и 4 лошади. На каждого проводника по 2 лошади, одна с всадником, а вторая только выючная на поводу сзади. В итоге договорились по условленной цене. Действительно, лишняя лошадь не помешала, вещей оказалось много, лошади оказались гружёными под завязку.

Проводники сильно отстали, мы даже заволновались, по той ли дороге идем. Александр решил сбегать навстречу отставшим, но только немного отбежал, как появились всадники. Забрали у нас коня Кузю и стали снова перевьючивать, а мы пошли дальше. 16⁵⁰-19³⁵ переход 11 км до места стоянки, водопад Дабат.

19³⁵-23⁰⁰ установка лагеря. Костер, ужин (рисовая каша, хлеб, сыр, чай с сахаром и конфетами). В этом месте стоял сарай, в нем расположились проводники. Коней стреножили и отпустили пастись. Место сырое, много комаров. Жамбал оказался заядлым рыбаком, через некоторое время принес несколько рыбин, хариус. Испек их на костре, на рожнах.

3 августа, суббота, переход: Стоянка Дабат – оз. Дозор Нур, берег (ниже летника)

6⁰⁰-6³⁰ 1413 м. Сборы, ясно, $t^{\circ}= 8^{\circ}\text{C}$; БД 755.9 мм рт. ст., АД 638.4 мм рт. ст., чуть падает.

6³⁰-7³⁰ костер, завтрак (макаронны, сыр с плесенью, чай с сахаром). Сбор лагеря. Погрузка вещей на лошадей.

7³⁰-10¹⁵ переход Дабат – временный отдых. Пошли дальше по лесной дороге, но сблизись с тропы (дороги) вышли на заросшие камни древнего большого селя, пошли по азимуту к берегу Тиссы, нашли дорогу.

10¹⁵-10³⁵ очередной отдых на берегу Тиссы. Погода хорошая $t^{\circ}= 16^{\circ}\text{C}$; БД 755.7 мм рт. ст., АД 635.4 мм рт. ст., 1438 м.

10³⁵-13³⁰ еще два перехода с небольшими отдыхами. 11²⁵ 1467 м, $t^{\circ}= 16^{\circ}\text{C}$. БД 755.4 мм рт. ст., АД 633.2 мм рт. ст., прошли 12.75 км за три с половиной часа.

13³⁰-14⁵⁰ остановились на обед в местечке Балакта Дабан, 1468 м. Пока мы догоняли проводников, они наловили хариусов и сварили уху. Обед (уха по-бурятски; хлеб, лук, чай с молоком и сахаром). По дороге попадалось много грибов, преимущественно подосиновики, а иногда и свежие следы медведя.



Рис. 4. Переправа через реку Сорхой (на первом коне Виктор, на втором – Евгений). Фото 08640, 03.08.2024.

Fig. 4. Crossing the Sorkhoy River (Victor on the first horse, Evgeny on the second). Photo 08640, 03.08.2024.

14⁵⁰-16²⁰ переход до р. Сорхой (правый приток Тиссы). Сорхой – бурная широкая река, в ее истоках есть ледник Сорхойский. 16²⁰-16⁴⁰ переправа на лошадях (рис. 4): сначала перевезли Евгения, потом Александр с

Прокопием на одной лошади. Пока мы догоняли и подходили к броду проводники переправились сами через бурный поток, развьючили самого спокойного, Кузю, и еще одного коня. Виктор вернулся к нам с этими конями.

Кони не хотели сначала пускаться на себя новых седоков, но, когда коня поставили ниже уступа берега к седоку боком, чтобы было легче садиться, а конь не видел седока, то удалось оседлать. Вторым рейсом решили переправить сразу двоих, на второго свободного сел Прокопий в седло, и сзади на круп, держась за Прокопия, сел Александр.

Удержаться на крупе коня было сложно, конь шел не ровно по камням и в бурной реке, переваливаясь с ноги на ногу. Но все обошлось благополучно. Дело усложнялось тем, что в руках у Прокопия была мерная рейка, а у Александра деревянный посох, конь боялся этих палок.

16⁴⁰-17²⁰ переход от брода до летника Виктора. Всего прошли 25.2 км за 7 часов.

Всадники пока седлали коней отстали от нас, и нагнали, когда мы подошли к развилке, вправо от дороги уходила тропа, она сокращала путь. Мы пошли следом за всадниками, но, конечно, отстали и потеряли их из вида. Вышли на какой-то луг, где тропа терялась. Решили идти к берегу Тиссы, да и за деревьями проглядывало какое-то строение, забор.

Это был летник, но там никого не было. Только много коров рядом паслось. Александр зашел во двор обошел кругом, все закрыто. Пошли искать другой стан. За небольшим озерцом просматривался еще один летник, там и коней своих заметили. Нас уже ждали, собрался весь околоток (жители всех соседних 3-х летников). На летнике домовничала мать Виктора.

17²⁰-18⁰⁵ отдых, перекус, $t^{\circ}= 25^{\circ}\text{C}$, БД 754.1 мм рт. ст., АД 629.7 мм рт. ст., 1492 м.

Хозяева нас хорошо угостили: домашний белый хлеб, деревенская сметана, варенье из красной смородины, чай с медом.

Проводники остались выючить лошадей, они так и пойдут правым берегом до брода у первого озера. А мы пошли к летнику, на

который первоначально вышли, с его хозяином Славой для переправы на лодке.

18¹⁰-18²⁰ переправа на левый берег Тиссы (сначала Слава перевез Евгения, потом Александра и наконец Прокопия). Река в этом месте спокойная и лодку почти не сносило (рис. 5).

18²⁰-20²⁰ переход до озера Дозор-Нур (рис. 6) с одним отдыхом. Прошли мимо какого-то летника, потом во время отдыха встретили стадо коров и пастуха с того летника. Спросили сколько идти до озера, парень-пастух сказал, что далеко, сегодня не дойдем, но оказалось совсем близко, можно было и не отдыхать.

20²⁰-21⁰⁰ $t^{\circ}= 20^{\circ}\text{C}$, БД 755.1 мм рт. ст., АД 628.5 мм рт. ст., 1521 м. Установка лагеря. Прошли за день 34 км за 9 часов.

20⁰⁰-21¹⁰ купание в озере Дозор-Нур. Берег песчаный, чуть поросший травой, вода теплая. Прокопий помылся раньше и хвалил воду. Александр было сначала не поверил, но вода действительно оказалась теплой.

21¹⁰-22¹⁰ костер, ужин (гречневая каша, хлеб домашний от проводников, чай сахаром и конфетами). 22¹⁰-22³⁰ устройство в палатке и дневниковые записи, отход ко сну.

4 августа, воскресенье, переход оз. Дозор-Нур – устье р. Хэлгин

6⁰⁰-6¹⁵ $t^{\circ}= 11^{\circ}\text{C}$. БД 656.1 мм рт. ст., АД 629.3 мм рт. ст., ясно.

6¹⁵-7⁴⁵ костер. Завтрак (поскольку оставшаяся гречка была с тушенкой, Александр заварил себе ролтон). Александр встал первым, развел костер и попутно со сбором палатки взялся подогреть гречку, но просмотрел, и она подгорела. Так что много оставшейся каши с ужина пропало. Получил выговор от коллектива, т.к. им пришлось обойтись только чаем с бутербродами.



Рис. 5. Переправа на левый берег реки Тиссы. Фото 08651, 03.08.2024.

Fig. 5. Crossing to the left bank of the Tisza River. Photo 08651, 03.08.2024.



Рис. 6. Озеро Дозор-Нур. Фото 09497, 03.08.2024.

Fig. 6. Dozor-Nur Lake. Photo 09497, 03.08.2024.

7⁴⁵-8³⁰ сбор лагеря. Проводники долго ходили за лошадьми в летник, потом начали выючить лошадей. Прокопий, Александр и Евгений пошли раньше. Проводник Виктор посоветовал идти не через перевал, а низом, вдоль берега озера. Активно это поддержал Прокопий, а Евгений был против, мол он так уже шел и пришлось брести по воде.

Договорились встретиться за озером, где тропа с перевала спускается вниз.

Оказалось, что тропы, даже звериной нет вдоль берега. Местами есть прижимы, отвесные скалы. Прокопий в основном брел вдоль берега. Александр не хотел мочить ноги в холодной воде. В основном лез по крутому берегу, в некоторых местах по опасным скалам.

Евгений местами шел с Александром по склону, но потом спустился к воде. Все время ворчал что не послушали его, нужно было идти через перевал по конной тропе. Действительно это было бы безопасно и легче. Понятно, Прокопий гидролог и от воды ему отходить ну никак невозможно, вот он и склонял брести вдоль берега по воде.

Прошли примерно треть пути по берегу, вымотались, скорость почти нулевая. Когда Александр спустился с очередной кручи к воде немного впереди попутчиков, то увидел туристов на лодке с водометом. С ними мы уже пересекались в начале озера Дозор-Нур предыдущим днем, они угостили наших проводников пивом. Пива у них было немерено, активно отдыхали. Александр стал махать руками, отчаянно звать их к берегу, без всякой надежды, а они взяли, да и подплыли. Говорят, мол вам же нужно пешком идти, чем труднее, тем лучше, чего зовете. Пришлось объяснять, что мы не туристы, а в экспедиции и быстрее нужно пройти. Подвезли они нас до конца озера Шутхалай-Нур. Могли бы подвезти и до устья Хэлина, да была назначена встреча с проводниками на тропе после их спуска с перевала.

По болоту вдоль стариц выбрались к тропе, крикнули, а караван как раз спустился с перевала Муухан хотел даван. Встретились. Проводники очень были удивлены, что мы так быстро прошли по непроходимому берегу. Удивлялись, что пенсионеры шустро ходят, ведь «на верную смерть посылали». Мы, конечно, утаили, что нас подвезли на моторке.

8³⁰-15⁵⁰ переход до брода р. Шутхулай-Гол и обед на левом берегу р. Шутхулай перед бродом. Пока мы подползли из последних сил проводники уже готовили обед.

Обед (самодельный хлеб с маслом, макароны, мясоеды ели макароны с самодельной бурятской тушенкой, чай с молоком, сахар, конфеты).

Надвигаются грозовые облака, но прошли мимо. 1527 м. t°= 20 °С, БД 754.6 мм рт. ст., АД 627.6 мм рт. ст.

15⁵⁰-16³⁰ сборы и переправа через р. Шутхулай. Опасный брод 10 лет назад Александр упал с коня в воду. В этот раз тоже

искупался. Первым прошел Евгений, затем Прокопий, за ним пошел Александр, но чуть ниже. В руках держал палку и сапоги. Почти у берега зацепился за камень и поток сбил его. С головой нырнул в воду. Пришлось выныривать, ловить сапоги и бороться с течением. Прокопий вовремя подбежал и помог выбраться на берег. Нужно было нормально упаковать сапоги (привязать к рюкзаку) и не просто опираться о палку одной рукой, а по правилам двумя руками упираться на шест, и идти следом за Прокопием. Пришлось выжиматься, переодеваться.

16³⁰-21⁰⁰ переход до устья Хэлгина, снова прошли за день 34 км. Вроде по расчетам должны были пройти меньше, 28 км. Примерно за 5 км до финиша, Евгений начал беспокоиться не будет ли у нас холодная ночевка, стал спрашивать есть ли спички. В этом месте тропа от склона поворачивала в болото к руслу Тиссы. Вскоре подошли к притоку Тиссы, Шара-Тырнадита, брод легкий. В этом месте нас нагнали проводники на лошадях. Все стало ясно, мы на верном пути. Еще один час, и мы вышли к месту стоянки.

21⁰⁰-24⁰⁰ установка лагеря у устья Хэлгина. Это базовый лагерь. Здесь мы расстаемся с проводниками. Оставляем часть продуктов, лодки и некоторые вещи и с большими рюкзаками поднимаемся по Хэлгину.

Костер, ужин (бурятская уха с мукой и маслом, чай с сахаром и конфетами). Устройство в палатке, дневниковые записи. 1569 м. t°= 10 °С, БД 756.8 мм рт. ст., АД 626.0 мм рт. ст. Растет.

5 августа, понедельник, дневка, устье р. Хэлгин

10⁰⁰-14⁰⁰ t°= 18 °С; БД 757.5 мм рт. ст., АД 626.6 мм рт. ст. растет. Дождь, морось. Домашние дела, Александр зашивал сандалии. Костер, обед, расчет с проводниками 60 000 руб. за 3 дня и 4-х коней. Проводники ловили коней. Хотя они были стреножены, но ушли далеко.

14⁰⁰-15⁰⁰ сборы проводников и отъезд. Они пошли выше по Тиссе. В планах дойти до верховий Тиссы, где есть минеральный источник и лечебные грязи. Там они собирались заночевать. Договорились, где будут оставлены

пробы воды из минерального источника. 15⁰⁰-16⁰⁰ костер, обед (уха). 16⁰⁰-21⁴⁵ рыбалка, предварительная сортировка вещей, ужин (уха, хлеб, масло, чай с сухарями). Проводники оставили нам хлеб домашний и коровье масло. Однако вскоре вернулись проводники, привезли пробы воды и 3 литра аршана для питья. Оказалось, что там бродит медведь. Решили не рисковать, т. к. ночью медведь мог задрать лошадей. 21⁴⁵-22²⁰ костер, ужин (каша рисовая, хлеб с маслом, чай с молоком). 22²⁰-23³⁰ устройство в палатке, дневниковые записи. $t^{\circ}=23^{\circ}\text{C}$, БД 757.6 мм рт. ст., АД 621.2 мм рт. ст., растет.

6 августа, вторник, выход с устья р. Хэлгин

6⁰⁰-8⁰⁰ $t^{\circ}=11^{\circ}\text{C}$, БД 756.3 мм рт. ст., АД 625.5 мм рт. ст., падает, туман.

8⁰⁰-11¹⁰ костер, завтрак (гречка в пакетах, чай хлеб с маслом, конфеты). После завтрака проводники уехали домой вниз по Тиссе. Мы продолжили сборы. Спрятали вещи в ернике и закрыли тентом, рюкзак с продуктами подвесили на ветку лиственницы. Было много вариантов как спасти вещи от медведей, а их здесь много. Можно было подвесить приемник, который звуком отпугивал бы. Есть жестокий метод: разбросать вокруг газовые баллоны обмазанные сгущенкой. Медведь облизнет баллон и прокусит, баллон взорвется и напугает хищника. Мы выбрали самый простой и дешевый: всё обсыпали махоркой. То ли медведь не пришел, то ли и правда сработало, но вещи и продукты остались не тронутыми.

11¹⁰-15⁴⁰ первый переход. Погода плохая, присматриваем место, где можно остановиться. Перешли брод р. Хутэл гол. Брод опасный, но переправились благополучно. В этом месте конная тропа отворачивает от Хэлгина и идет вверх вдоль р. Хэлгинэ-Хутэл, а потом через хребет. В прошлый раз (10 лет назад) на конях нас доставили к этому месту. Тогда мы шли с георадаром. И до конца дня смогли дойти до морены ледника Ячевского.

15⁴⁰-21⁰⁰ пока обедали пошел дождь, решили остановиться. Ставили палатки под дождем. Сильно вымокли, развели большой

костер, сушились. Обед (макаронны спагетти, чай со сгущенкой, конфеты «Москвичка»).

1771 м, $t^{\circ}=12^{\circ}\text{C}$, БД 754.4 мм рт. ст., АД 610.9 мм рт. ст., падает.

21⁰⁰-23⁰⁰ устройство в палатке, дневниковые записи. Дождь периодически то прекращается, то снова идет, $t^{\circ}=12^{\circ}\text{C}$, БД 757.4 мм рт. ст., АД 611.4 мм рт. ст., падает.

7 августа, среда, переход р. Хэлгин, устье Хутэл – граница леса

6⁰⁰-9⁵⁰ сборы, костер, завтрак (картофельное пюре, сыр, хлеб, чай, конфеты). $t^{\circ}=9^{\circ}\text{C}$, БД 757.0 мм рт. ст., АД 612.3 мм рт. ст., падает.

Хотели выйти к границе леса, но с несколькими остановками до обеда немного не дошли до назначенного места. Переход этот наиболее трудный, нужно преодолеть две каменные россыпи огромных камней. Первая шириной 630 м, вторая – 140 м и не такая трудная. Между ними 400 м хорошей тропы. Местами можно идти по песчаному берегу озера. Вероятно, с гребня хребта обрушились огромные скалы. Наибольшая россыпь перегородила реку, образовав озеро Додо Хухэ. 15³⁰-16³⁰ остановились на обед. 1803 м, $t^{\circ}=12^{\circ}\text{C}$, БД 757.0 мм рт. ст., АД 609.2 мм рт. ст., падает. Обед (лапша, сыр, хлеб, чай, изюм).

16³⁰-18²⁰ переход к границе леса. Нужно было бы идти еще, но погода плохая, без дров не высушиться. Решили остановиться, много валежин и хвороста, есть вода, до границы леса не дошли 400 м.

18²⁰-21⁰⁰ заготовка дров. Установка лагеря. Костер, ужин (суп из пакетов, сухари, чай). Устройство в палатке, дневниковые записи.

21⁰⁰-23⁰⁰ снова пошел дождь, но вскоре прекратился. 1848 м, $t^{\circ}=13^{\circ}\text{C}$, БД 760.5 мм рт. ст., АД 607.3 мм рт. ст., растет. Сушка у костра.

8 августа, четверг, переход верховья р. Хэлгин, граница леса – база на бугре с видом на морену ледн. Ячевского

7⁰⁰-10²⁰ 1848 м, $t^{\circ}=7^{\circ}\text{C}$, БД 759.6 мм рт. ст., АД 607.5 мм рт. ст., чуть растет. Сборы в палатке. Костер, завтрак (чечевица, чай, хлеб, конфеты). Сбор лагеря.

10²⁰-13⁰⁰ переход до штурмового базового лагеря. Прошли границу леса (рис. 7) и у

излучины Хэлгина к левому краю долины сбились с тропы и решили переправиться на правый берег. Александр вспомнил, что вроде 10 лет назад они легко перебрали реку и нашли полянки без ерника для палаток и рядом небольшие колки леса для костра. Когда сбились с тропы, то зашли в серию проток Хэлгина, болото. Подошли к основному руслу реки, вода большая, брод опасен. Прокопий по камням в русле все же перепрыгал на другой, правый берег Александр попытался за ним прыгать, но чуть не сорвался в воду, Евгений помог ему выбраться. Вдвоем

они перебрались через протоки и вышли на холм, где не было ерника. В это время их догнал Прокопий, сказал, что на другом берегу поставить палатки негде. На этой полянке вроде можно установить две палатки, решили здесь остановиться тем более, что погода ухудшалась, подходил дождь со стороны пика Топографов (рис. 8). Прошли 2.5 км.

13⁰⁰-13⁴⁵ устройство в палатке, переодевание. Дневниковые записи. 1925 м, $t^{\circ}= 11^{\circ}\text{C}$, БД 759.6 мм рт. ст., АД 601.5 мм рт. ст., падает.



Рис. 7. Граница леса и отдельные колки леса на правом берегу р. Хэлгин. Фото 08752, 08.08.2024.

Fig. 7. Forest border and separate forest stakes on the right bank of the Helgin River. Photo 08752, 08.08.2024.



Рис. 8. Команда исследователей (слева на право Евгений, Александр, Прокопий) у палаток базового лагеря. На дальнем плане видна крутая морена ледника Ячевского. Фото 08758, 08.08.2024.

Fig. 8. A team of researchers (from left to right Evgeny, Alexander, Prokopy) at the tents of the base camp. In the background, you can see the steep moraine of the Yachevsky glacier. Photo 08758, 08.08.2024.

13⁴⁵-14⁰⁰ перекус (чай на газовой горелке, орехи, печенье, конфеты). Теперь поваром стал Евгений, готовит на газе, продукты нормировано.

Погода переменная, преимущественно плохая, когда выглядывает Солнце, начинаем сушить вещи. 14⁰⁰-14¹⁰ дождь, морось. 14¹⁰-14⁵⁰ выглянуло солнце, сушка одежды на ветвях кедра (*Pinus sibirica*) карликовой формы и ернике (*Betula nana*). Фотосессия. 14⁵⁰-16³⁵ опять пошел дождь, загнал нас в палатки, пол неба затянуло облаками, облака лезут из-за морены ледника Ячевского и пика Топографов. 16³⁵-17⁰⁰ выглянуло солнце, сушка одежды на ернике. Фотосессия. 17⁰⁰-17³⁰ обложной дождь, но над Тиссой просветы. 17³⁰-17⁵⁵ снова солнце 17⁵⁵-18³⁰ дождь пришел с пика Топографов.

18³⁰-18⁴⁵ паузин (лапша).

18⁴⁵-19¹⁵ пасмурно, $t^{\circ}= 12^{\circ}\text{C}$, БД 759.7 мм рт. ст., АД 601.5 мм рт. ст., чуть падает. С 18⁵⁰ дождь, сидим в палатках. С 19¹⁵ сильный дождь.

20¹⁰-20³⁰ ужин (чай, шоколад, конфеты) за-дабриваем Бурхана. Бурхан принял наши мольбы и дождь поутих.

9 августа, пятница, база на холме с видом на морену ледн. Ячевского. Заключительный маршрут на ледн. Ячевского

8⁰⁰-10⁴⁵ тН 1483, 1924 м. День ясный, небольшая облачность. $t^{\circ}= 12^{\circ}\text{C}$; БД 759.4 мм рт. ст., АД 601.0 мм рт. ст., чуть падает. Сборы и завтрак (суп из пакетов, сухари, чай, конфеты). Сборы в маршрут к оз. Дэдэ-Хухэ-Нур и на ледник Ячевского, ясно, $t^{\circ}= 12^{\circ}\text{C}$, БД 758.2 мм рт. ст., АД 600.8 мм рт. ст., чуть падает.

10⁴⁵-11⁰⁰ пошли по тропе на бараньи лбы. Сначала шли по хорошей тропе, но потом сбились, однако перед самым подъемом снова вышли на тропу. На гребне, подпирающем озеро Дэдэ-Хухэ-Нур, на бараньих лбах (2010 м) организовали фотосессию, наметили маршрут подъема на морену ледника (рис. 9).

12²⁰-12³⁰ спустились вниз по камням к стоку озера (исток Хэлгина из озера Дэдэ-Хухэ-Нур).

12³⁰-14³⁰ тН 1487, 2024 м. Замер параметров стока, расход воды и др. (рис. 10). Взятие проб. Ширина стока 10 м. Пробы оставили у большого камня. Основные тяготы взятия параметров легли на Прокопия, Евгений и Александр лишь записывали диктуемые им данные. В выбранном месте, где поток не столь сильный Прокопий по ледяной воде перешел на левый берег с веревкой, через каждый метр промерил глубину мерной рейкой, затем с этим же интервалом измерял прибором скорость потока. Тяжела жизнь гидролога!

14³⁰-17⁰⁵ подъем и переход по поверхностным моренам ледника до низа языка открытой части. Верх конечной морены тН 1488. Первым на заморененную часть ледника поднялся Евгений, за ним Александр. Прокопий отстал и его не могли докричаться. Александр и Евгений решили быстрее дойти до открытого льда и взять пробы, так как времени было уже много, да и погода портилась. В темпе пошли по поверхностной морене, спустились с современной конечной морены к открытому льду и начали брать пробы. Это место, где сток с ледника был одним руслом

и уходил под морену бы завален огромными камнями (рис. 11). Ледник существенно просел, а конец льда отодвинулся внутрь кара. Этот же вид представлен на рис. 12 ровно десятью годами ранее (Китов и др., 2014).

У низа открытой части, вид на ледник и верх кара с пиком Топографов, тН 1489. Слева дальняя вершина в виде ступенчатой пирамиды пик Топографов, 3015.2 м, а правее более высокая трапециевидная вершина, 3089.2 м, на которую обычно поднимаются туристы по леднику Топографов (№ 18) с севера (мы шли по западному леднику Ячевского (№ 20)). На этой же большей вершине установлен красивый триангулятор Роскартографией (Обиняков, 1988, 2018; Разумовский, 2018).

Только наколупали льда и собрались идти обратно, как подошел Прокопий. Начали брать пробы снова, по правилам. 17⁰⁵-17¹⁵ взятие проб льда, воды, фирна, тН 1490, 2381 м (рис. 13).

17¹⁵-20⁴⁰ возвращение в лагерь. Когда пошли обратно со стороны ледника в современном гребне морены увидели большую дыру во льду, туннель (рис. 14).



Рис. 9. На верху гребня из бараньих лбов. Намечаем маршрут подъема на конечную морену. Поднимались слева по впадине правый край осыпи. Внизу оз. Дэдэ Хухэ. Фото 08781, 09.08.2024.

Fig. 9. At the top of the comb of sheep's foreheads. We plan the route of ascent to the terminal moraine. On the left, along the depression, the first edge of the scree was climbing. At the bottom of the Dede Huhe lake. Photo 08781, 09.08.2024.



Рис. 10. Измерение расхода воды в створе р. Хэлгин. Фото 08849, 09.08.2024.

Fig. 10. Measurement of water discharge at the Helgin River site. Photo 08849, 09.08.2024.

20⁴⁰-23⁰⁰ тН 1492, 1493 м, пришли в лагерь. Прошли 7.82 км. $t^{\circ}= 13^{\circ}\text{C}$, БД 762.7 мм рт. ст., АД 600.1 мм рт. ст., падает. Домашние дела, переодевание, дневниковые записи. Ужин (суп-лапша, чай с горной смородиной,

конфеты). С погодой повезло, хотя небо хмурилось, появлялись из-за хребтов темные тучки, но дождь так и не пошел.



Рис. 11. Вид конца языка ледника в 2024 г. В 2014 г. ледник был выше до верхнего уровня обломочного материала. Такого V-образного углубления не было. Фото Е. Белобородова 0034, 09.08.2024.

Fig. 11. View of the end of the glacier tongue. In 2014, the glacier was higher up to the upper level of the detrital material. There was no such V-shaped depression. Photo by E. Beloborodov 0034, 09.08.2024.



Рис. 12. Вид конца языка ледника, того же места, 2014 г. Фото 2603, 09.08.2014.

Fig. 12. View of the end of the glacier tongue, the same place, 2014. Photo 2603, 09.08.2014.



Рис. 13. Прокопий отмеряет 50 мл ледниковой воды для анализа на наличие изотопов H_2 и O_2 . Фото 08874, 09.08.2024.

Fig. 13. Procopy measures 50 ml of glacial water to analyze for the presence of H_2 and O_2 isotopes. Photo 08874, 09.08.2024.



Рис. 14. Ледяной грот в современной конечной морене ледника, сформировавшийся в последние 10 лет. Фото 08882, 09.08.2024.

Fig. 14. The ice grotto in the modern terminal moraine of the glacier, formed in the last 10 years. Photo 08882, 09.08.2024.

10 августа, суббота, база на бугре – выход вниз по Хэлгину

7³⁰-11⁰⁵ подъем, сборы, сушка одежды и палаток, сэлфи. $t^{\circ}=9^{\circ}\text{C}$, БД 758.9 мм рт. ст., АД 600.3 мм рт. ст., падает. Завтрак (суп из пакетов, сухари, семечки, чай). Сбор лагеря.

11⁰⁵-11³⁰ спускаемся вниз по Хэлгину, смотрим место, где можно измерить расход воды.

11³⁰-12¹⁰ после рекогносцировки решили поискать другое место, тН 1495, 1871 м, $t^{\circ}=24^{\circ}\text{C}$, БД 757.9 мм рт. ст., АД 604.2 мм рт. ст., падает.

12¹⁰-12⁴⁰ переход до границы леса. 12⁴⁰-12⁵⁰ 1872 м, граница леса. Отдых. От лагеря прошли 3 км. 12⁵⁰-13⁵⁰ очередной переход, отдых, переход от тропы к руслу реки. Здесь, перед озером удобное место для измерения расхода воды. 13⁵⁰-15²⁰ тН 1498, 1446 м. Измерение расхода воды, взятие проб. $t^{\circ}=24^{\circ}\text{C}$, БД 757.9 мм рт. ст., АД 604.2 мм рт. ст., не меняется.

Больше часа Прокопий несколько раз пересекал русло реки с ледяной водой, диктовал результаты измерения Александру.

Пока Прокопий и Александр проводили измерения, Евгений развел костер и приготовил обед. 15²⁰-15³⁰ перекус (чай на костре, конфеты, шоколад).

15³⁰-18²⁰ переход до верхних, меньших, камней у озера Додо-Хухэ-Нур. Эти камни не так сложны, чем которые будут ниже у этого же озера через 400 м.

18³⁰-19³⁵ отдых у камней и переход по ним, шли от лагеря 4 часа, прошли 9 км.

19³⁵-19⁵⁵ 1825 м. Большой отдых перед самым трудным переходом. $t^{\circ}=25^{\circ}\text{C}$, БД 758.7 мм рт. ст., АД 608.4 мм рт. ст., ровно.

19⁵⁵-20⁰⁵ переход через следующую россыпь больших камней с несколькими отдыхами, на берегу кем-то брошена резиновая дырявая лодка. После камней решили остановиться на ночлег, так как это был трудный переход по камням (рис. 15, 16).



Рис. 15. Вид каменной россыпи. Фото Е. Белобородова 0021, 10.08.2024.

Fig. 15. View of a stone placer. Photo by E. Beloborodov 0021 from 10.08.2024.



Рис. 16. Берег озера Додо Хухэ. Фото Е. Белобородова 0027, 10.08.2024.

Fig. 16. The shore of Dodo Huhe Lake. Photo by E. Beloborodov 0027, 10.08.2024.

20⁰⁵-23³⁰ установка лагеря. 1820 м, светит солнце, $t^{\circ}= 24^{\circ}\text{C}$, БД 759.0 мм рт. ст., АД 608.8 мм рт. ст., ровно. Костер. Ужин (чечевица, кисель, чай, конфеты). Устройство в палатке. В этом месте восход солнца 6:00, заход 21:00.

11 августа, воскресенье, переход камни ниже озера – устье Хэлгина

7⁰⁰-7⁴⁵ 1809 м, $t^{\circ}= 9^{\circ}\text{C}$; БД 756.8 мм рт. ст., АД 608.7 мм рт. ст., падает, ясно.

7⁴⁵-10¹⁵ костер, завтрак (пюре картофельное, чай, шоколад, сахар). Сбор лагеря.

10¹⁵-10⁵⁰ первый переход и отдых, решили проходить по 1 км и отдыхать 5 мин. тН 1505,

1791 м, $t^{\circ}= 13^{\circ}\text{C}$, БД 757.8 мм рт. ст., АД 610.4 мм рт. ст., ровно.

10⁵⁰-11³⁵ тН 1506, 1650 м. Второй переход и отдых $t^{\circ}= 14^{\circ}\text{C}$, БД 757.8 мм рт. ст., АД 610.4 мм рт. ст., ровно. По дороге попалось много грибов.

11³⁵-13³⁰ тН 1507, 1768 м. Третий переход до брода Хутэл и обед за бродом на поляне с кострищем, вышли на хорошую конную тропу. Хотя перед этим сбились с тропы и вышли чуть ниже брода, но все равно удачно переправились через бурный приток Хэлгинэ-Хутэл. $t^{\circ}= 18^{\circ}\text{C}$, БД 756.7 мм рт. ст., АД 611.1 мм рт. ст., падает.

13³⁰-14¹⁰ тН 1508, 1656 м. Четвертый переход с отдыхом. Попадается много голубики, остановились поесть ее. $t^{\circ}= 35^{\circ}\text{C}$, БД 757.9 мм рт. ст., АД 612.3 мм рт. ст.

14¹⁰-14⁵⁰ тН 1509, 1755 м. Пятый переход с отдыхом. $t^{\circ}= 32^{\circ}\text{C}$, БД 757.8 мм рт. ст., АД 612.8 мм рт. ст., растет. Погода хорошая.

14⁵⁰-16²⁰ тН 1510, 1685 м. После 6-го перехода решили перекусить. Отдых, чай (чай, семечки, конфеты). $t^{\circ}= 30^{\circ}\text{C}$, БД 755.8 мм рт. ст., АД 616.3 мм рт. ст., растет.

16²⁰-17⁰⁰ тН 1511, 1667 м. 7-й переход.

17⁰⁰-17²⁵ последний, 8-й переход. Вышли к базовому лагерю на устье р. Хэлгин. Прошли в течение дня 9 км за 3.5 ходовых часа.

17²⁵-18¹⁵ тН 1512, 1560 м. Отдых. $t^{\circ}= 29^{\circ}\text{C}$, БД 754.6 мм рт. ст., АД 625.1 мм рт. ст., падает. Установка лагеря. Перекус (костровой чай, конфеты).

18¹⁵-21⁴⁵ перетаскивание вещей из схрана. Все целое, видимо ни медведь, ни люди не приходили. Костер, заготовка дров. Прокопий заболел (сказалась вредная работа гидролога). Евгений пошел рыбачить. Костер, ужин (уха, лук, хлеб, чай, сухари). Разговоры у костра, дневниковые записи.

21⁴⁵-22⁰⁰ устройство в палатке, дневниковые записи. Грозные облака, как обычно, идут с верховий Хэлгина, $t^{\circ}= 19^{\circ}\text{C}$, БД 756.0 мм рт. ст., АД 625.7 мм рт. ст., падает.

Итог похода по Хэлгину: в 10 точках отобраны пробы воды, а на леднике Ячевского льда и фирна, в двух створах измерен расход воды (рис. 17, 18).

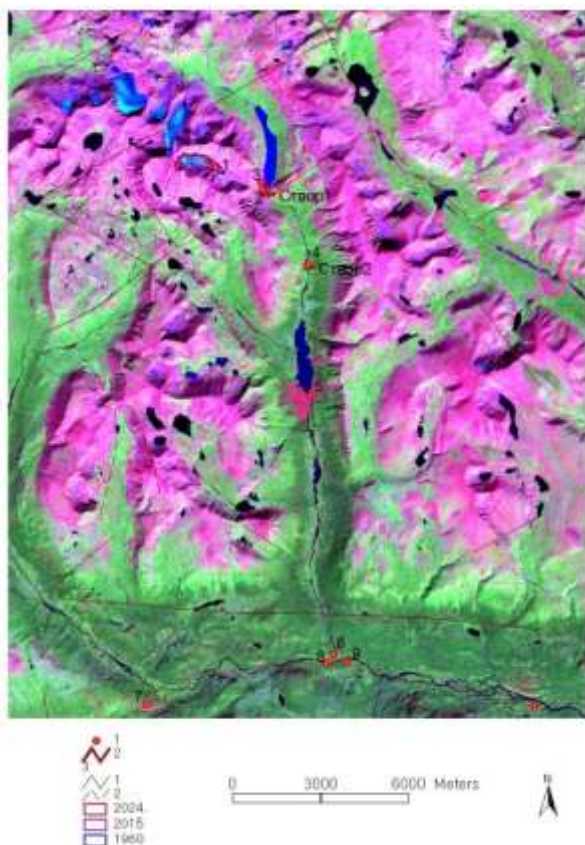


Рис. 17. На фоне космоснимка Landsat-8 16.08.2024 показаны места отбора проб и створы расхода воды. 1 – места взятия проб (число – порядковый номер пробы); 2 – створы измерения расхода; 3 – разломы по геологической карте; 2024, 2015, 1960 – состояние ледника по данным 2024, 2015 и 1960 г.

Fig. 17. Against the background of the Landsat-8 satellite image of 16.08.2024, sampling sites and water flow sites are shown. 1 – places of sampling (number – serial number of the sample); 2 – flow measurement sections; 3 – faults on the geological map; 2024, 2015, 1960 – the state of the glacier according to 2024, 2015 and 1960.

Предварительные анализы воды показали, что сильно отличаются воды ледника, родника из морены и Хэлгина между озерами от остальных вод. Не маловажную роль в этом играет сеть разломов (рис. 18). Они влияют на разгрузку или поглощение стока, отсюда может быть разный химический состав воды.



Рис. 18. Схема территории исследования: 1 – места взятия проб (число – порядковый номер пробы); 2 – створы измерения расхода; 3 – разломы по геологической карте; 4 – вершины; 5 – реки; 6 – озера; 2024, 2015, 1960 – состояние ледника Ячевского по данным 2024, 2015 и 1960 г.

Fig. 18. Scheme of the study area: 1 – places of sampling (number – serial number of the sample); 2 – flow measurement sections; 3 – faults on the geological map; 4 – topos; 5 – rivers; 6 – lakes; 2024, 2015, 1960 – the state of the Yachevsky glacier according to 2024 data. 2015 and 1960.

По Каталогу ледников СССР (1973) площадь открытой части ледника Ячевского была 0.989 км², по топокарте 1960 г. – 0.619 км², а в данном 2024 г. – 0.420 км².

12 августа, понедельник, устье Хэлгина, дневка. Переезд ниже по Тиссе 500 м

7⁰⁰-10⁵⁰ тН 1513, 1570 м, t°= 13 °С, БД 758.6 мм рт. ст., АД 627.7 мм рт. ст., ровно, ясно. Костер, завтрак (пшенная каша из пакетов, хлеб, чай, конфеты, мин. вода, принесенная проводниками с истоков Тиссы).

10⁵⁰-12³⁵ дождь. Сидим в палатках. Но это как раз время собрать пробы атмосферных осадков. Проба № 8.

12³⁵-14³⁵ костер, обед (макаронны, раст. масло, хлеб, сухари, чай со сгущенкой).

14³⁵-18²⁰ Евгений ушел ловить рыбу в Тиссе у устья Хэлгина, пасмурно, но есть просветы, высокая облачность. Александр и Прокопий остались у костра беседовать.

Александр пошел выше брода через Хэлгин, фотографировал рыбалку Евгения. Потом чистка рыбы (хариусов). Прокопий и Евгений взялись сортировать улов: крупную рыбу на засолку, мелкую на уху. Но с засолкой проблема, тепло, рыба успевает дать душок, прежде чем засолится.

18²⁰-21⁵⁰ костер, чистка и жарка рыбы. Чай. $t^{\circ}= 13^{\circ}\text{C}$, БД 760.8 мм рт. ст., АД 630.1 мм рт. ст., растет. Пасмурно.

13 августа, вторник, устье Хэлгина. Отъезд (выход на лодках 600 м)

7³⁰-8¹⁵ тН 1517, $t^{\circ}= 14^{\circ}\text{C}$; БД 762.6 мм рт. ст., АД 630.7 мм рт. ст., падает; сильный туман.

8¹⁵-9⁴⁵ костер, завтрак (ячка, чай, сухари, конфеты).

9¹⁵-11³⁰ сбор лагеря, рыбаки готовят снасти. Погода неопределенная. Можно перефразировать известную фразу: «Нам нельзя ждать милости от природы, нужно быстрее сваливать!». Но еще есть работа – нужно взять пробы из Тиссы на другом берегу от устья Хэлгина. Поэтому «первым делом «самолеты», а рыбалочка, рыбалочка потом». Высокая облачность 90 %, солнце светит через облака. Ветер слабый. Росы не было.

11³⁰-12¹⁵ рыбаки закончили править снасти. Прокопий подписал бутылки для проб. Окончательные сборы, палатки сняты. $t^{\circ}= 23^{\circ}\text{C}$, БД 761.0 мм рт. ст., АД 630.2 мм рт. ст., падает; туман поднялся.

12¹⁵-13⁵⁰ костер, обед (макаронны, раст. масло, хлеб, сухари, чай, конфеты). Последняя подготовка к погрузке в лодки.

13⁵⁰-16⁰⁰ ходьба с лодкой ЛАС300 к устью Хэлгина. Попытка измерить расход воды в устье Хэлгина не удалась. Течение очень сильное и глубоко. Прокопий взял пробу № 9 у устья и на другом берегу Тиссы пробу № 10 (рис. 19).



Рис. 19. Борьба Прокопия в устье Хэлгина со стремительным потоком. Нужно взять пробы № 9 и 10. Фото 09086, 13.08.2024.

Fig. 19. Procopius' struggle at the mouth of the Helgin with a rushing stream. You need to take samples No. 9 and 10. Photo 09086, 13.08.2024.

16⁰⁰-16¹⁰ Евгений ушел на ЛАС500 за скалы к месту посадки Александра. Тисса в этом месте мелкая, есть перекааты.

16¹⁰-16²⁰ Александр побежал 500 м за скалы к месту посадки, т. к., если сесть здесь, то на перекаате придется выскакивать в воду, если лодка сядет на камни.

16²⁰-19⁰⁵ начался дождь, морось. У рыбаков клев, не хотят дальше плыть. За скалой небольшая ровная поляна у берега, на высоком берегу есть запас дров и кострище под кедром. Решили ставить лагерь, дождь усиливается. $t^{\circ}= 20^{\circ}\text{C}$, БД 760.4 мм рт. ст., АД 630.4 мм рт. ст., падает. Пережидаем дождь в палатках, он то стихает, то усиливается. Прокопий взял топор у Александра и пошел разводить костер.

19⁰⁵-22³⁰ костер, сушка одежды, ужин (уха, хлеб, сухари, чай), тН 1519, 1561 м, $t^{\circ}= 14^{\circ}\text{C}$, БД 762.2 мм рт. ст., АД 631.2 мм рт. ст., растет). Пасмурно, моросит дождь.

14 августа, среда, лагерь ниже устья Хэлгина 600 м – устье Обо-Гол

8³⁰-9⁰⁵ подъем, ясно, $t^{\circ}= 14^{\circ}\text{C}$; БД 763.2 мм рт. ст., АД 632.0 мм рт. ст., растет.

9⁰⁵-11³⁰ костер, завтрак (пшенка, раст. масло, хлеб, чай, конфеты, сухари). Сбор лагеря.

11³⁰-16⁰⁰ бег по тропе Александра и сплав Евгения и Прокопия по Тиссе. Тисса мелкая, есть перекааты, поэтому решили, что

Александр пробежит по тропе ниже и сядет потом в лодку к Евгению. Точно место не оговорили. Какое-то время Александр отслеживал лодки, но потом они пропали из вида. Добежал до брода Шара-Тырендыта, перед бродом за 500 м тропа идет по старому зимнику, подходя ближе к берегу Тиссы. Здесь и вода в реке была спокойная. Где брод, там Тисса отходит в сторону, поэтому Александр пробежал дальше до левого склона долины. Со склона смотрел нет ли лодок, свистел в свисток. Вернулся обратно к броду, решил выйти к устью вдоль речки, но вдоль русла Шара-Тырендыта непроходимая чаща. Снова вышел к руслу Шара-Тырендыта, перебрел на правый берег, стал выбираться к тропе. Пересек еще несколько русел и стариц. По тропе-зимнику побежал обратно, там, где тропа подходит к Тиссе, остановился и свистел, тишина, не видно рыбаков. Присмотрел место, где удобно сесть в лодку.

Побежал дальше в сторону Хэлгина, добежал до предыдущей стоянки. Повернул и побежал по тропе обратно, свернул к берегу Тиссы, вдоль берега идет несколько звериных параллельных троп. Одна совсем у берега, вторая, немного дальше от берега, а вдоль склона и по склону основная конная тропа. На другой стороне на р. Обо-гол, правом притоке Тиссы, интересный небольшой водопад (рис. 20). Этот водопад Евгений не заметил, хотя проплывал рядом по руслу Тиссы.



Рис. 20. Водопад на реке Обо-гол. Фото 09178, 14.08.2024.

Fig. 20. Waterfall on the Obo-gol River. Photo 09178, 14.08.2024.

По звериной тропе вдоль берега вышел на старый зимник. Попутно попалась моховая полянка с клюквой, поклевал клюкву. По зимнику вышел на конную тропу, свистнул в

свиток и услышал отклик товарищей. Пока Александр бегал по тропе туда-сюда Евгений и Прокопий порыбачили и стали искать пропавшую лодку.

16⁰⁰-16⁰⁵ встреча на тропе. Прокопий и Евгений в этом месте причалили и вышли на тропу. Конечно, Александр и Прокопий с Евгением переживали, хотя потеряться было негде, тропа то одна. На лодках плыть дольше, река виляет, а тропа срезает изгибы, да и бежать быстрее. Рыбаки еще и порыбачили. Но все равно не приятно, и Евгений сказал, что больше не выпустит из лодки Александра. Вместо 3 км Александр набегал 10 км. Остановились, не доходя 1 км до брода Шара-Тырендыта.

16⁰⁵-19⁰⁰ костер, обед (гречка и уха, хлеб, чай, конфеты).

19⁰⁰-22³⁰ установка лагеря, заготовка дров, дров много – это хворост с лиственниц. Рыбаки разгружали лодки, сушили весла. Костер, ужин (уха, хлеб, чай со сгущенкой).

15 августа, четверг, лагерь между Обо-Гол – Шара-Тырендыта

8⁰⁰-9⁴⁰ тН 1522, 1547 м, t°= 8 °С; БД 761.7 мм рт. ст., АД 635.9 мм рт. ст., растет.

9⁴⁰-10⁵⁵ костер, завтрак (каша рисовая, раст. масло, чай со сгущенкой).

10⁵⁵-11⁰⁵ рыбаки Евгений и Прокопий приготовили снасти и ушли на промысел рыбы, Александр остался заготавливать дрова.

11⁰⁵-15⁰⁰ пока они ходили Александр чистил рыбу, поддерживал костер, устроил 2-й завтрак (рыба с геркулесом, хлеб), сушил вещи, дополнительно заготавливал дрова, начал писать статью об этом маршруте, до 4 августа дописал и для разминки заготовил еще дрова.

15⁰⁰-16⁴⁵ пришли рыбаки, неудачная рыбалка, ходили вверх по Тиссе 3 км. Костер, обед (макароны, раст. масло, хлеб, чай со сгущенкой).

16⁴⁵-17³⁰ Александр продолжил писать статью, а рыбаки сушились.

17³⁰-19⁴⁰ Александр с Евгением разговаривали у костра, а Прокопий ушел рыбачить вниз по Тиссе, надеясь все же напасть на косяк рыб. Но рыбалка снова не удалась. Евгений пошел к реке рыбачить, а Прокопий начал чистить рыбу, ранее пойманную.

Александр заготавливал дрова, навалил огромную кучу хвороста.

19⁴⁰-22⁰⁰ костер, ужин (уха, хлеб, чай со сгущенкой). В палатке, дневниковые записи. тН 1523, 1546 м, t°= 12 °С, БД 763.7 мм рт. ст., АД 633.6 мм рт. ст., растет, ясно.

16 августа, пятница, лагерь Шара-Тырендыта – остров у черной скалы

8⁰⁰-10⁰⁰ t°= 10 °С, БД 762.8 мм рт. ст., АД 634.1 мм рт. ст., падает чуть, ясно. Сборы в палатке. Костер, завтрак (пшено, геркулес, раст. масло, чай, конфеты).

10⁰⁰-11¹⁵ сбор лагеря, подкачка лодок.

11¹⁵-11³⁵ Прокопий и Евгений пошли на лодках, а Александр побежал по тропе ниже по течению 700 м. Там, где зимник подходит к левому берегу, это намеченное Александром спокойное место для посадки.

11³⁵-11⁴⁰ тН 1524, 1545 м. Место посадки Александра в лодку ЛАС500 к Евгению.

11⁴⁰-13⁰⁰ спустились вниз по реке, до косы на правом берегу. Рыбакам приглянулась эта коса, остановились на рыбалку. Рыба немного ловилась большая и маленькая (рис. 21). Прокопий наладил снасть на ленка и пытался в ямке у противоположного берега выловить его.



Рис. 21. Берег р. Тисса. Небольшой улов. Евгений чистит рыбу. Фото 09009, 10.08.2024.

Fig. 21. The bank of the Tisza River. A small catch. Evgeny cleans the fish. Photo 09009, 10.08.2024.

13⁰⁰-16⁰⁰ немного проплыли и снова остановились на рыбалку. Рыбалка. Уже нужно было бы перекусить, но у Прокопия начался клев, не может оторваться, а у него котелки.

Александр наготовил много дров подготовил кострище, но Прокопия так и не удалось дозваться. Евгений и Александр спустились немного ниже до следующей косы и решили приготовить чай на газовой горелке. Когда начали готовить подплыл Прокопий.

16⁰⁰-17⁴⁰ тН 1526, 1527 м. Коса на Тиссе перед черной скалой, рыбалка. Обед (суп, хлеб, чай, сгущенка).

17⁴⁰-18¹⁰ двинулись дальше. Александр сидел на носу лодки и греб 1.5 км, а Евгений сидел на корме и подправлял лодку. Доплыли до острова напротив скалы.

18¹⁰-19⁰⁰ тН 1527, 1521 м. Остановка на острове, хорошее обжитое место, выгрузка. Дневниковые записи. t°= 29 °С, БД 758.8 мм рт. ст., АД 630.7 мм рт. ст., падало, потом выровнилось, ясно. Установка лагеря.

19⁰⁰-21⁰⁰ костер, ужин (уха, спагетти, хлеб, чай, сгущенка, конфеты).

21⁰⁰-21⁵⁵ подплыли туристы (рис. 22) с низа на аэролодке: Вадим, Дмитрий и Константин. Спросили на долго ли здесь отдыхать, и когда узнали, что завтра утром мы отплываем, попросили освободить их насиженное место в центре поляны. Александр поставил палатку в стороне, а Евгению и Прокопию пришлось переустановить палатку. На это место туристы поставили большую палатку-шатер, вдоль стен раскладушки, кресла, стол, освещение, рядом с палаткой холодильник, генератор.



Рис. 22. Аэролодка подходит к острову. Фото 09306, 16.08.2024.

Fig. 22. The airboat approaches the island. Photo 09306, 16.08.2024.

Разговорились, оказалось, что с Александром есть общий знакомый Артем Кухаренко. Начались съемки, чтобы потом послать Артему. Туристы накрыли на стол, пригласили нас. Ужин 2 (свежий хлеб, перепелиные яйца, квас, самогон, рыба) Угостили ронетом Александра, он поделился с коллегами.

21⁵⁵-23³⁰ устройство в палатке. $t^{\circ}= 14^{\circ}\text{C}$, БД 759.0 мм рт. ст., АД 631.9 мм рт. ст., растет, ясно.

17 августа, суббота, лагерь, остров у черной скалы – Шутхулай нур

6³⁰-7³⁰ тН 1529, 1521 м, $t^{\circ}= 6^{\circ}\text{C}$, БД 758.9 мм рт. ст., АД 633.1 мм рт. ст., чуть растет, ясно.

7³⁰-9¹⁵ костер, завтрак (просяная каша в пакетах, отвар от каши, чай, блины). Соседи туристы настряпали блинов и угостили. Сбор лагеря. Погрузка в лодки.

9¹⁵-11¹⁰ прошли до р. Шутхулай, в устье на левом берегу Тиссы взяли пробы воды.

11¹⁰-12⁰⁰ тН 1530, 1520 м. Взятие проб (рис. 23): $t^{\circ}= 16.7^{\circ}\text{C}$ воздуха, $t^{\circ}= 11.2^{\circ}\text{C}$ воды, БД 759.8 мм рт. ст., АД 632.9 мм рт. ст., ясно.



Рис. 23. Устье реки Шутхулай. Фото 09384, 17.08.2024.

Fig. 23. The mouth of the Shuthulay River. Photo 09384, 17.08.2024.

12⁰⁰-15⁵⁰ тН 1532. Переход 11.5 км от черной скалы. Рыбалка, вроде как хорошая, а в яме может стоять ленок. Обед (рыба, хлеб, сухари, чай со сгущенкой). Сборы и погрузка в лодки.

15⁵⁰-17⁴⁰ прошли до озера Шутхулай Нур.

17⁴⁰-17⁵⁰ тН 1533, 1518 м. Отдых, лодки спускают поэтому необходимо подкачивать. $t^{\circ}= 14^{\circ}\text{C}$, БД 757.5 мм рт. ст., АД 630.8 мм рт. ст., ясно.

17⁵⁰-19⁴⁰ прошли оз. Шутхулай, Александр и Евгений усиленно гребли и оторвались от Прокопия.

19⁴⁰-20¹⁰ тН 1534, 1515 м. Установка лагеря между озерами Шутхулай и Дозор-Нур. $t^{\circ}= 15^{\circ}\text{C}$, БД 758.3 мм рт. ст., АД 631.6 мм рт. ст., ровно, ясно. Заготовка дров и пр. Костер, ужин (рис, чай, протеиновый батончик из заначки Евгения). Устройство в палатке, зарядка устройств, дневниковые записи.

18 августа, воскресенье, ниже оз. Шутхулай нур – ниже устья Сорхой

7⁰⁰-7⁴⁰ $t^{\circ}= 10^{\circ}\text{C}$, БД 763.7 мм рт. ст., АД 634.8 мм рт. ст., растет, ясно.

7⁴⁰-11²⁵ костер, завтрак (рис, чай), сушка вещей, подкачка лодок, подготовка тары для проб воды.

11²⁵-13¹⁵ переход по оз. Дозор-Нур, пришлось погрести. Шли 1 час 45 мин. Александр и Евгений активно вдвоем гребли и оторвались от Прокопия на 21 мин.

13¹⁵-13⁵⁵ тН 1535, 1507 м. Отдых. Место у низа озера, где наверху летник и была наша стоянка, когда шли вверх. $t^{\circ}= 21^{\circ}\text{C}$, БД 758.6 мм рт. ст., АД 632.4 мм рт. ст., чуть растет, ясно.

13⁵⁵-14³⁵ переход до устья Саган-Горхон гол. 14³⁵-17¹⁰ встали в устье, в дельте, Саган-Горхон, он действительно кажется белым (саган по-бурятски – белый). Взяли пробы воды, Евгений рыбачил и удачно. Встали ниже устья на обед (рыба). Рыбаки удили, Александр варил на костре.

17¹⁰-19⁴⁵ переход до устья Сорхой. Взятие проб, рыбалка. От устья стали появляться тополя. Состав леса в пойме Л9Т1 левый берег, Л5Т5 прав. берег. На террасе Л10 (только лиственница). Спустились чуть ниже устья и снова рыбалка. Уже вечерет, спускаемся

ниже ищем место для стоянки, проходим перекаты (далее перекаты будут страшнее) (рис. 24).



Рис. 24. Проходим шиверу. Фото 09452, 18.08.2024.

Fig. 24. We pass the shivera. Photo 09452, 18.08.2024.

19⁴⁵-20⁴⁰ тН 1540, 1465 м. Нашли хорошее место, есть кострище, дрова. $t^{\circ}= 22^{\circ}\text{C}$, БД 756.6 мм рт. ст., АД 634.2 мм рт. ст., ровно, ясно. Установка лагеря.

20⁴⁰-23⁰⁰ костер, ужин (уха, сухари, чай). Сушка одежды, мокрая от волн, захлестывавших лодку на перекатах.

19 августа, понедельник, ниже устья Сорхой – Балакта – Орлик – Боксан

7³⁰-10⁵⁰ тН 1541, 1463 м, $t^{\circ}= 12^{\circ}\text{C}$, БД 760.6 мм рт. ст., АД 637.0 мм рт. ст., растет, ясно, но туман. Костер, завтрак (рис, чай, сахар). Сбор лагеря. Погрузка, поддув лодок.

10⁵⁰-12²⁰ рафтинг по Тиссе. И остановка на подкачку лодок. В основном подкачиваем ЛАС500.

12²⁰-14⁰⁰ очередной переход и подкачка. ТН 1543, 1392 м. $t^{\circ}= 14^{\circ}\text{C}$, БД 758.6 мм рт. ст., АД 641.4 мм рт. ст., падает, обл. 100 %. До Балакты 6 км.

14⁰⁰-14⁴⁰ переход до Балакты. Река более спокойная, шиверы не такие бурные.

14⁴⁰-15⁰⁰ тН 1544, 1388 м. Финиш рафтинга перед Балактой, тоже место откуда стартовали вверх по Тиссе (рис. 25). Разгрузка. Пока ждали Виктора на Урале подъехал Валера с 2-мя спутниками, поехали на сенокос.



Рис. 25. Рафтинг закончен: А. Китов, Е. Белобородов. Фото П. Бадминова 0001, 19.08.2024.

Fig. 25. Rafting is finished: A. Kitov, E. Beloborodov. Photo by P. Badminov 0001, 19.08.2024.

15⁰⁰-16⁰⁰ приехал Виктор с двумя соседями из Балакты на УАЗике-таблетке. Сдувание лодок, погрузка.

16⁰⁰-16⁴⁰ проехали до моста в Балакте. Проводники достали напитки за встречу, закуску. Прокопий угостил их соленой рыбой.

16⁴⁰-16⁵⁰ тН 1545. Взятие проб из р. Балакта (рис. 26).

16⁵⁰-17¹⁰ переезд до брода на Оке.

17¹⁰-17³⁰ переправа на лодках. Перевезли с правого берега на левый подарок от женщин племяннику Виктора (перевоз Евгений на ЛАС300).



Рис. 26. П. Бадминов берет пробы воды из р. Балакта. Фото 09574, 19.08.2024.

Fig. 26. P. Badminov takes water samples from the Balakta River. Photo 09574, 19.08.2024.

17³⁰-18¹⁰ тН 1546. Погрузка вещей в джип Прокопия. Попрошались с Дальжиновым Александром и Раджаной. Перед этим заехали домой к Сане, они устроили нам перекус (хлеб белый домашней выпечки, сметана, чай с молоком, сахар). Они также рассказали, что в Орлике было похолодание до -5 °С. У нас в горах было значительно теплее.

Мы немного задержались в походе (около недели) и не прибыли в Орлик в назначенное время. Выяснилось, что Раджана позвонила в ИЗК. Там забеспокоились, что нас нет в срок, но в МЧС объяснили, что время выхода установлено на 30 августа и не стоит беспокоиться.

18¹⁰-20³⁰ поехали из Орлика до переправы на Боксон. Здесь нужно будет взять еще одну пробу воды.

20³⁰-21⁰⁰ тН 1547, 1544 м. Установка лагеря на правом берегу Оки. $t^{\circ}= 19$ °С, БД 759.1 мм рт. ст., АД 638.1 мм рт. ст., падает, пасмурно. Готовили на газовой плитке в багажнике джипа. Пошел дождь. Ужин (суп доширак, рис, сухари, конфеты, чай).

20 августа, вторник, Боксан – Иркутск

5³⁰-7³⁰ тН 1548, 1544 м, $t^{\circ}= 12$ °С, БД 763.4 мм рт. ст., АД 633.7 мм рт. ст., растет, туман.

7³⁰-8²⁵ тН 1549. Берег р. Ока. Сбор лагеря, взятие проб из Оки, приготовление на газовой плите.

8²⁵-10³⁵ завтрак (суп доширак, сухари, чернослив (зачатка Евгения), чай, сахар, конфеты). Сбор лагеря и погрузка.

10³⁵-12¹⁵ переезд до кафе у Бел. Иркута. По дороге вверху ущелья Черного Иркута пришлось на немного остановиться. Тракт перекрыт. На крутом склоне берега Иркута лежал перевернувшийся грузовик, вероятно в тумане не справился с управлением. Уже подъехал кран. Но нас пропустили. Задержки не было. Зашли в кафе. Евгению и Прокопию не понравились дорогие позы, решили ехать до Монд.

12¹⁵-12⁵⁰ переезд до п. Монды, в кафе повар сказал не смотрите в меню всего этого нет. Решили ехать до Жемчуга.

12⁵⁰-15⁰⁰ переезд в Жемчуг (Вышка).

15⁰⁰-15⁴⁵ Жемчуг, обед: у Александра (салат витаминный, блины, сметана, чебурек с

овощами, чай с лимоном); у Евгения и Прокопия что-то подобное, но с мясом.

15⁴⁵-19⁴⁵ переезд в Иркутск.

19⁴⁵-19⁵⁵ выгрузка Александра, Прокопий и Евгений поехали дальше разгружаться. Экспедиция к пику Топографов закончена.

Заключение

В экспедиции был пройден маршрут: на автомашине – 900 км, пешком в сопровождении каравана лошадей – 75 км, пешком с полной выкладкой – 40 км, сплав на лодках – 79.7 км. Взято 15 проб (комплекс: на содержание геля, газов N_2 и O_2 , уран, полный химический анализ, электропроводность, температура). Измерен расход воды реки Хэлгин в двух створах. По результатам химического анализа проб воды из р. Хэлгин, оз. Дэдэ-Хухэ-Нур, оз. Додо-Хухэ-Нур, стока в основании морены и ледниковых вод можно сказать, что все они относятся в основном к ультрапресным гидрокарбонатным кальциевым с минерализацией от 3 до 59.5 мг/л, что характерно для высокогорных районов Восточного Саяна, однако ледниковый сток фильтруясь через моренные отложения по своему составу трансформируется из гидрокарбонатных натриево-калиевых с минерализацией 3 мг/л в сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые с минерализацией 27 мг/л. Справедливости ради надо отметить, что сток из моренных отложений всего около 15 л/с и по объему не сопоставим с речным стоком равным 1.5 м³/с в истоке р. Хэлгин из оз. Дэдэ-Хух-Нур и 4.5 м³/с в 2 км ниже по течению. Предварительный анализ данных говорит, что доля ледникового стока незначительна.

По результатам дистанционного исследования ледник Ячевского (№ 20) в 1960-х годах имел площадь открытой части 0.62 км², в 2015 г. – 0.53 км², а в настоящее время (2023 г.) – 0.44 км², (2024 г.) – 0.42 км². Сократился по площади на 32 %. Ледник Топографов (№ 18) более устойчив, и с 1960-х (1.1 км²) сократился до 2024 г. (0.9 км²) на 18 %.

Отснято 14 видеофильмов (620 Мб), 1186 фотографий (6.8 Гб).

Источник финансирования

Исследование выполнено за счет средств государственного задания (№ государственной регистрации темы: АААА-А21-121012190056-4).

Литература

Каталог ледников СССР: Т. 16, Ангаро-Енисейский район. Выпуск 1. Енисей. Части 3–5. Выпуск 2. Ангара. Часть 1. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 64 с.

Китов А.Д. Экспедиция 2014 года к ледникам пика Топографов / А.Д. Китов, К.А. Вишняков, Е.Н. Иванов, Н.В. Филатов // Вестник кафедры географии ВСГАО. 2014. № 2–3. С. 84–89. Электрон. версия печат. публ. Режим доступа: http://kafgeo.igpu.ru/bulletin10/kitov14_2-3b.pdf (дата обращения: 16.09.2014).

Обиняков В. Экспедиция ЦНИИГАиК к пику Топографов (Восточный Саян) // Геодезия и картография. 2018 // Электрон. версия печат. публ. Режим доступа: <https://geocartography.ru/vestnik/pervaya-polosa/ekspediciya-cniigaik-k-piku-topografov-vostochnyy-sayan> (дата обращения: 11.02.2025).

Обиняков В.Б. Экспедиция ЦНИИГАиК к пику Топографов (Восточный Саян) // Геодезия и картография // Вестник геодезии и картографии. 2018. № 3. С. 7. Электрон. версия печат. публ. Режим доступа: <https://cgkipd.ru/upload/iblock/f0d/f0d04d3d8071f268a7029e88b02afb07.pdf> (дата обращения: 11.02.2025).

Китов Александр Данилович,

кандидат технических наук,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1,
Институт географии им. В.Б. Сочавы, СО РАН,
старший научный сотрудник,
тел.: (3952) 42–74–72,
email: kitov@irigs.irk.ru

Kitov Aleksandr Danilovich,

Candidate of Technical Sciences,
664033, Irkutsk, Ulaanbaatarskaya st., 1,
Sochava Institute of Geography, SB RAS,
Senior Research Fellow,
tel.: (3952) 42–74–72,
email: kitov@irigs.irk.ru

Бадминов Прокопий Сократович,

кандидат геолого-минералогических наук,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128,
Институт земной коры СО РАН,
научный сотрудник,

Разумовский А.И. Экспедиция к 70-летию ГУГК СССР на пик Топографов // Геопрофи, 2018, № 3, с. 50–53.

References

Catalogue of Glaciers of the USSR: Vol. 16, Angara-Yenisei District. Issue 1. Yenisei. Parts 3–5. Issue 2. Angara. Part 1. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1973, 64 p. (in Russ.).

Kitov A.D., Vishnyakov K.A., Ivanov E.N., Filatov N.V. Expedition of 2014 to the glaciers of the Topographers Peak. 2014. No. 2–3. P. 84–89. Electron. Print version. publ. Mode of access: http://kafgeo.igpu.ru/bulletin10/kitov14_2-3b.pdf. (in Russ.). (date of access: 16.09.2014).

Obinyakov V. Expedition of TsNIIGAiK to the Peak of Topographers (Eastern Sayan) // Geodesy and cartography. <https://geocartography.ru/vestnik/pervaya-polosa/ekspediciya-cniigaik-k-piku-topografov-vostochnyy-sayan>. (in Russ.). (date of access: 10.02.2024)

Obinyakov V.B. Expedition of TsNIIGAiK to the Peak of Topographers (Eastern Sayan) // Geodesy and Cartography // Bulletin of Geodesy and Cartography, 2018. No. 3. P. 7. <https://cgkipd.ru/upload/iblock/f0d/f0d04d3d8071f268a7029e88b02afb07.pdf>. (in Russ.). (date of access: 10.02.2024).

Razumovsky A.I. Expedition to the 70th anniversary of the GUGK of the USSR to the peak of Topographers. Geoprofi, 2018, No. 3, pp. 50–53 (in Russ.).

тел.: 89025139137,
email: prokop_sbade@mail.ru

Badminov Prokopy Sokratovich,
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
664033, Irkutsk, Lermontov st.,
128, Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Researcher,
tel.: 89025139137,
email: prokop_sbade@mail.ru

Правила для авторов

В журнале «Геология и окружающая среда» публикуются материалы научно-образовательного направления, отражающие теоретические, методические и практические результаты научной деятельности молодых и зрелых геологов и географов — научных сотрудников, преподавателей, аспирантов, студентов магистерской и бакалаврской подготовки. Кроме научных статей, в журнале помещаются рецензии и отзывы на монографии, учебники, учебные пособия, сборники научных трудов. Важное место отводится тематическим обзорам и событиям научно-учебной деятельности вузов по профилю издания. Важной задачей журнала является опубликование научных статей (в авторстве или соавторстве) студентов, аспирантов и молодых научных сотрудников.

Ответственность за достоверность изложения фактов в публикуемых материалах, плагиат (вольный или невольный) несут авторы. Все заимствованные в рукописи элементы (графика, текст, первичные данные) должны обязательно сопровождаться соответствующими корректными ссылками или разрешением правообладателя.

Мнение редколлегии может не совпадать с мнением авторов. Журнал является рецензируемым. Опубликование рукописей бесплатное. Гонорар авторам не выплачивается.

Рукописи статей присылаются на электронные адреса редакции или ответственного секретаря: kaf-dinamgeol@mail.ru или igrug@mail.ru. Работа должна быть полностью подготовлена для печати. Редакция оставляет за собой право вносить правки по согласованию с авторами. Приемка работ в рукописном или бумажном виде, требующем технического оформления, возможна за дополнительную плату с заключением договора.

Максимальный объем научной статьи — 1.5 печатных листа или 24 страницы с нижеследующими параметрами. На первой странице указывается УДК, далее на русском и английском языках приводятся: название статьи; инициалы и фамилия авторов, название учреждения; аннотация и ключевые слова. Аннотация должна содержать не более 15 строк, количество ключевых слов — не более 8.

Шрифт основного текста — Times New Roman, размер 14, межстрочный интервал 1, поля по 2.5 см. Представлять работы необходимо в формате текстового редактора Word или RTF. Более подробная информация об авторах дается в конце статьи (см. примеры в последнем выпуске).

В тексте статьи не допускаются сокращения (кроме стандартных); сокращенные названия поясняются при первом упоминании; все местные географические названия должны быть проверены. Применяется международная система единиц измерения СИ. В расчетных работах необходимо указывать авторов используемых программ.

Не допускается использовать при наборе:

- более одного пробела;
- формирование красной строки с помощью пробелов;
- автонумерацию (нумерованные и маркированные списки) в главах и абзацах;
- принудительные переносы.

Вставленные в работу рисунки, необходимо дублировать отдельными файлами рисунков размером не менее 10x15 см и разрешением не менее 300 dpi, в следующих графических форматах: .jpg, .crt и .cdr. Количество рисунков в статье не должно превышать 10. Рисунки должны иметь все необходимые обозначения и подписи.

Ссылки на рисунки приводятся в круглых скобках в формате: (рис. 1) или (рис. 1, 2) или (рис. 1–4).

Если рисунок единственный в статье, то он не нумеруется, а слово «рис.» в подписи к нему не пишется. Ссылка на него — рисунок.

При представлении материалов по конкретным объектам, статья должна содержать обзорную карту или схему, на которой показан район исследований. На картах необходимо указывать географические координаты, а на рисунках — ориентировку и линейный масштаб. Обозначения сторон света, широт и долгот должны быть указаны на русском языке.

Вставленные в работу таблицы книжного формата, должны иметь ширину не более 16 см, альбомного — 20 см; табличный шрифт Times New Roman, размер 11, межстрочный интервал 1, иметь сквозную порядковую нумерацию в пределах статьи, ссылки на таблицы приводятся в круглых скобках в формате: (табл. 1) или (табл. 1, 2) или (табл. 1–4). Если таблица единственная в статье, то она не нумеруется, а слово «Таблица» в названии не пишется. Ссылка на нее — таблица.

Перед тем, как вставить в статью диаграммы Excel и Word, их необходимо преобразовывать в рисунки формата .jpg. Формулы и уравнения, на которые в статье делаются ссылки, следует печатать с красной строки. В формулах между знаками ставятся пробелы.

Длинные формулы необходимо разбить на несколько строк (с учетом печати текста в две колонки). Перенос в формулах допускается делать в первую очередь на знаках соотношений, во вторую очередь — на многоточии, на знаках сложения и вычитания, в последнюю — на знаке умножения в виде косоугольного креста. Перенос на знаке деления не допускается. Математический знак, на котором разрывается формула при переносе, должен быть повторен в начале следующей строки.

Формулы и уравнения нумеруются в порядке следования по тексту статьи с правой стороны. Ссылки в тексте на формулу или уравнение обозначаются числом в круглых скобках: (1), (2), (3).

В журнале принято использование разделительного знака точки. Следует избегать смешанного употребления русских и латинских символов в одной статье. Все греческие и специальные символы печатаются через опции «Вставка» и «Символ».

Статью желательно разбивать на разделы, отражающие ее содержание. Допускаются следующие стандартные рубрики статьи: «Введение», «Исходные данные», «Методы исследования», «Результаты исследования», «Обсуждение результатов», «Выводы», «Заключение»; можно ввести раздел «Результаты и их обсуждение». Другие необходимые автору рубрики помещаются в начале соответствующего абзаца. Если работа выполнена при поддержке какого-либо гранта или технической поддержке преподавателя или аналитика, то эта информация приводится в конце статьи с рубрикой «Благодарности».

В конце рукописи необходим список использованной и цитируемой литературы, оформленный в соответствии с правилами библиографического описания литературных источников под заголовком «Литература» в алфавитном порядке: сначала русские работы, затем иностранные. Русские источники переводятся на английский язык и помещаются в конце списка под названием «Перевод на английский язык».

При ссылках на литературу в тексте работы приводятся фамилия автора с инициалами (двух авторов или первого автора в сочетании с «и др.», если количество авторов три и более) и год публикации в круглых скобках, например: «как сообщает А.И. Петров (2016)». Если автор публикации в тексте не указывается, то ссылка должна иметь следующий вид: «по данным (Петров, 2016) это...». Ссылки на публикации одного и того же автора, относящиеся к одному году, обозначаются буквенными индексами: (Петров, 2016а, 2016б, 2016в). При ссылке на работы двух и более авторов фамилии указываются в годично-алфавитном порядке: (Белов и др., 2017; Сидоров, 2016; Natton, 2014; Peyerl et al., 2018) (см. примеры в статьях последнего номера журнала).

В списке литературы работы не нумеруются, инициалы имен и отчеств пробелом не отделяются. Каждая работа должна занимать отдельный абзац.

Пример:

Федонкин М.А. Две летописи жизни: опыт сопоставления (палеобиология и геномика о ранних этапах эволюции биосферы) // Проблемы геологии и минералогии. Сыктывкар: Геопринт, 2016. С. 331–350.

Марков А.В., Куликов А.М. Происхождение эукариот как результат интеграционных процессов в микробном сообществе // Доклад в Институте биологии развития 29 января, 2019. Режим доступа: http://evolbiol.ru/dok_ibr2009.htm. (дата обращения: 23.10.2023). Допускаются ссылки на открытые отчеты геологических фондов.

Требуется акт экспертизы и официальное направление от организации на опубликование статьи в журнале Геология и окружающая среда на бланке организации (в электронном виде в формате JPEG). Ссылки на неопубликованные материалы других авторов и организаций не допускаются.

На отдельной странице в редакцию присылается авторская справка, содержащая фамилию, имя, отчество, ученую степень, звание, должность, место работы, почтовый адрес, телефон, факс и адрес электронной почты каждого автора. Необходимо указать фамилию автора, ответственного за прохождение статьи в редакции. Желательно указать трех специалистов, работающих по тематике статьи, как возможных рецензентов. Решение по вопросам рецензирования рукописей принимаются редколлегией.

Рукописи, оформленные без соблюдения настоящих правил, редколлегией журнала не рассматриваются.

Почтовый адрес редакции: 664025, г. Иркутск, ул. Ленина, д. 3, Геологический факультет Иркутского государственного университета.

Электронный адрес редакции: kaf-dinamgeol@mail.ru.

Редколлегия журнала