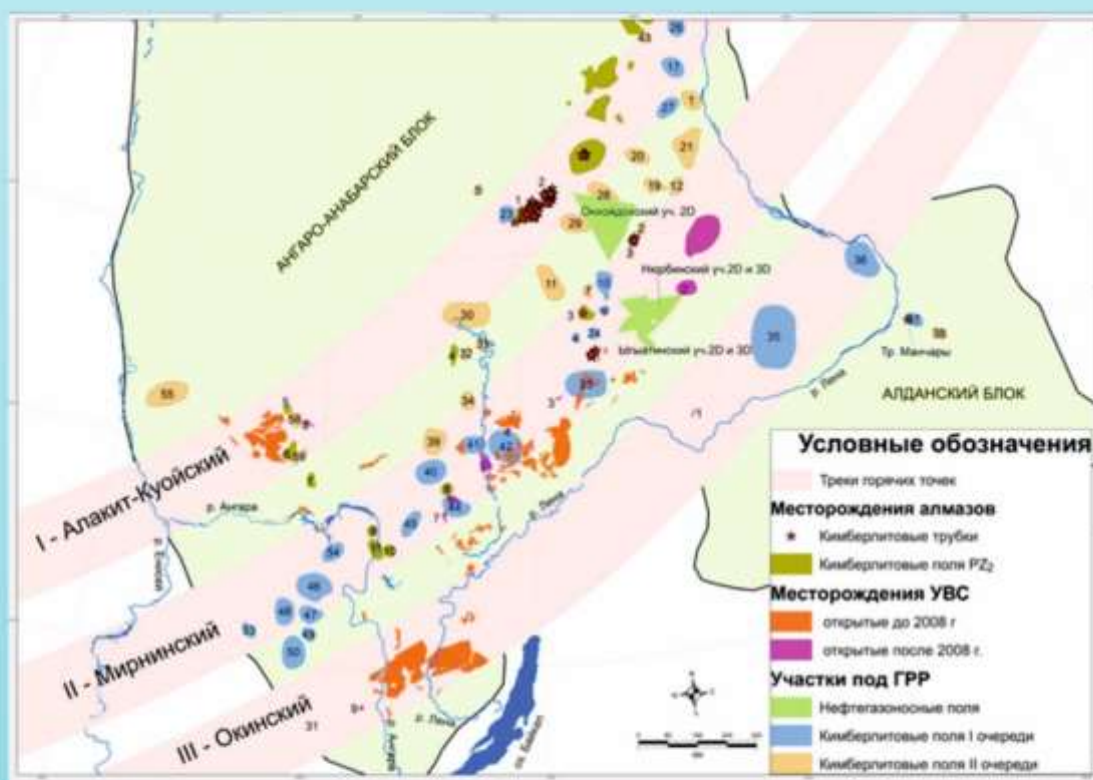


5 (4) 2025

ISSN 2541-9641



# ГЕОЛОГИЯ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА



ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Геология и  
окружающая  
среда

Том 5  
№ 4  
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  
Иркутский государственный университет, 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. – кандидат физ.-мат. наук, Институт  
астрономии и геофизики, 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, Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия.

#### Адрес редакции:

664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1

Тел.: (3952)243278

Email: [kaf-dinamgeol@mail.ru](mailto: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

Схема размещения известных месторождений углеводородов и предполагаемых районов ультраосновного магматизма (кимберлитовые поля) юга Сибирской платформы, построенная с позиции гипотезы горячих точек согласно динамической ФГМ. Из статьи К.М. Константинова Геологическая форма движения материи: основа возникновения жизни на Земле

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| От редколлегии журнала .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 5   |
| РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 7   |
| <u>И.С. Чувашова, С.В. Рассказов</u> Новейший геодинамический этап Азии в контексте эволюции Земли.....                                                                                                                                                                                                                                           | 7   |
| <u>К.М. Константинов</u> Геологическая форма движения материи: основа возникновения жизни на Земле .....                                                                                                                                                                                                                                          | 50  |
| МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 73  |
| <u>С.В. Рассказов, Е.П. Чебыкин, С.В. Снопков, А.М. Ильясова, И.С. Чувашова</u> Землетрясения Байкальской рифтовой системы в 2025 г.: снижение сейсмичности без существенных изменений гидрогеодинамики.....                                                                                                                                      | 73  |
| <u>С.В. Рассказов, И.А. Асламов, С.В. Снопков, В.И. Архипенко, А.М. Ильясова, Е.П. Чебыкин, И.С. Чувашова</u> Передовые ОВП записи подземных вод Байкальской рифтовой системы в конце 2025 г.: магнитосферный контроль слабых землетрясений .....                                                                                                 | 99  |
| ГЕОЛОГИЯ НЕФТИ И ГАЗА .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 132 |
| <u>А.Р. Валиуллин, В.А. Захарова</u> Влияние тектонических нарушений на формирование вторичной кальцитизации осинского горизонта на территории Непско-Ботуобинской антеклизы .....                                                                                                                                                                | 132 |
| ВУЛКАНИЗМ, НОВЕЙШАЯ ГЕОДИНАМИКА .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 141 |
| <u>С.В. Рассказов, Д.И. Парфенов, З.Б. Галсанов, Б.Д. Шарастепанов, А.П. Папаев, С.В. Снопков, Т.А. Ясныгина, И.С. Чувашова</u> Геохимическая оценка дифференциации в лавовых слоях и пространственной смены вулканических источников предголоценовой тефрит-трахибазальтовой серии в высоком горном хребте Большой Саян и Окинской впадине ..... | 141 |
| <u>С.А. Борняков, А.А. Добрынина, Ю. Го, Л. Яо, А.Н. Шагун, Ю. Чжо, В.А. Саньков, Д.В. Салко, А.И. Мирошниченко, А.А. Каримова</u> От лютотрясения к землетрясению....                                                                                                                                                                            | 172 |
| <u>С.А. Борняков, И.А. Пантелеев, А.Н. Шагун, А.А. Каримова, Д.В. Салко</u> Физическое моделирования сейсмогенной активизации разлома .....                                                                                                                                                                                                       | 193 |
| ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 203 |
| <u>С.Н. Коваленко</u> Погодные условия формирования современных нивально-гляциально-мерзлотных и наледных образований высокогорного района Мунку-Сардык в 2025 году (Восточный Саян) .....                                                                                                                                                        | 203 |
| КОНФЕРЕНЦИИ.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 218 |
| <u>С.В. Снопков, Л. Шубин, В. Вострикова, В. Чупрова, Т. Жилкина, Н.Г. Репина, Г.Г. Веретенина</u> Геологические исследования школьников (по результатам региональной конференции «Байкальское кольцо – 2025») .....                                                                                                                              | 218 |
| Правила для авторов .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 251 |

© ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»

© Геология и окружающая среда, 2025, Т. 5, № 4

## C O N T E N T S

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| From the editorial board of the journal .....                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 5   |
| REGIONAL GEOLOGY .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 7   |
| <u>I.S. Chuvashova, S.V. Rasskazov</u> The Latest Geodynamic Stage of Asia in the Context of Earth's Evolution .....                                                                                                                                                                                                                | 8   |
| <u>K.M. Konstantinov</u> Geologic Form of Matter Motion: the Basis of Life on Earth .....                                                                                                                                                                                                                                           | 50  |
| MONITORING OF NATURAL PROCESSES .....                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 73  |
| <u>S.V. Rasskazov, E.P. Chebykin, S.V. Snopkov, A.M. Ilyasova, I.S. Chuvashova</u> Earthquakes of the Baikal Rift System in 2025: Decrease in Seismicity without Sufficient Changes in Hydrogeodynamics .....                                                                                                                       | 73  |
| <u>S.V. Rasskazov, I.A. Aslamov, S.V. Snopkov, V.I. Archipenko, A.M. Ilyasova, E.P. Chebykin, I.S. Chuvashova</u> Frontier ORP records in groundwater from the Baikal Rift System in the fall of 2025: magnetospheric control of weak earthquakes .....                                                                             | 99  |
| GEOLOGY OF OIL AND GAS .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 132 |
| <u>A.R. Valiullin, V.A. Zakharova</u> Influence of Tectonic Faults on the Formation of Secondary Calcitization of the Osinsky Horizon within the Nepa-Botuoba Antecline .....                                                                                                                                                       | 133 |
| VOLCANISM, THE LATEST GEODYNAMICS .....                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 141 |
| <u>S.V. Rasskazov, D.I. Parfenov, Z.B. Galsanov, B.D. Sharastepanov, A.P. Papaev, S.V. Snopkov, T.A. Yasnygina, I.S. Chuvashova</u> Geochemical Assessment of Differentiation in Lava Layers and Spatial Change in Volcanic Sources for pre-Holocene Tephrite-Trachybasalt Series in the High Great Sayan Range and Oka Basin ..... | 142 |
| <u>S.A. Borneyakov, A.A. Dobrynina, Y. Guo, L. Yao, A.N. Shagun, Y. Zhuo, V.A. Sankov, D.V. Salko, A.I. Miroshnichenko, A.A. Karimova</u> From Icequake to Earthquake .....                                                                                                                                                         | 172 |
| <u>S.A. Borneyakov, I.A. Panteleev, A.N. Shagun, A.A. Karimova, D.V. Salko</u> Physical Modeling of Seismogenic Fault Activation .....                                                                                                                                                                                              | 193 |
| PHYSICAL GEOGRAPHY .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 203 |
| <u>S.N. Kovalenko</u> Weather Conditions of the Formation of Modern Nival-glacial-permafrost and Aufeis Formations of the High-mountain Region of Munku-Sardyk in 2025 (Eastern Sayan) .....                                                                                                                                        | 203 |
| CONFERENCES .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 218 |
| <u>S.V. Snopkov, L. Shubin, V. Vostrikova, V. Chuprova, T. Zhilkina, N.G. Repina, G.G. Veretenina</u> Geological Research by Schoolchildren (Based on the Results of the Regional Conference "Baikal Ring – 2025") .....                                                                                                            | 218 |
| Guidelines for Authors .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 251 |

© Irkutsk State University

© Geology and Environment, 2025, Vol. 5, No. 4

## 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. Пробиться 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

## РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 550.42:551.14+550.93(51)

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2025.4.7>

EDN: UDFUP

## Новейший геодинамический этап Азии в контексте эволюции Земли

И.С. Чувашова<sup>1</sup>, С.В. Рассказов<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

**Аннотация.** Подобно неотектоническому этапу, новейший геодинамический этап не имеет в эволюции Земли строго определенного рубежа. Спрединговые корообразующие процессы современных океанов, продолжающиеся до настоящего времени, были запущены около 280 млн лет назад, но реализовался спрединг в современных океанах Земли в разное время. В геологической эволюции Азии к настоящему времени возникла особая направленность процессов в связи со значительным смещением с севера на юг Сибирского палеоконтинента в интервале 200–150 млн лет назад и отделением от Гондваны Индийского палеоконтинента около 130–100 млн лет назад со смещением с юга на север и столкновением с Азией в интервале 66–32 млн лет назад. Направленная к настоящему времени эволюция Азии начинается в первой половине позднего мела, около 90 млн лет назад. В качестве показателя этой точки отсчета служит смена частых среднемеловых шошонитовых и трахибазальтовых вулканических извержений Центральной Монголии редкими щелочнобазальтовыми извержениями продолжительных (20-летних) интервалов. Частота импульсов вулканических извержений здесь с течением времени последовательно возрастает и укладывается в квазипериоды 10, 7.5 и 2.5 млн лет. В четвертичное время вулканизм переходит в квазипериодичность 0.3–0.7 млн лет. В контексте эволюции Земли начало новейшего геодинамического этапа в Азии сопровождается: 1) окончанием суперхроны Джалал около 83 млн лет назад, 2) нарушением великих циклов эксцентриситета 2.4 млн лет в орбитальном вращении Земли 87–85 млн лет назад, 3) извержением наиболее высокотемпературных (ультрамагнезиальных) коматиитовых магм о-ва Горгона около 90 млн лет назад, 4) ограничением распространения щелочных комплексов с карбонатитами в Северной Азии серединой мела при увеличении роли карбонатитов в Индии в ходе пост-среднемеловой эволюции Земли и 5) сменой главных трендов морских записей  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  около 90 млн лет назад. Эволюция Земли к настоящему времени привела к образованию наиболее глубокой аномалии геоида Индийского океана в пространственном сочетании с низкой Евразийской аномалией. Первая объясняется позднефанерозойским нарушением поднимающимися плюмами границы нижней и верхней мантии, тогда как вторая связывается с позднефанерозойским образованием в Центральной Азии Саяно-Монгольского низкоскоростного домена на глубинах верхней мантии 50–200 км.

**Ключевые слова:** новейшая геодинамика, современная геодинамика, вулканизм, поздний мел, кайнозой, аномалии геоида, Пангея, Монголия

Статья получена: 04.12.2025; исправлена: 08.12.2025; принята: 12.12.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чувашова И.С., Рассказов С.В. Новейший геодинамический этап Азии в контексте эволюции Земли // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 4. С. 7–49. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.7. EDN: UDFUP

Article received: 04.12.2025; corrected: 08.12.2025; accepted: 12.12.2025.

FOR CITATION: Chuvashova I.S., Rasskazov S.V. The latest geodynamic stage of Asia in the context of Earth's evolution // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 4. P. 7–49. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.7. EDN: UDFUP

## The Latest Geodynamic Stage of Asia in the Context of Earth's Evolution

I.S. Chuvashova<sup>1</sup>, S.V. Rasskazov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia*

<sup>2</sup>*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

**Abstract.** Like a Neotectonic stage, a Latest geodynamic stage has no single boundary in Earth's evolution. Crust-forming spreading processes, which continue to the present, were initiated approximately 280 million years ago. Spreading occurred in the Earth's modern oceans at various times. A specific direction of processes has emerged in the geological evolution of Asia, due to the significant north-south shift of the Siberian paleocontinent between 200 and 150 million years ago and the separation of the Indian paleocontinent from Gondwana between 130 and 100 million years ago, followed by a south-north shift and collision with Asia between 66 and 32 million years ago. The directional evolution of Asia began in the Late Cretaceous, approximately 90 million years ago. This starting point is marked by a change from frequent mid-Cretaceous shoshonitic and trachybasaltic volcanic eruptions in Central Mongolia to rare alkaline basaltic ones over long (20-year) intervals serves. The frequency of volcanic pulses here consistently increases over time and falls within quasi-periods of 10, 7.5, and 2.5 million years. In the Quaternary, volcanism develops to a quasi-periodicity of 0.3–0.7 million years. In the context of Earth's evolution, the onset of the most recent geodynamic stage in Asia is accompanied by: 1) the end of the Jalal superchron ca. 83 Ma, 2) the disruption of the 2.4 Ma great eccentricity cycles in the Earth's orbital rotation 87–85 Ma, 3) the eruption of the highest-temperature (ultra-Mg) komatiite magmas of Gorgona Island ca. 90 Ma, 4) the restriction of the distribution of alkaline complexes with carbonatites in Northern Asia by the mid-Cretaceous with an increasing role of carbonatites in India during the post-Middle Cretaceous evolution of the Earth, and 5) a change in the main trends of marine <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr records ca. 90 Ma. The evolution of the Earth to date has led to the formation of the deepest Indian Ocean geoid anomaly in spatial combination with the low Eurasian one. The former is explained by the late Phanerozoic disruption of the lower and upper mantle boundary by ascending plumes, while the latter is clearly associated in Central Asia with the late Phanerozoic formation of the Sayan-Mongolian low-velocity domain at the upper mantle depths of 50–200 km.

**Keywords:** latest geodynamic stage, present-day geodynamics, volcanism, Late Cretaceous, Cenozoic, geoid anomalies, Pangea, Mongolia.

### Введение

Геоморфологический подход к анализу тектонических движений земной поверхности способствовал выделению в геотектонике особой дисциплины «неотектоника». Предметом исследований этой дисциплины явились новейшие тектонические события, в результате которых созданы основные черты современного рельефа (Николаев, 1949). Возраст новейших тектонических движений принимается геоморфологами как олигоценый или неоген-четвертичный. Но фактически в разных районах мира рельеф формировался с юры, начала кайнозоя, олигоцена, миоцена или квартера. Неоднозначность временного аспекта в понятии «неотектоника» отражена в картах новейшей тектоники Сибири и Дальнего Востока со скользящим возрастом

активизации тектонических движений (Шерман и др., 1984; Логачев и др., 1981). Асинхронность позднекайнозойских тектонических движений на о-вах Сахалин и Хоккайдо выражена в скользящей во времени седиментации (Мельников, 1987, 1988).

В каких временных рамках может использоваться понятие «новейший этап» в исследованиях геодинамики Азии: с обозначением разных временных интервалов территорий, подобно определению «новейший этап» в геотектонике, или на основе единственного временного рубежа?

По аналогии с понятием «новейший этап» в геотектонике, авторами настоящей работы было предложено использовать понятие «новейший этап» (the latest stage) в геодинамике Азии последних 90 млн лет. При этом подчеркивалось глобальное значение этой точки

отсчета (Рассказов, Чувашова, 2013а,б, 2014а; Чувашова, Рассказов, 2014). Позже появились работы в которых существенное изменение эволюции Земли рассматривалось в рамках: 1) временного интервала распада Вегенеровской Пангеи после ее сборки 240 млн лет назад (Le Pichon et al., 2019, 2021) и 2) в рамках временного интервала, запущенного в Азии около 107 млн лет назад (Sheldrick et al., 2018, 2020; Papadopoulou et al., 2024).

Существуют еще два обстоятельства, которые нужно принять во внимание, учитывая существующие подходы в практике геологических исследований: 1) принципы организации хроностратиграфической шкалы и 2) переход от киммерийского цикла тектогенеза к альпийскому.

Хроностратиграфическая шкала была создана на палеонтологической основе. Новейшее развитие органического мира имело место в кайнозойскую эру, охватывающую последние 65.5 млн лет. Крупная катастрофа, отразившаяся в массовом вымирании биоты на Земле, произошла в результате импактного события с образованием кратера Чиксулуб. Слой импактных пород, однако, находится в средней части толщи траппов крупной магматической провинции Декан (Courtillot et al., 1988). Извержения траппов этой провинции также могли оказать влияние на массовое вымирание органического мира Земли. Чтобы принять мезозойско-кайнозойский биотический кризис в качестве рубежа новейшего геодинамического этапа, нужно иметь доказательства того, что в мезозое геологические процессы и действующие силы на Земле действительно кардинально отличались от геологических процессов и действующих сил кайнозоя.

С позиций классической континентальной геологии, последний этап эволюции Земли представлен альпийским циклом тектогенеза. Пульсационные события этого цикла, сменяющие события киммерийского цикла, составляли временной интервал последних 115 млн лет (Милановский, 1995). Переход от одного тектонического цикла к другому не совпадает ни с предложенными определениями точек отсчета новейшего геодинамического этапа, ни со сменой мезозоя кайнозоем, ни со сборкой и распадом Вегенеровской Пангеи.

Какое же из имеющихся определений последних событий на Земле, связанных с ее современным состоянием, может использоваться для изучения континентальной геодинамической специфики Азии?

### **Различия в определениях современной, новейшей и древней геодинамики**

Геодинамика изучает силы и процессы Земли. В качестве важнейшего принципа выделения новейшего этапа в геодинамике должно быть выделение совокупности процессов, обусловленных единым действием сил, которые объединены в единую направленную эволюционную последовательность.

Современная геодинамика отличается от новейшей предметом исследований. Современная ограничивается (по аналогии с современной тектоникой) изучением процессов (вулканических, сейсмических, гидрогеологических и др.) и сил (эндогенных), их вызывающих в последние 3 (по инструментальным наблюдениям) или 10–15 тыс. лет (по наблюдениям за вулканической активностью) (Simkin et al., 1989; Рассказов, Чувашова, 2013б, 2018). Новейшая геодинамика в общем оперирует более продолжительным интервалом взаимосвязанных процессов и усилий, приложенных к литосфере и подлитосферной мантии, которые привели к современному состоянию Земли. В определении понятия новейшей геодинамики ключевое значение имеет направленность процессов, завершающихся их современным состоянием. Изучение новейших геодинамических процессов должно вести к пониманию их современной результирующей эволюции. Соответственно, древняя геодинамика (палеогеодинамика) рассматривает процессы и силы, не имеющие непосредственных связей с современным состоянием глубинных процессов и предшествующие новейшим процессам и силам.

В определении точки отсчета новейшего геодинамического этапа 90 млн лет назад (Рассказов, Чувашова, 2013а) обозначаются палеогеодинамические условия в Азии, существовавшие в середине мела и раньше, которые кардинально различаются с

условиями, установившимися в позднем мелу и кайнозое, после 90 млн лет назад. В несколько удревненном значении времени глобального перехода от альпийского цикла к кимерийскому (Милановский, 1995) и варианте точки отсчета однотипного внутриплитного вулканизма Центральной Монголии (Sheldrick et al., 2018, 2020; Papadopoulou et al., 2024) предполагается, что кардинальная геодинамическая смена в целом на континентах и в частности в Азии произошла, соответственно, 115 или 107 млн лет назад. В определении глобальной точки отсчета сборки и распада Вегенеровской Пангеи (Le Pichon et al., 2019, 2021) обозначается кардинальная смена геодинамических условий на всей Земле около 240 млн лет назад.

### **Смена магматизма Азии в течение всего фанерозоя и в позднем фанерозое**

#### *Общая смена магматизма*

В фанерозое Азии распространены мантийные и коровые магматические породы. Террейны континентальной литосферы разделены шовными зонами сомкнувшихся берегов Урало-Монгольского, Туркестанского, Солонкерского палеоокеанов и Монголо-Охотского залива Тихого океана. Стагнирующие палеослабовые фрагменты выявлены сейсмической томографией на разных мантийных уровнях в виде высокоскоростных неоднородностей.

В составе позднемезозойских магматических комплексов областей Западного Забайкалья, Хэнтэй-Даурской и Центрально-Монгольской, распространены редкометалльные Li–F гранитоиды и их эффузивные аналоги (онгониты) (Коваленко и др., 1999). В позднем мелу и кайнозое такие породы отсутствуют. В составе пород позднего палеозоя и мезозоя Западного Забайкалья находятся агпаитовые эффузивные и интрузивные породы среднего и кислого состава с щелочными пироксенами и амфиболами (Таусон и

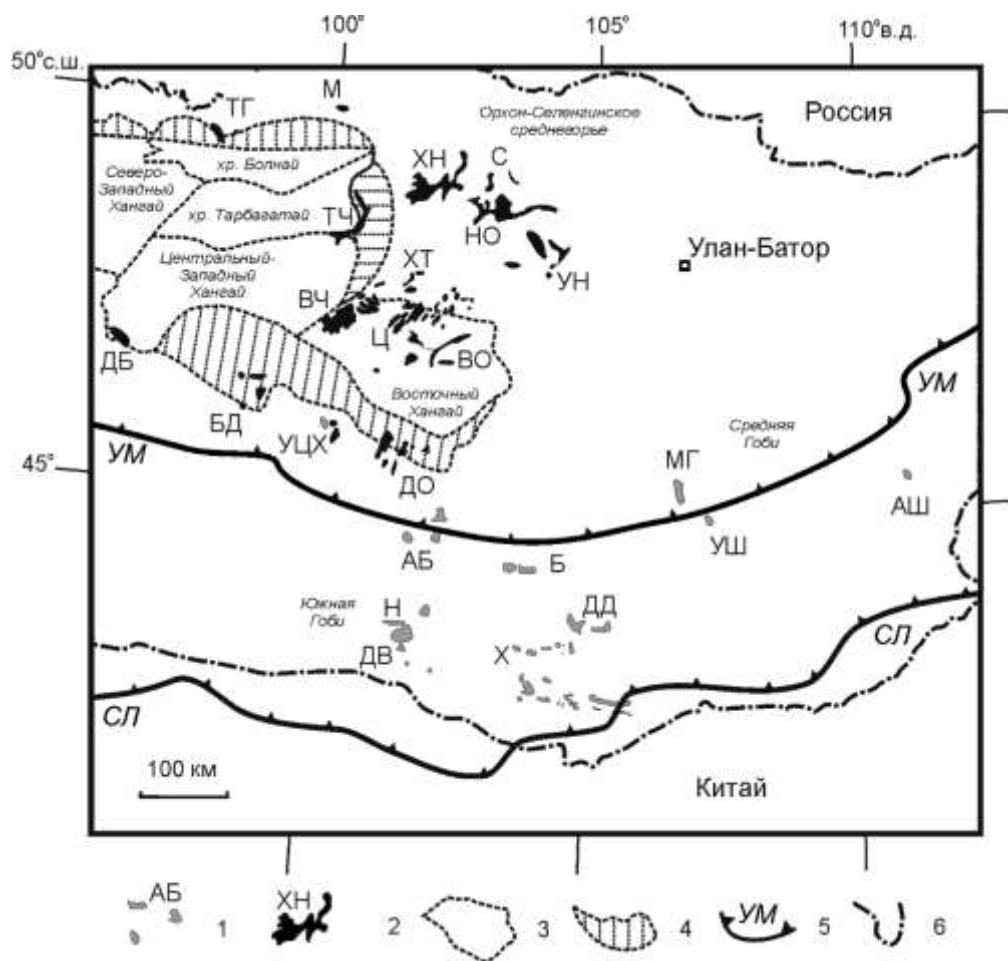
др., 1984). В позднем мелу и кайнозое такие породы также отсутствуют.

На протяжении большей части фанерозоя роль коровых источников в геологических структурах Центральной Азии была существенной и резко снижалась в позднем мелу. Начиная с этого времени, мантийные выплавки стали преобладать, а коровые проявлялись эпизодически (Rasskazov, Taniguchi, 2006; Рассказов и др., 2007б, 2012б; Рассказов, Чувашова, 2012а). По единообразному мантийному характеру источников, магматизм последних 90 млн лет на территории Центральной Азии рассматривается в качестве процесса новейшего геодинамического этапа и различается с предшествующим ранне-среднефанерозойским магматизмом с коромантийным характером источников.

#### *Эволюция вулканизма в позднем мелу и кайнозое на территории Монголии*

В середине мела вулканизм широко проявился во фронте области конвергенции плит Тихого океана и Азии и во фронте области конвергенции Индии и Азии. Под действием сил Индо-Азиатской конвергенции в Центральной Азии образовалась Центрально-Азиатская орогенная система, а под действием сил Японско-Байкальского геодинамического коридора – Байкальская рифтовая система. Вулканизм последних 90 млн лет Центральной Азии развивался неравномерно в пространстве и времени. Вулканические извержения мигрировали на десятки, а иногда на первые сотни километров.

Ключевое значение для обоснования точки отсчета новейшего геодинамического этапа Азии имеет эволюция вулканизма в Центральной Монголии. На этой территории сначала, 91–31 млн лет назад, была активной Гобийская система вулканических полей, а затем, в интервале последних 32 млн лет, – Хангайская (рис. 1). Особенности пространственно-временной эволюции вулканизма Центральной Монголии отражены в вариациях концентрации калия и K/Na отношения (Рассказов и др., 2012б).



**Рис. 1.** Основное возрастное подразделение вулканических полей позднего мела и кайнозоя в Центральной Монголии на Гобийскую и Хангайскую системы. 1–2 – вулканические поля двух возрастных интервалов: 1 – 91–31 млн лет Гобийской системы (УЦХ – Улан-Цаб-Худукское, Б – Булганское, ДД – Даланзадгадское, МГ – Мандалгобийское, УШ – Ундэршилское, АШ – Алтан-Ширэ, АБ – Арц-Богдское, Н – Ноёнское, Х – Хурмэнское, ДВ – Дурвэлджин); 2 – <32 млн лет Хангайской системы (ДО – Долино-Озерское, БД – Байдарикское, ДБ – Дзабханское, М – Мурэнское, Ц – Цэцэрлэгское, ХТ – Хойт-Тамирское, ВО – Верхнеорхонское, ВЧ – Верхнечулутынское, ТЧ – Тарят-Чулутынское, УН – Угей-Нурское, НО – Нижнеорхонское, ХН – Хануйское, С – Селенгинское, ТГ – Тэсийн-Гольское); 3 – Хангайский ороген; 4 – пограничная зона орогена (Корина, 1982); 5 – шов закрывшегося палеоокеана (УМ – Урало-Монгольского, СЛ – Солонкерского, шов монголо-охотской части Тихого палеоокеана огибает с юга и севера Хангайский ороген, на рис. не показан); 6 – государственная граница Монголии.

**Fig. 1.** Main age subdivision of the Late Cretaceous and Cenozoic volcanic fields in Central Mongolia into the Gobi and Hangay systems. 1–2 – volcanic fields of two age intervals: 1 – 91–31 Ma of the Gobi system (УЦХ – Ulan-Tsab-Khuduk, Б – Bulgan, ДД – Dalanzadgad, МГ – Mandalgobi, УШ – Under-shil, АШ – Altan-Shire, АБ – Arts-Bogd, Н – Noyon, Х – Khurmen, ДВ – Durveldzhin); 2 – <32 Ma of the Hangay system (ДО – Valley of Lakes, БД – Baydarik, ДБ – Dzabkhan, М – Muren, Ц – Tset-serleg, ХТ – Khoyt-Tamir, ВО – Verkhniy Orkhon, ВЧ – Verkhniy Chulutyn, ТЧ – Taryat-Chulutyn, УН – Ugey-Nur, НО – Nizhniy Orkhon, ХН – Khanui, С – Selenga, ТГ – Tesiin-Gol); 3 – Hangay orogen; 4 – border of the orogen after (Korina, 1982); 5 – suture of the closed paleo-ocean (УМ – Ural-Mongolian, СЛ – Solonker, the suture of the Mongolian-Okhotsk part of the Pacific paleo-ocean goes around the Hangay orogen from the south and north, not shown in the figure); 6 – state border of Mongolia.

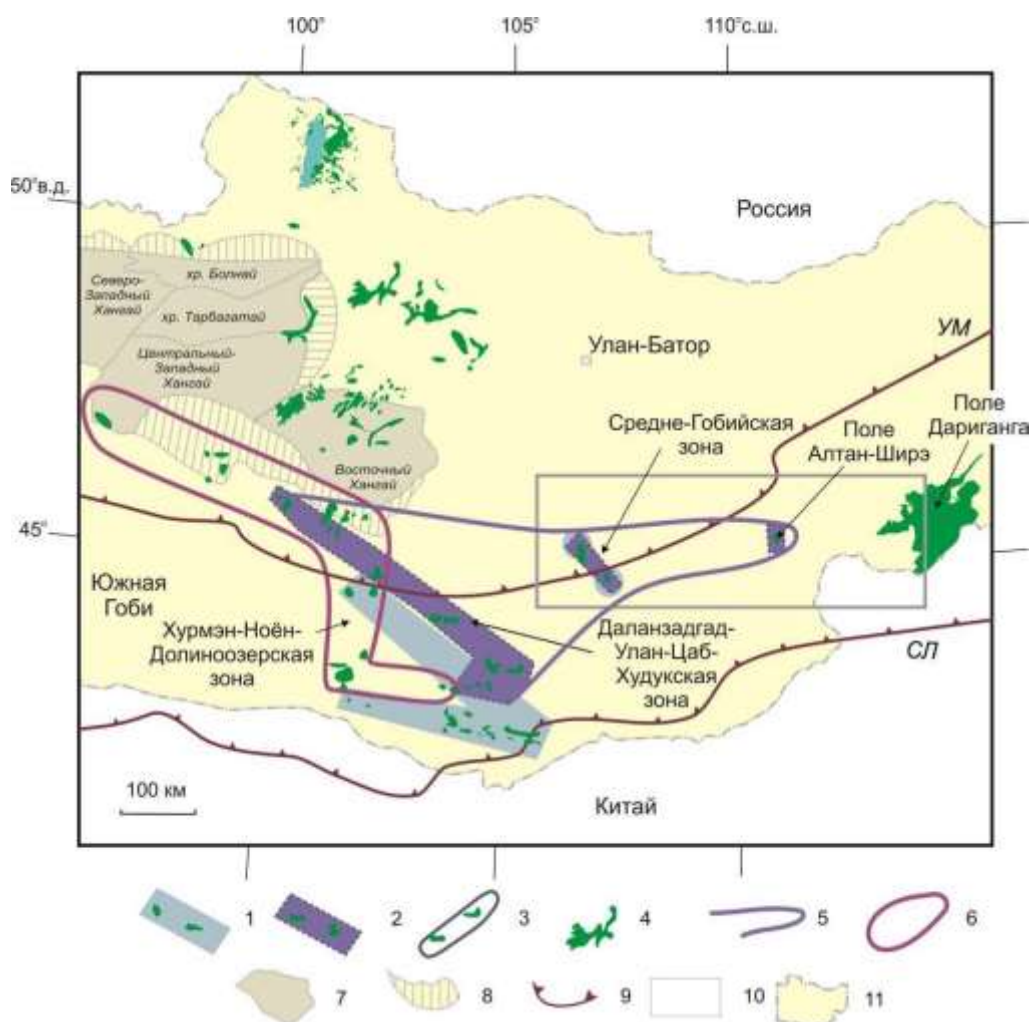
В Юго-Восточной Монголии разновозрастные генерации мезозойских и кайнозойских вулканических пород отчетливо

разделяются между собой вдоль субширотного профиля Мандалгоби – Дариганга. Юрско-меловые поля находятся вдоль всей

протяженности профиля, мел-палеогеновые (Мандалгобийское и Ундэршилское) поля Средней Гоби – на его западном окончании, а позднекайнозойское Даригангское поле – на его восточном окончании. Вулканизм Средней Гоби играл особую роль. Его первичное вступление 88–82 млн лет назад соответствовало началу новейшего геодинамического этапа, а заключительный (палеоцен-среднеэоценовый) эпизод 60–42 млн лет назад совпадал со структурной перестройкой, проявившейся в глобальном контексте и в региональном контексте Азии. Мел-палеогеновый вулканизм начала новейшего геодинамического этапа представлен породами базальтового и щелочно-базальтового состава. Юрско-меловой вулканизм отличается от мел-палеогенового вулканизма наличием в продуктах извержений пород дифференцированного (трахитового) состава, а последующий позднекайнозойский вулканизм территории – наличием щелочнобазальтоидных продуктов извержений (с глубинными включениями), в

целом не характерных для мела и палеогена (Чувашова и др., 2024).

Роль структурной среднеэоценовой перестройки глубинных процессов проявляется в пространственно-временном распределении вулканизма позднего мела и кайнозоя Южной и Средней Гоби. Мел-палеоцен-среднеэоценовые вулканические поля Даланзадгад-Улан-Цаб-Худукской, Средне-Гобийской зон и поля Алтан-Ширэ расширяются на западе, в Южной Гоби, и выклиниваются на востоке, в Средней Гоби, не достигая, однако, позднекайнозойского Даригангского вулканического поля. Вдоль профиля Мандалгоби – Дариганга наблюдается контрастное соотношение между Южно-Средне-Гобийским мел-палеоцен-среднеэоценовым вулканическим клином и позднекайнозойским Даригангским вулканическим полем, тогда как среднеэоценовая-олигоценовая зона вулканических полей Южной Гоби переходит к пост-олигоценовым вулканическим полям Хангайской орогенной провинции постепенно (рис. 2).



**Рис. 2.** Линейные зоны вулканизма Центральной и Юго-Восточной Монголии (Чувашова и др., 2024). 1–3 – линейная зона: 1 – позднемеловая, 2 – палеоцен-среднеэоценовая, 3 – среднеэоценовая-олигоценовая; 4 – пост-олигоценовые вулканические поля; 5–6 – структурная перестройка расплавных аномалий от выклинивающихся к востоку мел-палеоцен-среднеэоценовых вулканических полей Даланзадгад-Улан-Цаб-Худукской, Средне-Гобийской зон и поля Алтан-Ширэ (5) к распространению вулканических полей от среднеэоценовой-олигоценовой зоны к пост-олигоценовым вулканическим полям Хангайской провинции (6); 7 – позднекайнозойский Хангайский ороген; 8 – его пограничные структуры (Корина, 1982); 9 – шов закрывшегося палеоокеана (УМ – Урало-Монгольского, СЛ – Солонкерского); 10 – профиль Мандалгоби – Дариганга; 11 – границы Монголии.

**Fig. 2.** Linear zones of volcanism in Central and Southeastern Mongolia (Chuvashova et al., 2024). 1–3 – linear zone: 1 – Late Cretaceous, 2 – Paleocene-Middle Eocene, 3 – Middle Eocene-Oligocene; 4 – post-Oligocene volcanic fields; 5–6 – structural reorganization of melting anomalies from the Cretaceous-Paleocene-Middle Eocene volcanic fields of the Dalanzadgad-Ulaan-Tsab-Khuduk, Middle Gobi zones and the Altan-Shire field wedging out to the east (5) to the spread of volcanic fields from the Middle Eocene-Oligocene zone to the post-Oligocene volcanic fields of the Hangay province (6); 7 – Late Cenozoic Hangay orogen; 8 – its boundary zones (Korina, 1982); 9 – suture of the closed paleocean (УМ – Ural-Mongolian, СЛ – Solonker); 10 – Mandalgobi – Dariganga profile; 11 – borders of Mongolia.

Исходя из закономерностей пространственно-временного распределения лав калиевой и калинатровой серий обосновано влияние межплитных процессов на кайнозойскую активизацию Внутренней Азии. Показано, что вулканизм Центральной Монголии развивался согласованно с вулканизмом Тибета во временных интервалах дрейфа Кохистанской энсиматической дуги и ее столкновения с континентальной окраиной Азии (91–71 млн лет назад), Индо-Азиатской коллизии (66–32 млн лет назад) и постколлизийной конвергенции (41–21, 20–10, 10–2 и <2 млн лет назад) (Чувашова и др., 2010; Рассказов и др., 2012б).

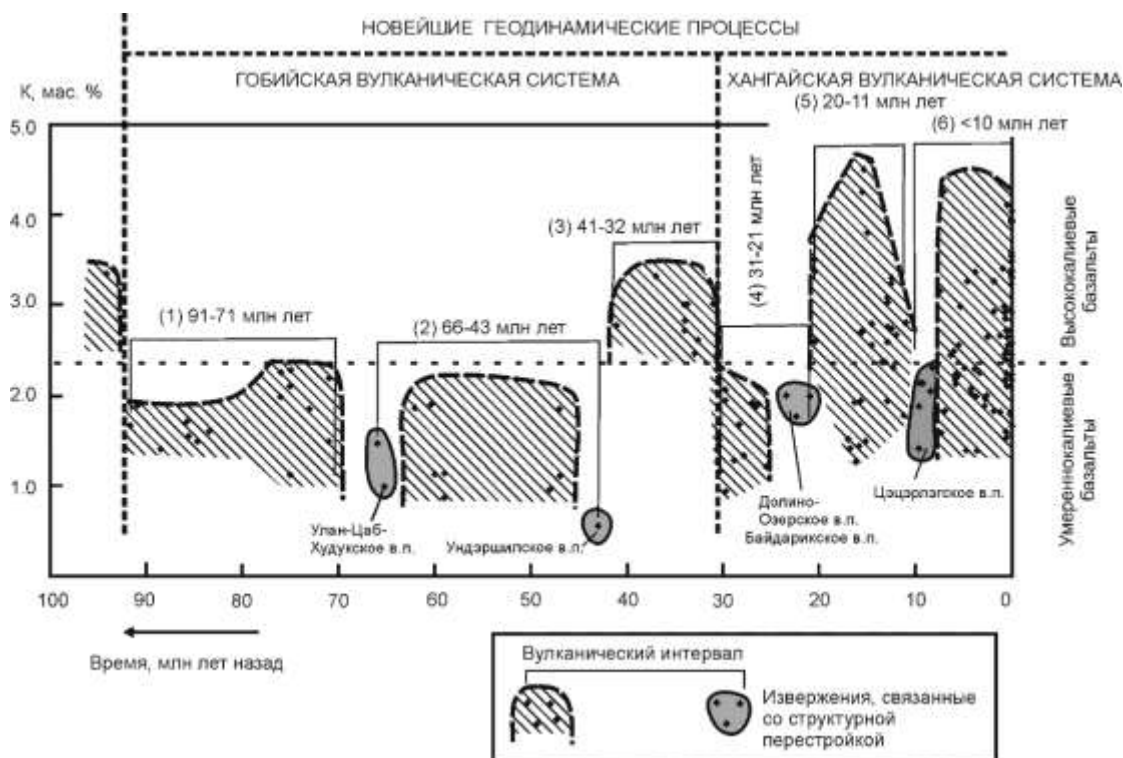
Рубеж около 90 млн лет назад обозначен сменой высококалиевых лав умереннокалиевыми в районе хр. Арц-Богд Южной Гоби. Высокое содержание калия ( $K = 3.35$  мас. %) и высокое калинатровое отношение ( $K_2O/Na_2O = 1.2$ ) определено в латите, излившемся около 94 млн лет назад. Для латитов и ассоциирующихся с ними шошонитов и трахибазальтов характерно низкое содержание  $MgO$  (1.4–3.1 мас. %), высокое отношение  $Ba/Sr$  (1.2–1.4), повышенное начальное изотопное отношение стронция (до 0.70533) и низкое – неодима (до 0.512250) (Enkhtuvshin, 1995). Такие характеристики отражают происхождение расплавов из

корových источников. В позднемеловых лавах Южной Гоби, извергнутых во временном интервале 91–71 млн лет назад, определена умеренная концентрация калия ( $K = 1.4–1.7$  мас. %) при повышенном содержании  $MgO$  (до 8.5 мас. %), сравнительно низкое отношение  $Ba/Sr$  (0.52–0.73), широкие диапазоны начальных отношений изотопов  $Sr$  и  $Nd$  – от обогащённых (относительно примитивный мантии) до обеднённых (Ярмолук и др., 2007). Эти характеристики сопоставляются с характеристиками кайнозойских лав, производных преимущественно мантийных источников (Рассказов и др., 2012б).

По вариациям концентрации калия в позднемеловых и кайнозойских лавах различаются шесть временных интервалов вулканизма: 1) позднемеловой (91–71 млн лет назад), 2) палеоцен-среднеэоценовый (66–43 млн лет назад), 3) среднеэоценовый-раннеолигоценовый (41–31 млн лет назад), 4) олигоцен-раннемиоценовый (32–21 млн лет назад), 5) миоценовый (20–11 млн лет назад) и 6) позднемиоценовый-четвертичный (<10 млн лет назад). Первые три интервала рассматриваются как события Гобийской вулканической системы, последние три – Хангайской. В Центральной Монголии около 90 млн лет назад высококалиевые латиты из корových источников сменялись умереннокалиевыми

базальтами – из мантийных. Предполагалось, что базальтовый вулканизм временного интервала 91–31 млн лет назад был производным активизации палеослабовых фрагментов Гобийской системы закрывшихся Солонкерского и/или Урало-Монгольского палеоокеанов, а затем, начиная с 32 млн лет назад, был связан с развитием Хангайского орогена. Чередование умеренно- и высоко-калиевых

лавовых извержений первого временного интервала новейшего геодинамического этапа укладывалось в длиннопериодные отрезки 20 млн лет (рис. 3). Вулканическая деятельность была сопряжена с внутриплитной аккомодацией процессов Индо-Азиатской конвергенции (Rasskazov et al., 2010; Рассказов, Чувашова, 2013a,b; Чувашова и др., 2024).

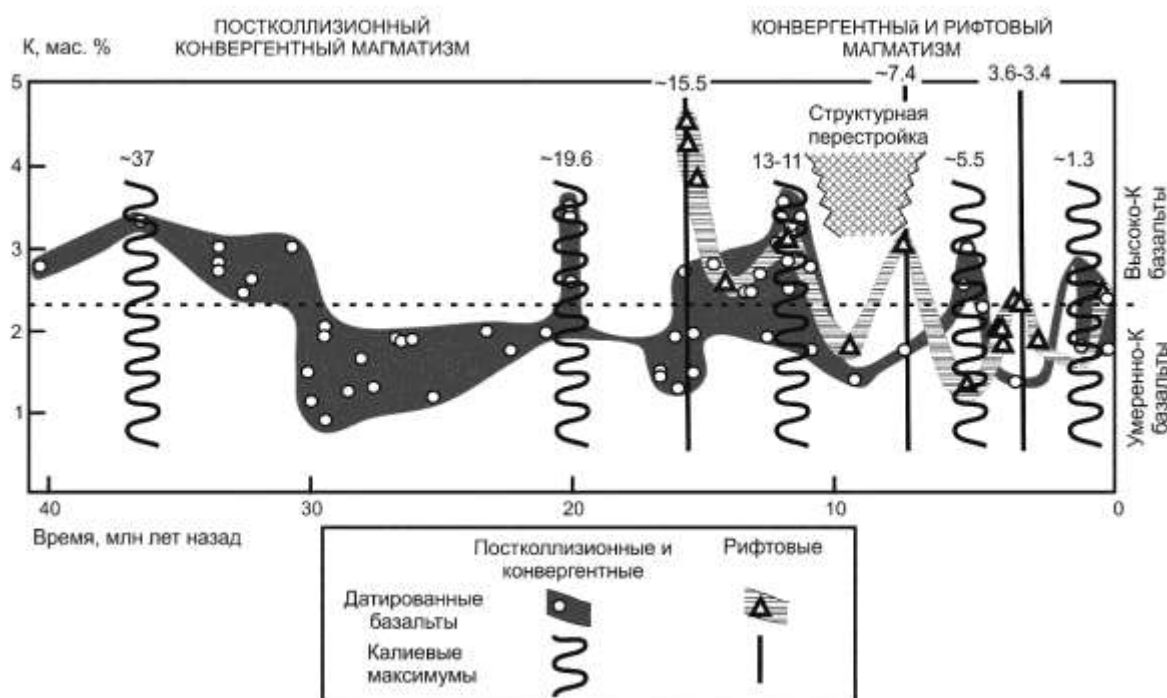


**Рис. 3.** Временные вариации калия в вулканических породах позднего мела и кайнозоя Центральной Монголии. Таблица датировок приведена в работе (Рассказов и др., 2012б). Нижнее ограничение новейших геодинамических процессов обозначено датировкой  $94.4 \pm 2.2$  млн лет латита с содержанием  $K = 3.35$  мас. % из района хр. Арц-Богд.

**Fig. 3.** Temporal variations of potassium in Late Cretaceous and Cenozoic volcanic rocks of Central Mongolia. Data are presented by (Rasskazov, Chuvashova et al., 2012b). The lower limit of the latest geodynamic processes is indicated by the age of  $94.4 \pm 2.2$  Ma of latite with a K content of 3.35 wt.% from the Arts-Bogd Ridge area.

В пространстве и времени постколлизийный конвергентный магматизм сменяется сопряженным противофазным развитием конвергентного и рифтогенного магматизма. Во временном интервале 41–21 млн лет назад конвергентный высоко- и умереннокалиевый магматизм длился интервалами по 10 млн лет. В последние 25 млн лет умереннокалиевые извержения вулканических полей

продолжались в среднем 7.0–7.5 млн лет, а высококалиевые носили эпизодический характер. Наиболее продолжительный интервал высококалиевого конвергентного магматизма 15.6–11.0 млн лет назад сопровождал начало рифтогенного магматизма, предшествуя структурной перестройке, произошедшей в интервале 11–7 млн лет назад (рис. 4).



**Рис. 4.** Переход от постколлизийного конвергентного магматизма к сопряженному противофазному конвергентному и рифтогенному магматизму.

**Fig. 4.** Transition from post-collisional convergent magmatism to conjugate antiphase convergent and rift-related one.

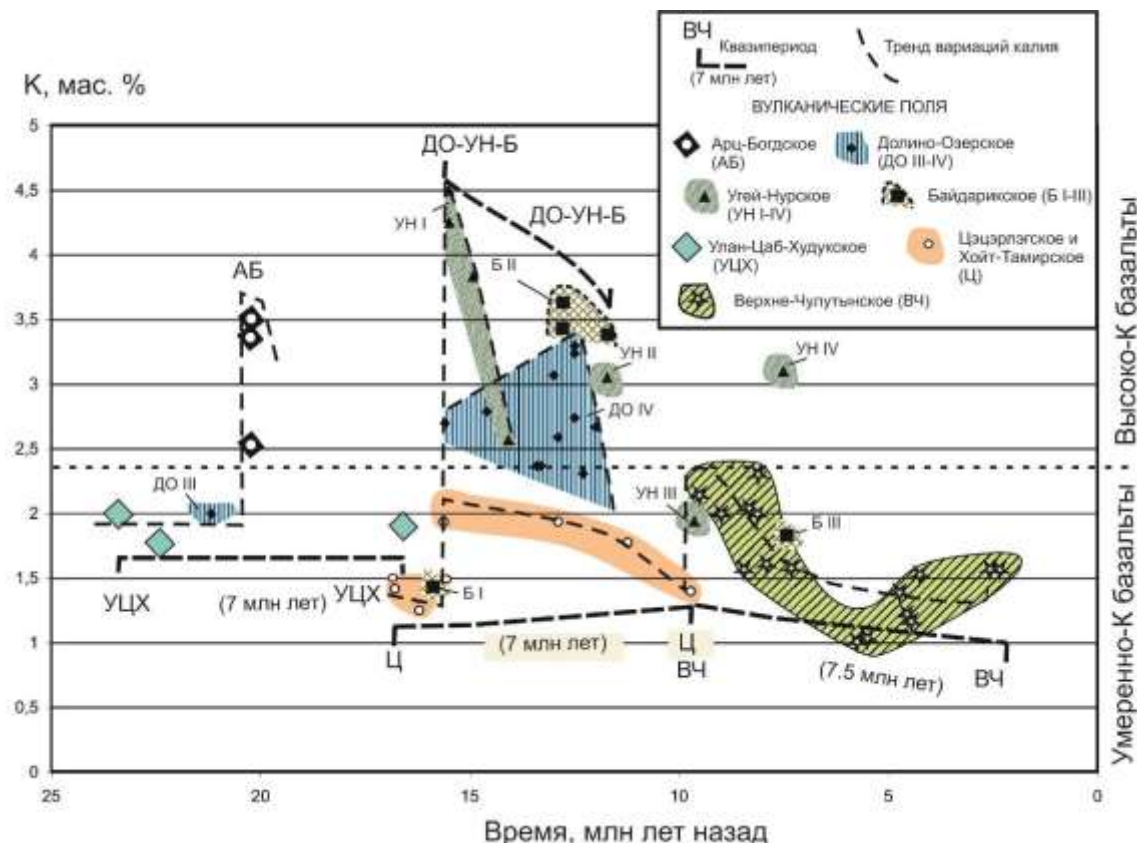
Конвергентные базальты южной части вулканической области Центральной Монголии и рифтогенные базальты ее северо-восточной части характеризуются противоположными временными вариациями концентраций калия. В эволюции конвергентного магматизма выделяются максимумы калия ~37, ~19.6, 13–11, ~5.5 и ~1.3 млн лет назад в чередовании с его минимумами ~30, ~16, ~10 и 3.6–3.4 млн лет назад. С минимумами калия конвергентного магматизма близки по времени максимумы калия рифтогенного магматизма ~15.5, ~3.6–3.4 млн лет назад и минимум калия ~10 млн лет назад. Временное соответствие минимумов калия в конвергентных и рифтогенных базальтах характеризует структурную перестройку магматической системы. Максимум калия в рифтогенных базальтах ~7.4 млн лет назад не имеет соответствующего выражения в конвергентных базальтах. Противофазные квазипериодические вариации концентрации калия в лавах Орхон-Селенгинского среднегорья и Восточного Хангая подчеркивают динамическую

противоположность, проявившуюся ~5.5, 3.6–3.4 и ~1.3 млн лет назад, между конвергентным магматизмом Ноён-Восточно-Хангайской магистральной зоны и магматизмом Центрально-Монгольской рифтовой зоны.

За фазой извержений высококалийных лав хр. Арц-Богд около 19.6 млн лет назад через 4 млн лет следовали извержения лав около 15.6 млн лет назад с концентрацией калия 2.7 мас. % на Долино-Озерском поле. Извержения на нем продолжались до 12.2 млн лет назад с относительным повышением калия до 3.3 мас. %, сопровождаясь извержениями лав Байдарикского поля интервала 13–11 млн лет назад с более высокой концентрацией калия (3.4–3.6 мас. %). На Байдарикском поле эта вулканическая фаза предвлялась и сменялась фазами извержений умереннокалийных лав, соответственно, около 15.6 и 7.0 млн лет назад, а на Угей-Нурском поле, наоборот, фаза извержений умереннокалийных лав около 9.6 млн лет назад предвлялась и сменялась фазами извержений высококалийных лав, соответственно, 15.5–14.2 и около 7.4

млн лет назад. Подобным образом концентрации калия варьировали в противофазе в лавах хр. Восточный Хангай и Орхон-Селенгинского среднегорья. Извержениями умереннокалиевых базальтов на Улан-Цаб-

Худукском, Цэцэрлэгском и Верхне-Чулу-  
тынском вулканических полях обозначились более длительные магматические квази-периоды порядка 7 млн лет (рис. 5).



**Рис. 5.** Соотношения извержений высоко- и умереннокалиевых лав Центральной Монголии во временном интервале 23.4–2.1 млн лет назад. По датировкам пород разных вулканических полей обозначены квазипериоды высоко- и умереннокалиевого магматизма, соответственно, 4.5 и 7.0 млн лет.

**Fig. 5.** Relationships between high- and moderate-K lava eruptions in Central Mongolia in the time interval 23.4–2.1 Ma. From dating of rocks in different volcanic fields, quasi-periods of high- and moderate-K magmatism are designated at 4.5 and 7.0 Ma, respectively.

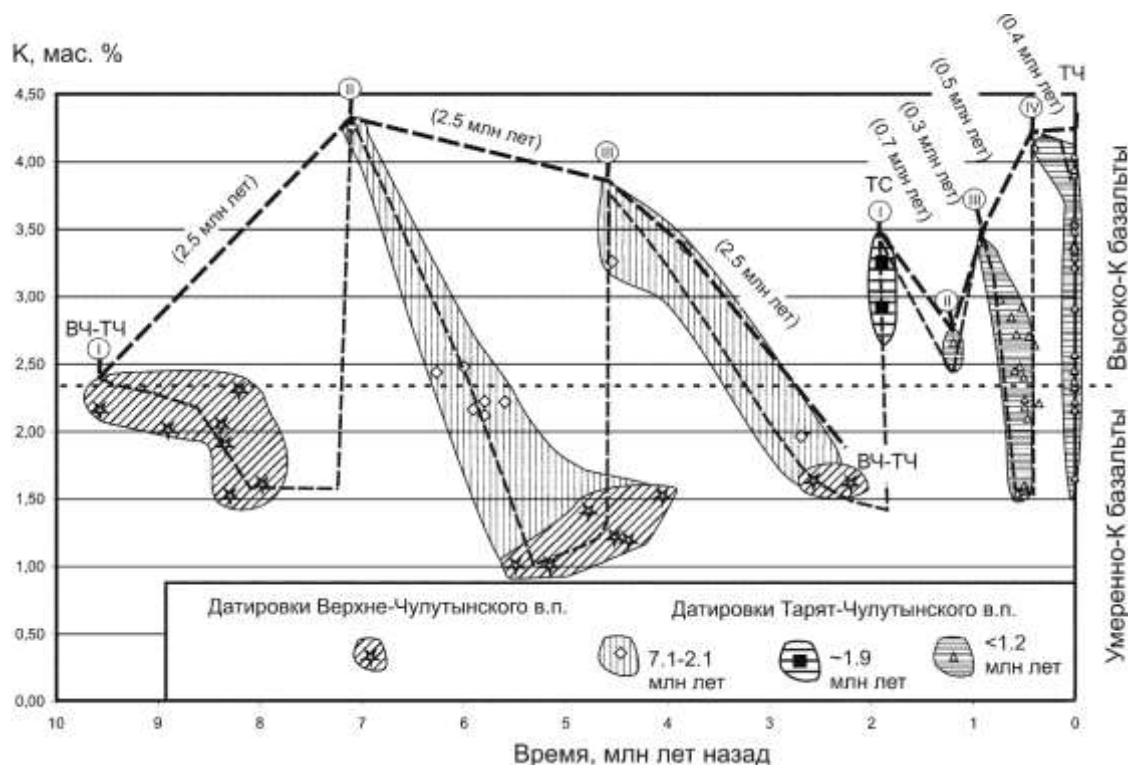
Умереннокалиевый вулканизм Цэцэрлэгского и Хойт-Тамирского полей продолжался с 17.0 до 9.7 млн лет назад при относительном повышении концентрации калия, согласованном во времени с началом высококалиевого вулканизма Долино-Озерского и Угей-Нурского полей 15.6–15.5 млн лет назад. Это вызвано эффектом наложения процессов высококалиевого магматизма на ход эволюции умереннокалиевых расплавов, что свидетельствует о частичной согласованности эволюции мантийных процессов с быстрым эпизодическим воспроизводством

высококалиевых магм и замедленным, продолжительным – умереннокалиевых.

В интервале 10–2 млн лет назад временные вариации калия в базальтах Верхне-Чулутынского и Тарят-Чулутынского полей были согласованы между собой с квази-периодичностью 2.5 млн лет. На Тарят-Чулутынском поле эта квазипериодичность выражена в фазах извержений высококалиевых лав около 7.1 и 4.6–3.8 млн лет назад. На Верхне-Чулутынском поле высококалиевые лавы не известны. Лавы умереннокалиевого состава, излившиеся в интервале 9.6–8.0 млн лет назад,

составляли вулканический интервал, предшествовавший извержениям Тарят–Чулутынского поля, а лавы интервалов 5.5–4.0 и 2.6–2.1 млн лет назад обозначали финальные фазы извержений с минимальной концентрацией калия двух других вулканических интервалов. В последние 2 млн лет извержения

на Верхне-Чулутынском поле не возобновлялись, а фазы высококалиевых извержений Тарят–Чулутынского поля выстраивались в четыре интервала с квази-периодичностью 0.3–0.7 млн лет. Два последних включали, кроме высококалиевых, лавы умереннокалиевого состава (рис. 6).



**Рис. 6.** Переход от извержений Верхне-Чулутынского и Тарят–Чулутынского вулканических полей в интервале 9.6–2.1 млн лет назад с согласованными квазипериодическими вариациями калия в лавах (интервалы I–III с квазипериодичностью 2.5 млн лет) к извержениям на Тарят–Чулутынском поле (интервалы I–IV с квазипериодичностью 0.3–0.7 млн лет).

**Fig. 6.** Transition from eruptions in the Verkhny Chulutyn and Taryat-Chulutyn volcanic fields in the interval 9.6–2.1 Ma with coordinated quasi-periodic variations of potassium in lavas (intervals I–III with a quasi-periodicity of 2.5 Ma) to the eruptions in the Taryat-Chulutyn field (intervals I–IV with a quasi-periodicity of 0.3–0.7 Ma).

*Смена геологических процессов от среднего мела (апт, альб) к позднему мелу и кайнозойю около 90 млн лет назад в других регионах Азии*

На территории Саян и Центральной Монголии вулканические поля последних 90 млн лет пространственно соответствуют Саяно-Монгольскому низкоскоростному домену глубинного уровня 50–200 км (Рассказов и др., 2003). Позднемеловые, ранне-среднекайнозойские и позднекайнозойские вулканические извержения распространялись от Южной Гоби до Хакасии в виде полосы

протяженностью около 2 тыс. км при средней ширине порядка 500 км. Начальный вулканизм этого низкоскоростного домена проявился в позднем мелу на окончаниях Хакасско-Гобийской вулканической полосы. Интервалу вулканизма в Хакасии 79–72 млн лет назад соответствовал интервал вулканизма в самой южной части Гоби 76–71 млн лет назад. Вулканизм смещался из Хакасии к югу, в Саяно-Хамардабанскую область, и из Южной Гоби к северу – в Хангайскую (Хангай и Орхон-Селенгинское среднегорье). Магматические события в Западной Туве были ограничены интервалом 28–23 млн лет

назад. При отсутствии событий раннего-среднего кайнозоя, вулканизм этого временного интервала оказался пространственно разобщенным с начальными вулканическими проявлениями Хакассии. Последующие позднекайнозойские извержения распространились в целом юго-восточнее.

На юго-востоке Китая гранитоидный надсубдукционный магматизм занимал обширную территорию в середине мела и прекратился около 88 млн лет назад. Предполагалось, что в это время или несколько раньше (около 100 млн лет назад) в западной части Тихого океана образовалась субдукционная пробка (Niu et al., 2015).

В Восточной Азии структурная перестройка середины мела отчетливо выражена в распределении бассейнов седиментации (Кириллова, 1997, 2000). Резкая смена характера магматизма выявлена на п-ове Шандунь, в восточной части Сино-Корейского кратона. В интервале 90–75 млн лет назад здесь имел место амагматичный временной интервал, отделявший позднефанерозойские извержения базальтов от контрастного интрузивного гранитного и базитового магматизма, в целом свойственного предшествовавшему развитию территории. По изотопным характеристикам неодайма и стронция, магматизм, предшествовавший перерыву, был производным обогащенной мантии и коры. После перерыва стали поступать базальтовые расплавы из источников обедненной мантии (Xu et al., 2004).

В Северо-Восточной Азии, на северной и западной континентальных окраинах Охотского моря, были активны Охотско-Чукотский и Восточно-Сихотэ-Алинский вулканические пояса андийского типа: первый – во временном интервале 110–75 млн лет назад, второй – в интервале 95–65 млн лет назад (Котляр, Русакова, 2004; Rasskazov, Taniguchi, 2006; Акинин, 2012). Существенное различие этих территорий заключается в разной роли последующих процессов, получивших выражение в извержениях лав внутриплитного типа. К северу от Охотского моря вулканизм Охотско-Чукотского пояса сменялся 86–72 млн лет назад переходным вулканизмом островодужного–внутриплитного

типа и продолжался до 54 млн лет назад извержениями внутриплитных базальт–трахибазальтовых и трахибазальт–трахириолитовых комплексов (Белый, Белая, 1998; Котляр, Русакова, 2004). К западу от Охотского моря вулканизм Восточно-Сихотэ-Алинского пояса сменялся в раннем-среднем кайнозое переходным вулканизмом островодужного–внутриплитного типа, а затем извержениями внутриплитных базальт–трахибазальтовых комплексов, продолжавшимися в позднем кайнозое до 3 млн лет назад. Такая длительная «внутриплитная» активность на континентальной окраине сочеталась с субдукционными процессами со стороны Тихого океана (Рассказов и др., 2005б, 2014б).

### **Показатели глобальных геодинамических процессов**

#### *Подходы к выделению рядов взаимосвязанных геологических процессов в рамках фанерозоя*

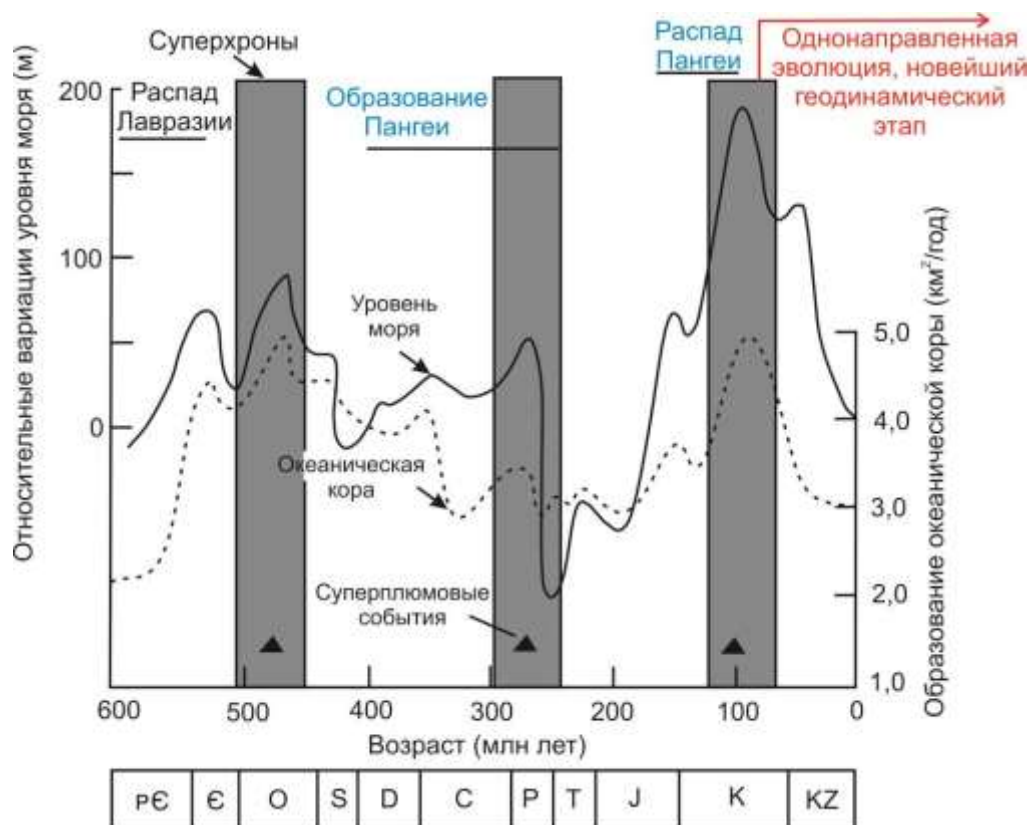
Трапповая провинция Декан рубежа мезозоя и кайнозоя представляет собой одну из крупных магматических провинций, сочетающихся, как предполагается, с импульсами глаукофанового метаморфизма через каждые 30 млн лет, начиная с 550 млн лет назад (Добрецов и др., 2001). С этого времени формировались комплексы высоких давлений (Maruyama, Liou, 1998). Таким образом, сочетание крупных магматических провинций и высокобарных комплексов должно характеризовать повторяющееся геодинамическое состояние Земли во временных рамках всего фанерозоя. Чтобы соотнести эти события с современным состоянием Земли, нужно ввести в их совокупность современные геодинамические обстановки, в которых крупная магматическая провинция будет сочетаться с комплексом высоких давлений. Такое сочетание встало бы в единый ряд однотипных процессов, действительно завершающихся современным геодинамическим состоянием Земли, и вывело бы на предметное обсуждение времени запуска процессов этого типа и их воспроизводимости к настоящему времени.

На Земле имеются только три расплавных аномалии, в которых вулканизм начинается с образования крупной магматической провинции (Реюнион – Декан, Луизвиль – Онтонг Джава, и Тристан – Парана). Вулканизм этих магматических провинций последовательно развивается в виде мигрирующих цепочек вулканов до настоящего времени (Foulger, 2010). В крупной магматической провинции Декан вулканизм был запущен около 90 млн лет назад, в провинции Онтонг Джава – около 122 млн лет назад, в провинции Парана – около 133 млн лет назад. Во всех других случаях процессы формирования крупных магматических провинций в фанерозое носят прерывистый характер и не могут рассматриваться с точки зрения анализа эволюции того или иного региона к настоящему времени.

В фанерозое обозначаются три суперхроны (ордовикская, пермская и меловая) с шагом около 200 млн лет. С этими суперхронами коррелируются тектонические события распада суперконтинентов, уровня моря и предполагаемые суперплюмовые события.

При переходе от раннего-среднего фанерозоя к позднему завершается стабильный режим существования единой палеомагнитной меловой суперхроны прямой полярности Джалал. Распад Вегенеровской Пангеи начинается до суперхроны Джалал. Условия для направленного развития процессов к настоящему времени складываются в конце этой суперхроны.

В реконструкциях спрединга океанического дна Д.С. Енгебретсон и др. (Engebretson et al., 1984) были вынуждены признать, что отсутствие полосовых линейных аномалий во время мелового магнитного периода затишья между хронами M11 и 34 (135–85 млн лет назад) не позволяет выполнить удовлетворительных плитотектонических построений. Соответственно, предполагается, что этому временному интервалу соответствует главная перестройка в движении литосферных плит (Rea, Dixon, 1983). С этой перестройкой логично связать начало новейшего геодинамического этапа в масштабе всей Земли (рис. 7).



**Рис. 7.** Соотношение новейшего геодинамического этапа с крупной квазипериодичностью геологических процессов в фанерозое. Используется основа рисунка из работы (Condie, 2001). Образование и распаду Пангеи соответствуют разные суперхроны. Направленность процессов

эволюции Земли между этими суперхронами меняется. С конца последней суперхроны Джалал реконструируется последовательное уменьшение скорости образования океанической коры и снижение уровня моря, которое можно связать с процессами и силами новейшего геодинамического этапа.

**Fig. 7.** Relationship between the latest geodynamic stage and the major quasi-periodicity of geological processes in the Phanerozoic. The figure is based on (Condie, 2001). The formation and breakup of Pangea correspond to different superchrons. The direction of Earth's evolutionary processes changes between these superchrons. Since the end of the last (Jalal) superchron, a consistent decrease in the rate of oceanic crust formation and a fall in sea level have been recoded, which can be linked to the processes and forces of the latest geodynamic stage.

*Седиментационные и вулканические отклики на циклы орбитального вращения Земли: обнаружение нарушения великих циклов эксцентриситета 87–85 млн лет назад*

Цикличность орбитального вращения Земли отражается в осадконакоплении и вулканизме. Эти процессы имеют разную природу. Циклическая седиментация в длительно существовавших бассейнах фиксировала ритмику осадконакопления на поверхности Земли, подверженной меняющимся солнечным инсоляциям. Импульсный вулканизм отражал ритмику высвобождения тепловой энергии планеты в связи с возникновением в ней сил плавучести в подлитосферной мантии и тектонических усилий в литосфере. Взаимное соответствие квазипериодов этих процессов означает общепланетарный характер вызывающих их причин.

Квазипериодичность осадконакопления связывается с палеоклиматической гипотезой сербского астрофизика Милутина Миланковича, в которой предполагается влияние на палеоклимат астрономически обусловленных циклических инсоляционных вариаций Солнца (Imbrie et al., 1992; Laurens et al., 1996; Hilgen et al., 1997). Циклы 0.4 и 0.1 млн лет связываются с изменением эксцентриситета орбитального вращения Земли, а циклы 41 и 23 тыс. лет – с изменением наклона оси вращения Земли и возникновением прецессии. При сглаживании седиментационных гармоник выделяются и более продолжительные циклы: 2.4 млн лет (великий цикл эксцентриситета) и 1.2 млн лет (великий цикл наклона оси вращения Земли) (Hinnov, 2013). Теоретические ряды данных об орбитальной цикличности выстроены для интервалов от

последних 500 тыс. лет до 10 млн лет (Hilgen, 1991; и др.) и для более длительного интервала последних 250 млн лет (Laskar et al., 2004). Экстраполяция орбитальной цикличности в геологическое прошлое лимитируется, однако, резонансными явлениями, происходившими с орбитой Земли во временном интервале последних 100–50 млн лет в связи с ее хаотическим вращением (Laskar et al., 2004, 2011; Hinnov, 2013).

В недавно опубликованной работе (Ma et al., 2017) определен нижний предел орбитальных реконструкций по меловым осадочным толщам малоглубинного морского бассейна Северной Америки во временном интервале 87–85 млн лет назад. Великий цикл эксцентриситета Земли 2.4 млн лет проявился в интервале 87–85 млн лет назад за 1.2 млн лет. Такое нарушение в ритмике орбитального вращения было единственным за последние 250 млн лет. Оно совпало с определением точки отсчета новейшего геодинамического этапа эволюции Земли (Рассказов, Чувашова, 2013а,б). Ма и др. высказали предположение, что орбитальное вращение Земли в это время резко изменилось из-за резонансного взаимодействия ее орбиты с орбитой Марса.

Чувствительность ритмики осадконакопления к вариациям орбитальных параметров Земли ограничивается великим циклом эксцентриситета 2.4 млн лет и включает менее продолжительные циклы эксцентриситета, наклона оси вращения, прецессии и нутации. В эти периоды вписывается квазипериодичность вулканизма позднего кайнозоя. В позднем мелу и раннем-среднем кайнозое обнаруживаются более длительные квазипериодические вариации 7, 10 и 20 млн лет, не регистрируемые в осадочных летописях. Эти

более продолжительные вариации отчетливо проявлены в обстановке сжатия литосферы Центральной Азии. В этой же обстановке в квартере резко выражен переход к квазипериодам 0.3–0.7 млн лет.

*Рассредоточение магм ультрамагнезиального состава в течение мела и кайнозоя на востоке Азии и извержение коматиитовых магм около 90 млн лет назад на о. Горгона*

Поступление магм ультрамагнезиального состава ( $MgO = 18\text{--}32$  мас. %) в истории Земли маркирует адиабатическое поднятие мантийного материала с глубин нижней мантии. Коматиитовая магма с ультравысокой температурой поступает из обедненного источника. Меймечитовая или пикритовая магма может образоваться при более низкой температуре в присутствии компонентов обогащенного источника.

В эволюции Земли примечателен эпизод ультрамагнезиального магматизма около 90 млн лет назад. В это время произошли извержения коматиитов о-ва Горгона. Подобные магмы из источников обедненного типа были характерны для ранней Земли. Их проявление на о. Горгона представляет собой уникальное событие для временного интервала последнего миллиарда лет (Arndt et al., 2008).

Другие магмы ультрамагнезиального состава – меймечиты и пикриты – имели достаточно широкое распространение в позднем фанерозое. Наряду с первыми траппами провинции Мейшань, минимуму 262 млн лет назад соответствуют среднепермские пикриты из юрского аккреционного комплекса Мино в Юго-Западной Японии. Минимум 160–158 млн лет назад сопоставляется с извержениями меймечитов Востока Азии (пояса офиолитов о-вов Хоккайдо и Сахалин, хр. Сихотэ-Алинь, провинции Хейлунцзян). Маркирующая роль меймечитов выражена также в палеогеновом поясе Минеока, в Японии (Ishivatari, Ishiyama, 2004). Эти меймечиты относятся к интервалу 40–37 млн лет назад.

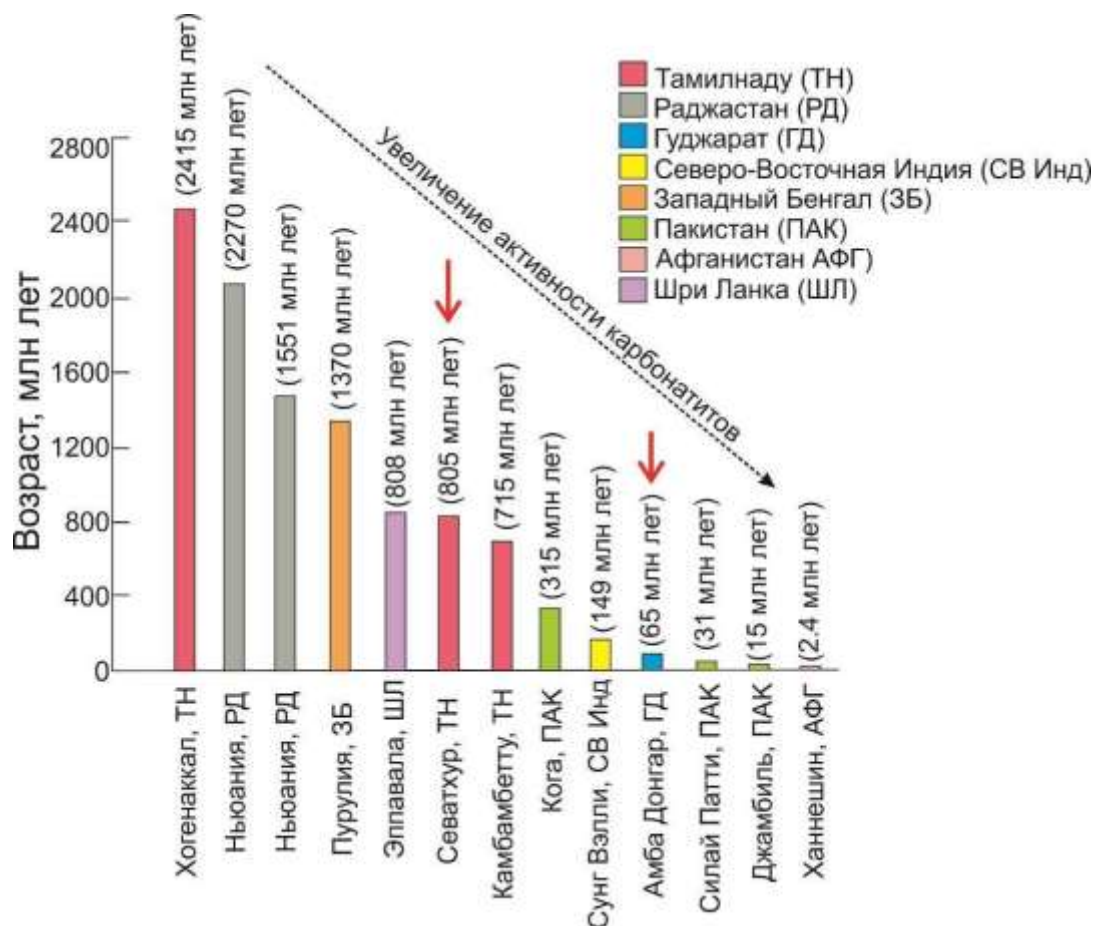
Нижнемеловые меймечиты Самаркинского террейна (Сихотэ-Алинь)

сопоставляются по возрасту со становлением на юге Алданского щита массива Кондер, для дунитов и клинопироксенитов которого получены палеомагнитные данные, соответствующие положению виртуального магнитного поля 110 млн лет назад (Каретников, 2006). Для дунитов и клинопироксенитов ультраосновного Чадского массива, который входит в кондерский комплекс сходных по строению массивов Алданского щита (Кондер, Чад, Инагли, Сыбах), также получен раннемеловой палеомагнитный полюс (Каретников, 2015). Раннемеловой возраст подтвердился определением возраста для платиновой минерализации методом  $^{190}\text{Pt}\text{--}^4\text{He}$  для массива Кондер ( $125\pm 6$  и  $121\pm 6$  млн лет) и для массива Чад ( $110\pm 5$  млн лет). Для Инаглинского массива получен более древний возраст ( $141\pm 7$  млн лет), а для массива Гальмознан – более молодой ( $64\pm 3$  и  $62\pm 3$  млн лет) (Шуклюков и др., 2012; Якубович, 2013). Возраст массивов кондерского комплекса растянут на весь меловой период – от его нижнего рубежа до верхнего.

*Увеличение роли карбонатитов в Индии в ходе эволюции Земли и ограничение распространения щелочных комплексов с карбонатитами в Северной Азии серединой мела*

В позднем мезозое Внутренней Азии установлены комплексы щелочных пород с карбонатитами в четырёх обособленных друг от друга ареалах: Западно-Забайкальском, Южно-Хангайском, Центрально-Алданском и Центрально-Тувинском (Коваленко и др., 2006). Наиболее молодые извержения карбонатитов датируются альбом.

В позднем мелу и кайнозое карбонатитовый магматизм не проявился в Северной Азии, тогда как на п-ове Индостан роль карбонатитов постоянно возрастала. На Индийском субконтиненте карбонатиты встречаются не только в Индии, но и в Пакистане, Афганистане и Шри-Ланке. Общий возрастной диапазон массивов щелочных пород с карбонатитами составляет от  $>2400$  млн лет до  $<0.6$  млн лет (Randive, Meshram, 2020) (рис. 8).

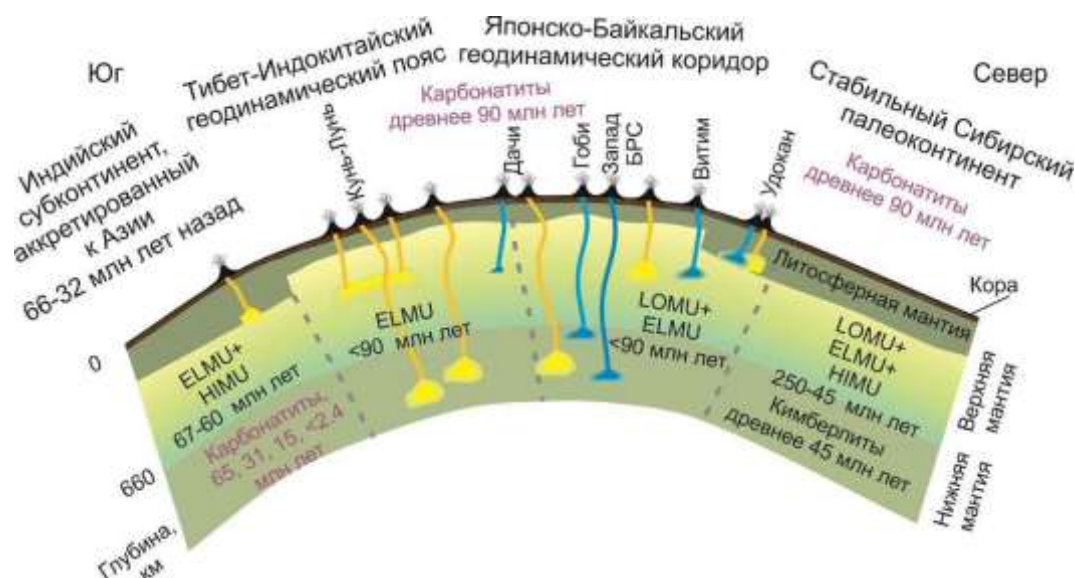


**Рис. 8.** Диаграмма временного распространения карбонатитового магматизма на Индийском субконтиненте (Randive, Meshram, 2020). Объекты исследований (Rasskazov et al., 2025) помечены красными стрелками.

**Fig. 8.** Diagram of temporal distribution of carbonatite magmatism in the Indian subcontinent after (Randive, Meshram, 2020). The study subjects (Rasskazov et al., 2025) are marked with red arrows.

Карбонатиты распространяются в течение всего позднего фанерозоя в Северо-Восточной Африке. Здесь известны многочисленные выходы карбонатитов и открыт действующий вулкан Олдоиньо Ленгаи, извергающий карбонатитовую магму (Доусон, 1983). В Северной Азии карбонатиты распространяются в фанерозое до раннего мела, включительно, и отсутствуют на новейшем геодинамическом этапе. Возрастной диапазон

карбонатитов Индостана (рис. 8) в верхнем пределе подобен возрастному диапазону карбонатитов Африки и отличается от возрастного диапазона карбонатитов Северной Азии (рис. 9). Такая возрастная специфика карбонатитов служит дополнительным аргументом для обозначения начала новейших геодинамических процессов в Азии около 90 млн лет назад (Рассказов, Чувашова, 2013а,б).



**Рис. 9.** Схема кайнозойского проявления карбонатитов на Индийском субконтиненте в соотношении с проявлением карбонатитов в Северной Азии. Схема из работы (Rasskazov et al., 2025) с изменениями. Синим цветом обозначены источники LOMU, желтым – источники ELMU.

**Fig. 9.** Scheme of Cenozoic displaying of carbonatites at the Indian subcontinent in relation to those in North Asia. The scheme is from (Rasskazov et al., 2025). LOMU sources are shown in blue, ELMU sources in yellow.

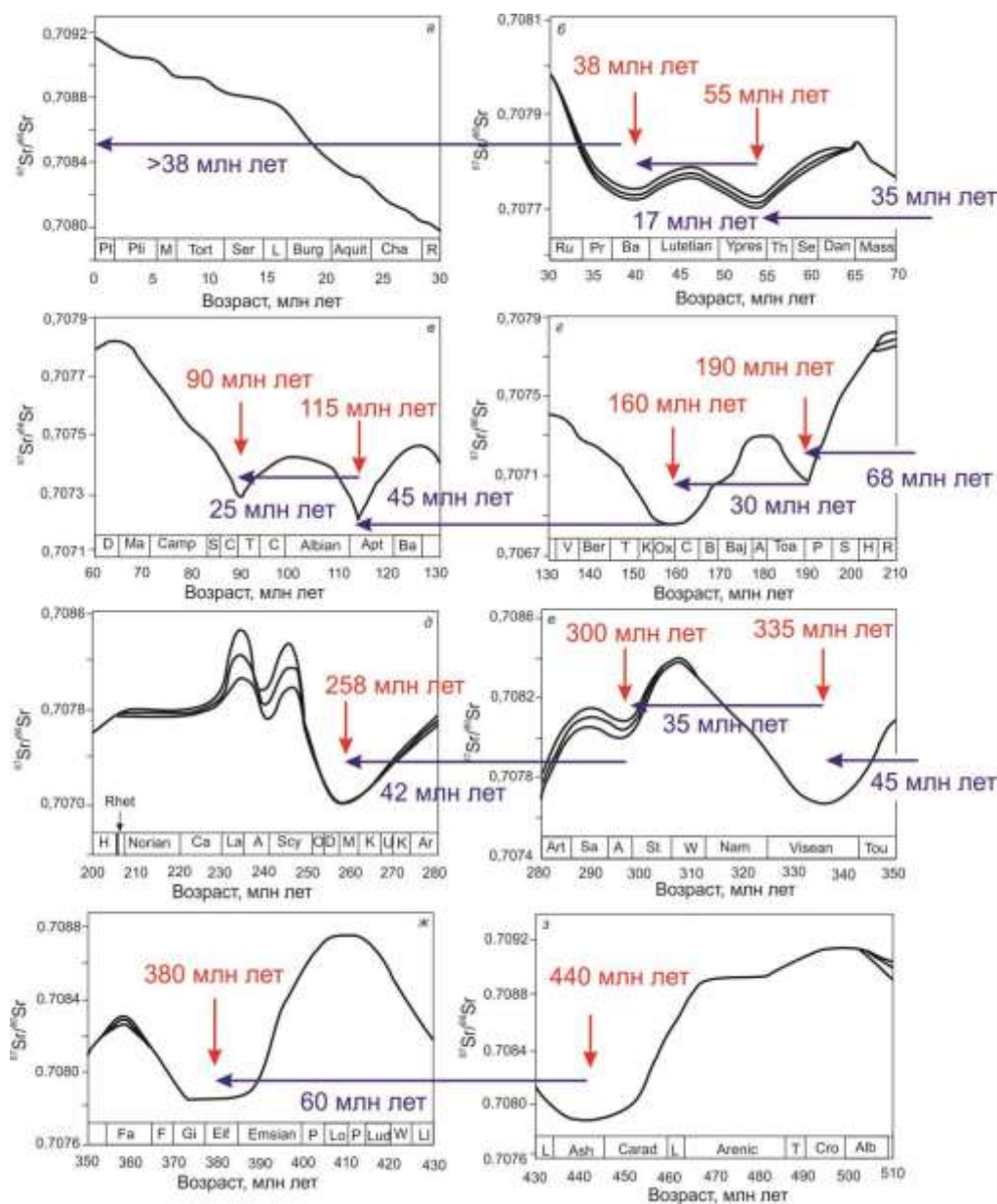
Из Рb-изотопных данных следует, что карбонатитовые расплавы Самалпатти (Индия) возрастом 800 млн лет были производными протолита мантийного источника ранней Земли возрастом около 4.26 млрд лет. После отделения Индийского субконтинента от Гондваны и его соединения с Азией силикатные расплавы крупной магматической провинции Декан генерировались из протолитов возрастом около 2 млрд лет средней геодинамической эпохи эволюции Земли. Карбонатиты Амба Донгар возрастом 66 млн лет (Индия) также были производными протолитов мантии ранней Земли, частично измененных событием возрастом около 2 млрд лет. Меловые карбонатиты массивов Мало-Мурунский и Вэйшань Северной Азии генерировались только из протолитов средней геодинамической эпохи эволюции Земли (соответственно, 3.45 и 2.2 млрд лет) (Рассказов и др., 2024; Rasskazov et al., 2025). Трасса горячего пятна, пересекающая Индийский океан, отошла от Индии около 90 млн лет назад (Sheth, 2005).

#### Глобальный поворот в эволюции Земли около 90 млн лет назад в морских записях $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Независимую информацию о глобальной эволюции Земли несет изотопный состав Sr Мирового океана. Поступление Sr в морскую воду в тот или иной временной отрезок зависит от соотношения материала из коровых (обогащённых радиогенным  $^{87}\text{Sr}$ ) и мантийных (обеднённых этим изотопом) источников.

#### Квазипериодичность минимумов $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

В анализе морских записей  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  основное внимание уделялось минимумам (McArthur et al., 2001, 2012). Порядок ритмичности  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  Мирового океана в первые десятки млн лет выдерживался в течении всего фанерозоя. Наименее продолжительный интервал (17 млн лет) разделял минимумы 55 и 38 млн лет назад, наиболее продолжительный (68 млн лет) – минимумы 258 и 190 млн лет назад (рис. 10).



**Рис. 10.** Квазипериодические вариации  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  Мирового океана в фанерозое. Использованы кривые из работы (McArthur et al., 2001). Минимумы значений стронциевого изотопного отношения обозначены цифрами красного цвета со стрелками.

**Fig. 10.** Quasiperiodic variations in  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in the World Ocean during the Phanerozoic. Curves from (McArthur et al., 2001) are used. Minima in the strontium isotope ratio are indicated by red numbers with arrows.

В работе (McArthur et al., 2001) отмечалась связь изгибов кривой  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  с извержениями континентальных флуд-базальтов крупных магматических провинций 17, 65, 92, 110?, 125, 184?, 200?, 250 и 258 млн лет назад. Часть изгибов кривой не сопоставлялась с какими-либо извержениями флуд-базальтов, а некоторые извержения флуд-базальтов не имели соответствующих изгибов на кривой.

По результатам статистических исследований временных вариаций  $\Delta^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в морских карбонатах важнейшее значение придавалось минимумам 54.5, 161.5, 264.5, 342.5 и 452.5 млн лет с квазипериодичностью 100 млн лет. Такие периодические минимумы в морских записях изотопных отношений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , свидетельствующие о ритмике преобладания мантийных источников, можно

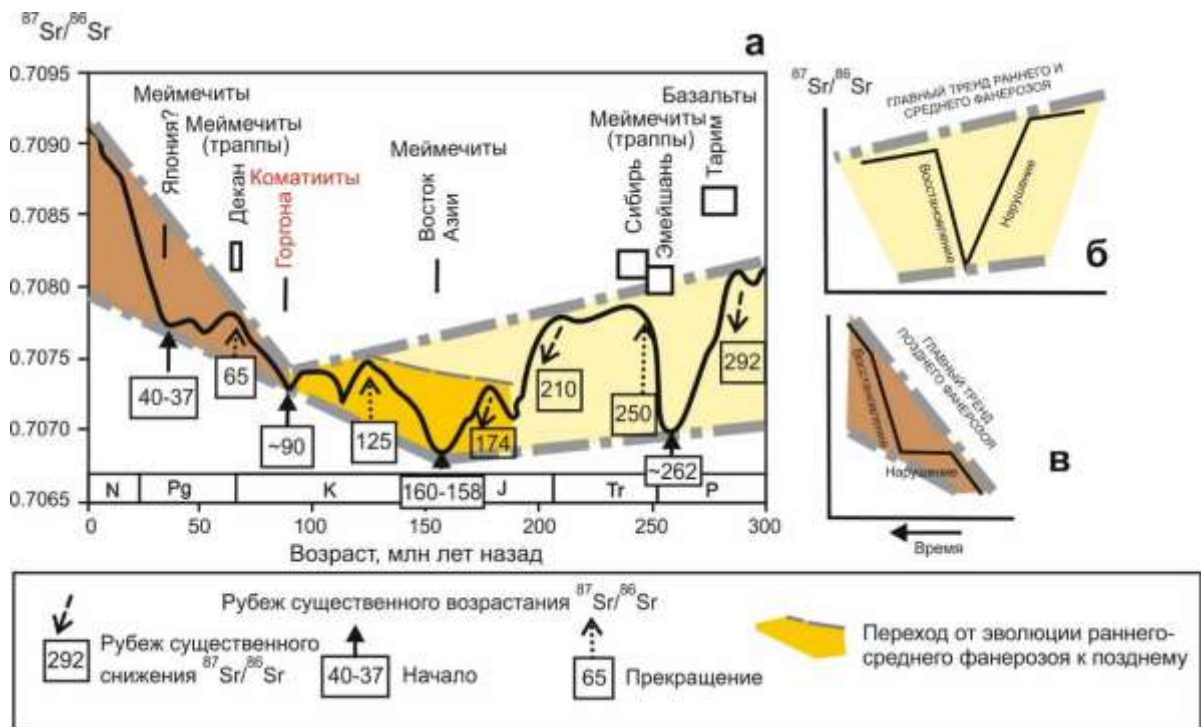
интерпретировать в пользу единообразия всей фанерозойской геодинамики. Было также замечено удовлетворительное совпадение минимумов 100-миллионной квазипериодичности с глубокими трогами линий морских записей рубежей гваделупской и лопингинской эпох пермского периода (минимум 264.5 млн лет назад), а также средней и поздней эпох юрского периода (минимум 161.5 млн лет назад). С трогами линии морских записей минимумов совпадают визейский ярус каменноугольного периода (342.5 млн лет назад) и поздний ордовик (452.5 млн лет назад) (Диденко, 2011).

**Смена главных трендов вариаций  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в морской воде от раннего-среднего фанерозоя к позднему фанерозою**

По данным из работ (McArthur et al., 2001, 2012), максимальные отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в морской воде составляли ~ 410 млн лет назад величину 0.7088, а в интервале 500–490 млн лет назад достигали значения 0.70915, т. е. находились на уровне, близком к современному  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . В свете интерпретации изотопного состава Sr с выделением главного тренда основную стабилизирующую роль в

эволюции Земли играло осаждение в составе карбонатов Мирового океана континентального стронция, а относительные отклонения от него с понижением  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  отражали наложенный процесс контаминации морской воды мантийным стронцием. Отношение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  главного тренда снизилось с 500 до 100 млн лет назад от 0.70915 до 0.70740. Затем это отношение главного тренда с 85 млн лет назад до настоящего времени возросло от 0.7074 до 0.7092.

В позднем фанерозое отчетливо выделяется главный тренд вариаций  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  с изгибом на рубеже ~ 90 млн лет, который принимается в качестве поворотного пункта в переходе от геодинамического этапа раннего и среднего фанерозоя к этапу позднего фанерозоя ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  во временных интервалах 305–285, 245–205, а также ~ 125 и ~ 100 млн лет назад, на позднефанерозойском – максимальные значения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в интервалах 85–65 и <15 млн лет назад). На обоих этапах фанерозоя наклоны обозначенных временных отрезков линий морских записей  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  согласованы с наклоном линии главного тренда (рис. 11).



**Рис. 11.** Главные тренды вариаций  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в морской воде раннего-среднего и позднего фанерозоя (a) и конфигурация импульсов мантийной подпитки на главных трендах морских записей  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в раннем-среднем (б) и позднем фанерозое (в) (Rasskazov, Chuvashova, 2017). На панели a изгиб верхней огибающей (конвергентной) линии тренда около 90 млн лет назад соответствует

начальной точкой отсчета новейшего глобального геодинамического этапа. Изгиб нижней огибающей (дивергентной) линии тренда около 160 млн лет назад означает предшествующую глобальную структурную перестройку, обозначенную относительным снижением  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  при переходе от эволюции раннего-среднего фанерозоя к позднему. Врезки *б* и *в* иллюстрируют нисходящий и восходящий характер главного тренда. Использована линия морских записей из работы (McArthur et al., 2001).

**Fig. 11.** Main trends of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  variations in seawater in the Early-Middle and Late Phanerozoic (*a*) and the configuration of mantle recharge pulses on the main trends of marine  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  records in the Early-Middle (*b*) and Late Phanerozoic (*c*) (Rasskazov, Chuvashova, 2017). In panel *a*, the bend in the upper envelope (convergent) trend line at about 90 Ma corresponds to the starting point of the latest global geodynamic stage. The bend in the lower envelope (divergent) trend line at about 160 Ma signifies the preceding global structural reorganization, indicated by a relative decrease in  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  during the transition from the Early-Middle to the Late Phanerozoic evolution. Insets *b* and *c* illustrate the descending and ascending nature of the main trend. The marine record line is used after (McArthur et al., 2001).

На кривой меловых и кайнозойских вариаций изотопных отношений стронция, наряду с минимумом 54.5 млн лет, различаются другие минимумы. На шкале записей выделяются интервалы малоамплитудных вариаций  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  во временных интервалах 140–90 и 70–37 млн лет назад и переход от последнего интервала к устойчивому повышению концентрации радиогенного  $^{87}\text{Sr}$  при общем последовательном возрастании изотопного отношения Sr с интервала 160–158 млн лет назад.

*Рассредоточенные эпизоды нарушения главных трендов как отражение разрастания коры современных океанов и магматизма океанов и континентов*

В рамках гипотезы тектоники литосферных плит определено место для 90 % всего вулканизма Земли, обусловленного процессами на границах плит – в срединных океанических хребтах и субдукционных зонах (Foulger, 2010). Именно этот вулканизм определял баланс растворенного вещества океанов. Повышение роли радиогенного  $^{87}\text{Sr}$  в последние 90 млн лет могло быть обусловлено поступлением в мировой океан материала континентов (континентальных окраин).

В эпизоды увеличения роли мантийного материала раннего и среднего фанерозоя (в минимумах  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) различается нарушение и восстановление главного тренда (рис. 11*б, в*). На пермо-триасовом отрезке кривой  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  временного интервала 292–250 млн лет назад минимум ~ 262 млн лет соответствует началу траппового магматизма

провинции Эмейшань (Guo et al., 2004). Между тем, возраст главной магматической фазы провинции Сибирских траппов (251–250 млн лет) соответствует не минимуму, а максимуму  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  на изгибе линии от восходящего отрезка 262–250 млн лет назад к отрезку слабых вариаций  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  250–210 млн лет назад. Базальтовые лавы крупной Таримской магматической провинции, извергавшиеся во временном диапазоне 292–272 млн лет назад (Li et al., 2012a), наоборот, соответствуют изгибу линии от отрезка слабых вариаций  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в интервале 310–290 млн лет назад к нисходящему отрезку во временном интервале 290–262 млн лет назад (Li et al., 2011, 2012; Zhang et al., 2012).

На примере пермо-триасового минимума морских записей  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  можно видеть, что эволюция главного тренда была нарушена во время активности крупной Таримской магматической провинции. Первые траппы Эмейшаня возрастом 262 млн лет фиксировали экстремальное нарушение и переход к восстановлению главного тренда. Траппы Сибири соответствовали по времени его полному восстановлению. Казалось бы, поступление больших объёмов мантийных магм должно было приводить только к нарушению стабильного поступления материала, обогащённого радиогенным  $^{87}\text{Sr}$ . В реальности, эпизоды активности крупных магматических провинций маркируют все переломные моменты пермо-триасового импульса нарушения и восстановления главного тренда. По видимому, активность крупных

магматических провинций отражала общие перестройки, происходившие в ходе эволюции Земли.

Наиболее глубокое положение минимума отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в морских водах 160–158 млн лет назад имеет логическое объяснение. Снижение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  относительно главного тренда началось во временном интервале 210–200 млн лет назад. В интервале 200–160 млн лет назад произошло неполное восстановление главного тренда с наложением нового импульса подпитки мантийным стронцием около 175 млн лет назад. Результатом наложения явилось самое низкое значение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (0.70685) в интервале 160–158 млн лет назад за всю фанерозойскую историю Мирового океана. После второго (наложенного) импульса главный тренд оказался восстановленным к 125 млн лет назад. Аномалия, выраженная в минимальных отношениях изотопов Sr, явилась, таким образом, следствием перекрытия эффектов двух импульсов возрастания роли мантийного стронция в Мировом океане в общем ходе геологической эволюции раннего-среднего фанерозоя.

После временного отрезка главного тренда 125–95 млн лет назад, приблизительно соответствовавшего суперхроне Джалал, должен был наступить переход к импульсу нарушения, но снижение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в морской воде было малоамплитудным с минимумом ~ 90 млн лет назад. В интервале 90–85 млн лет назад отношение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  возросло до прежнего уровня, а дальнейшее более пологое повышение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  временного отрезка 85–65 млн лет назад приобрело статус главного тренда на позднефанерозойском этапе эволюции.

Заметим, что изотопное отношение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  возрастало в морской воде на 0.0002 единицы за 10 млн лет во временном интервале 85–65 млн лет назад и почти с таким же приращением увеличивалось в последние 15 млн лет. Принимая эти части кривой в качестве характеристики главного тренда в последние 90 млн лет, обозначим импульс отклонения от этого тренда – его нарушение на временном отрезке 65–37 млн лет назад и восстановление на временном отрезке 37–15 млн лет назад. Если нарушение главного

тренда импульсом мантийной подпитки в раннем и среднем фанерозое выражалось в снижении  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , а восстановление – в возрастании этого отношения, нарушение и восстановление главного тренда в позднем фанерозое было иным. При нарушении тренда в интервале 65–37 млн лет назад отношение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  менялось во времени слабо, а при его восстановлении в интервале 37–15 млн лет назад быстро возрастало.

По аналогии с пермо-триасовым импульсом нарушения и восстановления главного тренда, можно найти магматические маркеры переломных моментов импульсов нарушения главного тренда позднефанерозойских морских записей  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . К примеру, на окончании отрезка 85–65 млн лет назад приходится активность крупной магматической провинции Декан. В качестве магматического эпизода, сопровождавшего восстановление средне-позднефанерозойского главного тренда, можно принять максимальную активность крупной магматической провинции Снэйк-Ривер (~17 млн лет назад). Но активность такой крупной магматической провинции как Эфиопской ~30 млн лет назад в морских записях  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  не отразилась.

Отмеченные позднефанерозойские рубежи морских записей  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (90, 65, 40–37 и 17–15 млн лет назад) были отчётливо обозначены в магматической активности и тектонических перестройках разных регионов Азии. Так, магматизм окраинно-континентального Восточно-Сихотэ-Алинского пояса начинался около 90 млн лет назад и завершался около 65 млн лет назад. В Юго-Западной Японии этим же временным диапазоном ограничивалась эксгумационная активность пояса Санбагава, сопровождавшаяся магматизмом пояса Риоке (Rasskazov, Taniguchi, 2006).

Незначительные изменения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в интервале 66–37 млн лет назад приблизительно соответствовали интервалу Индо-Азиатской коллизии и среднеэоценовой структурной перестройке. Подобные тектонические и магматических процессы могли повлечь за собой слабые вариации  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  временного интервала 140–90 млн лет назад. По-видимому, коллизионный характер соединения (конвергенции) континентальных массивов в целом

обусловил главный тренд  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  морских записей раннего и среднего фанерозоя от 500 до 90 млн лет назад. Нарушение главного тренда свидетельствовало о структурных перестройках, сопровождавшихся возрастанием роли мантийных компонентов, возможно, в условиях усиления роли процессов деструкции (дивергенции). На позднефанерозойском этапе, главный тренд, нарушенный Индо-Азиатской коллизией и другими процессами, восстанавливался в интервале 37–15 млн лет назад, подобно тому, как восстанавливался главный ранне-среднефанерозойский тренд.

В раннем и среднем фанерозое главный тренд нарушался подпиткой мантийным материалом с нисходящими значениями  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  морских записей. В позднем фанерозое роль этой подпитки нивелировалась, фаза подпитки с нисходящими значениями  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  отсутствовала, а осуществлялось только увеличение этих отношений.

В раннем-среднем фанерозое мантийный материал мог поступать в океанскую воду благодаря увеличению скорости спрединга океанского дна, размыву океанических плато или вулканических островов. Сейчас невозможно составить полное представление о вкладе в изотопный баланс Sr эндогенных и экзогенных процессов. Важно подчеркнуть наличие этого вклада и эпизодический переход в состояние, соответствовавшее главному тренду. Около 90 млн лет назад динамика мантийных и коровых процессов изменилась. Теперь поступление мантийного материала, обеднённого радиогенным  $^{87}\text{Sr}$ , уже не имело самостоятельного значения, а получило существенное распространение растворение в океанской воде корового материала, выраженное в последовательном возрастании  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . Это нарастание было прервано процессами, сопровождавшими Индо-Азиатскую коллизию. В дальнейшем в океанской воде растворялся вновь преимущественно коровый материал с высоким  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .

Около 15 млн лет назад произошло отделение Южной Америки от Антарктиды и образовался пролив Дрейка, обеспечивший циркуляцию вод вокруг Антарктиды (Котляков, 1994). Связывая интервал последних 15 млн

лет с главным трендом позднефанерозойской эволюции, можно предположить, что характер вариаций изотопов Sr в Мировом океане зависел от циркуляции океанических течений. Обстановка, подобная обстановке главного тренда, сложившаяся в результате образования пролива Дрейка, могла существовать в интервале 85–65 млн лет назад и оказалась нарушенной Индо-Азиатской коллизией и сопутствующими событиями начала кайнозоя.

В позднем фанерозое эпизоды нарушения главных трендов морских записей изотопных отношений стронция в целом рассредоточены. В контексте событий позднего фанерозоя эпизоды нарушения главных трендов были лишь частично сопряжены с магматическими событиями, составлявшими эволюционный фон для разворота главных трендов морских записей  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .

### Обсуждение

Для ответа на основной вопрос о начале новейшего геодинамического этапа в Азии, прежде всего, принимаются во внимание соответствующие этому началу события, а также характер магматических процессов до и после начальной точки отсчета в контексте общей эволюции Земли в океанах и на континентах.

#### *Аргументация точки отсчета новейшей геодинамики в Азии около 90 млн лет назад, сопутствующие глобальные изменения на Земле*

Первоначальная гипотеза о начале новейшего геодинамического этапа в Азии около 90 млн лет назад исходит из данных о пространственно-временном распространении вулканизма Центральной Монголии (Рассказов, Чувашова, 2013а; Чувашова, Рассказов, 2014). Около 90 млн лет назад шошонит-латитовый и трахибазальтовый вулканизм Южной Гоби из источников с коровыми геохимическими характеристиками сменяется щелочнобазальтовым вулканизмом с характеристиками мантии. В ходе эволюции вулканизма Центральной Монголии последних 90 млн лет различаются его квазипериоды 20, 10, 7.5, 2.5 и 0.3–0.7 млн лет. На разных территориях конвергентный характер вулканизма

сменяется противофазным чередованием конвергентного и рифтогенного вулканизма. Гипотеза о единой направленности вулканического процесса Центральной Азии получает дополнительную аргументацию новыми данными по вулканизму Средней Гоби (Чувашова и др., 2024).

Запуск новейшей геодинамики Азии около 90 млн лет назад близок по времени или совпадает с: 1) окончанием суперхроны Джалал, 2) нарушением великих циклов эксцентриситета в орбитальном вращении Земли, 3) извержением наиболее высокотемпературных (ультрамагнезиальных) коматиитовых магм о-ва Горгона, 4) различием в распространении щелочных комплексов с карбонатитами в Северной Азии и Индии и 5) сменой главных трендов морских записей  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .

Особое звучание приобретает недавно обнаруженное прохождение великого цикла эксцентриситета Земли 2.4 млн лет за 1.2 млн лет в интервале 87–85 млн лет назад (Ma et al., 2017). Нарушение орбитального вращения Земли не могло не сопровождаться изменением ее внутреннего состояния. Более того, орбитальное движение Земли могло быть нарушено из-за ее особой внутренней динамики. Искривленному движению по орбите в интервале 87–85 млн лет назад предшествует длительный режим спокойного магнитного поля ядра Земли, начавшийся 119 млн лет назад. Вслед за искривленным движением, около 83 млн лет назад, ядро выходит из режима спокойствия.

В качестве основного фактора вариаций частоты палеомагнитных инверсий рассматривается величина теплового потока на границе ядро – мантия (Диденко, 2011). С увеличением теплового потока до некоторой критической величины геомагнитное поле из дипольного безынверсионного состояния способно перейти в инверсионное. И наоборот, при уменьшении теплового потока геомагнитное поле переходит из инверсионного в безынверсионное. Интервал прямой полярности Джалал – время длительного существования низкого теплового потока на границе ядро – мантия. Переход от суперхроны к инверсионному режиму около 83 млн лет назад, продолжающемуся до настоящего времени, обозначил повышение теплового потока на

границе ядро–мантия. Следовательно, переход к новейшей геодинамике отразил суть глобальных процессов, получивших развитие после интервала длительного относительного покоя на границе ядро – мантия.

*Особенность вулканизма среднего мела, предшествующего переходу к новейшему геодинамическому этапу*

В середине мела магматизм широко проявился на всей Земле. Огромные масштабы вулканизма, сопоставимого с проявлениями траппов крупных магматических провинций, породили гипотезу о связи глобальной средне-меловой вспышки магматизма с активностью суперплюма (Larson, 1991). Аномально-горячее состояние нижней мантии этого времени моделировалось нарушением термального граничного слоя 660 км лавинным погружением слэбов, вызывавшим обратный поток с его проявлением на земной поверхности около 125 млн лет назад и повторным проявлением – около 60 млн лет назад (Machetel, Humpler, 2003).

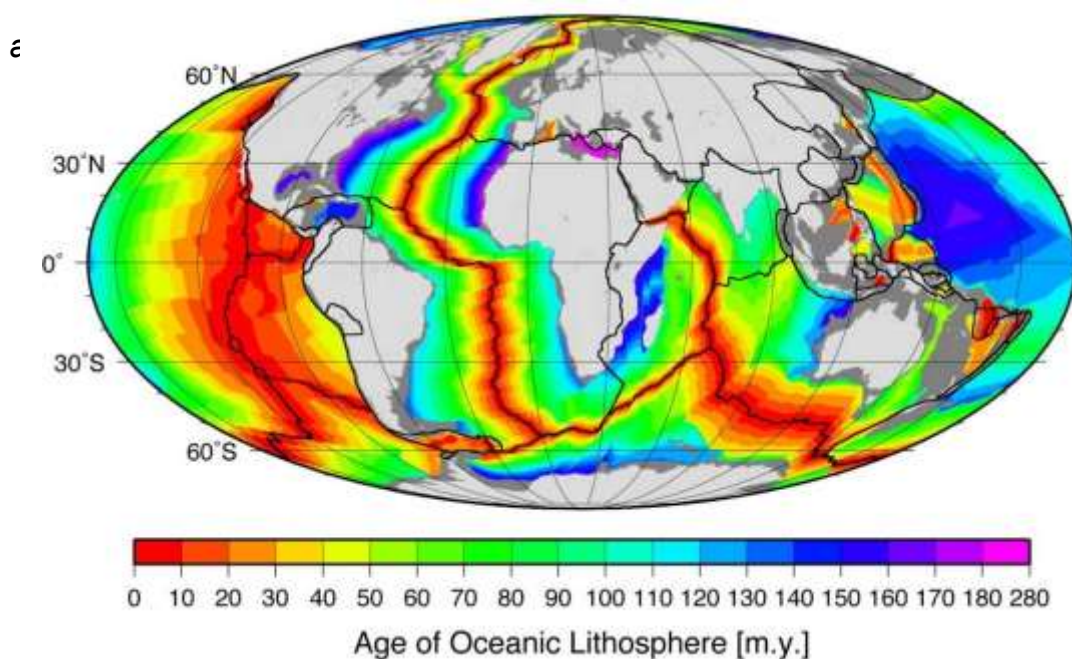
Среднемеловой вулканизм Центральной Монголии представлял собой часть обширной территории Азии, занятой мезозойским вулканизмом (Рассказов, Чувашова, 20126; Воронцов и др., 2016; Ярмлюк и др., 2019, 2020; Чувашова и др., 2024). Среднемеловые шошонитовые и трахибазальтовые вулканические извержения Азии были частыми, но после нарушения великого цикла эксцентриситета орбитального вращения Земли сменились в Центральной Монголии на щелочнобазальтовые извержения продолжительных (20-летних) интервалов. Частота импульсов вулканических извержений во Внутренней Азии с течением времени последовательно возрастала. В четвертичный период вулканические импульсы укладывались в квази-периоды 0.3–0.7 млн лет циклов М. Миланковича. Для выявления квазипериодичности в рядах частых вулканических событий среднего мела необходимы специальные прецизионные геохронологические исследования вулканизма. Интенсивный вулканизм этого времени мог подчиняться квазипериодичности, установившейся в четвертичное время.

Для констатации резкого различия в геодинамике среднего и позднего мела

достаточно подчеркнуть существенное снижение интенсивности вулканического процесса. Ослабленный вулканизм с замедленной квазипериодичностью выстраивается затем в единую ускоряющуюся последовательность позднего мела и кайнозоя. Уместно сравнить геодинамические изменения в начале новейшего геодинамического этапа с изменением вращения юлы, подвергшейся внешнему воздействию. Вращение такой юлы становится неустойчивым и осложняется длиннопериодными колебательными движениями. Подобным образом около 90 млн лет назад в Центральной Монголии начался вулканизм продолжительных временных интервалов, последовательно сменявшихся менее продолжительными с наиболее частыми финальными извержениями в четвертичное время.

#### *Место сборки и распада Вегенеровской Пангеи в переходе от древней геодинамики к новейшей*

Распад Пангеи преобразил Землю коренным образом. Спрединг коры с оформлением дна Мирового океана, в сущности, означал однонаправленный процесс растяжения. Кора разных океанов, однако, образовалась в разное время. В самом раннем океане из существующих ныне (Атлантическом) спрединг дна начался около 280 млн лет назад. Отдельные фрагменты такого возраста сохранились в краевых частях Северной Атлантики, граничащей с пассивными континентальными окраинами, а также в закрывшемся средиземноморском фрагменте Неотетиса (рис. 12).



**Рис. 12.** Вариант реконструкций возраста океанической коры (Müller et al., 2008). Возраст основан на выявленных магнитных аномалиях современных океанов и реконструкциях плит.

**Fig. 12.** A variant of the oceanic crust age reconstruction (Müller et al., 2008). The age is based on the identified magnetic anomalies of modern oceans and plate reconstructions.

Предполагается, что бассейн Тихого океана мог существовать с докембрия приблизительно в современных границах. Древняя океаническая кора Палеопацифика субдуцирована в мантию, обдуцирована на континенты или находится в аккрецированных территориях. Разрастание Тихоокеанской

литосферной плиты реконструируется со 160 млн лет назад от тройного сочленения плит Кула, Фаралон и Феникс (Hilde et al., 1977).

Арктический океан образовался позже при разрушении Арктического палеоконтинента (Зоненшайн, Натапов, 1987). В интервале 133–125 млн лет назад заложился Канадский

океанический бассейн, 125–80 млн лет назад образовалась система бассейнов и хребтов (впадина Подводников, Ломоносовский хр. и др.) и 56 млн лет назад заложились Евразийский бассейн, который продолжает раскрываться в настоящее время. Структурные перестройки около 125 и 80 млн лет назад сопровождались проявлением объемного мантийного магматизма (Nikishin et al., 2017, 2021).

Эволюция континентальной литосферы была частично согласована, а частично различалась с эволюцией океанической литосферы. Например, в Ливантийской провинции и на сопредельных территориях Северо-Восточной Африки, начиная, приблизительно, с рубежа ранней и средней юры (со 175 млн лет назад), поддерживалась квазипериодичность магматизма 13 млн лет (Segev, 2000). По этому признаку обозначенная территория характеризуется выдержанной во времени геодинамикой. Соответственно, этот квазипериодичный магматизм отличается от магматизма Центральной Монголии с ускоряющимися квазипериодами от 20 млн лет до 0.3–0.7 млн лет. Резкое изменение магматизма около 90 млн лет назад с переходом к новейшему геодинамическому этапу произошло в Азии, но не отразилось в ходе ливантийского магматизма, имеющего сквозной характер, подобно спредингу в океанах. Такое различие подчеркивает региональную континентальную геодинамическую специфику Азии.

#### *Случаи сквозной эволюции вулканизма в среднем-позднем мелу и кайнозое*

Мощный среднемеловой всплеск магматизма Земли обозначает ее особое геодинамическое состояние. Между тем, случай сквозной эволюции ливантийского магматизма, получившего единообразное развитие на протяжении 175 млн лет, в том числе в среднем-позднем мелу и кайнозое, не единственный. В других регионах Мира также известны случаи сквозной средне-позднемеловой-кайнозойской магматической эволюции.

В качестве примера может служить Императорско-Гавайская цепь подводных вулканов Тихого океана. Возраст подводных гор в Императорском хребте постепенно увеличивается с юга на север. На океаническом дне под самыми северными подводными горами

магнитная линейность отсутствует, поскольку оно формировалось в меловой спокойный период. Самые древние гайоты Детройт (81 млн лет) и Мэйдзи (85 млн лет) образовались на тонкой литосфере, возраст которой в то время составлял менее 20 млн лет (Caplan-Auerbach et al., 2000; Regelous et al., 2003). Поднятие Обручева и вулканические породы Императорско-Гавайского горячего пятна простираются на север вплоть до Камчатского мыса, на котором в альбе-сеномане (112–93 млн лет назад) извергались базальты с внутриплитными геохимическими характеристиками (Савельев, 2003; 2004). Происхождение альб-туронских океанических образований Камчатского мыса в океаническом спрединговом центре реконструировалось по специфическим процессам вторичных изменений пород (Соколов, 1997). По мере продвижения подводных гор к югу состав микроэлементов и изотопный состав вулканических пород меняется в зависимости от возраста подстилающей океанической тихоокеанской литосферы. Древнейшие императорские лавы, извергавшиеся сквозь молодую литосферу вблизи бывшего спредингового центра, имеют относительно обедненный микроэлементный и изотопный состав. Более молодые императорско-гавайские лавы, извергавшиеся сквозь более древнюю литосферу, имеют более обогащенный состав (Regelous et al., 2003).

Другой пример сквозной эволюции вулканизма в среднем-позднем мелу и кайнозое касается внутренней части Евразии. На Южном (Китайском) Тянь-Шане вулканизм с внутриплитными геохимическими характеристиками начался в апте и завершился в эоцене. На протяжении временного интервала 122–46 млн лет назад извергалась серия расплавов пикробазальт–базанит–фонотефрит–фонолит, производная плавления малоглубинного безгранатового источника мантии. В отличие от Южного Тянь-Шаня, в Северном и Среднем Тянь-Шане был представлен ряд расплавов фойдит–базанит–трахибазальт–базальт–андезибазальт в ограниченном временном интервале 61–53 млн лет назад. Базаниты и фойдиты выплавлялись в глубокой части мантии гранатовой фации, а трахибазальты, базальты и андезибазальты – в нижней коре.

Предполагалось, что различие мел-палеогеновых вулканических серий Южного и Северного-Срединного Тянь-Шаня отражало разный характер активизации мантийных и коровых неоднородностей, образовавшихся в процессе позднепалеозойского закрытия Туркестанского палеоокеана (Рассказов и др., 2015).

Подобные разновозрастные соотношения вулканизма с разным характером мантийных и коровых источников определяются по латерали шовной зоны Урало-Монгольского палеоокеана в районе хр. Арц-Богд. Непосредственно в этой шовной зоне, на вулканическом поле Арц-Богд, до 94 млн лет назад извергались шошониты, сменившиеся извержениями щелочных базальтов, продолжавшимися до 19 млн лет назад (Enkhtuvshin, 1995). Южнее этого вулканического поля, на вулканическом поле Тсост, базальты, извергавшиеся 107–99 млн лет назад, имели щелочнобазальтовый состав с содержанием MgO до 9 мас. % и составами, соответствующими мантийному направлению на диаграмме Th/Yb – Ta/Yb (Sheldrick et al., 2018, 2020).

Рассмотренные примеры показывают, что в общей геодинамической эволюции Земли с переходом от обстановки, предшествующей переходу к новейшему геодинамическому этапу, в середине мела могут проявляться сквозные вулканические процессы, отражающиеся в локальной генерации магм с мантийными характеристиками.

***Магматические и тектонические события как основа для реконструкций процессов первой половины новейшего геодинамического этапа***

На фоне спредингово-океанического распада Пангеи в Азии осуществлялось наращивание континентальной коры присоединением к ней геологических блоков на востоке и юге. Заметное событие этой сборки – Индо-Азиатское столкновение. Индийский субконтинент входил в состав Гондваны вместе с субконтинентами Африки, Австралии и Антарктиды, отделился от них около 130–100 млн лет назад, продвинулся и присоединился к Азии около 66–32 млн лет назад (Beck et al.,

1995; McLoughlin, 2001; Khan et al., 2004; Sarkar et al., 2023). По отношению к спредингово-океаническому распаду Пангеи, наращивание континентальной коры Евразии выступило как противоположный процесс.

После начала взаимодействия Индии и Азии 66–50 млн лет назад в Евразии последовала длительная тектоническая и магматическая нестабильность. Аравийско-Евразийская конвергенция стабилизировалась на уровне 2–3 см в год с 56 млн лет назад и снизилась до <1 см в год около 25 млн лет назад одновременно с открытием моря Рида (McQuarrie et al., 2003). Самое сильное глобальное потепление в кайнозое произошло около 61–56 млн лет назад (Hudson, Magoon, 2002; Jolley et al., 2002). Предполагалось, что это явление было вызвано разрушением газогидратов океанических отложений с выделением метана и возмущением океанических вод, вызванным магматизмом Исландского прото-плюма в северо-восточной части Атлантического океана. Для вулканических событий этого плюма различными изотопными методами были получены датировки 60 млн лет и моложе (Dickin, 1988). В интервале 61–56 млн лет деформировались осадочные отложения аккреционного клина Аляскинского залива, что также вызвало увеличение производства метана и глобальное потепление (Hudson, Magoon, 2002). В раннем кайнозое между 53.5 и 37.5 млн лет произошла крупная перестройка глобальных движений литосферных плит (Rona, Richardson, 1978; Gordon, Jurdy, 1986). Таким образом, магматические события 60–50 млн лет в Евразии были инициированы не только Индо-Азиатской коллизией, но отражали также глобально возросшую тектоническую нестабильность.

В Южной Евразии определяется временной интервал сжатия с  $57.4 \pm 2.4$  млн лет до  $47.8 \pm 2.4$  млн лет назад (Boztug et al., 2004). Подобные события наблюдались на юго-востоке Сахалина. Нарастающее сжатие здесь было представлено высокобарным

метаморфизмом в интервале 64–54 млн лет назад, а ослабления сжатия – внедрением гранитоидов S-типа в интервале 49–42 млн лет назад. Соответственно, вулканические импульсы 58–56 и 48–44 млн лет назад связаны с началом и завершением коллизионного интервала 57–48 млн лет. Важно подчеркнуть существенное различие в пространственном распределении палеоцен-раннеэоценовых и среднеэоценовых магматических событий.

В интервале 60–50 млн лет магматизм сосредоточился вдоль восточных окраин Монгольского, Северо-Китайского и Южно-Китайского блоков, а также в Тунка-Еравнинской зоне и Долине озер. Позже, в среднем эоцене, магматизм снова проявился вдоль восточных окраин Монгольского, Северо-Китайского и Южно-Китайского блоков со смещением в Центральной Азии к северо-западной границе Монгольского блока. Базальты «внутриплитного» типа извергались в Северо-Охотском регионе до 54 млн лет.

Ключевую роль в развитии палеоэоценового рифтогенеза и магматизма в Восточной и Центральной Азии сыграла аккреция Охотоморской плиты к окраине Азии. По мере затухания этих процессов на востоке, роль коллизии на юге, между Индией и Азией, возросла, что привело к формированию нового типа деформаций и магматизма в Центральной Азии. Палеомагнитные исследования в Сихотэ-Алине выявили вращение против часовой стрелки в позднем мелу – раннем палеогене. Это явление первоначально объяснялось левосторонним движением вдоль сдвиговых разломов субмеридианального простираения. Однако этой интерпретации противоречили результаты палеомагнитных исследований, выполненных на восточной окраине Северо-Китайского блока. Согласно новой гипотезе (Otofuji et al., 2003), богоспольская свита Сихотэ-Алиня образовалась в палеоцене на юго-восточной окраине жёсткого Монгольского блока, который впоследствии не испытывал значительного вращения относительно Евразии. Стратиграфически ниже-

лежащие вулканические породы

сиджановской свиты и кисинской группы, наиболее ранние игнимбриты позднемеловой монастырской и приморской серий Восточно-Сихотэ-Алинского вулкано-плутонического пояса внедрились, когда этот блок повернул против часовой стрелки на  $41^\circ \pm 16^\circ$ . Это вращение было направлено в противоположную сторону относительно вращения восточной части Северо-Китайского блока, реконструированного для конца раннего мела, позднего мела и пост-мелового временного интервала. Это несоответствие свидетельствовало о вращении блока континентальной окраины, подобном более позднему вращению такого же блока со среднемиоценовым открытием Японского моря, вызванным «чистой горизонтальной силой», направленной в сторону океана (Otofuji et al., 2003).

Между магматическими и седиментационными событиями Байкальской рифтовой системы и задугового Япономорского бассейна устанавливается тесная связь, начиная с 16 млн лет, посредством Японско-Байкальского геодинамического коридора (Chuvashova et al., 2017). С учетом сходства раскрытия задуговых бассейнов на восточной окраине Азии позднемелового-пост-мелового временного интервала и синхронного проявления вулканизма в Западном Забайкалье и Приморье не только в позднем кайнозое, но и 60–43 млн лет назад, действие Японско-Байкальского геодинамического коридора распространяется на весь новейший геодинамический этап последних 90 млн лет.

#### *Выражение глубинной геодинамики в аномалиях геоида Индийского океана и Центральной Азии*

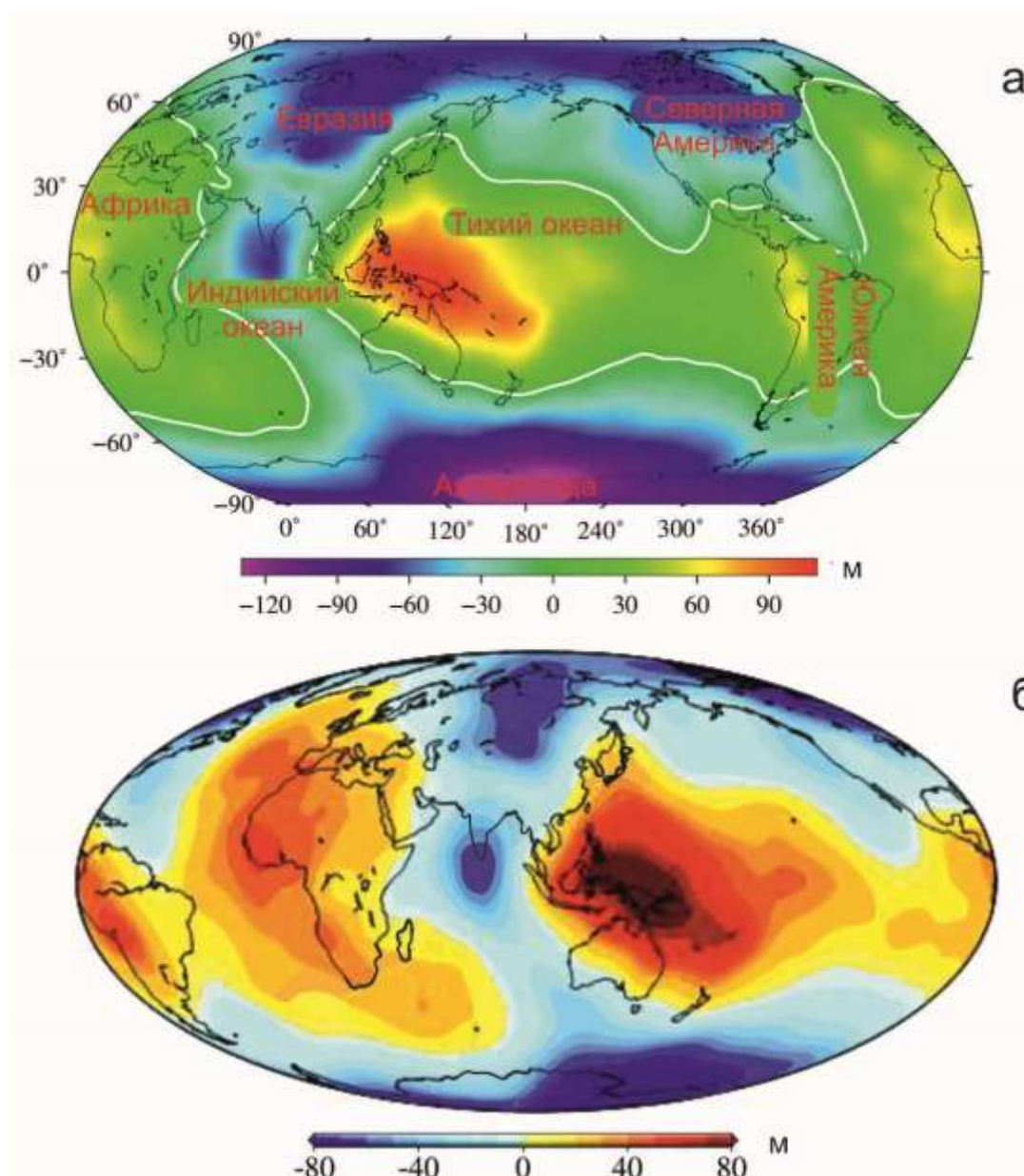
В рамках гипотезы об исключительной роли в эволюции Земли распада Пангеи (Le Pichon et al., 2019) не находят объяснения низкие аномалии Индийского океана и Евразии. Понимание причин таких геодинамических осложнений невозможно без привлечения, кроме спрединговой эволюции океанов, геологической эволюции Азии.

С одной стороны, Индийский палеоконтинент, отделившись от Гондваны, пересек Тетис и в интервале 66–32 млн лет назад столкнулся с южной окраиной Азии. Во Внутренней Азии широко проявлены последствия Индо-Азиатской конвергенции. С другой стороны, Сибирский палеоконтинент испытал значительные смещения с севера на юг в интервале 200–150 млн лет назад с последующим несущественным движением по широте (Кравчинский, 1995; Besse, Courtillot, 2002; Kravchinsky et al., 2002; Коваленко, 2010; Khanchuk et al., 2015). В середине этого интервала, на северо-западном берегу оз. Байкал накапливалась мощная толща конгломератов, которая относится, по палеонтологическим данным, к верхней части ааленского яруса средней юры (174–170 млн лет) (Скобло и др., 2001). В составе конгломератов находятся трахидацит-риолитовые гальки плюмазитового состава. Среднеюрский вулкан активизировался в шовной зоне Сибирского палеоконтинента. По южному краю палеоконтинента в условиях сжатия в это время получили развитие надвиги (Замараев и др., 1983). Вулкан находился на эродируемом горном хребте, погребенном в позднем кайнозое под осадочными отложениями Южно-Байкальской впадины (Олиферовский и др., 2022). Южно-Байкальский хребет, образовавшийся в средней юре, продолжал играть роль водораздела между краем Сибирского палеоконтинента и Забайкальем в мелу и раннем-среднем кайнозое. Впадины формировались в это время в Селенгино-Витимском прогибе Западного Забайкалья. Южно-

Байкальская впадина в ее современных границах заложилась в позднем кайнозое (Чувашова и др., 2019; Рассказов и др., 2021).

По-видимому, в низких аномалиях геоида отражается конечный результат встречного движения Сибирского и Индийского палеоконтинентов. Около 170 млн лет назад движение Сибирского палеоконтинента с севера на юг сопровождалось сжатием коры у его южного края, а движение Индийского палеоконтинента с юга на север привело к образованию высокого синколлизийного Тибетско-Гималайского горного сооружения. В обоих случаях процессы сжатия земной коры континентов с образованием орогенов вряд ли могут выстраиваться в единый ряд с процессами растяжения, обеспечивающими спрединговую эволюцию океанов.

Модели геоида используются для реконструкций глубинной динамики Земли в сопоставлении с глобальными моделями сейсмической томографии. В работах, посвященных исследованиям современной формы Земли, подчеркивается наибольшая глубина аномалии Индийского океана и отчетливо наблюдается единство низких аномалий геоида Индийского океана и Евразии. Учитывается также фактор полярного сплющивания Земли (Nakiboglu, 1982; Cambat et al., 2010; Cui et al., 2019; Pal, Ghosh, 2023). При этом обособленность низких аномалий геоида Индийского океана и Евразии сохраняется в разных моделях. Евразийская низкая аномалия геоида составляет единое целое с низкой аномалией геоида в Арктике (рис. 13).



**Рис. 13.** Два варианта пространственного соотношения низкой аномалии геоида в Центральной Азии и Арктике с наиболее выразительной низкой аномалией геоида в Индийском океане: *а* – Cambat et al., 2010; Cui et al., 2019; *б* – Nakiboglu, 1982; Pal, Ghosh, 2023.

**Fig. 13.** Two versions of spatial relationship of the low geoid anomaly in Central Asia and Arctic with the most pronounced low geoid anomaly in the Indian Ocean: *a* – after Cambat et al., 2010; Cui et al., 2019; *b* – after Nakiboglu, 1982; Pal, Ghosh, 2023.

Происхождение самой глубокой аномалии геоида в Индийском океане дискуссионно. Существует несколько конкурирующих гипотез, среди которых с использованием сейсмотомографических моделей сделан вывод о гравитационном влиянии на глубокую аномалию геоида в Индийском океане расплавных аномалий средней и верхней мантии (Reiss et al., 2017; Cui et al., 2019; Rao et al.,

2020; Pal, Ghosh, 2023, 2024). В двух последних цитированных работах формирование депрессии геоида реконструируется с учетом движения литосферных плит за счет глобальной мантийной конвекции, начиная со 140 млн лет назад до настоящего времени. Предполагается, что поток, вызванный нисходящими слэбами Тетиса, возмущает Африканскую низкоскоростную область и приводит к

образованию плюмов, материал которых достигает верхней мантии. Низкая аномалия Индийского океана, таким образом, обусловлена этими плюмами, наряду со структурой мантии, сложившейся вблизи минимума геоида.

В реконструкции из работы (Pal, Ghosh, 2023) позднефанерозойская Евразия остается фактически неподвижной при существенных смещениях сопредельных литосферных плит Земли. Такая модель согласуется с построениями, в которых Азия пространственно соответствует глобальной Азиатской Изотопной Термальной Аномалии (ASITA), обозначающей мантийный остов ранней Земли (Rasskazov et al., 2020; Рассказов и др., 2024), а также с различием времени проявления и источников карбонатитовых магм в Индии и Северной Азии (Рассказов и др., 2024; Rasskazov et al., 2025).

Самое низкое положение аномалии геоида в Центральной Азии (рис. 13) пространственно соответствует Саяно-Монгольскому низкоскоростному домену на глубинах мантии 50–200 км. Новейший магматизм этого домена характеризует глубинные процессы в Саяно-Монгольском секторе Индо-Азиатской конвергенции (Рассказов и др., 2012; Chuvashova et al., 2017). Субмеридиональное сочетание низких аномалий геоида Индийского океана с низкими аномалиями в центре и на севере Азии с выходов в Арктику может служить показателем главенства глубинной динамики субмеридиональной трансзиатской континентальной структуры. В связи с этим подключение бокового воздействия на Центральную Азию Японско-Байкальского геодинамического коридора может рассматриваться как наложенный фактор, осложняющий глубинные процессы в Байкальской рифтовой системе на новейшем геодинамическом этапе. Такое соотношение сил должно приниматься во внимание в деформационной модели рифтовой системы при разработке подходов к прогнозу сильных землетрясений.

### **Заключение**

Подобно понятию «новейшая тектоника», понятие «новейшая геодинамика» не имеет строго определенного рубежа в эволюции

Земли. Распад Вегенеровской Пангеи придал импульс запуску спрединговых корообразующих процессов уже около 280 млн лет назад. Дальнейший спрединг реализовался в разное время в современных океанах Земли. В геологической эволюции Азии, однако, сочетались процессы, которые обеспечили направленность процессов, отличающуюся от спредингового корообразования. Причиной особой эволюции Азии явилось то, что с одной стороны, значительные смещения с севера на юг испытывал Сибирский палеоконтинент в интервале 200–150 млн лет назад, с другой стороны, значительные смещения с юга на север испытывал Индийский палеоконтинент, отделившийся от Гондваны и в интервале 66–32 млн лет назад столкнувшийся с южной окраиной Азии.

В составе магматических комплексов позднего палеозоя и мезозоя Центральной и Восточной Азии распространены гранитоидные массивы, редкометалльные Li–F гранитоиды и их эффузивные аналоги (онгониты), агпаитовые эффузивные и интрузивные породы среднего и кислого состава с щелочными пироксенами и амфиболами. В позднем мелу и кайнозое такие породы отсутствуют. Характер магматизма меняется со среднего мела к позднему. Среднемеловые шошонитовые и трахибазальтовые вулканические извержения Азии происходят часто. В Центральной Монголии они сменяются более редкими щелочнобазальтовыми извержениями продолжительных (20-летних) интервалов. Частота импульсов вулканических извержений с течением времени последовательно возрастает и укладывается в квазипериоды 10, 7.5 и 2.5 млн лет. В четвертичное время вулканизм переходит в квазипериодичность 0.3–0.7 млн лет.

На фоне направленного спредингового процесса распада Вегенеровской Пангеи в эволюции Земли отчетливо выделяются события, имеющие маркирующее значение для обоснования начала новейшего геодинамического этапа в Азии около 90 млн лет назад: 1) окончание суперхроны Джалал около 83 млн лет назад, 2) нарушение великих циклов эксцентриситета 2.4 млн лет в орбитальном вращении Земли 87–85 млн лет назад, 3)

извержение наиболее высокотемпературных (ультрамагнезиальных) коматиитовых магм о-ва Горгона около 90 млн лет назад при общем рассредоточенном характере других ультрамагнезиальных (меймечитовых, пикритовых, дунитовых) магм в мезозое и кайнозое, 4) ограничение распространения щелочных комплексов с карбонатитами в Северной Азии серединой мела при увеличении роли карбонатитов в Индии в ходе дальнейшей эволюции Земли и 5) смена главных трендов морских записей  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  около 90 млн лет назад.

Новейшая геодинамическая эволюция Земли выражена в образовании наиболее глубокой аномалии геоида Индийского океана в пространственном сочетании с подобной Евразийской аномалией. Самое низкое положение аномалии геоида в Индийском океане связывается с нарушением плюмами границы нижней и верхней мантии. Самое низкое положение аномалии геоида в Центральной Азии пространственно соответствует Саяно-Монгольскому низкоскоростному домену на глубинах верхней мантии 50–200 км. Новейший магматизм этого домена характеризует глубинные процессы в Саяно-Монгольском секторе Индо-Азиатской конвергенции. Сочетание низких аномалий геоида Индийского океана с низкими аномалиями в центре и на севере Азии с выходом в Арктику может служить показателем главенства глубинной динамики субмеридиональной трансасиатской континентальной структуры. В связи с этим подключение бокового воздействия на Центральную Азию Японско-Байкальского геодинамического коридора может рассматриваться в качестве дополнительного наложенного фактора, осложняющего глубинные процессы в Байкальской рифтовой системе на новейшем геодинамическом этапе. Такая оценка соотношения сил может приниматься во внимание в деформационной модели рифтовой системы при разработке подходов к прогнозу сильных землетрясений.

## Литература

- Акинин В.В. Позднемезозойский и кайнозойский магматизм и преобразование нижней коры в северном обрамлении Пацифики. Автореферат диссертации... доктора геол.-мин. наук. М., ИГЕМ РАН, 2012. 43 с.
- Белый В.Ф., Белая Б.В. Поздняя стадия развития Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (верхнее течение р. Энмываам). Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1998. 108 с.
- Воронцов А.А., Ярмолюк В.В., Комарицына Т.Ю. Позднемезозойский-раннекайнозойский рифтогенный магматизм Удинского сектора (Западное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57 № 5. С. 920–946.
- Диденко А.Н. О возможной причине квазипериодических колебаний частоты геомагнитных инверсий и величины  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в морских карбонатных породах в фанерозое // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 12. С. 1945–1956.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2001. 409 с.
- Доусон Дж. Кимберлиты и ксенолиты в них. М.: Мир, 1983. 306 с.
- Замараев С.М., Сизых В.И., Мешалкин С.И., Новокшенов Ю.А. Особенности строения Ангарского надвига // Геология и геофизика. 1983. № 5. С. 126–129. (Zamaraev S.M., Sizykh V.I., Meshalkin S.I., Novokshonov Yu.A. Structural Features of the Angarsk Thrust // Geology and Geophysics. 1983, No. 5. P. 126–129.)
- Зоненшайн Л.П., Натапов Л.М. Тектоническая история Арктики // Актуальные проблемы геотектоники. М.: Наука, 1987. С. 31–57.
- Каретников А.С. Возраст и генезис платиноидной минерализации массива Кондер: палеомагнитные и радиоизотопные данные // Литосфера, 2006, № 3. С. 96–107.
- Каретников А.С. Оценка возраста ультрамафитов массива Чад (Хабаровский край) по палеомагнитным данным // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34, № 6. С. 74–90.
- Кириллова Г.Л. Корреляция меловых событий на Востоке Азии с глобальными событиями // Тихоокеанская геология. 1997. № 6. С. 3–20.
- Кириллова Г.Л. Мел востока России: седиментация, геодинамика, биоразнообразие, климат. Владивосток: Дальнаука, 2000. 94 с.
- Коваленко В.И., Костицын Ю.А., Ярмолюк В.В. и др. Источники магм и изотопная (Sr, Nd) эволюция редкометальных Li–F гранитоидов // Петрология. 1999. Т. 7, № 4. С. 401–429.
- Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Андреева И.А. и др. Типы магм и их источники в истории Земли. Часть 2. Редкометальный магматизм: ассоциации пород, состав и источники магм,

геодинамические обстановки формирования. М.: ИГЕМ РАН, 2006. 280 с.

Коваленко Д. В. Палеомагнетизм позднепалеозойских, мезозойских и кайнозойских геологических комплексов Монголии // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 4. С. 496–515.

Корина Н. А. Хангайское нагорье // Геоморфология Монгольской народной республики. Труды Совместной Советско-Монгольской научно-исследовательской экспедиции. Вып. 28. М.: Наука. 1982. С. 87–108.

Котляков В. М. Мир снега и льда. М.: Наука, 1994. 286 с.

Котляр И. Н., Русакова Т. В. Меловой магматизм и рудоносность Охотско-Чукотского региона: геолого-геохронологические корреляции. Магадан, 2004. 152 с.

Кравчинский В. А. Палеомагнетизм горных пород Монголо-Охотского складчатого пояса. Диссертация ... кандидата геолого-минералогических наук. Иркутск, 1995. 181 с.

Логачев Н. А., Шерман С. И., Леви К. Г. О принципах и методике составления карты новейшей тектоники Сибири // Методические рекомендации к Атласу тектонических карт и опорных профилей Сибири. Новосибирск. 1981. С. 12–20.

Мельников О. А. Структура и геодинамика Хоккайдо-Сахалинской складчатой области. М.: Наука, 1987. 95 с.

Мельников О. А. Геологические формации Хоккайдо-Сахалинской области. Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. 213 с.

Милановский Е. Е. Пульсации Земли // Геотектоника. 1995. № 5. С. 3–24.

Николаев Н. И. Новейшая тектоника СССР (Труды комиссии по изучению четвертичного периода) М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1949. 342 с.

Олиферовский Р. В., Седунова Е. А., Шаметова И. Б., Башкирцев А. В., Данилин Д. А., Монгуш А. Р., Коваленко С. Н., Ясныгина Т. А., Чувашова И. С., Саранина Е. В., Рассказов С. В. Источник трахидацит-риолитовых галек среднеюрских конгломератов на северо-западном берегу Байкала: сопоставление галек с породами магматических комплексов верхнего палеозоя и мезозоя Забайкалья // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 4. С. 53–79. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.53

Рассказов С. В., Чувашова И. С. Образование глобальной Азиатской Изотопной Термальной Аномалии (ASITA) в зарождающейся системе Земля–Луна: Мегаимпакт или фрагментация

газопылевого облака? // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 1. С. 7–41. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.7>

Рассказов С. В., Чувашова И. С. Глобальное и региональное выражение новейшего геодинамического этапа // Бюллетень МОИП. Отд. геологический. 2013а. Т. 88, вып. 4. С. 21–35.

Рассказов С. В., Чувашова И. С. Новейшая мантийная геодинамика Центральной Азии. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013б. 308 с.

Рассказов С. В., Чувашова И. С. Кайнозойские динамические экстремумы в эпизодах извержений коровых выделов в орогенных и рифтовых структурах Азии // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 10. Т. 2. Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2012а. С. 51–54.

Рассказов С. В., Чувашова И. С. Временная смена источников позднекайнозойского вулканизма на границе Забайкальского и Саяно-Монгольского расплавных доменов // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Материалы совещания. Вып. 12. Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2014а. С. 239–240.

Рассказов С. В., Чувашова И. С. Вулканизм и трансформация на северо-востоке Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2018. 383 с.

Рассказов С. В., Коломиец В. Л., Будаев Р. Ц., Чувашова И. С., Аль-хамуд А., Хассан А., Алокла Р. Новейшая активизация шовной зоны Сибирского кратона под Южным Байкалом: от мел-палеогенового орогена к неоген-четвертичному рифту // Геология и окружающая среда. 2021. Т. 1, № 1. С. 7–15. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2021.1.7>

Рассказов С. В., Логачев Н. А., Кожевников В. М., Яновская Т. Б. Ярусная динамика верхней мантии Восточной Азии: соотношения мигрирующего вулканизма и низкоскоростных аномалий // Докл. АН. 2003. Т. 390, № 1. С. 90–95.

Рассказов С. В., Чувашова И. С., Мордвинова В. В. и др. Роль кратонного раздела Леман в кайнозойской динамике верхней мантии Центральной Азии: интерпретация моделей скоростей сейсмических волн в свете пространственно-временной эволюции вулканизма // Фундаментальные проблемы геотектоники. Тезисы докладов XL Тектонического совещания. М.: МГУ. 2007б. С. 126–129.

Рассказов С.В., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А. и др. Калиевая и каликатовая вулканические серии в кайнозойской Азии. Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО», 2012б. 310 с.

Рассказов С.В., Чувашова И.С., Миколайчук А.В., Собель Э.Р., Ясныгина Т.А., Феллов Н.Н., Саранина Е.В. Латеральная смена источников мел-палеогенового магматизма в Тянь-Шане // Петрология. 2015. Т. 23, № 3. С. 308–336.

Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С. Мантийные источники кайнозойских вулканических пород Восточной Азии: производные слэбов, подлитосферной конвекции и литосферы // Тихоокеанская геология. 2014б. Т. 33, № 5. С. 47–65.

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., Феллов Н.Н., Жаров А.Э. Пространственная смена глубинных источников кайнозойских вулканических пород западного побережья Южного Сахалина // Тихоокеанская геология. 2005б. Т. 24, № 2. С. 10–32.

Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Хари К.Р., Чувашова И.С., Саранина Е.В. Магматические источники эволюционирующей континентальной тектоносферы Индии: генерация щелочных магматических комплексов с карбонатитами в массивах Самалпатти (Южная Индия) и Амба Донгар (Западная Индия) // Геодинамика и тектонофизика. 2024. Т. 15, № 5, 0783.

Савельев Д.П. Внутриплитные щелочные базальты в меловом аккреционном комплексе Камчатского полуострова (Восточная Камчатка) / Д. П. Савельев // Вулканология и сейсмология. 2003. № 1. С. 14–20.

Савельев Д.П. Меловые внутриплитные вулканы Восточной Камчатки: геологическое положение и влияние на островодужный вулканизм // Геология и Разведка. 2004. № 2. С. 16–19.

Скобло В.М., Лямина Н.А., Лузина И.В., Руднев А.Ф. Континентальный верхний мезозой Прибайкалья и Забайкалья. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 332 с.

Соколов С.Д. Континентальная аккреция, террейны и нелинейные эффекты в геодинамике северо-востока России, тектонические и геологические феномены // Тр. Геол. ин-та РАН 505. М.: Наука, 1997. С. 42–69.

Таусон Л.В., Антипин В.С., Захаров М.Н., Зубков В.С. Геохимия мезозойских латитов Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1984. 215 с.

Шуколюков Ю.А., Якубович О.В., Мочалов А.Г., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Яковлева С.З., Корнеев С.И., Гороховский Б.М. Новый изотопный геохронометр для прямого датирования самородных минералов платины ( $^{190}\text{Pt}$ – $^4\text{He}$  метод) // Петрология. 2012. Т. 20, № 6. С. 545–559.

Чувашова И.С., Рассказов С.В. Источники магматизма в мантии эволюционирующей Земли. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 291 с.

Чувашова И.С., Андреева Ю.С., Рассказов С.В. Мел-палеогеновые базальты и щелочные базальтоиды Юго-Восточной Монголии: 1. Распределение в пространственно-временном геолого-геохронологическом контексте позднего мезозоя и кайнозоя // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 3. С. 33–64. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.3.33>

Чувашова И.С., Рассказов С.В., Брандт С.Б. Циклические вариации калия в позднекайнозойских лавах Центральной Монголии // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2010. Т. 3, № 1. С. 159–176.

Чувашова И.С., Рассказов С.В., Сунь Йи-минь. Новейшая геодинамика Центральной Азии: первичные и вторичные мантийные расплавы аномалии в контексте орогенеза, рифтогенеза и движения–взаимодействия литосферных плит // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8, вып. 1. С. 45–80. [doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0232](https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0232)

Чувашова И.С., Хассан А., Аль Хамуд А., Коваленко С.Н., Руднева Н.А., Рассказов С.В. Переход от Селенгино-Витимского прогиба к Витимскому плоскогорью: кайнозойское осадконакопление и вулканизм // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2019. Т. 27. С. 138–153. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.27.138>

Шерман С.И., Леви К.Г., Ружич В.В., Саньков В.А., Днепровский Ю.И., Рассказов С.В. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Неотектоника. Новосибирск: Наука, 1984. 207 с.

Якубович О.В. Новый метод изотопной геохронологии для датирования минералов платины. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук, Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2013. 20 с.

Ярмолук В.В., Козловский А.М., Саватенков В.М., Кудряшова Е.А., Кузнецов М.В. Позднемезозойская Восточно-Монгольская вулканическая область: строение, магматические ассоциации, источники магматизма // Петрология. 2020. Т. 28, № 6. С. 563–590.

- Ярмолук В.В., Кудряшова Е.А., Козловский А.М. и др. Позднемеловой – раннекайнозойский след Южно-Хангайской горячей точки мантии // Вулканонология и сейсмология. 2007. № 1. С. 3–31.
- Ярмолук В.В., Кудряшова Е.А., Козловский А.М. Поздние стадии развития позднемезозойской Восточно-Монгольской вулканической области: возраст и состав вулканических пород // Докл. АН. 2019. Т. 487. С. 283–288. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524873283-288>
- Arndt N., Leshner C.M., Barnes S.J. Komatiite. Cambridge University Press, 2008. 458 p.
- Beck R.A., Burbank D.W., Sercombe W.J. et al. Stratigraphic evidence for an early collision between northwest India and Asia // Nature. 1995. V. 373. P. 55–58.
- Besse J., Courtillot V. Apparent and true polar wander and the geometry of the geomagnetic field over the last 200 Myr // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, B 11. P. 6–31.
- Boztug D., Jonckheere R., Wagner G.A., Yegingil Z. Slow Senonian and fast Paleocene — Early Eocene uplift of the granitoids in the Central Eastern Pontides, Turkey: apatite fission-track results // Tectonophysics. 2004. Vol. 382. P. 213–228.
- Caplan-Auebrach J., Duennebier F., Ito G. Origin of intraplate volcanoes from guyot heights and oceanic palaeodepth // Geophys. Res. 2000. Vol. 106. P. 2679–2697.
- Chambat F., Ricard Y., Valette B. Flattening of the Earth: Further from hydrostaticity than previously estimated // Geophysical Journal International. 2010. Vol. 183. P. 727–732.
- Condie K.C. Mantle plumes and their record in Earth history. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 246 p.
- Courtillot V., Féraud G., Maluski H. Deccan flood basalts and the Cretaceous/Tertiary boundary // Nature. 1988. Vol. 333. P. 843–846.
- Cui R., Fang J., Yoshida M., Chen M. Modeling Long-Wavelength Geoid Anomalies from Instantaneous Mantle Flow: Results from Two Recent Tomography Models // Pure Appl. Geophys. 2019. Vol. 176. P. 4335–4348.
- Dickinson A.P. The North Atlantic Tertiary province / J.M. Macdougall (ed.) Continental Flood Basalts, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London. 1988. P. 111–149.
- Engelbreton D.C., Cox A., Gordon R.G. Relative motion between oceanic plates of the Pacific basin // J. Geophys. Res. 1984. V. 89, N B12. P. 10291–10310.
- Enkhtuvshin H.A. Petrological study on the Late Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks of the Mongolian Plateau // Master thesis. Shimane University, 1995. 119 p.
- Foulger G.R. Plates vs. plumes: a geological controversy. Wiley–Blackwell, 2010. 328 p.
- Gordon R.G., Jurdy D.M. Cenozoic global plate motions // J. Geophys. Res. 1986. Vol. 91. P. 12389–12406.
- Guo F., Fan W., Wang Y., Li C. When did the Emeishan mantle plume activity start? Geological and geochemical evidence from ultramafic–mafic dikes in Southwestern China // International Geology Review. 2004. V. 46. P. 226–234.
- Hilgen F.J. Astronomical calibration of Gauss to Matuyama sapropoles in the Mediterranean and implication for the geomagnetic polarity time scale // Earth and Planet. Sci. Lett. 1991. Vol. 104, N 2. P. 226–244.
- Hilgen F.J., Krijgsman W., Langereis J., Lourens L.J. Breakthrough made in dating of geological record // EOS: Trans. Amer. Geophys. Union. 1997. Vol. 78, N28. P. 285–287.
- Hilde T.W., Uyeda S., Kroenke L. Evolution of the Western Pacific and its margin // Tectonophysics. 1977. V. 38. P. 145–165.
- Hinnov L.A. Cyclostratigraphy and its revolutionizing applications in the Earth and planetary sciences // Geol. Soc. Am. Bull. 2013. Vol. 125. P. 1703–1734.
- Hudson T.L., Magoon L.B. Tectonic controls on greenhouse gas flux to the Paleogene atmosphere from the Gulf of Alaska accretionary prism // Geology. 2002. Vol. 30. P. 547–550.
- Jolley D.W., Clarke B., Kelley S. Paleogene time scale miscalibration: evidence from the dating of North Atlantic igneous province // Geology. 2002. Vol. 30. P. 7–10.
- Imbrie J., Boyle E.A., Clemens S.C., Duffy A., Howard W.R., Kukla S.G., Kutzbach S.J., Martinson D.G., McIntyre S.A., Mix A.C., Molino B., Morley S.J.J., Peterson S.L.C., Pisias N.G., Prell W.L., Raymo M.E., Shackleton N.J., Toggweiler J.R. On the structure and origin of major glaciation cycles. 1. Linear responses to Milankovitch forcing // Paleoceanology. 1992. Vol. 7, N 6. P. 701–738.
- Ishiwatari A., Ichiyama Y. Alaskan-type plutons and ultramafic lavas in Far East Russia, Northeast China, and Japan // International Geology Review. 2004. V. 46. P. 316–331 DOI: 10.2747/0020-6814.46.4.316

Khan S.D., Stern R.J., Manton M.I. et al. Age, geochemical and Sr–Nd–Pb isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis of Teru volcanics, Northern Kohistan terrane, Pakistan // *Tectonophysics*. 2004. V. 393. P. 263–280.

Khanchuk A.I., Didenko A.N., Popeko L.I., Sorokin A.A., Shevchenko B.F. Structure and evolution of the Mongol–Okhotsk Orogenic Belt // *The Central Asia Orogenic Belt: geology, evolution, tectonics and models* (A. Kroner, ed.), Borntraeger Science Publishers, Stuttgart, 2015. P. 211–234.

Kravchinsky V.A., Cogné J.P., Harbert W.P., Kuzmin M.I. Evolution of the Mongol–Okhotsk Ocean as constrained by new palaeomagnetic data from the Mongol–Okhotsk suture zone, Siberia // *Geophys. J. Int.* 2002. Vol. 148, No. 1. P. 34–57. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-246x.2002.01557.x>.

Krishnamurthy P. Carbonatites of India // *Journal Geological Society of India*. 2019. Vol. 94. P. 117–138. <https://dx.doi.org/10.1007/s12594-019-1281-y>

Larson R.L. Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume // *Geology*. 1991. V. 19. P. 547–550.

Laskar J., Robutel P., Joutel F., Gastineau M., Correia A.C.M., Levrard B. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth // *Astron. Astrophys.* 2004. Vol. 428. P. 261–285.

Laskar J., Fienga A., Gastineau M., Manche H. La2010: a new orbital solution for the long-term motion of the Earth // *Astron. Astrophys.* 2011. V. 532. P. A89. doi: 10.1051/0004-6361/201116836

Laurens L.J., Antonarakou A., Hilgen F.J., Van Hoof A.A.M., Vergnaud-Grazzini C., Zachariasse W.J. Evaluation of the Plio–Pleistocene astronomical time scale // *Paleoceanography*. 1996. Vol. 11, N4. P. 391–413.

Le Pichon X., Jellinek M., Lenardic A., Şengör A.M.C., İmren C. Pangea migration // *Tectonics*. 2021. Vol. 40, e2020TC006585. <https://doi.org/10.1029/2020TC006585>

Le Pichon X., Şengör, A.M.C., İmren C. Pangea and the lower mantle // *Tectonics*. 2019. Vol. 38, 10.1029/2018TC005445

Li Z., Li Y., Chen H. et al. Hf isotopic characteristics of the Tarim Permian large igneous province rocks of NW China: Implication for the magmatic source and evolution // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2012a. V. 49. P. 191–202. doi:10.1016/j.jseas.2011.11.021

Li Z., Chen H., Song B. et al. Temporal evolution of the Permian large igneous province in Tarim Basin

in northwestern China // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2011. V. 42. P. 917–927. doi:10.1016/j.jseas.2011.05.009

Li Y.-Q., Li Z.-L., Sun Y.-L. et al. Platinum-group elements and geochemical characteristics of the Permian continental flood basalts in the Tarim Basin, northwest China: Implications for the evolution of the Tarim Large Igneous Province // *Chemical Geology*. 2012. V. 328. P. 278–289

Lithgow-Bertelloni C., Richards M.A. The dynamics of Cenozoic and Mesozoic plate motions. // *Reviews of Geophysics*. 1998. Vol. 36, No. 1. P. 27–78.

Ma C., Meyers S.R., Sageman B.B. Theory of chaotic orbital variations confirmed by Cretaceous geological evidence // *Nature*. 2017. Vol. 542. P. 448–470. doi:10.1038/nature21402

Machetel P., Humler E. High mantle temperature during Cretaceous avalanche // *Earth Planet Sci. Letters*. 2003. V. 208. P. 125–133.

Maruyama S., Liou J.G. Initiation of ultrahigh-pressure metamorphism and its significance on the Proterozoic–Paleozoic boundary // *The Island Arc*. 1998. V. 7. P. 6–35.

McArthur J.M., Howarth R.J., Bailey T.R. Strontium isotope stratigraphy: LOWESS version 3: best fit to the marine Sr-isotope curve for 0–509 Ma and accompanying look-up table for deriving numerical age. // *J. Geol.* 2001. Vol. 109. P. 155–170.

McArthur J.M., Howarth R.J., Shields G.A. Chapter 7. Strontium Isotope Stratigraphy. *The Geologic Time Scale 2012*. // In: Gradstein F., Ogg J., Schmitz M., Ogg G. (Eds.), Elsevier. 2012. DOI: 10.1016/B978-0-444-59425-9.00007-X

McQuarrie N., Strock J.M., Verdel C., Wernicke B.P. Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions // *Geophys. Res. Letters*. 2003, 2036, doi:10.1029/2003GL017992.

McLoughlin S. The breakup history of Gondwana and its impact on pre-Cenozoic floristic provincialism // *Australian Journal of Botany*. 2001. Vol. 49 (3). P. 271–300. <https://doi.org/10.1071/BT00023>

Müller R. D. et al. Age, spreading rates and spreading symmetry of the world's ocean crust. // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2008. Vol. 9, Q04006. doi:10.1029/2007GC001743.

Nakiboglu S. Hydrostatic theory of the Earth and its mechanical implications // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1982. Vol. 28, No. 4. P. 302–311.

Nikishin A.M., Petrov E.I., Malyshev N.A., Ershova V.P., 2017. Rift systems of the Russian Eastern Arctic shelf and Arctic deep water basins: link between geological history and geodynamics //

Geodynamics & Tectonophysics. 2017. Vol. 8, No. 1. P. 11–43. doi:10.5800/GT-2017-8-1-0231.

Nikishin, A.M., Petrov, E.I., Cloetingh, S., Freiman, S.I., Malyshev, N.A., Morozov, A.F., Posamentier, H.W., Verzhbitsky, V.E., Zhukov, N.N., Startseva, K. Arctic Ocean Mega Project: Paper 3 — Mesozoic to Cenozoic geological evolution // *Earth-Science Reviews*. 2021. Vol. 217, 103034.

Niu Y., Liu Y., Xue Q., Shao F., Chen S., Duan M., Guo P., Gong H., Hu Y., Hu Z., Kong J., Li J., Liu J., Sun P., Sun W., Ye L., Xiao Y., Zhang Y. Exotic origin of the Chinese continental shelf: new insights into the tectonic evolution of the western Pacific and eastern China since the Mesozoic // *Sci. Bull.* 2015. Vol. 60 No. 18. P. 1598–1616. DOI 10.1007/s11434-015-0891-z

Pal D., Ghosh A. How the Indian Ocean geoid low was formed // *Geophys. Res. Lett.*, 2023. Vol. 50, No. 9, e2022GL102694, doi:10.1029/2022GL102694

Pal D., Ghosh A. Present day mantle structure from global mantle convection models since the Cretaceous // *Geophys. J. Int.* 2024. Vol. 238. P. 1651–1675

Otofuji Y-I. Large tectonic movement of the Japan Arc in late Cenozoic times inferred from paleomagnetism: review and synthesis // *The Island Arc*. 1996. Vol. 5. P. 229–249.

Otofuji Y-I., Matsuda T., Enami R., Uno K., Nishihama K., Halim N., Su L., Zaman H., Kulinich R.G., Zimin P.S., Matunin A.P., Sakhno V.G. Late Cretaceous to early Paleogene paleomagnetic results from Sikhote Alin, Far Eastern Russia: implications for deformation of East Asia // *Earth Planet. Sci. Letters*. 2003. Vol. 130. P. 95–108.

Papadopoulou M., Barry N.L., Dash B., Halton A.M., Sherlock S.C., Hunt A.C. Evidence for long-lived (>100 Myr) continental intraplate volcanism: Mongolia since the last ocean closure // *Gondwana Research*. 2024. Vol. 133. P. 30–59. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2024.04.009>

Randive K., Meshram T. An overview of the carbonatites from the Indian subcontinent // *Open Geoscience*. 2020. Vol. 12. P. 85–116. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0007>

Rao B.P., Kumar M.R., Saikia D. Seismic evidence for a hot mantle transition zone beneath the Indian Ocean Geoid Low // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2020. Vol. 21. e2020GC009079. <https://doi.org/10.1029/2020GC009079>

Rasskazov S., Taniguchi H. Magmatic response to the Late Phanerozoic plate subduction beneath East

Asia. CNEAS Monograph Series No. 21. Tohoku University, Japan, 2006. 156 p.

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., Chuvashova I., Yasnygina T., Saranina E. Mantle evolution of Asia inferred from Pb isotopic signatures of sources for Late Phanerozoic volcanic rocks // *Minerals*. 2020. Vol. 10, No. 9, 739; doi:10.3390/min10090739

Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Chuvashova I.S., Saranina E.V. Contrast evolution of Indian and North Asian tectonosphere: Pb-isotope ages of deep sources for carbonatite-alkaline igneous complexes and Ba–Sr signatures of rocks // *Geology and Environment*. 2025. Vol. 5, No. 3. P. 94–125. DOI 10.26516/2541-9641.2025.3.94.

Rea D.K., Dixon J.M. Late Cretaceous and Paleogene tectonic evolution of the North Pacific Ocean // *Earth Planet. Sci. Letters*. 1983. V. 65. P. 145–166.

Regelous M., Hofmann A.W., Abouchami W. et al. Geochemistry of lavas from the Emperor Seamounts, and the geochemical evolution of Hawaiian magmatism from 85 to 42 Ma // *J. Petrol.* 2003. V.44, № 1. P. 113–140.

Reiss A., Thomas C., Driel J., Heyn B. A hot mid-mantle anomaly in the area of the Indian Ocean geoid low // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44. P. 6702–6711.

Rona P.A., Richardson E.S. Early Cenozoic global plate reorganization // *EPSL*. 1978. Vol. 40. P. 1–11.

Sarkar S., Giuliani A., Dalton H., Phillips D., Ghosh S., Misev S., Maas R. Derivation of lamproites and kimberlites from a common evolving source in the convective mantle: the case for Southern African ‘transitional kimberlites’ // *Journal of Petrology*. 2023. Vol. 64. P. 1–16 <https://doi.org/10.1093/petrology/egad043>

Segev A. Synchronous magmatic cycles during the fragmentation of Gondwana: radiometric ages from the Levant and other provinces // *Tectonophysics*. 2000. V. 325. P. 257–277.

Sheldrick T.C., Barry T.L., Van Hinsbergen D.J.J., Kempton P.D. Constraining lithospheric removal and asthenospheric input to melts in Central Asia: A geochemical study of Triassic to Cretaceous magmatic rocks in the Gobi Altai (Mongolia) // *Lithos*. 2018. P. 296–299, 297–315.

Sheldrick T.C., Barry T.L., Dash B., Gan C., Millar I.L., Barfod D.N., Alison M. Halton Simultaneous and extensive removal of the east Asian lithospheric

root // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. P.4128 | <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60925-3>

Sheth H.C. Were the Deccan flood basalts derived in part from ancient oceanic crust within the Indian continental lithosphere? // *Gondwana Research*. 2005. Vol. 8 (2). P. 109–127. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)71112-6](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)71112-6)

Simkin T., Tilling R.I., Taggart J.N., Jones W.J., Spall H. This dynamic planet world map of tectonics, volcanoes, earthquakes, and plate tectonics. Washington D.C., 1989.

Xu Y.-G., Huang X.-L., Ma J.-L., et al. Crust–mantle interaction during the tectono-thermal reactivation of the North China craton: constraints from SHRIMP zircon U–Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from western Shandong // *Contrib. Miner. Petrol.* 2004. 147. P. 750–767.

Zhang D., Zhou T., Feng Y. et al. Source, evolution and emplacement of Permian Tarim Basalts: Evidence from U–Pb dating, Sr–Nd–Pb–Hf isotope systematics and whole rock geochemistry of basalts from the Keping area, Xinjiang Uygur Autonomous region, northwest China // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2012. V. 49. P. 191–202. doi:10.1016/j.jseaes.2011.10.018

## References

Akinin, V.V. Late Mesozoic and Cenozoic magmatism and transformation of the lower crust in the northern framing of the Pacific. Abstract of a dissertation... by Doctor of Geological and Mineral Sciences. Moscow, IGEM RAS, 2012. 43 p.

Arndt N., Leshner C.M., Barnes S.J. Komatiite. Cambridge University Press, 2008. 458 p.

Beck R.A., Burbank D.W., Sercombe W.J. et al. Stratigraphic evidence for an early collision between northwest India and Asia // *Nature*. 1995. V. 373. P. 55–58.

Bely, V.F., Belaya, B.V. Late stage of development of the Okhotsk-Chukotka volcanogenic belt (upper reaches of the Enmyvaam River) – Magadan: SVKNII FEB RAS, 1998. 108 p.

Besse J., Courtillot V. Apparent and true polar wander and the geometry of the geomagnetic field over the last 200 Myr // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, B 11. P. 6–31.

Boztug D., Jonckheere R., Wagner G.A., Yegingil Z. Slow Senonian and fast Paleocene — Early Eocene uplift of the granitoids in the Central Eastern Pontides, Turkey: apatite fission-track results // *Tectonophysics*. 2004. Vol. 382. P. 213–228.

Caplan-Auebrach J., Duennebier F., Ito G. Origin of intraplate volcanoes from guyot heights and oceanic

palaeodepth // *Geophys. Res.* 2000. Vol. 106. P. 2679–2697.

Chambat F., Ricard Y., Valette B. Flattening of the Earth: Further from hydrostaticity than previously estimated // *Geophysical Journal International*. 2010. Vol. 183. P. 727–732.

Chuvashova I.S., Rasskazov S.V., 2014. Sources of magmatism in the mantle of the evolving Earth. Irkutsk State University Publisher, Irkutsk, 291 p.

Chuvashova I.S., Andreeva Yu.S., Rasskazov S.V. Cretaceous-Paleogene basalts and alkaline basaltoids from South-Eastern Mongolia: 1. Distribution in spatial-temporal geological-geochronological context of the Late Mesozoic and Cenozoic // *Geology and Environment*. 2024. Vol. 4, No. 3. P. 33–64. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.3.33>

Chuvashova I.S., Hassan A., Al Hamud A., Kovalenko S.N., Rudneva N.A., Rasskazov S.V. Transition from the Selenga-Vitim Trough to the Vitim Plateau: Cenozoic Sedimentation and Volcanism // *Bulletin of Irkutsk State University. Earth Sciences Series*. 2019. Vol. 27. pp. 138–153. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.27.138>

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. pp. 159–176.

Chuvashova I.S., Rasskazov S.V., Sun Yimin. Recent geodynamics of Central Asia: Primary and secondary mantle melt anomalies in the context of orogenesis, rifting, and plate motion and interaction // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2017. Vol. 8, no. 1. pp. 45–80. doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0232

Condie K.C. Mantle plumes and their record in Earth history. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 246 p.

Courtillot V., Féraud G., Maluski H. Deccan flood basalts and the Cretaceous/Tertiary boundary // *Nature*. 1988. Vol. 833. P. 843–846.

Cui R., Fang J., Yoshida M. Chen M. Modeling Long-Wavelength Geoid Anomalies from Instantaneous Mantle Flow: Results from Two Recent Tomography Models // *Pure Appl. Geophys.* 2019. Vol. 176. P. 4335–4348.

Dawson J. Kimberlites and xenoliths in them. M.: Mir, 1983. 306 p. (Translated from English to Russian)

Dickin A.P. The North Atlantic Tertiary province / J.M. Macdougall (ed.) Continental Flood Basalts, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London. 1988. P. 111–149.

- Didenko, A.N., "On a Possible Cause of Quasi-periodic Fluctuations in the Frequency of Geomagnetic Reversals and the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  Ratio in Marine Carbonate Rocks in the Phanerozoic," *Geology and Geophysics*, 2011, Vol. 52, No. 12, pp. 1945–1956.
- Dobretsov, N.L., Kirdyashkin, A.G., Kirdyashkin, A.A., "Deep Geodynamics." Novosibirsk: SB RAS Publishing House, GEO Branch, 2001, 409 p.
- Engebretson D.C., Cox A., Gordon R.G. Relative motion between oceanic plates of the Pacific basin // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89, N B12. P. 10291–10310.
- Enkhtuvshin H.A. Petrological study on the Late Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks of the Mongolian Plateau // Master thesis. Shimane University, 1995. 119 p.
- Foulger G.R. Plates vs. plumes: a geological controversy. Wiley–Blackwell, 2010. 328 p.
- Gordon R.G., Jurdy D.M. Cenozoic global plate motions // *J. Geophys. Res.* 1986. Vol. 91. P. 12389–12406.
- Guo F., Fan W., Wang Y., Li C. When did the Emeishan mantle plume activity start? Geological and geochemical evidence from ultramafic–mafic dikes in Southwestern China // *International Geology Review*. 2004. V. 46. P. 226–234.
- Hilgen F.J. Astronomical calibration of Gauss to Matuyama sapropeles in the Mediterranean and implication for the geomagnetic polarity time scale // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1991. Vol. 104, N 2. P. 226–244.
- Hilgen F.J., Krijgsman W., Langereis J., Lourens L.J. Breakthrough made in dating of geological record // *EOS: Trans. Amer. Geophys. Union*. 1997. Vol. 78, N28. P. 285–287.
- Hilde T.W., Uyeda S., Kroenke L. Evolution of the Western Pacific and its margin // *Tectonophysics*. 1977. V. 38. P. 145–165.
- Hinnov L.A. Cyclostratigraphy and its revolutionizing applications in the Earth and planetary sciences // *Geol. Soc. Am. Bull.* 2013. Vol. 125. P. 1703–1734.
- Hudson T.L., Magoon L.B. Tectonic controls on greenhouse gas flux to the Paleogene atmosphere from the Gulf of Alaska accretionary prism // *Geology*. 2002. Vol. 30. P. 547–550.
- Jolley D.W., Clarke B., Kelley S. Paleogene time scale miscalibration: evidence from the dating of North Atlantic igneous province // *Geology*. 2002. Vol. 30. P. 7–10.
- Imbrie J., Boyle E.A., Clemens S.C., Duffy A., Howard W.R., Kukla S.G., Kutzbach S.J., Martinson D.G., McIntyre S.A., Mix A.C., Molino B., Morley S.J.J., Peterson S.L.C., Pisias N.G., Prell W.L., Raymo M.E., Shackleton N.J., Toggweiler J.R. On the structure and origin of major glaciation cycles. 1. Linear responses to Milankovitch forcing // *Paleoceanology*. 1992. Vol. 7, N 6. P. 701–738.
- Ishiwatari A., Ichiyama Y. Alaskan-type plutons and ultramafic lavas in Far East Russia, Northeast China, and Japan // *International Geology Review*. 2004. V. 46. P. 316–331 DOI: 10.2747/0020-6814.46.4.316
- Karetnikov A.S. Age and genesis of platinum group mineralization in the Kondyor massif: paleomagnetic and radioisotope data // *Lithosphere*, 2006, no. 3, pp. 96–107.
- Karetnikov, A.S. Age estimation of ultramafic rocks of the Chad massif (Khabarovsk Krai) based on paleomagnetic data // *Pacific Geology*. 2015. Vol. 34, no. 6, pp. 74–90.
- Kirillova, G.L. Correlation of Cretaceous events in East Asia with global events // *Pacific Geology*. 1997. no. 6, pp. 3–20.
- Kirillova, G.L. Cretaceous of eastern Russia: sedimentation, geodynamics, biodiversity, climate. Vladivostok: Dalnauka, 2000. 94 p.
- Khan S.D., Stern R.J., Manton M.I. et al. Age, geochemical and Sr–Nd–Pb isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis of Teru volcanics, Northern Kohistan terrane, Pakistan // *Tectonophysics*. 2004. V. 393. P. 263–280.
- Khanchuk A.I., Didenko A.N., Popeko L.I., Sorokin A.A., Shevchenko B.F. Structure and evolution of the Mongol–Okhotsk Orogenic Belt // *The Central Asia Orogenic Belt: geology, evolution, tectonics and models* (A. Kroner, ed.), Borntraeger Science Publishers, Stuttgart, 2015. P. 211–234.
- Kovalenko V.I., Kostitsyn Yu.A., Yarmolyuk V.V., et al. Magma sources and isotopic (Sr, Nd) evolution of rare-metal Li–F granitoids // *Petrology*. 1999. Vol. 7, No. 4. P. 401–429.
- Kovalenko V.I., Yarmolyuk V.V., Andreeva I.A., et al. Magma types and their sources in the Earth's history. Part 2. Rare-metal magmatism: rock associations, magma composition and sources, geodynamic settings of formation. Moscow: IGEM RAS, 2006. 280 p.
- Kovalenko D.V. Paleomagnetism of late Paleozoic, Mesozoic, and Cenozoic geological complexes of Mongolia // *Geology and Geophysics*. 2010. Vol. 51, No. 4. P. 496–515.
- Korina N.A. Khangai Highlands // *Geomorphology of the Mongolian People's Republic*. Proceedings

of the Joint Soviet-Mongolian Research Expedition. Vol. 28. M.: Science. 1982. pp. 87–108.

Kotlyakov V.M. A world of snow and ice. M.: Nauka, 1994. 286 p.

Kotlyar I.N., Rusakova T.V. Cretaceous magmatism and ore content of the Okhotsk-Chukotka region: geological and geochronological correlations. Magadan, 2004. 152 p.

Kravchinsky V.A. Paleomagnetism of rocks of the Mongol-Okhotsk fold belt. Dissertation ... candidate of geological and mineralogical sciences. Irkutsk, 1995. 181 p.

Kravchinsky V.A., Cogné J.P., Harbert W.P., Kuzmin M.I. Evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean as constrained by new palaeomagnetic data from the Mongol-Okhotsk suture zone, Siberia // *Geophys. J. Int.* 2002. Vol. 148, No. 1. P. 34–57. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-246x.2002.01557.x>.

Krishnamurthy P. Carbonatites of India // *Journal Geological Society of India*. 2019. Vol. 94. P. 117–138. <https://dx.doi.org/10.1007/s12594-019-1281-y>

Larson R.L. Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume // *Geology*. 1991. V. 19. P. 547–550.

Laskar J., Robutel P., Joutel F., Gastineau M., Correia A.C.M., Levrard B. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth // *Astron. Astrophys.* 2004. Vol. 428. P. 261–285.

Laskar J., Fienga A., Gastineau M., Manche H. La2010: a new orbital solution for the long-term motion of the Earth // *Astron. Astrophys.* 2011. V. 532. P. A89. doi: 10.1051/0004-6361/201116836

Laurens L.J., Antonarakou A., Hilgen F.J., Van Hoof A.A.M., Vergnaud-Grazzini C., Zachariasse W.J. Evaluation of the Plio-Pleistocene astronomical time scale // *Paleoceanography*. 1996. Vol. 11, N4. P. 391–413.

Le Pichon X., Jellinek M., Lenardic A., Şengör A.M.C., İmren C. Pangea migration // *Tectonics*. 2021. Vol. 40, e2020TC006585. <https://doi.org/10.1029/2020TC006585>

Le Pichon X., Şengör, A.M.C., İmren C. Pangea and the lower mantle // *Tectonics*. 2019. Vol. 38, 10.1029/2018TC005445

Li Z., Li Y., Chen H. et al. Hf isotopic characteristics of the Tarim Permian large igneous province rocks of NW China: Implication for the magmatic source and evolution // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2012a. V. 49. P. 191–202. doi:10.1016/j.jseaes.2011.11.021

Li Z., Chen H., Song B. et al. Temporal evolution of the Permian large igneous province in Tarim Basin in northwestern China // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2011. V. 42. P. 917–927. doi:10.1016/j.jseaes.2011.05.009

Li Y-Q., Li Z-L., Sun Y-L. et al. Platinum-group elements and geochemical characteristics of the Permian continental flood basalts in the Tarim Basin, northwest China: Implications for the evolution of the Tarim Large Igneous Province // *Chemical Geology*. 2012. V. 328. P. 278–289

Lithgow-Bertelloni C., Richards M.A. The dynamics of Cenozoic and Mesozoic plate motions. // *Reviews of Geophysics*. 1998. Vol. 36, No. 1. P. 27–78.

Logatchev N.A., Sherman S.I., Levi K.G. On the principles and methods of compiling a map of the recent tectonics of Siberia // *Methodological recommendations for the Atlas of tectonic maps and reference profiles of Siberia*. Novosibirsk, 1981. P. 12–20.

Ma C., Meyers S.R., Sageman B.B. Theory of chaotic orbital variations confirmed by Cretaceous geological evidence // *Nature*. 2017. Vol. 542. P. 448–470. doi:10.1038/nature21402

Machetel P., Humler E. High mantle temperature during Cretaceous avalanche // *Earth Planet Sci. Letters*. 2003. V. 208. P. 125–133.

Maruyama S., Liou J.G. Initiation of ultrahigh-pressure metamorphism and its significance on the Proterozoic-Paleozoic boundary // *The Island Arc*. 1998. V. 7. P. 6–35.

McArthur J.M., Howarth R.J., Bailey T.R. Strontium isotope stratigraphy: LOWESS version 3: best fit to the marine Sr-isotope curve for 0–509 Ma and accompanying look-up table for deriving numerical age. // *J. Geol.* 2001. Vol. 109. P. 155–170.

McArthur J.M., Howarth R.J., Shields G.A. Chapter 7. Strontium Isotope Stratigraphy. *The Geologic Time Scale 2012*. // In: Gradstein F., Ogg J., Schmitz M., Ogg G. (Eds.), Elsevier. 2012. DOI: 10.1016/B978-0-444-59425-9.00007-X

McQuarrie N., Strock J.M., Verdel C., Wernicke B.P. Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions // *Geophys. Res. Letters*. 2003, 2036, doi:10.1029/2003GL017992.

McLoughlin S. The breakup history of Gondwana and its impact on pre-Cenozoic floristic provincialism // *Australian Journal of Botany*. 2001. Vol. 49 (3). P. 271–300. <https://doi.org/10.1071/BT00023>

Melnikov O.A. Structure and geodynamics of the Hokkaido-Sakhalin folded region. Moscow: Nauka, 1987. 95 p.

- Melnikov O.A. Geological formations of the Hokkaido-Sakhalin region. Vladivostok: Far Eastern Branch of the USSR Academy of Sciences, 1988. 213 p.
- Milanovsky E.E. Earth pulsations // *Geotectonics*. 1995. No. 5. P. 3–24
- Müller R. D. et al. Age, spreading rates and spreading symmetry of the world's ocean crust. // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2008. Vol. 9, Q04006. doi:10.1029/2007GC001743.
- Nakiboglu S. Hydrostatic theory of the Earth and its mechanical implications // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1982. Vol. 28, No. 4. P. 302–311.
- Nikishin A.M., Petrov E.I., Malyshev N.A., Ershova V.P., 2017. Rift systems of the Russian Eastern Arctic shelf and Arctic deep water basins: link between geological history and geodynamics // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2017. Vol. 8, No. 1. P. 11–43. doi:10.5800/GT-2017-8-1-0231.
- Nikishin, A.M., Petrov, E.I., Cloetingh, S., Freiman, S.I., Malyshev, N.A., Morozov, A.F., Posamentier, H.W., Verzhbitsky, V.E., Zhukov, N.N., Startseva, K. Arctic Ocean Mega Project: Paper 3 — Mesozoic to Cenozoic geological evolution // *Earth-Science Reviews*. 2021. Vol. 217, 103034.
- Nikolaev N.I. Recent Tectonics of the USSR (Proceedings of the Commission for the Study of the Quaternary Period) Moscow–Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1949. 342 p.
- Niu Y., Liu Y., Xue Q., Shao F., Chen S., Duan M., Guo P., Gong H., Hu Y., Hu Z., Kong J., Li J., Liu J., Sun P., Sun W., Ye L., Xiao Y., Zhang Y. Exotic origin of the Chinese continental shelf: new insights into the tectonic evolution of the western Pacific and eastern China since the Mesozoic // *Sci. Bull.* 2015. Vol. 60 No. 18. P. 1598–1616. DOI 10.1007/s11434-015-0891-z
- Oliferovsky R.V., Sedunova E.A., Shametova I.B., Bashkirtsev A.V., Danilin D.A., Mongush A.R., Kovalenko S.N., Yasygina T.A., Chuvashova I.S., Saranina E.V., Rasskazov S.V. Source of trachydacite-rhyolite pebbles from Middle Jurassic conglomerates on the northwestern shore of Lake Baikal: comparison of pebbles with rocks of Upper Paleozoic and Mesozoic igneous complexes of Transbaikalia // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 4. Pp. 53–79. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.53
- Pal D., Ghosh A. How the Indian Ocean geoid low was formed // *Geophys. Res. Lett.*, 2023. Vol. 50, No. 9, e2022GL102694, doi:10.1029/2022GL102694
- Pal D., Ghosh A. Present day mantle structure from global mantle convection models since the Cretaceous // *Geophys. J. Int.* 2024. Vol. 238. P. 1651–1675
- Otofuji Y-I. Large tectonic movement of the Japan Arc in late Cenozoic times inferred from paleomagnetism: review and synthesis // *The Island Arc*. 1996. Vol. 5. P. 229–249.
- Otofuji Y-I., Matsuda T., Enami R., Uno K., Nishihama K., Halim N., Su L., Zaman H., Kulinich R.G., Zimin P.S., Matunin A.P., Sakhno V.G. Late Cretaceous to early Paleogene paleomagnetic results from Sikhote Alin, Far Eastern Russia: implications for deformation of East Asia // *Earth Planet. Sci. Letters*. 2003. Vol. 130. P. 95–108.
- Papadopoulou M., Barry N.L., Dash B., Halton A.M., Sherlock S.C., Hunt A.C. Evidence for long-lived (>100 Myr) continental intraplate volcanism: Mongolia since the last ocean closure // *Gondwana Research*. 2024. Vol. 133. P. 30–59. https://doi.org/10.1016/j.gr.2024.04.009
- Randive K., Meshram T. An overview of the carbonatites from the Indian subcontinent // *Open Geoscience*. 2020. Vol. 12. P. 85–116. https://doi.org/10.1515/geo-2020-0007
- Rao B.P., Kumar M.R., Saikia D. Seismic evidence for a hot mantle transition zone beneath the Indian Ocean Geoid Low // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2020. Vol. 21. e2020GC009079. https://doi.org/10.1029/2020GC009079
- Rasskazov S.V., Chuvashova I.S. Generation of the global Asian Isotope Thermal Anomaly (ASITA) in the incipient Earth-Moon system: Gas-dust cloud fragmentation versus mega-impact // *Geology and Environment*. 2024. Vol. 4, No. 1. P. 7–41. https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.7
- Rasskazov S.V., Chuvashova I.S. Global and regional expression of the latest geodynamic stage // *Bulletin of MOIP. Geological Dept.* 2013a. Vol. 88, issue 4. pp. 21–35.
- Rasskazov S.V., Chuvashova I.S. Recent mantle geodynamics of Central Asia. Irkutsk: Irkutsk State University Publishing House, 2013b. 308 pp.
- Rasskazov S.V., Chuvashova I.S. Cenozoic dynamic extremes in episodes of crustal melt eruptions in orogenic and rift structures of Asia // *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from ocean to continent): Proceedings of the meeting*. Issue. 10. Vol. 2. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS. 2012a. P. 51–54.
- Rasskazov S.V., Chuvashova I.S. Temporal change in sources of late Cenozoic volcanism at the

boundary of the Transbaikalian and Sayan-Mongolian melt domains // *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from ocean to continent)*. Proceedings of the meeting. Issue 12. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS. 2014a. P. 239–240.

Rasskazov S.V., Chuvashova I.S. Volcanism and transtension in the northeastern Baikal Rift System. Novosibirsk, Academic Publishing House «GEO», 2018. 384 p. doi: 10.21782/B978-5-6041446-3-3

Rasskazov S., Taniguchi H. Magmatic response to the Late Phanerozoic plate subduction beneath East Asia. CNEAS Monograph Series No. 21. Tohoku University, Japan, 2006. 156 p.

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., Chuvashova I., Yasnygina T., Saranina E. Mantle evolution of Asia inferred from Pb isotopic signatures of sources for Late Phanerozoic volcanic rocks // *Minerals*. 2020. Vol. 10, No. 9, 739; doi:10.3390/min10090739

Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Mordvinova V.V., et al. The Role of the Lehman Cratonic Divide in the Cenozoic Dynamics of the Central Asian Upper Mantle: Interpretation of Seismic Wave Velocity Models in Light of the Spatiotemporal Evolution of Volcanism // *Fundamental Problems of Geotectonics*. Abstracts of the XL Tectonic Meeting. Moscow: Moscow State University. 2007b. Pp. 126–129.

Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Yasnygina T.A., et al. Potassium and Potassium-Sodium Volcanic Series in the Cenozoic of Asia. Novosibirsk: Academic Publishing House "GEO", 2012b. 310 p.

Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Mikolaichuk A.V., Sobel E.R., Yasnygina T.A., Fefelov N.N., Saranina E.V. Lateral change of sources of Cretaceous-Paleogene magmatism in Tien Shan // *Petrology*. 2015. Vol. 23, No. 3. pp. 308–336.

Rasskazov S.V., Logatchev N.A., Kozhevnikov V.M., Yanovskaya T.B. Stage dynamics of the upper mantle of East Asia: relationships between migrating volcanism and low-velocity anomalies // *Dokl.* 2003. Vol. 390, No. 1. Pp. 90–95.

Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Chuvashova I.S., Saranina E.V. Contrast evolution of Indian and North Asian tectonosphere: Pb-isotope ages of deep sources for carbonatite-alkaline igneous complexes and Ba–Sr signatures of rocks // *Geology and Environment*. 2025. Vol. 5, No. 3. P. 94–125. DOI 10.26516/2541-9641.2025.3.94.

Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Chuvashova I.S. Mantle sources of Cenozoic volcanic rocks of

East Asia: derivatives of slabs, sublithospheric convection, and the lithosphere // *Pacific Geology*. 2014b. Vol. 33, No. 5. pp. 47–65. 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 of Cenozoic volcanic rocks of the western coast of South Sakhalin // *Pacific Geology*. 2005b. Vol. 24, No. 2. Pp. 10–32.

Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Hari K.R., Chuvashova I.S., Saranina E.V. Magmatic sources of the evolving continental tectonosphere in India: Generation of alkaline igneous complexes with carbonatites in the Samalpatti (Southern India) and Amba Dongar (Western India) massifs // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2024. Vol. 15, No. 5, 0783. doi:10.5800/GT-2024-15-5-0783

Rea D.K., Dixon J.M. Late Cretaceous and Paleogene tectonic evolution of the North Pacific Ocean // *Earth Planet. Sci. Letters*. 1983. V. 65. P. 145–166.

Regelous M., Hofmann A.W., Abouchami W. et al. Geochemistry of lavas from the Emperor Seamounts, and the geochemical evolution of Hawaiian magmatism from 85 to 42 Ma // *J. Petrol.* 2003. V.44, No. 1. P. 113–140.

Reiss A., Thomas C., Driel J., Heyn B. A hot mid-mantle anomaly in the area of the Indian Ocean geoid low // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44. P. 6702–6711.

Rona P.A., Richardson E.S. Early Cenozoic global plate reorganization // *EPSL*. 1978. Vol. 40. P. 1–11.

Sarkar S., Giuliani A., Dalton H., Phillips D., Ghosh S., Misev S., Maas R. Derivation of lamproites and kimberlites from a common evolving source in the convective mantle: the case for Southern African 'transitional kimberlites' // *Journal of Petrology*. 2023. Vol. 64. P. 1–16 <https://doi.org/10.1093/petrology/egad043>

Saveliev, D.P. Intraplate Alkaline Basalts in the Cretaceous Accretionary Complex of the Kamchatka Peninsula (Eastern Kamchatka) / D. P. Saveliev // *Volcanology and Seismology*. 2003. No. 1. pp. 14–20.

Saveliev D.P. Cretaceous Within-Plate Volcanics of Eastern Kamchatka: Geological Setting and Influence on Island-Arc Volcanism // *Geology and Exploration*. 2004. No. 2. P. 16–19.

Segev A. Synchronous magmatic cycles during the fragmentation of Gondwana: radiometric ages from the Levant and other provinces // *Tectonophysics*. 2000. V. 325. P. 257–277.

Sheldrick T.C., Barry T.L., Van Hinsbergen D.J.J., Kempton P.D. Constraining lithospheric removal and asthenospheric input to melts in Central Asia: A geochemical study of Triassic to Cretaceous magmatic rocks in the Gobi Altai (Mongolia) // *Lithos*. 2018. P. 296–299, 297–315.

Sheldrick T.C., Barry T.L., Dash B., Gan C., Millar I.L., Barfod D.N., Alison M. Halton Simultaneous and extensive removal of the east Asian lithospheric root // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. P.4128 | <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60925-3>

Sheth H.C. Were the Deccan flood basalts derived in part from ancient oceanic crust within the Indian continental lithosphere? // *Gondwana Research*. 2005. Vol. 8 (2). P. 109–127. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)71112-6](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)71112-6)

Simkin T., Tilling R.I., Taggart J.N., Jones W.J., Spall H. This dynamic planet world map of tectonics, volcanoes, earthquakes, and plate tectonics. Washington D.C., 1989.

Skoblo V.M., Lyamina, N.A., Luzina, I.V., Rudnev, A.F. Continental Upper Mesozoic of the Baikal and Transbaikalian Regions. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2001. 332 p.

Sokolov S.D. Continental accretion, terranes and nonlinear effects in the geodynamics of northeastern Russia, tectonic and geological phenomena // *Proceedings of the Geological Institute of the Russian Academy of Sciences* 505. Moscow: Nauka, 1997. P. 42–69.

Sherman S.I., Levi K.G., Ruzhich V.V., Sankov V.A., Dneprovskiy Yu.I., Rasskazov S.V. Geology and Seismicity of the BAM Zone. Neotectonics. Novosibirsk: Nauka, 1984. 207 p.

Tauson L.V., Antipin V.S., Zakharov M.N., Zubkov V.S. Geochemistry of Mesozoic latites in Transbaikalia. Novosibirsk: Nauka, 1984. 215 p.

Vorontsov, A.A., Yarmolyuk, V.V., Komaritsyna, T.Yu. Late Mesozoic-Early Cenozoic riftogenic magmatism of the Uda sector (Western Transbaikalia) // *Geology and Geophysics*. 2016. Vol. 57b, No. 5. pp. 920–946.

Xu Y.-G., Huang X.-L., Ma J.-L., et al. Crust–mantle interaction during the tectono-thermal reactivation of the North China craton: constraints from SHRIMP zircon U–Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from western Shandong // *Contrib. Miner. Petrol*. 2004. 147. P. 750–767.

Yakubovich, O.V. A New Method of Isotope Geochronology for Dating Platinum Minerals. Abstract of a Candidate of Geological and Mineralogical Sciences Dissertation, St. Petersburg: St. Petersburg State University, 2013. 20 p.

Yarmolyuk, V.V., Kozlovsky, A.M., Savatenkov, V.M., Kudryashova, E.A., Kuznetsov, M.V. Late Mesozoic East Mongolian Volcanic Region: Structure, Igneous Associations, and Sources of Magmatism // *Petrology*. 2020. Vol. 28, No. 6. pp. 563–590.

Yarmolyuk V.V., Kudryashova E.A., Kozlovsky A.M., et al. Late Cretaceous – Early Cenozoic Trace of the South Khangai Mantle Hotspot // *Volcanology and Seismology*. 2007. No. 1. pp. 3–31.

Yarmolyuk V.V., Kudryashova E.A., Kozlovsky A.M. Late Stages of the Development of the Late Mesozoic East Mongolian Volcanic Region: Age and Composition of Volcanic Rocks // *Dokl. AN*. 2019. Vol. 487. pp. 283–288. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524873283-288>

Zamaraev S.M., Sizykh V.I., Meshalkin S.I., Novokshonov Yu.A. Structural Features of the Angarsk Thrust // *Geology and Geophysics*. 1983, No. 5. P. 126–129.

Zhang D., Zhou T., Feng Y. et al. Source, evolution and emplacement of Permian Tarim Basalts: Evidence from U–Pb dating, Sr–Nd–Pb–Hf isotope systematics and whole rock geochemistry of basalts from the Keping area, Xinjiang Uygur Autonomous region, northwest China // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2012. V. 49. P. 191–202. doi:10.1016/j.jseaes.2011.10.018

Zonenshain L.P., Natapov L.M. Tectonic History of the Arctic // *Actual Problems of Geotectonics*. Moscow: Nauka, 1987. P. 31–57.

**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](mailto: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*

***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*

---

## Геологическая форма движения материи: основа возникновения жизни на Земле

К.М. Константинов

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

**Аннотация.** Согласно учению о диалектики, геологическая форма движения материи как совокупность более простых форм движений единой материи (механической, физической, химической) определила качественный переход от неорганической к живой природе (биологическая форма движения материи). В статье приводится система доказательств этого процесса, вытекающих из современной теории мантийных плюмов.

**Ключевые слова:** Геологическая форма движения материи, теория мантийных плюмов, примитивная Земля, абиогенез, жизнь, панспермия, динамическая физико-геологическая модель

## Geologic Form of Matter Motion: the Basis of Life on Earth

K.M. Konstantinov

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract.** According to the doctrine of dialectics the geological form of motion of matter as a set of simpler forms of motion of single matter (mechanical, physical, chemical) determined the qualitative transition from inorganic to wildlife (biological form of motion of matter). The article provides a system of evidence for this process arising from the modern theory of mantle plumes.

**Keywords:** Geological form of matter motion, mantle plume theory, primitive Earth, abiogenesis, life, panspermia, dynamic physical-geological model

### Введение

В связи с тем, что дискуссии о существовании геологической формы движения материи (ГФДМ) ведутся с конца XVIII века, начиная с Ф. Энгельса (1982) и продолженные В.И. Лениным (1968), Б.М. Кедровым (1981) и др. философами, вплоть до настоящего времени, эта тема в статье подробно не рассматривается. Данный вопрос сугубо философский, поскольку определяется количественными и качественными критериями,

конкретизирующими свойства этой формы движения материи. Например, в своем труде Ф. Энгельс (1931) считал, что «что жизнь должна была возникнуть химическим путем» минуя ГФДМ: механика – физика – химия – биология (рис. 1). Обосновывая свою иерархическую цепочку Ф. Энгельс писал, что живой организм представляет собой высший синтез механики, физики и химии, в силу которого эту тройцу разделить нельзя. Каждая из них отражает лишь сторону или момент единого нераздельного целого, каким

---

Статья получена: 23.11.2025; исправлена: 01.12.2025; принята: 12.12.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Константинов К.М. Геологическая форма движения материи: основа возникновения жизни на Земле // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 4. С. 50–72. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.50. EDN: UEATOJ

Article received: 23.11.2025; corrected: 01.12.2025; accepted: 12.12.2025.

FOR CITATION: Konstantinov K.M. Geologic form of matter motion: the basis of life on Earth // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 4. P. 50–72. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.50. EDN: UEATOJ

является жизнь, живой организм. В принципе, Ф. Энгельс не отрицал и не отвергал существования ГФДМ, поскольку в то время

геология как наука начинала только формироваться в систему знаний.



**Рис. 1.** Формы движения материи (о геологической форме движения материи: смотрите и скачивайте изображения — Яндекс Картинки).

**Fig. 1.** Forms of motion of matter (about the geological form of motion of matter: watch and download images – Yandex Pictures).

В.И. Ленин (1968), отстаивая материалистическую теорию познания, опирался на геологию, поскольку Земля существовала раньше появления на ней человека, и не могла зависеть от его сознания: «...*Естествознание положительно утверждает, что земля существовала в таком состоянии (примитивная Земля<sup>1</sup> – прим. автора), когда ни человека, ни вообще какого бы ни было живого существа на ней не было и быть не могла. ... Значит, не было ощущающей материи, – не было ни каких «комплексов ощущений», – никакого Я, будто бы «неразрывно» связанного со средой... Такова материалистическая теория познания, на которой стихийно стоит естествознание*».

Идея ГФДМ активно обсуждалась философами и специалистами наук о Земле с начала 50-х годов. На основе учения Ф. Энгельса о формах движения материи, советскими философами Б.М. Кедровым (1959, 1962, 1981), Е.А. Куражковской (1970), Г.П. Горшковым (1970), И.Ф. Зубковым (1974, 1979) и др. в практику было впервые введено понятие

ГФДМ в качестве особой и самостоятельной формы. ГФДМ – это специфическая форма движения материи, связанная с изменениями в геосистемах – материках, слоях земной коры и т. д. или, перефразируя, – способ существования неорганического (минерального) вещества в рамках отдельного космического тела (от минералообразования до взаимодействия оболочек планеты). Её специфика заключается в синтезе более простых форм движения (механического, физического, химического) на неорганической вещественной основе (образование всевозможных минералов, руд и др. веществ) в условиях больших температур и давлений.

Согласно классификации основных форм движения материи, Б.М. Кедров (1959) предложил, что после химической формы движения процесс развития природы поляризуется на две основные ветви: органической и неорганической природы (рис. 2). Одна ветвь, выйдя за пределы химии, вступает в область биологии, другая — в область геологии:

<sup>1</sup> Примитивная Земля – это Земля без жизни такой она была примерно 4 млрд лет тому назад (то же самое можно сказать и о примитивных океане и атмосфере).



**Рис. 2.** Схема бифуркации химической формы движения материи на биологическую (живую) и геологическую (неживую) формы движения материи по (Кедров, 1959; 1981). Пунктирные линии означают, что предмет геологии (неживая природа, Земля) служил и служит предпосылкой и условием существования предмета биологии (живых организмов), аналогичным образом растения являются условием существования высших животных.

**Fig. 2.** Scheme of bifurcation of the chemical form of motion of matter into biological (living) and geological (non-living) forms of motion of matter according to (Kedrov, 1959; 1981). Dotted lines mean that the subject of geology (inanimate nature, Earth) served and serves as a prerequisite and condition for the existence of the subject of biology (living organisms), similarly plants are a condition for the existence of higher animals.

В предложенной схеме (рис. 2) Б.М. Кедров считает ГФДМ тупиковой, неперспективной. Он отвергал возможность возникновения жизни из геологического вещества, считая, что жизнь может возникнуть исключительно из физической и химической формы движения, но никак не из геологической.

Поскольку ГФДМ, по Б.М. Кедрову, представляет собой ответвление от общей линии исторически следующих друг за другом и вытекающих одна из другой форм движения материи (рис. 2), то создает представление о ее «второстепенности», «незаконности», «неполноценности», во всяком случае не такой «фундаментальности», какой обладают химическая, биологическая, социальная формы движения. Поэтому его точка зрения подверглась жесткой критике со стороны исследователей, что, в итоге, привело к ее отрицанию и последующей корректировке (рис. 1). Е.А. Куражковская (1970) пишет, что «если выводить геологическую и биологическую формы по принципу дивергенции от химической формы, то это приводит к отрыву геологической формы от биологической, следовательно, к отрыву от общей линии прогрессивного развития... Совершенно очевидно, что именно геологическая форма *подготовила условия и явилась средой*, в которой мог осуществиться переход от химии к жизни. Бесспорным является и тот факт, что эта форма движения является условием и средой существования органического мира на протяжении всей его истории».

Если ГФДМ тупиковая, то она по определению не может претендовать на самостоятельную форму движения материи, поскольку не создает ни чего качественно нового. Это лишнее звено в диалектике природы.

Планета, очевидно, возникает раньше, служит условием возникновения жизни (Ленин, 1968). Поэтому если связывать ГФДМ с планетной или какой-либо ее сферой, то эта форма должна предшествовать биологической (а не быть с ней параллельной) и входить в ее структуру (рис. 1). Учитывая это, большинство исследователей считает, что ГФДМ в генетическом ряду по видам материи занимает важное место и определяет качественный переход (связующее звено) от неорганической к живой природе.

Так каким же образом ГФДМ подготовила условия и тем самым послужила основой для развития химической эволюции, которая в итоге привела к появлению органических веществ и сложных органических соединений? Поскольку вывод об унитарности ГФДМ имеет гносеологическое значение для развития всего человечества, то он требует неопровержимых (практических) доказательств полученных в разных областях науки. Но, как не странно, в процессе моей работы по этой теме установлено полное отсутствие доводов (фактов) в пользу этой логической цепочки в выше приведенных философских трактатах. Я думаю, что в меру той или иной полученной специализированной информации, этот

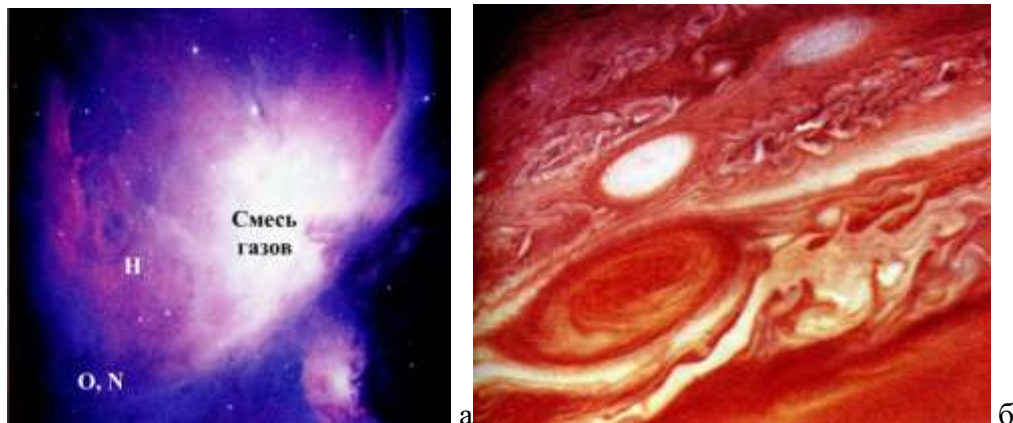
вопрос каждый может решать для себя самостоятельно. Тем более информации по этому вопросу в интернете достаточно много. Поэтому задача состояла в том, чтобы сформировать систему фактов для доказательства этого тезиса: о роле ГФДМ в возникновении жизни на Земле. Что я и попытался сделать в данной статье.

### Краткий обзор гипотез

Если отбросить антинаучные догмы возникновения жизни на Земле такие как теологию и самозарождение (внезапное «de novo» возникновение живых существ на Земле; она же рассматривает случаи, когда одна форма жизни трансформируется непосредственно в другую, например, зерно превращается в мышь), то в настоящее время имеются как минимум две общепризнанные парадигмы (гипотезы), которые условно можно отнести к панспермии (космогенная) и химической эволюции (экзогенная). Третья – гипотеза геодинамической эволюции (эндогенная) пока находится в стадии разработки. В

каждой из них существуют факты подтверждающие формирование сложных органических полимеров из простых химических элементов – С, Н, N, P, O. Первые две гипотезы (космогенная и экзогенная) в отличие от третьей указывают на то, что Земля могла лишь предоставить для инопланетной жизни подходящие условия, но не могла, как утверждается в эндогенной гипотезе – стать ее источником.

Согласно *космогенной гипотезе (панспермия)*, повсюду во Вселенной (рис. 3) происходит синтез органического вещества из химических элементов (абиогенез) и среди его конечных продуктов много биологически важных соединений, в том числе основных мономеров генетических систем и их предшественников. Эти открытия позволили осознать тот важный факт, что синтез биологических соединений не есть какой-то специфический химический процесс, возможный лишь в особо благоприятных условиях, характерных только для нашей планеты, но представляет собой явление космического масштаба.



**Рис. 3.** Распространение химических элементов и их соединений во Вселенной.

а – Туманность в созвездии Орион. Гигантские массы газа и пыли, которые окружают центральную звезду в группе, образующей «меч» Ориона, – еще одна иллюстрация распространенности во Вселенной водорода (Калифорнийский технологический институт, 1959 г.); б – большое Красное Пятно – долгоживущее образование метана и аммиака в атмосфере Юпитера, окруженное турбулентной облачностью (фотография получена космической станцией «Вояджер»).

**Fig. 3.** Distribution of chemical elements and their compounds in the universe.

а – Nebula in the constellation Orion. The giant masses of gas and dust that surround the central star in the group that forms Orion's «sword» is another illustration of the prevalence of hydrogen in the universe (Caltech, 1959); б – Large Red Spot – a long-lived formation of methane and ammonia in the atmosphere of Jupiter, surrounded by turbulent clouds (photo obtained by the Voyager space station).

Сообразно этому представлению, «зародыши жизни» (эмбрионы) блуждают в космическом пространстве в законсервированном виде (рис. 4) до тех пор, пока не попадают на подходящую по своим условиям планету – там они и дают начало биологической эволюции. Эту идею поддерживали самые знаменитые физики XIX в. – Герман ван Гельмгольц (1821-1894) и Уильям Томсон (позднее лорд

Кельвин; 1824-1907). По их мнению, во Вселенной должно существовать много других миров, несущих жизнь, которые время от времени разрушаются при столкновении с другими космическими телами, а их обломки (межпланетные «прыгуны») с живыми растениями и животными рассеиваются в пространстве.



**Рис. 4.** Межпланетные «прыгуны»: метеориты (а) с включениями объекта (б) по морфологическим признакам схожего с современной цианобактерией *Calothrix* sp. (из матрицы метеорита Оргэй).

**Fig. 4.** Interplanetary «jumpers»: meteorites (a) with inclusions of object (b) on morphological features similar to modern cyanobacteria *Calothrix* sp. (from the Orgay meteorite matrix).

Эта идея была тщательно разработана в 1908 г. шведским химиком Сванте Аррениусом (1859-1927), который назвал свою гипотезу *панспермией*. Развивая идеи Гельмгольца и Кельвина, он высказал несколько собственных соображений, предположив, что бактериальные споры и вирусы могут уноситься с планеты, где они существовали, под действием электростатических сил, а затем перемещаться в космическое пространство под давлением света звезд. Находясь в космическом пространстве, спора может осесть на частицу пыли; увеличив тем самым свою массу и преодолев давление света, она может попасть в окрестности ближайшей звезды и будет захвачена одной из планет этой звезды. Таким образом, живая материя способна

переноситься с планеты на планету, из одной звездной системы в другую. Если предположить, что «прыгуны» (метеориты и кометы) являются осколками планет, то, их органика могла засеять и Землю (рис. 4). Как указывал С. Аррениус, из этой теории, в частности, следует, что все живые существа во Вселенной должны быть химически родственны.

Основные контраргументы этой гипотезы:

1. Любые созданные органические соединения погибают под действием космического излучения.

2. Состав и небольшие размеры родительских метеоритов (углистых хондритов), иллюстрирует путь химического развития, который не мог привести к возникновению и эволюции жизни на этих телах (Cronin et al., 1995). Отсюда следует, что одной из

предпосылок возникновения жизни является дифференцированное строение соответствующего космического тела. Иначе говоря, жизнь могла возникнуть лишь на телах планетарного размера, способных удерживать раздельные атмосферу и гидросферу.

3. Согласно логике катастрофических событий от планеты к планете, должна существовать протопланета, на которой жизнь и зародилась первоначально. Возможно, Земля и отличается от своей дальней родственницы, но это не принципиально.

Таким образом, у нас остается только модель абиогенного возникновения жизни на планетах (естественно там, где существуют приемлемые эколого-биологические факторы), включая и Землю!

Так возникла современная *гипотеза химической эволюции (экзогенная)* жизни, согласно которой живая материя образуется из химических соединений и систем (абиогенез). Она рассматривает химию примитивной Земли, прежде всего химические реакции, протекавшие в атмосфере и в поверхностном слое воды. Здесь, по всей вероятности, концентрировались легкие элементы, составляющие основу живой материи, и поглощалось огромное количество разнообразной энергии: солнечной, тепловой, электрической, динамической и т. п. (рис. 5). На границе море-суша-воздух были созданы благоприятные условия для образования сложных соединений и их последующая эволюция. Многие исследователи пришли к выводу, что зарождение и развитие жизни берет свое начало около прибрежных районов морей и океанов (Иванов и др., 2020). Так каким же образом в ту далекую эпоху могли самопроизвольно возникнуть и сформироваться в живую систему органические соединения?

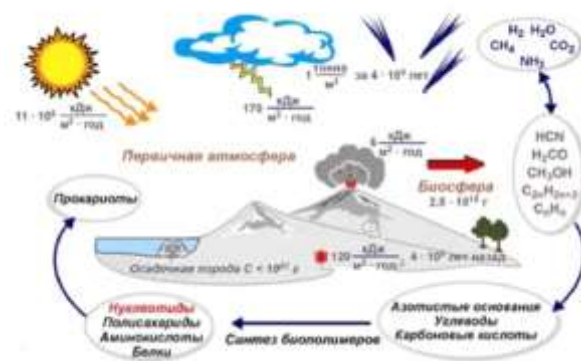


Рис. 5. Химическая эволюция жизни примитивной Земли.

Fig. 5. Chemical evolution of primitive Earth life.

Общий подход к химической эволюции жизни на Земле первым сформулировал советский биохимик А.И. Опарин (1924). Он доказывал, что на примитивной Земле господствовали иные условия: в земной атмосфере того времени отсутствовал кислород, но в изобилии имелись водород и газы, содержащие водород, такие, как метан ( $\text{CH}_4$ ) и аммиак ( $\text{NH}_3$ )<sup>2</sup>. Обосновывая свою идею о восстановительном характере примитивной атмосферы Земли, А.И. Опарин выдвигал следующие аргументы:

1. Водород в изобилии присутствует в звездах (рис. 3 а).

2. Углерод обнаруживается в спектрах комет и холодных звезд в составе радикалов  $\text{CH}$  и  $\text{CN}$ , а окисленный углерод проявляется редко.

3. Углеводороды, т. е. соединения углерода и водорода, встречаются в метеоритах (рис. 4).

4. Атмосферы Юпитера и Сатурна чрезвычайно богаты метаном и аммиаком (рис. 3 б).

<sup>2</sup> Подобную атмосферу, богатую водородом и бедную кислородом, называют восстановительной в отличие от современной, окислительной, атмосферы, богатой кислородом и бедной водородом. Вселенная в

целом находится в восстановительном состоянии. Следовательно, на первобытной Земле углерод и азот должны были находиться в таком же состоянии.

5. В вулканических газах содержится аммиак (рис. 5).

6. Кислород, содержащийся в современной атмосфере, вырабатывается зелеными растениями в процессе фотосинтеза, и, следовательно, по своему происхождению это биологический продукт (возможно не совсем так – прим. Автора, см. ниже).

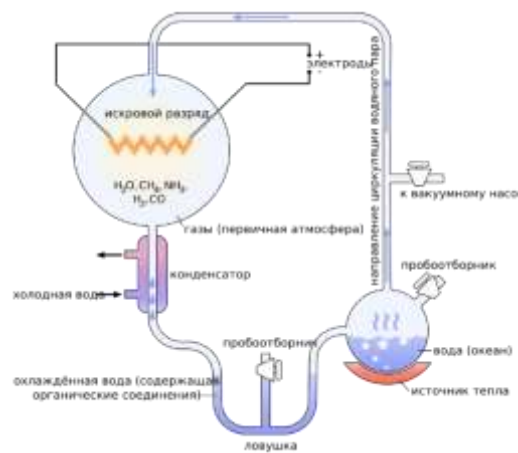
О том, что атмосфера молодой Земли имела восстановленный характер, самостоятельно пришел Нобелевский лауреат Гарольд Юри (1952) занимаясь эволюцией Солнечной системы.

Согласно мнению А.И. Опарина и Г. Юри, такие условия создавали прекрасные возможности для самопроизвольного синтеза органических соединений из простейших неорганических соединений (аммиака, метана, водорода и воды) в условиях первичной анаэробной (свободной от кислорода) атмосферы примитивной Земли. Чтобы «запустить» подобную химическую реакцию потребовались разнообразные источники энергии: электрические разряды (молнии), высокая температура (радиоактивное, космическое и солнечное излучение, извержения вулканов), давление/стресс (удары метеоритов и комет, действия волн прилива), фотосинтез на базе азота и газовой смеси и пр. Всего этого на первобытной Земле хватало в избытке (рис. 5).

Благодаря восстановительному характеру атмосферы древней Земли образовались простые органические соединения: формальдегид, спирты, муравьиная кислота, аминокислоты и т. д. Окисление организовавшихся веществ не происходило, так как отсутствовал свободный кислород. Синтезированные вещества в течение десятков миллионов лет постепенно накапливались в древнем океане, что привело к образованию однородной массы — «первичного бульона». В первичном органическом бульоне молекулы случайно объединялись в цепочки, возникали протобионты — предшественники современных клеток. Некоторые протобионты оказались жизнеспособны и дали начало первым живым организмам.

Гипотеза Опарина-Юри успешна была подтверждена достаточно простым лабораторным экспериментом. Американские учёные Стэнли Миллер и Гарольд Юри (Miller, 1953, Urey, 1953, Miller, Urey, 1959) смоделировали условия древней Земли (рис. 6): пропускали электрические разряды через смесь газов (метан, аммиак, водород и водяной пар), что имитировало удары молний в

атмосфере древней Земли. В течение нескольких дней в системе образовались пять аминокислот и другие органические соединения, которые являются строительными блоками для жизни. Более точный повторный анализ, опубликованный в 2008 году, показал, что эксперимент привёл к образованию 22-х аминокислот. Поскольку гипотеза Опарина-Юри была неоднократно проверена практическими экспериментами, то ее по праву следует относить к естественнонаучной теории, подтверждающей модель зарождения жизни на примитивной Земле в процессе абиогенеза.



**Рис. 6.** Эксперимент Миллера-Юри (1953) считается одним из важнейших опытов в исследовании происхождения жизни на Земле. Аппарат, спроектированный для проведения эксперимента, включал смесь газов, соответствующую представлениям о составе атмосферы ранней Земли в 1950-х, и пропускавшие через неё электрические разряды. На фотографии – молодой сотрудник Университета Чикаго, Стэнли Миллер, проводит свои знаменитые эксперименты по синтезу биологических молекул. 1953

год (архив Химического факультета Калифорнийского университета в Сан-Диего).

**Fig. 6.** The Miller-Urey experiment (1953) is considered one of the most important experiments in the study of the origin of life on Earth. The apparatus designed for the experiment included a mixture of gases that corresponded to ideas about the composition of the atmosphere of the early Earth in the 1950s, and electric discharges passed through it. In the photo – a young employee of the University of Chicago, Stanley Miller, conducts his famous experiments on the synthesis of biological molecules. 1953 (Archive of the Department of Chemistry, University of California, San Diego).

Таким образом, установлена «жесткая» причинно-следственная связь между химией и биологией, что в принципе подтверждает точку зрения Ф. Энгельса (рис. 1). Тогда причем здесь ГФДМ? Неужели ее роль заключается только в предоставлении благоприятных для абиогенеза условий? Однако учитывая, что синтез протобионтов протекал в условиях и пределах поверхности земного шара, то этому явно способствовали не только экзогенные, но и эндогенные геологические процессы (рис. 5), например:

— удары электрических разрядов во время дождей и вулканических извержений в приповерхностной оболочке атмосферы Земли (тропосфере);

— волно-прибойные движения воды в прибрежных условиях (Иванов и др., 2020), в абразивных нишах которых происходил пневматический удар, регулярно перекачивающий многофазную пузырьковую среду энергией, вырабатываемой соединениями органического бульона;

— извержения вулканов явилось важным источником тепловой энергии и поставщиком азота из недр Земли (см. выше) и пр.

На первый взгляд может создаться ощущение о достаточно пассивном участии планеты Земля к процессам абиогенеза. Но это далеко

не все видимые человеком благоприятные для возникновения жизни геологические предпосылки, которые создает Земля. Здесь как нельзя лучше подходит известный афоризм Козьмы Пруtkова – «Зри в корень», а в нашем случае – в глубь Земли.

В *эндогенной гипотезе* зарождение жизни основывается на гидродинамической теории геодинамической эволюции Земли (теория мантийных плюмов (ТМП)), которая рассматривает термохимические реакции на границе ядро-мантия и создание плюмов – подъём тепла и вещества из глубинных зон Земли в виде локальных струй (лифтов), доставляющих «ценный груз» (полезные ископаемые) от ядра планеты к поверхности (Аглонов, 2001, Ernst, Buchan, 2001; Добрецов, 2001; 2011; Добрецов и др., 2011; Хаин, 2003 и др.).

Важную роль в развитии ТМП играют динамические физико-геологические модели (ФГМ)<sup>3</sup> (Вахромеев, Давыденко, 1987). Например, траектории кажущихся миграции палеомагнитных полюсов континентов является динамическими ФГМ (каждому геологическому периоду соответствуют определенные координаты палеомагнитных полюсов относительно географического положения платформ), являющейся следствием их перемещения по поверхности Земли. Динамические ФГМ лежат в основе разных частных научных теорий, составляющих ТМП: дрейф континентов, разрастание океанического дна, тектоника литосферы и др. (рис. 7). Благодаря динамическим ФГМ можно прогнозировать размещение месторождений полезных ископаемых (ретроспективный анализ), землетрясения, экологические катастрофы и т. п. Не исключено, что в перспективе становление ТМП на основе физико-химических опытов и моделирования глубинных процессов прольет свет и на возникновение жизни на Земле.

<sup>3</sup> Динамические ФГМ направлены на установление зависимостей между физическими полями и протекающими геологическими процессами во времени.



**Рис. 7.** Некоторые факты частных естественно-научных теорий, лежащие в основе теории мантийных плюмов по (Константинов, 1998) с изменениями.

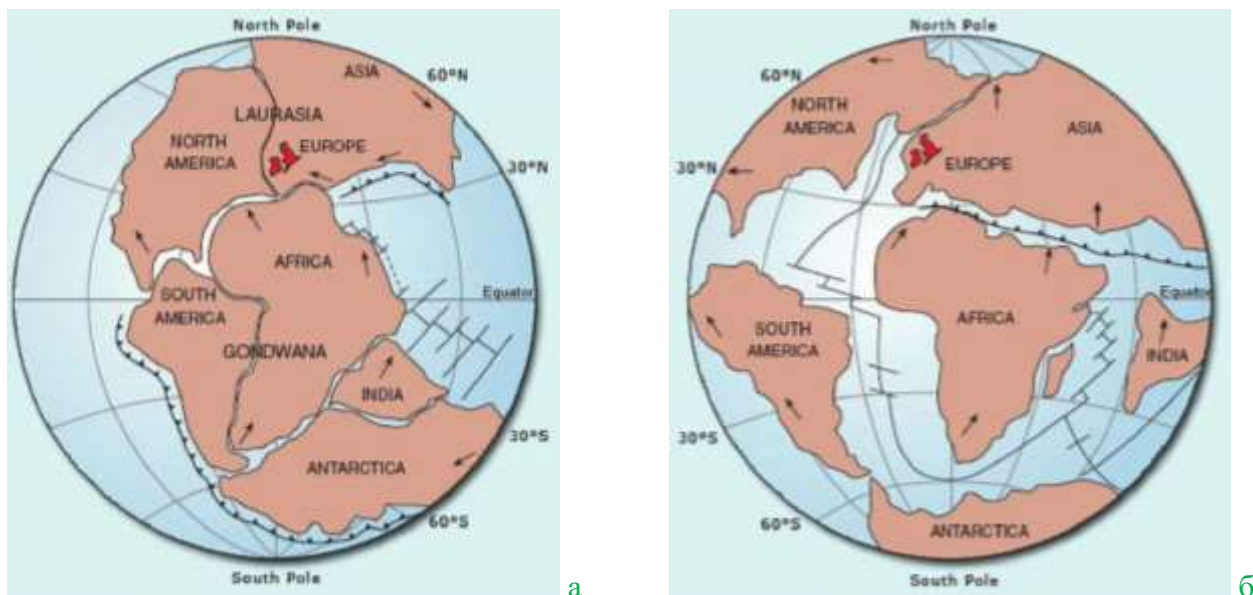
**Fig. 7.** Some facts of private natural-scientific theories underlying the theory of mantle plumes according to (Konstantinov, 1998) with changes.

Основы ТМП заложил Альфред Вегенер (1984) – немецкий метеоролог и геолог в 1912 году сформулировал первую научную теорию медленного **дрейфа континентов** (рис. 8). Он указал не только на совпадения очертаний материков (ранее на это многие обращали внимание), но, что особенно важно, и на многочисленные сходства в геологическом строении континентов, на общность ископаемой флоры и фауны в геологическом

прошлом, схожесть климатических условий в отдаленных эпохах и пр. аргументы (рис. 7). Основным недостатком его гипотезы было то, что она не смогла объяснить причину движения материков (механизм дрейфа). Движущей силой приводящей дрейф континентов он считал т. н. полюсобежную (*polfluchtkraft*)<sup>4</sup>, но в таком случае континенты постоянно находились бы в полярных областях.

4 Полусобежная сила – эта сила следует из разности величин центробежной силы, действующей на массы, центр тяжести которых лежит на различном

уровне, и обусловленной вращением Земли вокруг своей оси.



**Рис. 8.** Дрейф континентов и распад Пангеи: а – ранняя юра ( $\approx 195$  млн лет), б – поздний мел ( $\approx 65$  млн лет) по (Scotese, Langford, 1995).

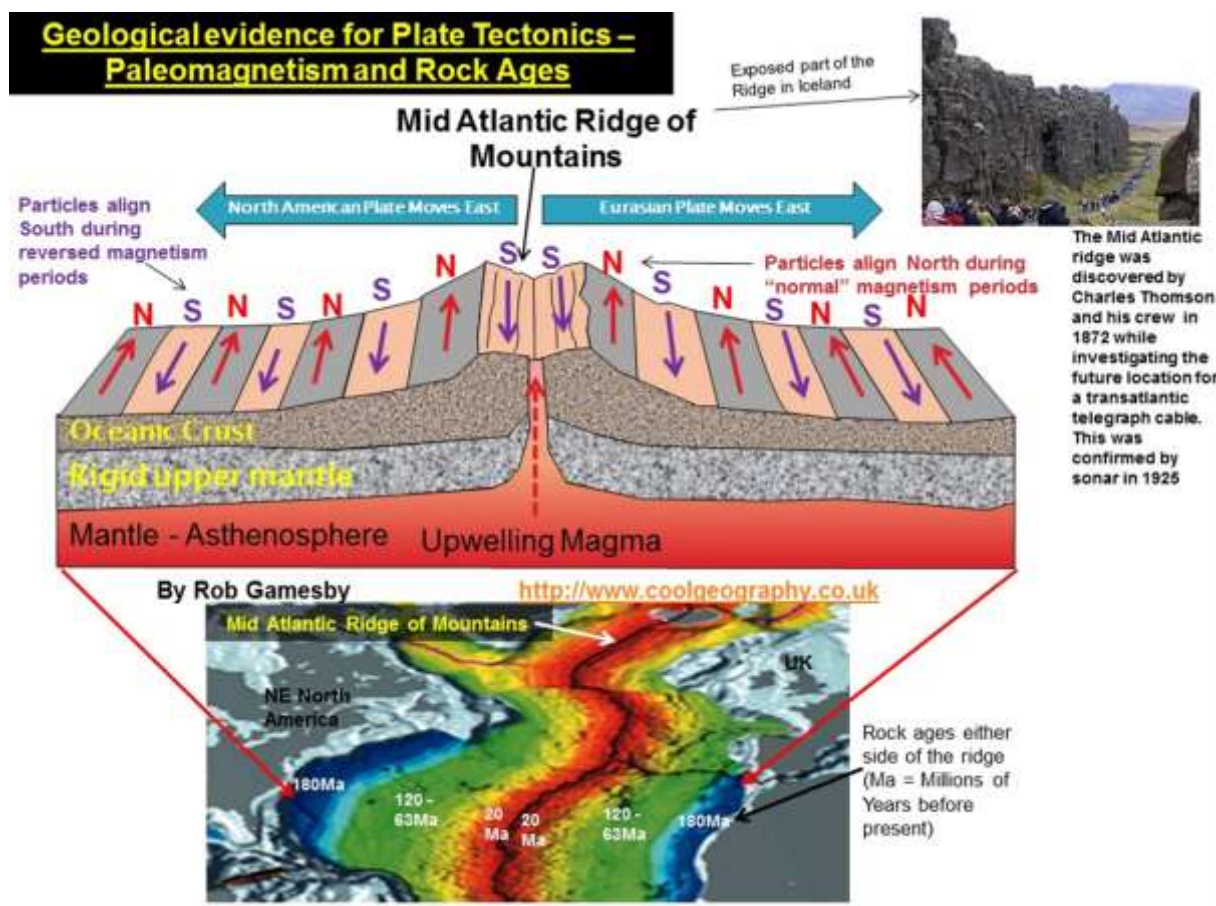
**Fig. 8.** Continental drift and decay of Pangaea: а – Early Jurassic ( $\approx 195$  Ma), б – Late Cretaceous ( $\approx 65$  Ma) according to (Scotese, Langford, 1995).

После второй мировой войны развернулись широкомасштабные исследования Мирового океана, которые послужили толчком создания **теории литосферных плит** (ТЛП). Построенная карта рельефа дна Мирового океана с данными абсолютного датирования базальтов океанической коры позволила Р. Дицу (Dietz, 1961), Г. Хессу (Hess, 1962) и Джону Вильсону (Wilson, 1963) в начале 60-х годов прошлого века выдвинуть гипотезу спрединга (разрастание океанического дна), которая в последствие была подтверждена и открытием полосовых магнитных аномалий океанического дна Ф. Вайном и Д. Мэттьюзом (Vine, Matthews, 1963) (рис. 9). Огромный вклад в ТЛП внесли палеомагнитные, – климатические и – ботанические реконструкции

(Scotese, McKerrow, 1990; Scotese, 1998; Torsvik, Cocks, 2016). Позднее тектоника плит подтверждена прямыми измерениями скорости плит методом РИСДБ<sup>5</sup> (Джордан, Минстер, 1988). Результаты многолетних геолого-геофизических исследований полностью подтвердили основные положения ТЛП (рис. 7). Таким образом, она ответила на вопрос о механизмах дрейфа континентов за счет конвективных течений (ячеек) в мантии Земли. Согласно концепции ТЛП, океанические бассейны структуры непостоянные (их возраст за счет субдукции слеба не превышает 180 млн лет), неустойчивые, а континенты – устойчивые (Кокс, Харт, 1989). Ну что же тогда служит источником энергии для движения тектоносферы?

<sup>5</sup> Метод РИСДБ – метод радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой основан на приеме радиотелескопами высокочастотного «шума», излучаемого множеством внегалактических радиоисточников (квазары).

Разность времен прихода сигналов позволяет вычислять расстояние между станциями с точностью до сантиметра.

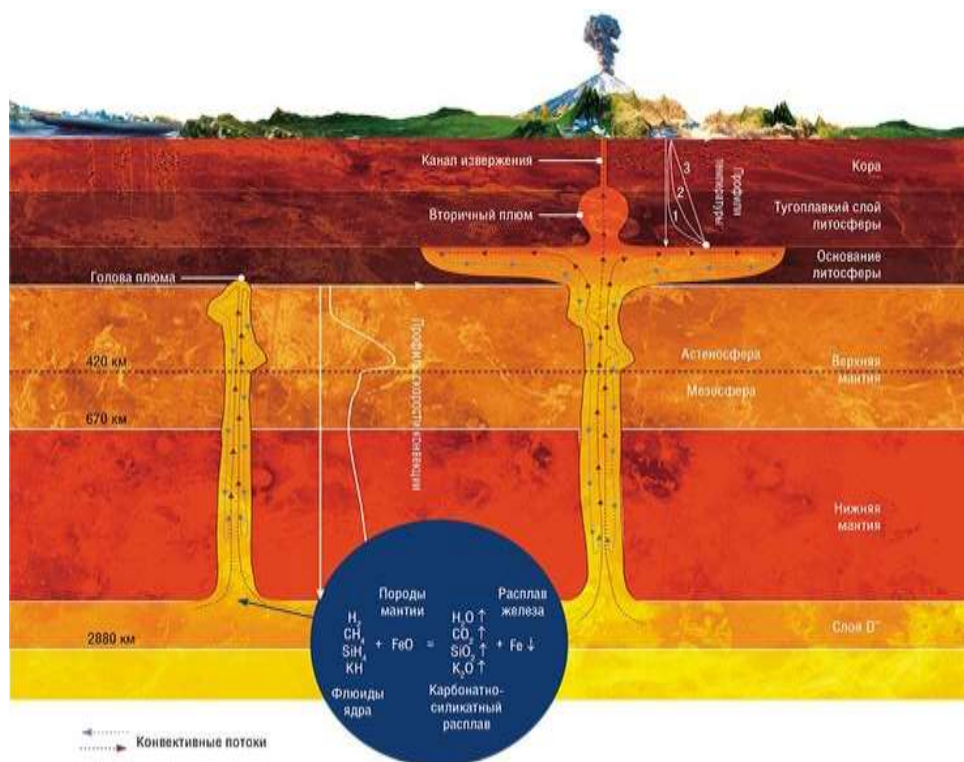


**Рис. 9.** Динамическая физико-геологическая модель разрастания океанического дна (синий/красный цвет соответствует старой/молодой коре) по (Dietz, 1961; Hess, 1962; Vine, Matthews, 1963).

**Fig. 9.** Dynamic physical and geological model of ocean floor overgrowth (blue/red color corresponds to old/young crust) according to (Dietz, 1961; Hess, 1962; Vine, Matthews, 1963).

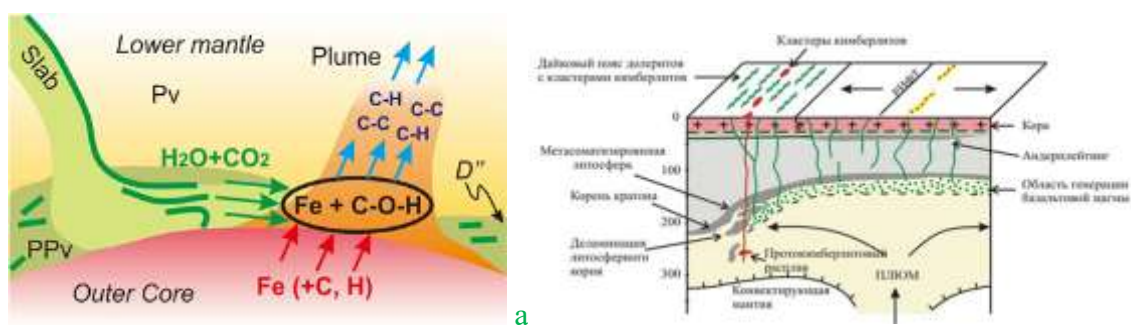
Согласно современной концепции развития Земли ТМП, источником энергии служит внешнее жидкое ядро, которое в области локального поступления химической добавки имеет большую температуру, чем температура плавления мантии (Аплонов, 2001, Добрецов, 2001; 2011; Добрецов и др., 2011; Хаин, 2003, Zhao, 2004; Жао и др., 2010; Летников, 2006; Belonoshko et al., 2015; Владыкин, 2016 и др.) (рис. 10, 11 а). Источником химической добавки, понижающей температуру плавления, могут быть реакции железосодержащих минералов нижней мантии (перовскита, магнезиовюститита) с водородом и/или метаном, выделяющимися на границе ядро-мантия (слой D" – пограничный слой высотой 10–20 км, выделяемый геофизиками

(Maupin, 2004)). При окислении водородных и углеродных соединений, выделяющихся из металлического ядра, образующиеся газообразные оксиды ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) формируют восходящий поток вместе с водородом и продуктами реакции ( $\text{CH}_4$  и др.). Из смеси воды и углекислоты или просто набора углерод-кислород-водород (C-O-H) в результате термобарохимической реакции происходило образование органических соединений углеводородов. Из последних, в ходе эволюции химии углерода, могли сформироваться аминокислоты, живые клетки, водоросли, бактерии и далее от низшего к высшему (Miller, Urey, 1959). Восстановленное до металлического состояния железо стекает в жидкое внешнее ядро, увеличивая его в размерах.



**Рис. 10.** Рождение и развитие мантийного плюма в направлении поверхности планеты обусловлено не столько тепловой конвекцией, сколько термохимическими реакциями во флюидной смеси, продукты которых являются более легкоплавкими, чем породы мантии по (Добрецов, 2008). Рассчитанные профили температуры демонстрируют динамику прогрева коры во времени.

**Fig. 10.** The birth and development of the mantle plume in the direction of the planet's surface is caused not so much by thermal convection as by thermochemical reactions in the fluid mixture, the products of which are more fusible than the rocks of the mantle according to (Dobretsov, 2008). The calculated temperature profiles demonstrate the dynamics of crustal warming over time.



**Рис. 11.** Мантийный плюм и связанные с ним процессы. а – образование ненасыщенных углеводородов, обозначенных как связи С-С и С-Н, на границе ядро-мантия (слой D'') посредством реакции С-О-Н несущей жидкости/расплава из субдущированного слэба с Fe из внешнего ядра по (Belonoshko et al., 2015). Альтернативным источником С и Н служит само металлическое ядро. Зеленые ломтики представляют собой бывшую океаническую кору. Pv – перовскит, PPv – постперовскит-поверхностный слой в более холодных зонах CMB Core–MantleBoundary (CMB), (2700–2900 км) – граница ядра и мантии. б – геодинамическая модель плюм-литосферного взаимодействия в области Вилуйского авлакогена по (Киселев и др., 2013). Достигая основания литосферы, плюмы образуют астеносферные линзы, над которыми формируются тектоно-магматические структурные ассоциации, в т. ч. кластеры кимберлитов, базитов и пр.

**Fig. 11.** Mantle plume and related processes. а – formation of unsaturated hydrocarbons, designated as C-C and C-H bonds, at the core-mantle interface (layer D'') through the reaction of the C-O-H carrier

liquid/melt from a subducted slab with Fe from the outer core according to (Belonoshko et al., 2015). An alternative source of C and H is the metal core itself. Green slices represent former oceanic crust. Pv – perovskite, PPv – post-perovskite-surface layer in colder zones CMB Core-Mantle Boundary (CMB), (2700-2900 km) – core-mantle boundary. 6 – geodynamic model of plume-lithospheric interaction in the Vilyui aulacogen region according to (Kiselev et al., 2013). Reaching the base of the lithosphere, plumes form asthenospheric lenses over which tectonic-magmatic structural associations are formed, including clusters of kimberlites, basites, etc.

Восстановленное до металлического состояния железо стекает в жидкое внешнее ядро, увеличивая его в размерах (Галимов, 2010). Благодаря дифференциации по сечению внешнего жидкого ядра должен проявиться процесс расслоения вязкого вещества внешнего ядра на зоны с разной плотностью, температурой, давлением и вязкостью (Летников, 2006). В итоге, в сечении внешнего ядра образуется огромное число полос расплава с разными физико-химическими свойствами (рис. 12 в). Трение маловязкого вещества на границах внешнее ядро-мантия и внешнее ядро – внутреннее ядро и полос с разной вязкостью друг о друга внутри объема внешнего ядра будут в итоге приводить к выделению огромного количества тепла. Кроме того, не исключено возникновение электрических зарядов основанных на эффекте трибоэлектричества<sup>6</sup> (Лёб, 1963) или по принципу работы генератора Ван де Граафа<sup>7</sup> (Ван де Грааф и др., 1933).

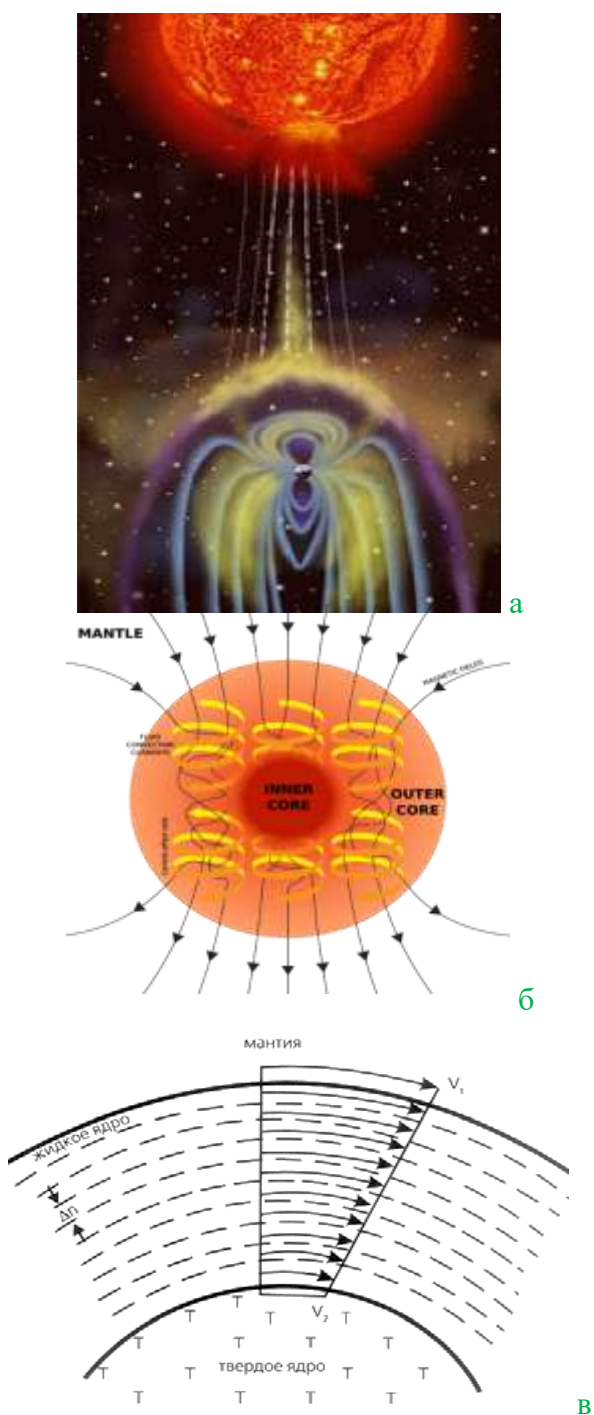
Таким образом, можно предположить, что магнитное поле Земли (рис. 12) возникает за счет движения электрических зарядов в жидком внешнем ядре (Kono, Roberts 2002; Jones, 2011; Roberts, King, 2013), состоящем в основном из железа при температуре порядка 4–6 тысяч кельвин, которое отлично проводит ток, создаются конвективные потоки

(термохимическая конвекция), отводящие от твёрдого внутреннего ядра тепло (генерируемое благодаря распаду радиоактивных элементов либо освобождению скрытой теплоты при затвердевании вещества на границе между внутренним и внешним ядром по мере постепенного остывания планеты). Силы Кориолиса закручивают эти потоки в характерные спирали, образующие так называемые столбы Тейлора (рис. 12 б). Благодаря трению слоёв они приобретают электрический заряд, формируя контурные токи. Таким образом, создаётся система токов, циркулирующих по проводящему контуру в движущихся в (изначально присутствующем, пусть и очень слабом) магнитном поле проводниках, как в диске Фарадея. Она создает магнитное поле, которое при благоприятной геометрии течений усиливает начальное поле, а это, в свою очередь, усиливает ток, и процесс усиления продолжается до тех пор, пока растущие с увеличением тока потери на джоулево тепло не уравновесят притоки энергии, поступающей за счет гидродинамических движений.

<sup>6</sup> Явление возникновения электрических зарядов при трении называется трибоэлектричеством (от греч. *tribos* — «трение»). Это тип контактной электризации, в которой некоторые материалы становятся электрически заряженными после того, как входят в фрикционный контакт с другим материалом. Ранние эксперименты с электричеством эпохи античности, такие, как опыты Фалеса с янтарными палочками, были связаны с трибоэлектрическим эффектом. Трибоэлектричество наблюдается при взаимном трении двух диэлектриков, полупроводников или металлов различного химического состава или одинакового состава, но разной плотности и пр. Существенную роль может играть также разное нагревание тел при трении, что вызывает переход носителей тока с локальных неоднородностей более нагретой поверхности («истинное»

трибоэлектричество). Степень электризации трущихся друг о друга тел тем значительнее, чем обширнее площади их поверхностей.

<sup>7</sup> Генератор Ван де Граафа — электростатический генератор высокого напряжения, принцип действия которого основан на электризации движущейся диэлектрической ленты. Первый генератор был разработан американским физиком Робертом Ван де Граафом в 1929 году и позволял получать разность потенциалов до 80 киловольт. В 1931 и 1933 годах им же были построены более мощные генераторы, позволившие достичь напряжения в 1 миллион и 7 миллионов вольт соответственно. Разность потенциалов, достигаемая современными генераторами Ван де Граафа, может достигать 25 МВ.

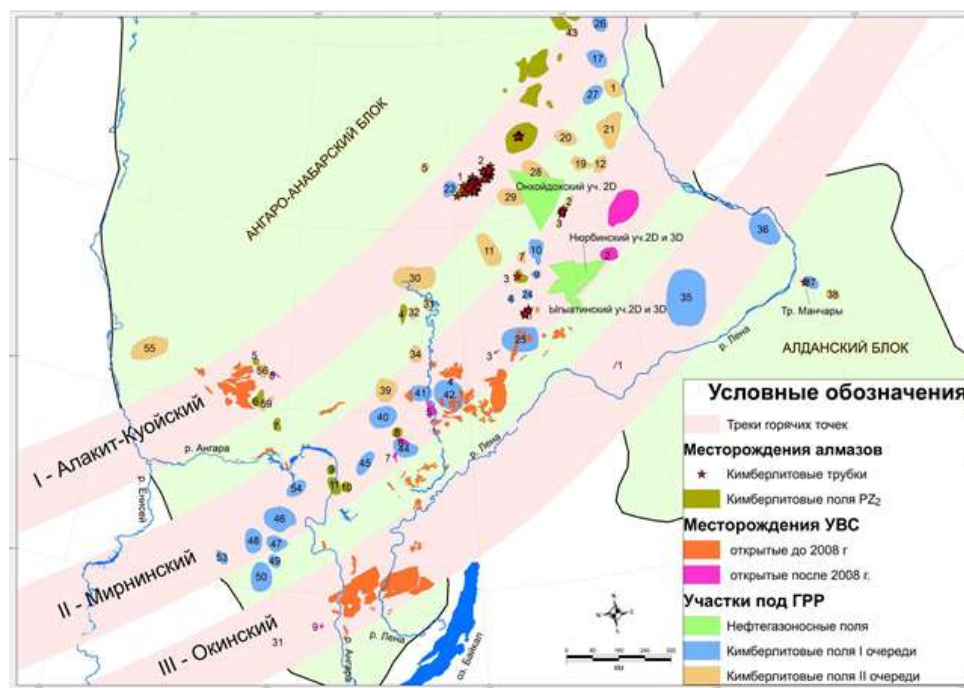


**Рис. 12.** Магнитное поле Земли – щит, оберегающий нашу планету и все живое на ней

от воздействия солнечного ветра и космических лучей. а – обтекание магнитосферы Земли солнечным ветром [https://myslide.ru/documents\\_7/fe35316e36b577001a919665b1a03ce8/img13.jpg](https://myslide.ru/documents_7/fe35316e36b577001a919665b1a03ce8/img13.jpg); б – генерируется действием геодинамо в ядре Земли (Джинлоз, 1983); в – схема генерации теплоты трения в жидком ядре Земли (Летников, 2006).

**Fig. 12.** The Earth's magnetic field is a shield that protects our planet and all life on it from the effects of the solar wind and cosmic rays. а – flowing around the Earth's magnetosphere by the solar wind [https://myslide.ru/documents\\_7/fe35316e36b577001a919665b1a03ce8/img13.jpg](https://myslide.ru/documents_7/fe35316e36b577001a919665b1a03ce8/img13.jpg); б – generated by the action of geodynamo in the core of the Earth (Jinloz, 1983); в – scheme for generating friction heat in the liquid core of the Earth (Letnikov, 2006).

Фактически плюмы (горячие точки) выполняют функцию транспортеров (лифтов) мантийного вещества (например, ненасыщенных углеводородов) на поверхность Земли. Когда голова плюма достигает тугоплавкого слоя литосферы, плюм растекается по его подошве (рис. 10, 11 б). Над плюмовым каналом при этом начинает формироваться вторичный плюм. Растущие термические напряжения приводят к образованию трещин в коре (рифты, зоны повышенной проницаемости), через которые спустя 7 – 12 млн лет происходит массовое извержение магмы на поверхность с формированием разных типов месторождений полезных ископаемых (Wilson, 1963; Ernst, Buchan, 1997; Кузьмин и др., 2000; Летников, 2001; 2011; Борисенко и др., 2006; Соболев и др., 2010; Зоненшайн и др., 1990; Добрецов и др., 2011; Kuzmin et al., 2010; Кузьмин, Ярмолук, 2014; Киселев и др., 2006; 2014; 2016; Владыкин, 2016).



**Рис. 13.** Схема размещения известных месторождений углеводородов и предполагаемых районов ультраосновного магматизма (кимберлитовые поля) юга Сибирской платформы, построенная с позиции гипотезы горячих точек согласно динамической ФГМ по (Zhitkov, 1995; Константинов и др., 2020). Известные кимберлитовые поля: 1 – Алаakit-Мархинское, 2 – Далдынское, 3 – Сюльдюкарское, 4 – Нижнекогемское, 5 – Тычанское, 6 – Тайгикуно-Нембинское, 7 – Чадобецкое, 8 – Икское, 9 – Тушамское, 10 – Тубинское, 11 – Илимское. Прогнозируемые кимберлитовые поля: 4 – Курунг-Юряхское, 9 – Утунинское, 10 – Ыгыатинское, 15 – Булкурское, 17 – Сюнгюдинское, 23 – Аллара-Дэлингдинское, 24 – Бахчинское, 25 – Тас-Юряхское, 26 – Муогданское, 27 – Оттохское, 31 – Ингашинское, 35 – Марха-Ленское, 36 – Кенгкеминское, 37 – Хомпу-Майское, 40 – Немуйское, 41 – Ереминское, 42 – Верхнечонское, 44 – Ченгильское, 45 – Верхнекатангское, 46 – Седаново-Ковинское, 47 – Чукшинское, 48 – Бирюсино-Чунское, 49 – Андочинское, 50 – Тайгуй-Удинское, 53 – Туманшетское, 54 – Магдомское. Месторождения УВС недавно открытые: 1 – Бысахтахское, 2 – Нижнетюкянское, 3 – Илгычахское, 4 – Северо-Вакунайское, 5 – Им. Н. Лисовского, 6 – Гораздинское, 7 – Вятшинское, 8 – Шушукское, 9 – Саянское. Материалы получены из фондов Амакинской ГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО), Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского и Обзорной карты Восточной Сибири (Центральная часть Лено-Тунгусской нефтегазовой провинции) путем совмещения данных.

**Fig. 13.** The layout of known hydrocarbon deposits and proposed areas of ultramafic magmatism (kimberlite fields) in the south of the Siberian platform, constructed from the position of the hot spot hypothesis according to the dynamic PhGM (Zhitkov, 1995; Konstantinov et al., 2020). Famous kimberlite fields: 1 – Alakit-Markhinsko, 2 – Daldynskoye, 3 – Syuldyukarskoye, 4 – Nizhnkogemskoye, 5 – Tychanskoye, 6 – Taigikuno-Nembinskoye, 7 – Chadobetskoye, 8 – Ikskoye, 9 – Tushamskoye, 10 – Tubamskoye Inskoe, 11 – Ilim. Predicted kimberlite fields: 4 – Kurung-Yuryakhskoye, 9 – Utuninskoye, 10 – Ygyatinskoye, 15 – Bulkurskoye, 17 – Syungyudinskoye, 23 – Allara-Delingdinskoye, 24 – Bakhchinskoye, 25 – Tas-Yuryakhskoye, 26 – Muogdanskoye, 27 – Ottokhskoye, 31 – Ingashinskoye, 35 – Markha-Lenskoye, 36 – Kengkeminskoye, 37 – Khompu-Mayskoye, 40 – Nemuiskoye, 41 – Yereminskoye, 42 – Verkhnechonskoye, 44 – Chengilskoye, 45 – Verkhnekatangskoye, 46 – Sedanovo-Kovinskoye, 47 – Chukshinskoye, 48 – Biryusino-Chunskoye, 49 – Andochinskoye, 50 – Taigui-Udinskoye, 53 – Tumanshetskoye, 54 – Magdomskoye. Recently discovered hydrocarbon deposits: 1 – Bysakhtakhskoye, 2 – Nizhnetyukyanskoye, 3 – Ilgychakhskoye, 4 – Severo-Vakunayskoye, 5 – Im. N. Lisovsky, 6 – Gorazdinskoye, 7 – Vyatshinskoye, 8 – Shushukskoye, 9 – Sayanskoye. The materials were obtained from the funds of the Amakinskaya GRE of AK ALROSA (PJSC), the All-Russian

Research Geological Institute named after A.P. Karpinsky and the Overview Map of Eastern Siberia  
(Central part of the Leno-Tunguska oil and gas province) by combining data.

Учитывая, что распространение магматических тел и в целом проявления магматических процессов в земной коре связаны с зонами повышенной проницаемости, то нет ничего удивительного, что они также будут контролировать размещение углеводородного сырья в благоприятных структурных зонах. Например, на основе динамической ФГМ плюм-литосферного взаимодействия (рис. 10, 11) можно спрогнозировать местоположение районов кимберлитового магматизма и углеводородов в пределах рассчитанных треков (Алакит-Куойский, Мирнинский и Окинский) на юге Сибирской платформы (рис. 13) (Zhitkov, 1995; Константинов и др., 2020). Возможно, треки горячих точек являются рудораспределяющими. В этом случае, предложенная региональная динамическая ФГМ может свидетельствовать о неорганическом образовании (абиогенный синтез) углеводородов. Следовательно, между месторождениями алмазов и углеводородов должна существовать не только парастерическая<sup>8</sup>, но и генетическая связь.

Таким образом, ТМП на основе заложенных в ней динамических ФГМ объясняет достаточно широкий спектр геологических процессов (рис. 7). Но если она действительно претендует на роль фундаментальной теории, то способна ли так же объяснить развитие живых организмов? Только на этом основании ГФДМ может иметь право занимать ключевое место в диалектике познания природы и общества (рис. 1).

### Обсуждение материалов

Может ли возникнуть жизнь, минуя ГФДМ? Если нет, то ГФДМ является важным звеном в общей схеме движения материи (рис. 1) и, тем самым, имеет законное право занимать место между химической и биологической формами движения материи.

Здесь возникает дилемма. С одной стороны, практика доказала абиогенное зарождение жизни из простых химических элементов – эксперимент Миллера-Юри (рис. 6). Тогда главная цель Земли (Геи) – поддерживать условия, необходимые для сохранения и развития жизни. И с этим она пока благополучно справляется, не смотря на разрушительную

деятельность Человека в границах формирования ноосферы. То есть, ни о какой унитарной ГФДМ речь идти, в данной ситуации, не может.

С другой стороны, Земля – как и жизнь, то же конечный продукт химической ФДМ, но жизнь появилась на ней позже. Поэтому роль геологических процессов и, следовательно, ГФДМ должна быть определяющей в формировании и развитии жизни на Земле. Для того, чтобы раскрыть закономерности возникновения биологического уровня организации материи необходимо более широкое понимание причинно-следственной связи геологических событий с начала формирования Земли, благоприятных для саморождения жизни. Для этого необходимо построить сценарий событий хотя бы основных факторов, повлиявших на абиогенный процесс.

И так, мы знаем, что для возникновения жизни, согласно теории Опарина-Юри, на поверхности примитивной Земли существовали восстановительные условия (рис. 5), которые, согласно эксперименту Миллера-Юри (рис. 6), способствовали синтезу высокомолекулярных органических соединений в результате воздействия разного вида внешних (космических) и внутренних (земных) энергий: электрических, тепловых, динамических и пр. Последние, естественно, генерируются собственно оболочками Земли – тектоносферой (вулканы, землетрясения), гидросферой (волно-прибойные движения) и атмосферой (молнии). В такой обстановке мог появиться первичный бульон из органической материи, но развитие жизни на этом бы и застопорилось, поскольку для этого процесса должны были возникнуть и существовать необходимые условия.

Прежде всего, для защиты новообразованных биополимеров и их потомков от губительного воздействия космического излучения, особенно от солнечного ветра – потока заряженных частиц (в основном протонов и электронов), которые постоянно излучаются Солнцем должен быть «ангел хранитель», роль которого выполняет магнитное (геомагнитное) поле Земли (рис. 12 а). Без этого защитного слоя (магнитосфера) Земля была бы подвержена постоянной атаке радиации, что сделало бы жизнь на планете практически

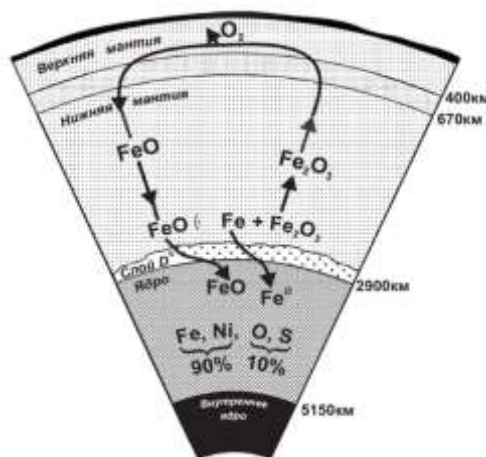
<sup>8</sup> Парастерическая связь – совмещенные в пространстве и синхронные по времени становления, разные по генезису геологические объекты.

невозможной. А магнитное поле генерируется в ядре планеты (рис. 12 б). Получается, что Земля как бы сознательно создала такой щит для возникновения и дальнейшего существования всего живого.

Другим из основных условий развития первобытной жизни является смена обстановок из восстановительной в окислительную. А кислород, по мнению А.И. Опарина мог появиться только благодаря растениям (см. выше, п. 6). В первые сотни миллионов лет на примитивной Земле восстановительная обстановка существовала и создала благоприятные условия для возникновения жизни (Опарин, 1924; Miller, 1953, Urey, 1953, Miller, Urey, 1959). Детальный анализ развития биосферы Земли, который провел П. Клауд (1983а; 1983 б), показал, что биологические процессы в водной среде начались ~3.8 млрд. лет назад, когда в атмосфере кислород отсутствовал. В такой ситуации не было наземных растений, жизнь зарождалась только в водной среде. Рубеж около 400 млн лет знаменовался необъяснимо стремительным ростом содержания  $O_2$  в атмосфере, отвечающего современному, что привело к появлению первых наземных растений, которые начали выделять биогенный кислород. Подобное обстоятельство заставляет рассмотреть проблему альтернативных небιοгенных источников кислорода в формировании кислородной атмосферы Земли (Летников, 2006).

Согласно гипотезе (Летников, Сизых, 2002), основанной на данных газовых хроматографических анализов горных пород и петрологогеохимических моделей формирования оболочек Земли, формирования кислородной атмосферы произошло в процессе длительного общепланетарного проявления процессов гранитизации по породам базит-гипербазитового состава протокоры.

По мнению (Galimov, 2006), формирование окислительной обстановки так же может быть так же связана с окислительной эволюцией мантии за счет медленного наращивания ядра Земли в процессе диспропорционирования  $FeO$ , содержащегося в силикатной мантии, на металлическое железо, присоединяющееся к ядру, и окисное железо, остающееся в мантии, что привело к накачке кислорода в мантию (рис. 10, 11 а, 14). На 90–95 % ядро сформировалось в первые 100 млн лет, а оставшаяся часть могла наращиваться в течение всей геологической истории, генерируя тем самым геомагнитное поле (рис. 12). Дальнейшее наращивание ядра, сопровождающееся окислением мантии, привело к замене первичного восстановленного режима на более окисленный (нейтральный) на рубеже 4 млрд лет назад. Но к этому времени предбиологический этап уже был завершен, и жизнь приобрела способность к адаптации к внешним условиям.



**Рис. 14.** Схема окисления первоначально восстановленной мантии за счет постепенного наращивания ядра (Галимов, 2010).

**Fig. 14.** The oxidation scheme of the originally restored mantle due to the gradual expansion of the core (Galimov, 2010).

Независимо от приведенных воззрений разных исследователей, очевидно, что атмосферы кислородного типа могут возникать лишь на планетах земного типа (Летников, 2006; Галимов, 2010; Cronin et al., 1995).

Таким образом, ГФДМ носителем которой служат оболочки Земли в целом (от ядра до магнитосферы), не только являлась поставщиком элементарных химических элементов из недр Земли (рис. 10, 11, 14), необходимых для синтеза из них органических соединений, но и источником разного вида энергий. В чреве Земли генерировалась магнитное поле (рис. 12), обеспечивающее надежную защиту от воздействия вредоносных космических излучений для совершенствования живых организмов.

### Заключение

Геология по своей природе и основным параметрам выходит за пределы химической формы движения материи и является материальным основанием новой формы движения материи – геологической. ГФДМ не тупиковая ветвь развития неорганической химии (рис. 2), а самая что не наесть важное звено в диалектики познания природы и общества (рис. 1).

ГФДМ, очерченная в ТМП («кругооборот горных пород в природе»), *создала не только условия, но и предпосылки для формирования первобытной жизни* (рис. 7). Она представляет собой этап качественного перехода от неживой к живой материи. Поэтому ГФДМ на полном основании можно считать особой и самостоятельной формой движения материи в иерархической последовательности Б.М. Кедрова (рис. 1).

Эндогенный и экзогенный абиогенные процессы формирования живых организмов на Земле не исключают инопланетную миграцию (панспермия) широкого спектра органических соединений, имеющих предбиологическое значение (поскольку процессы на Земле также возможно свойственны и другим планетам) и его последующую ассимиляцию с «аборигенами».

Ранее, независимо от наших рассуждений – о тесной связи геологии и жизни, к такому же выводу благодаря своей интуиции пришел и гениальный поэт современности Роберт Рождественский:

Мы – дети Галактики,  
Но самое главное, –  
Мы дети твои, дорогая Земля!

Поэтому Человек должен относиться к ней как к своей матери, особенно в поиске путей

восстановления ее экологического баланса. Решение же проблемы ГФДМ раскрывает место и роль геологических знаний в общей картине природы и, несомненно, будет способствовать положительному решению экологических задач на планете Земля.

### Литература

Аплонов С.В. Геодинамика: Учебник. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2001. 360 с.

Большая Российская энциклопедия. В 35 т. Т. 23. Николай Кузанский – Океан. БРЭ, 2004. 765 с.

Борисенко А.С., Сотников В.И., Изох А.Э., Поляков Г.В., Оболенский А.А. Пермотриасовое оруденение Азии и его связь с проявлением плюмового магматизма // Геол. и геофиз. 2006. Т. 47, № 1. С. 166–182.

Ван де Грааф Р.Дж., Комптон К.Т., Ван Атта Л.К. (февраль 1933 г.). «Электростатическое получение высокого напряжения для ядерных исследований». Physical Review. 43 (3): 149–157. Bibcode:1933PhRv.43.149V. doi:10.1103/PhysRev.43.149

Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике. М.: Недра, 1987. 194 с.

Вегенер А. Происхождение материков и океанов. Л.: Наука, 1984. 277 с.

Владыкин Н.В. Модель зарождения и кристаллизации ультраосновных-щелочных карбонатитовых магм Сибирского региона, проблемы их рудоносности, мантийные источники и связь с плюмовым процессом. Геология и геофизика, 2016, т. 57, № 5. С. 889–905.

Галимов Э.М. Условия зарождения жизни на Земле. Биосфера, 2010. Т. 1. С. 39–47.

Горшков Г.П. Земная кора и ее движения / О-во «Знание» РСФСР. Москва: Б. и., 1970. 32 с. ил.; 20. – (В помощь лектору).

Джинлоз Р. Земное ядро. В мире науки, 1983, № 11. С. 16–27.

Дхордан Т.Х., Минстер Д.Б. Измерение деформаций земной коры на западе США. В мире науки, 1988, № 10. С. 24–33.

Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. 2-е изд., доп. и перераб. Новосибирск: Изд-во СО РАН. Фил. «Гео», 2001. 409 с.

Добрецов Н.Л. Геологические следствия термохимической модели плюмов. Геология и геофизика, 2008, т. 49 (7). С. 587–604.

Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э. Термохимические глубинные мантийные плюмы – источник рудного богатства планеты. Наука из первых рук, 2011, т. 42, № 6. С. 36–43

Добрецов Н. Л. Основы тектоники и геодинамики: Учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2011.

Жао Д., Пирайно Ф., Лиу Л. Структура и динамика мантии под Восточной Россией и прилегающими

регионами. Геология и геофизика, 2010, № 9. С. 1188–1203.

Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР: В 2 кн. М.: Недра, 1990.

Зубков И.Ф. Геологическая форма движения материи. Методологические вопросы геологических наук. Киев: Наукова думка, 1974.

Зубков И.Ф. Проблема геологической формы движения материи. М.: Наука. 1979. 240 с.

Иванов А.А., Севастьянов В.С., Шныкин Б.А., Долгонос А.А., Кривенко А.П., Приймак С.В., Галимов Э.М. Оценка эффективности различных источников энергии стадии образования предбиологических структур при абиогенезе. Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии. Материалы семинара. Москва, 2020. С. 239–241.

Кедров Б.М. О соотношении форм движения материи в природе. Философские проблемы современного естествознания. Вопросы философии, N 4, 1959. С. 44–56.

Кедров Б.М. Предмет и взаимосвязь естественных наук. М.: Издательство Академии Наук СССР, 1962. 411 с.

Кедров Б.М. Энгельс и Ленин о геологии. Теоретические и методологические вопросы нефти и газа. Новосибирск: Наука, 1981. Вып. 512. С. 15–20.

Киселев А.И., Ярмолук В.В., Егоров К.Н., Чернышов Р.А., Никифоров А.В. Среднепалеозойский базитовый магматизм северо-западной части Вилуйского рифта: состав, источники, геодинамика // Петрология. 2006. Т. 14, № 6. С. 626–648.

Киселев А.И., Ярмолук В.В., Егоров К.Н. Среднепалеозойский рифтогенез и сопутствующий магматизм востока Сибирского кратона / Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы: Материалы Второго Всероссийского симпозиума с международным участием и молодежной научной школы, посвященных памяти академиков Н.А. Логачева и Е.Е. Милановского / Под ред. С.В. Рассказова, А.М. Никишина, С.П. Приминой. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2013. В 2-х томах. Т. 1. С. 155–159.

Киселев А.И., Ярмолук В.В., Иванов А.В., Егоров К.Н. Пространственно-временные отношения среднепалеозойских базитов и алмазонасных кимберлитов на северо-западном плече Вилуйского рифта (Сибирский кратон). Геология и геофизика, 2014. Т. 55, № 2. С. 185–196.

Киселев А.И., Константинов К.М., Ярмолук В.В., Иванов А.В. Чаро-Синский дайковый рой в структуре среднепалеозойской Вилуйской рифтовой системы (Сибирский кратон). Доклады АН. Т. 471, № 2, 2016. С. 209–213.

Клауд П. Биосфера / В мире науки, 1983. № 11. С. 102–113.

Кокс А., Харт Р. Тектоника плит. М.: Изд-во «Мир», 1989. – 427 с.

Константинов К.М. Динамическая физико-геологическая модель Байкальской складчатой области по палеомагнитным данным. Автор. канд. дис. Иркутск, 1998. 18 с.

Константинов К.М., Шибeko Е.А. Геологическая форма движения как основа возникновения жизни на Земле. Развитие жизни в процессе абиотических изменений на Земле. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 30-летию юбилею Байкальского музея СО РАН. Иркутск, 2023. С. 19–22.

Константинов К.М., Шибeko Е.А., Шульга В.В. Региональная динамическая физико-геологическая модель Сибирской платформы в позднем девоне-раннем карбоне: установление парастерической связи кимберлитов и углеводородообразования. Геофизика, 2020, № 3. С. 62–71.

Кузьмин М.И., Ярмолук В.В. Мантийные плюмы Северо-Восточной Азии и их роль в формировании эндогенных месторождений. Геология и геофизика, 2014. Т. 55, № 2. С. 153–184.

Кузьмин М.И., Корольков А.Т., Дриль С.И., Коваленко С.Н. Историческая геология с основами тектоники плит и металлогении. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2000. 288 с.

Куражковская Е.А. Диалектическая концепция развития в геологии (Философский аспект). Москва: Издательство Московского университета, 1970. 239 с.

Ленин В. И. Материализм и эмпириокритицизм. М.: Гос. изд-во полит. лит., 1968. Т. 18. С. 33–96.

Летников Ф.А. Сверхглубинные флюидные системы Земли и проблемы рудогенеза // Геология рудных месторождений. 2001. Т. 43, № 4. С. 291–307.

Летников Ф.А., Сизых Н.В. Роль процессов гранитизации в формировании кислородной атмосферы Земли // Доклады РАН. 2002. Т. 386, № 4.

Летников Ф.А. Сверхглубинные флюидные системы Земли // Российская наука: мечта светла. – М.: Октопус. Природа, 2006. С. 304–314.

Летников Ф.А. Синергетические аспекты геологического развития Земли // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319, № 1. С. 6–12.

Лёб Л.Б. Статическая электризация, пер. с англ. В.М. Фридкина. М., Л.: Госэнергоиздат, 1963. 408 с.

Опарин А.И. Происхождение жизни. М.: Московский рабочий, 1924. 70 с.

Соболев А.В., Соболев С.В., Кузьмин Д.В., Малич К.Н., Петрунин А.Г. Механизм образования сибирских меймечитов и природа их связи с траппами и кимберлитами // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 12. С. 1293–1334.

Хаин В.Е. Основные проблемы современной геологии. М.: Научный мир, 2003. 348 с.

- Энгельс Ф. Диалектика природы. М.: Политиздат, 1982.
- Энгельс Ф. Анти-Дюринг 1878 // Маркс К., Энгельс Ф. Сочинения. Т. 14. М.-Л.: Соцэкгиз, 1931. 359 с.
- Belonoshko A.B., Lukinov T., Rosengren A., Bryk T., Litasov K.D. Synthesis of heavy hydrocarbons at the core-mantle boundary // *Scientific Reports*. 2015 / 5:18382 / DOI: 10.1038/srep18382. P. 1–5.
- Coffin M.F., Eldholm O. Large Igneous Provinces – Crustal Structure, Dimensions, and External Consequences // *Rev. Geophys.* 1994. Vol. 32, Iss. 1. P. 1–36.
- Cronin J. R., Cooper G. W., Pizzarello. Characteristics and formation of amino acids and hydroxy acids of the Murchison meteorite. *Adv. Space Res.* 1995. Vol. 15. P. 91–97.
- Dietz R.S. Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea floor. *Nature*, 1961, vol. 190. P. 854–857.
- Ernst R.E., Buchan K.L. 1997. Layered mafic intrusions: a model for their feeder systems and relationship with giant dyke swarms and mantle plume centres. *S. Afr. J. Geol.* 100:319–34.
- Ernst R.E., Buchan K.L. 2001. Mantle Plumes: Their Identification Through Time. *GSA Am. Spec. Pap.* 352. 593 p.
- Jones C.A. Planetary Magnetic Fields and Fluid Dynamics // *Annual Review of Fluid Mechanics*. Annual Reviews, 2011. Vol. 43. P. 583–614.
- Hess H.H. (1962). The history of Ocean Basins. In: Engel, A.E.D., James, H.L., and Leonard, B.F., eds., *Petrological Studies: A Volume in Honor of A.F. Baddington*, Geological Society of America, Boulder, 599–620.
- Galimov E.M. Redox evolution of the Earth caused by a multi-stage formation of its core // *Earth. Planet. Sci. Lett.* 2005. Vol. 233. P. 263–276.
- Klaud P. Paleocological significance of banded iron ore formations // *Sci Amer.* 1983. No. 11. P. 102–113.
- Kono M., Roberts P.H. Recent geodynamo simulations and observations of the geomagnetic field // *Reviews of Geophysics*. – 2002. – T. 40, № 4. – P. 4–1 – 4–53. <https://doi.org/10.1029/2000RG000102>
- Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A. Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province / *Earth-Science Reviews* 102 (2010). P. 29–59.
- Maupin V. The nature of the «D» layer: seismological constraints // *Geophys. Res. Abstracts*. 2004. Vol. 6. P. 11749.
- Miller S. L. (1953). A Production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth Conditions. *Science* 117 (3046). P. 528–529 doi:10.1126/science.117.3046.528
- Miller S. L., Urey H.C. Organic compound synthesis on the primitive Earth. *Science*. 1959. Vol.130. P. 245–259.
- Pirajno F. Ore deposits and mantle plumes. Kluwer, Academic Publishers, 2004. 572 p.
- Roberts P.H., King E.M. On the genesis of the Earth's magnetism // *Reports on Progress in Physics*. 2013. 4 September (vol. 76). P. 096801. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/76/9/096801>
- Scotese C.R., McKerrow W.S., Revised World maps and introduction // *Paleozoic Paleogeography and Biogeography*. Memoir № 12, Published by the Geological Society, London. 1990. P. 1–21.
- Scotese C.R. Paleogeographic Atlas. PALEOMAP Progress Report 90-0497 // Department of Geology, University of Texas at Arlington, Arlington, TX, 1998, 45 p.
- Scotese, C.R., Langford, R.P. (1995). Pangea and the paleogeography of the Permian. In P. A. Scholle, T. M. Peryt, & D. S. Ulmer-Scholle (Eds.), *The Permian of northern Pangea* (pp. 3–19). Berlin, Heidelberg: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-78593-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-78593-1_1)
- Torsvik, T.H., & Cocks, L.R. (2016). Triassic. In *Earth history and palaeogeography* (pp. 138–158). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316225523.012>
- Urey H.C. (1952). The planets: their origin and development. New Haven, Conn.: Yale Univ. 245 p.
- Urey H. C. *Proc. Roy. Soc. (London)* 219A, 281 (1953).
- Chemical evidence regarding the earth's origin. In XIIth Congress for Pure and Applied Chemistry: Plenary Lectures, pp. 188–214.
- Vine F.J., Matthews D.H. Magnetic anomalies over oceanic ridges // *Nature*, 1963, 199, № 4897, p. 947–949.
- Wilson J.T. A possible origin of the Hawaiian Islands // *Canad. J. Phys.*, 1963, vol. 41, p. 863–866.
- Zhao D. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep earth dynamics // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2004. Vol. 146. P. 3–34.
- Zhitkov A.N. Paleokinematics and pattern of kimberlite fields location on the Siberian platform based on the hypothesis of hot spots // *Extended abstracts Sixth International kimberlite conference*. Russia, Novosibirsk, 1995. P. 692–694.

## References

- Aplonov S.V. Geodynamics: Textbook. St. Petersburg: Publishing House S.-Peterb. University, 2001. 360 p.
- Belonoshko A.B., Lukinov T., Rosengren A., Bryk T., Litasov K.D. Synthesis of heavy hydrocarbons at the core-mantle boundary // *Scientific Reports*. 2015 / 5:18382 / DOI: 10.1038/srep18382. P. 1–5.
- Borisenko A.S., Sotnikov V.I., Izokh A.E., Polyakov G.V., Obolensky A.A. Permotrias mineralization of Asia and its connection with the manifestation of plume magnetism//*Geol. and geophysics*. 2006. Vol. 47, No. 1. P. 166–182.
- Cloud P. Biosphere/In the world of science, 1983. No. 11. P. 102–113.

- Coffin M.F., Eldholm O. Large Igneous Provinces – Crustal Structure, Dimensions, and External Consequences // *Rev. Geophys.* 1994. Vol. 32, Iss. 1. P. 1–36.
- Cox A., Hart R. Plate tectonics. M.: Publishing house «Mir», 1989. 427 p.
- Cronin J. R., Cooper G. W., Pizzarello. Characteristics and formation of amino acids and hydroxy acids of the Murchison meteorite. *Adv. Space Res.* 1995. Vol. 15. P. 91–97.
- Dietz R.S. Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea floor. *Nature*, 1961, vol. 190. P. 854–857.
- Dhordan TH, Minster DB. Measurement of crustal deformations in the western United States. In the world of science, 1988, No. 10. P. 24–33.
- Dobretsov N.L., Kirdyashkin A.G., Kirdyashkin A.A. Deep geodynamics. 2nd ed., Add. And revised. Novosibirsk: Publishing House of the SB RAS. Phil. «Geo», 2001. 409 p.
- Dobretsov N.L. Geological consequences of the thermochemical model of plumes. *Geology and Geophysics*, 2008, vol. 49 (7), p. 587–604.
- Dobretsov N.L., Borisenko A.S., Izokh A.E. Thermochemical deep mantle plumes are the source of the planet's ore wealth. *First-hand science*, 2011, vol. 42 No. 6. P. 36–43.
- Dobretsov N.L. Fundamentals of tectonics and geodynamics: A textbook. Novosibirsk: Publishing House of NSU, 2011.
- Ernst R.E., Buchan K.L. 1997. Layered mafic intrusions: a model for their feeder systems and relationship with giant dyke swarms and mantle plume centres. *S. Afr. J. Geol.* 100:319–34.
- Ernst R.E., Buchan K.L. 2001. Mantle Plumes: Their Identification Through Time. *GSA Am. Spec. Pap.* 352. 593 p.
- Engels F. *Dialectics of nature*. M.: Politizdat, 1982.
- Engels F. *Anti-Düring 1878* // Marx K., Engels F. *Works*. Vol. 14. M.-L.: Sotsekgiz, 1931. 359 p.
- Galimov E.M. Conditions for the origin of life on Earth. *Biosphere*, 2010. Vol. 1. P. 39–47.
- Galimov E.M. Redox evolution of the Earth caused by a multi-stage formation of its core // *Earth. Planet. Sci. Lett.* 2005. Vol. 233. P. 263–276.
- Gorshkov G.P. Earth crust and its movements/About the «Knowledge» of the RSFSR. - Moscow: B. I., 1970. 32 p. Ill.; 20. (To help the lecturer). Джинлоз Р. Земное ядро. В мире науки, 1983, № 11. P. 16–27.
- Hess H.H. (1962). The history of Ocean Basins. In: Engel, A.E.D., James, H.L., and Leonard, B.F., eds., *Petrological Studies: A Volume in Honor of A.F. Baddington*, Geological Society of America, Boulder, 599–620.
- Ivanov A.A., Sevastyanov V.S., Shnykin B.A., Dolgonosov A.A., Krivenko A.P., Priymak S.V., Galimov E.M. Evaluation of the efficiency of various energy sources of the stage of formation of prebiological structures during abiogenesis. *Proceedings of the All-Russian Annual Seminar on Experimental Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Workshop materials*. Moscow, 2020. P. 239–241.
- Jones C.A. Planetary Magnetic Fields and Fluid Dynamics // *Annual Review of Fluid Mechanics. Annual Reviews*, 2011. Vol. 43. P. 583–614.
- Kedrov B.M. On the ratio of forms of motion of matter in nature. *Philosophical problems of modern natural science. Questions of philosophy*, N 4, 1959. P. 44–56.
- Kedrov B.M. Subject and relationship of natural sciences. M.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1962. 411 p.
- Kedrov B.M. Engels and Lenin on geology. Theoretical and methodological issues of oil and gas. Novosibirsk: Science, 1981. No. 512. P. 15–20.
- Khain V.E. The main problems of modern geology. M.: Scientific world, 2003. 348 p.
- Kiselev A.I., Yarmolyuk V.V., Egorov K.N., Chernyshov R.A., Nikiforov A.V. Central Paleozoic basite magmatism of the northwestern part of the Vilyui rift: composition, sources, geodynamics // *Petrology*. 2006. Vol. 14, No. 6. P. 626–648.
- Kiselev A.I., Yarmolyuk V.V., Egorov K.N. Middle Paleozoic rifting and concomitant magmatism of the east of the Siberian craton/Continental rifting, concomitant processes: Materials of the Second All-Russian Symposium with international participation and a youth scientific school dedicated to the memory of academicians N.A. Logachev and E.E. Milanovsky/Ed. S.V. Rasskazova, A.M. Nikishina, S.P. Primina. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS, 2013. In 2 volumes. Vol. 1. P. 155–159.
- Kiselev A.I., Yarmolyuk V.V., Ivanov A.V., Egorov K.N. Spatio-temporal relations of Middle Paleozoic basites and diamond-bearing kimberlites on the northwestern shoulder of the Vilyui rift (Siberian craton). *Geology and geophysics*, 2014. Vol. 55, No. 2. P. 185–196.
- Kiselev A.I., Konstantinov K.M., Yarmolyuk V.V., Ivanov A.V. Charo-Sinsky dike swarm in the structure of the Middle Paleozoic Vilyui rift system (Siberian craton). *Reports of the Academy of Sciences*. Vol. 471, No. 2, 2016. P. 209–213.
- Klaud P. Paleoecological significance of banded iron ore formations // *Sci Amer.* 1983. No. 11. P. 102–113.
- Kono M., Roberts P.H. Recent geodynamo simulations and observations of the geomagnetic field // *Reviews of Geophysics*. 2002. Vol. 40, No. 4. P. 4-1 – 4-53. <https://doi.org/10.1029/2000RG000102>
- Konstantinov K.M. Dynamic physical and geological model of the Baikal folded region based on paleomagnetic data. Author. cand. dis. Irkutsk, 1998, 18 p.
- Konstantinov K.M., Shibeko E.A. Geological form of motion as the basis for the emergence of life on Earth. Development of life in the process of abiotic changes on Earth. Materials of the IV All-Russian Scientific and

Practical Conference dedicated to the 30th anniversary of the Baikal Museum of the SB RAS. Irkutsk, 2023. P. 19–22.

Konstantinov K.M., Shibeko E.A., Shulga V.V. Regional dynamic physical and geological model of the Siberian platform in the Late Devonian-Early Carboniferous: establishment of a parastrophic relationship between kimberlite and hydrocarbon formation. *Geophysics*, 2020, No. 3. P. 62–71.

Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A. Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province / *Earth-Science Reviews* 102 (2010). P. 29–59.

Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V. Mantle plumes of Northeast Asia and their role in the formation of endogenous deposits. *Geology and geophysics*, 2014. Vol. 55, No. 2. P. 153–184.

Kuzmin M.I., Korolkov A.T., Dril S.I., Kovalenko S.N. Historical geology with the basics of plate tectonics and metallogeny. Irkutsk: Irkut Publishing House. un-ta, 2000. 288 pp. Куражковская Е.А. Диалектическая концепция развития в геологии (Философский аспект). Москва: Издательство Московского университета, 1970. 239 p.

Lenin V.I. Materialism and empiriocriticism. M.: State Publishing House Polit. lit., 1968. Vol. 18. P. 33–96.

Letnikov F.A. Superdeep fluid systems of the Earth and problems of rudogenesis // *Geology of ore deposits*. 2001. Vol. 43, No. 4. P. 291–307.

Letnikov F.A., Sizykh N.V. The role of granitization processes in the formation of the Earth's oxygen atmosphere // *Reports of the Russian Academy of Sciences*. 2002. Vol. 386, No. 4.

Letnikov F.A. Super-deep fluid systems of the Earth // *Russian science: the dream is bright*. M.: Octopus. Nature, 2006. P. 304–314.

Letnikov F.A. Synergistic aspects of the geological development of the Earth // *Izvestia Tomsk Polytechnic University*. 2011. Vol. 319, No. 1. P. 6–12.

Löb L.B. Static electrification, translation from English V.M. Fridkin, M., L.: Gosenergoizdat, 1963. 408 p.

Maupin V. The nature of the «D» layer: seismological constraints // *Geophys. Res. Abstracts*. 2004. Vol. 6. P. 11749.

Miller S. L. (1953). A Production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth Conditions. *Science* 117 (3046). P. 528–529 doi:10.1126/science.117.3046.528

Miller S. L., Urey H.C. Organic compound synthesis on the primitive Earth. *Science*. 1959. Vol. 130. P. 245–259.

Oparin A.I. Origin of life. M.: Moscow worker, 1924. 70 p.

Pirajno F. Ore deposits and mantle plumes. Kluwer, Academic Publishers, 2004. 572 p.

Roberts P.H., King E.M. On the genesis of the Earth's magnetism // *Reports on Progress in Physics*. 2013. 4

September (vol. 76). P. 096801. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/76/9/096801>

Sobolev A.V., Sobolev S.V., Kuzmin D.V., Malich K.N., Petrunin A.G. The mechanism of formation of Siberian meimechites and the nature of their connection with traps and kimberlites // *Geology and geophysics*. 2009. Vol. 50, No. 12. P. 1293–1334.

Scotese C.R., McKerrow W.S., Revised World maps and introduction // *Paleozoic Paleogeography and Biogeography*. Memoir No. 12, Published by the Geological Society, London. 1990. P. 1–21.

Scotese C.R. Paleogeographic Atlas. PALEOMAP Progress Report 90-0497 // Department of Geology, University of Texas at Arlington, Arlington, TX, 1998, 45 p.

Scotese, C.R., Langford, R.P. (1995). Pangea and the paleogeography of the Permian. In P. A. Scholle, T. M. Peryt, & D. S. Ulmer-Scholle (Eds.), *The Permian of northern Pangea* (pp. 3–19). Berlin, Heidelberg: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-78593-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-78593-1_1)

Torsvik, T.H., & Cocks, L.R. (2016). Triassic. In *Earth history and palaeogeography* (pp. 138–158). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316225523.012>

Urey H.C. (1952). The planets: their origin and development. New Haven, Conn.: Yale Univ. 245 p.

Urey H.C. Proc. Roy. Soc. (London) 219A, 281 (1953). Chemical evidence regarding the earth's origin. In XIIth Congress for Pure and Applied Chemistry: Plenary Lectures, pp. 188–214.

Vakhromeev G.S., Davydenko A.Yu. Modeling in exploratory geophysics. M.: Nedra, 1987, 194 p.

Vladykin N.V. Model of the origin and crystallization of ultrabasic-alkaline carbonatite magmas of the Siberian region, problems of their ore content, mantle sources and connection with the plume process. *Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, No. 5, p. 889–905.

Van de Graaf R.J., Compton K.T., van Atta L.C. (February 1933). «Electrostatic production of high voltage for nuclear research» *Physical Review*. 43 (3): 149–157. Bibcode:1933PhRv...43..149V. doi:10.1103/PhysRev.43.149

Vine F.J., Matthews D.H. Magnetic anomalies over oceanic ridges // *Nature*, 1963, 199, № 4897, p. 947–949.

Wegener A. Origin of continents and oceans. L.: Science, 1984. 277 p.

Wilson J.T. A possible origin of the Hawaiian Islands // *Canad. J. Phys.*, 1963, v. 41, p. 863–866.

Zhao D. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep earth dynamics // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2004. Vol. 146. P. 3–34.

Zhao D, Pirajno F, Liu L. Mantle structure and dynamics under Eastern Russia and adjacent regions. *Geology and Geophysics*, 2010, No. 9. P. 1188–1203.

Zhitkov A.N. Paleokinematics and pattern of kimberlite fields location on the Siberian platform based on the hypothesis of hot spots // *Extended abstracts Sixth*

International kimberlite conference. Russia, Novosibirsk, 1995. P. 692–694.

Zonenshain L.P., Kuzmin M.I., Natapov L.M. Tectonics of lithospheric plates of the territory of the USSR: In 2 books. M.: Nedra, 1990.

Zubkov I.F. Geological form of matter motion. Methodological issues of geological sciences. Kyiv: Naukova Dumka, 1974.

Zubkov I.F. The problem of the geological form of motion of matter. M.: Science. 1979. 240 p.

**Константинов Константин Михайлович,**

*доктор геолого-минералогических наук,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет, институт «Сибир-  
ская школа геонаук»,  
руководитель департамента геофизики,  
email: konstantinovkm@ex.istu.edu*  
**Konstantinov Konstantin Mihailovich,**  
*Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Irkutsk National Research Technical University,  
Siberian School of Geosciences,  
Head of the Geophysics Department,  
email: konstantinovkm@ex.istu.edu*

# МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 550.844+546.791.027+632.126  
<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2025.4.73>

EDN: STZRHL

## Землетрясения Байкальской рифтовой системы в 2025 г.: снижение сейсмичности без существенных изменений гидрогеодинамики

С.В. Рассказов<sup>1,2</sup>, Е.П. Чебыкин<sup>1</sup>, С.В. Снопков<sup>2,3</sup>, А.М. Ильясова<sup>1</sup>, И.С. Чувашова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>3</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**Аннотация.** В контексте развития 10–12-летних сейсмических циклов Байкальской рифтовой системы (БРС) сейсмичность 2025 г. падает с переходом от эпизодического проявления сильных землетрясений Байкало-Хубсугульской и Северо-Байкальско-Хангайской активизаций 2020–2024 гг. (энергетический класс  $K=13–15,7$ ) к умеренным и слабым землетрясениям середины сейсмического цикла ( $K$  меньше 13). Соответственно, содержание термофильного компонента Si подземных вод ст. 27 Култукского полигона слегка снижается. Между тем, другие гидрогеодинамические параметры (урановые компоненты: отношение активностей  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ , концентрации U и  $^{234}\text{U}$ , термофильные компоненты: Li и Na) сохраняются в подземных водах 2025 г. в пределах значений, которые были характерны для подземных вод во время сильных землетрясений 2020–2024 гг. Дальнейший ход сейсмического цикла БРС зависит от соотношения сил, создающихся в Японско-Байкальском геодинамическом коридоре и Саяно-Монгольском секторе Индо-Азиатской конвергенции. Возможны различные варианты перехода к будущей сильной сейсмической активизации. Направленность эволюции сейсмического процесса будет определяться в зависимости от трендов гидрогеодинамических параметров подземных вод.

**Ключевые слова:** подземные воды, мониторинг, гидрогеохимия, окислительно-восстановительный потенциал, землетрясения, Байкал

## Earthquakes of the Baikal Rift System in 2025: Decrease in Seismicity without Sufficient Changes in Hydrogeodynamics

S.V. Rasskazov<sup>1,2</sup>, E.P. Chebykin<sup>1,3</sup>, S.V. Snopkov<sup>2,4</sup>, A.M. Ilyasova<sup>1</sup>, I.S. Chuvashova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup>A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>4</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Статья получена: 03.12.2025; исправлена: 15.12.2025; принята: 19.12.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Снопков С.В., Ильясова А.М., Чувашова И.С. Землетрясения Байкальской рифтовой системы в 2025 г.: снижение сейсмичности без существенных изменений гидрогеодинамики // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 4. С. 73–98. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.73. EDN: STZRHL

Article received: 03.12.2025; corrected: 15.12.2025; accepted: 19.12.2025.

FOR CITATION: Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Snopkov S.V., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S. Earthquakes of the Baikal Rift System in 2025: decrease in seismicity without sufficient changes in hydrogeodynamics // *Geology and Environment*. 2025. Vol. 5, No. 4. P. 73–98. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.73. EDN: STZRHL

**Abstract.** In the context of the 10-12-year seismic cycles development in the Baikal Rift System (BRS), seismicity in 2025 decreases with the transition from episodic displaying of strong earthquakes of the Baikal-Khubsugul and North Baikal-Hangay reactivations of 2020-2024 (energy class  $K=13-15.7$ ) to moderate and weak earthquakes of the seismic cycle middle ( $K$  less 13). Respectively, the content of the thermophilic component Si in groundwater at station 27 of the Kultuk area slightly decreases in 2025 relative to 2020–2024 values. Meanwhile, other groundwater parameters of 2025 ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  activity ratio, concentrations of U,  $^{234}\text{U}$ , Li, and Na) preserve signatures that are characteristic of 2020–2024. The further course of the BRS seismic cycle depends on the balance of forces generated in the Japan-Baikal geodynamic corridor and Sayan-Mongolian sector of the Indo-Asian Convergence. Various scenarios for the transition to future strong seismic activities are possible. The direction of evolution of the seismic process will be determined through trends of hydrogeodynamic parameters of groundwater.

**Keywords:** groundwater, monitoring, hydrogeochemistry, oxidation-reduction potential, earthquakes, Baikal

## Введение

Землетрясения Байкальской рифтовой системы (БРС) и гидрогеохимические изменения в подземных водах находятся между собой в парагенетических соотношениях, отражающих деформации земной коры (Rasskazov et al., 2024). Землетрясения – результат деформационных процессов, реализующихся в ее средней части, недоступной для непосредственных наблюдений. Состав подземных вод – результат взаимодействия вода–порода в доступной для мониторинга ее верхней части. Из гидрогеохимических изменений в резервуаре подземных вод можно составить представления о деформационном состоянии земной коры, приводящем к сильным землетрясениям.

Комплексная гидрогеохимическая информация о состоянии резервуара подземных вод, полученная при мониторинге в 2012–2025 гг. на Култукском полигоне БРС, свидетельствует о циклическом характере сейсмогенных деформаций земной коры с квазипериодичностью 10–12 лет (Rasskazov et al., 2022). Полигон выбран для мониторинга как наиболее чувствительная территория к сейсмогенным деформациям БРС, на которой растягивающаяся Южно-Байкальская впадина сочленяется со сжимающейся восточной частью Тункинской долины (Рассказов и др., 2015; Чебыкин и др., 2015). Кроме гидрогеохимического мониторинга, для оценки сейсмогенных деформаций земной коры на этом полигоне с декабря 2023 г. проводится непрерывное оперативное отслеживание

изменений окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) подземных вод в режиме реального времени (измерения каждые 2 мин.) с ежедневным детальным анализом соотношений этого параметра с сейсмичностью. Обозначаются сигналы ОВП, связанные с проявлением землетрясений (Рассказов и др., 2023).

Высокая сейсмическая активность 2020–2024 гг. с землетрясениями энергетического класса  $K=13.0-15.7$  сменяется в 2025 г. более слабой сейсмичностью ( $K<13.0$ ). В первые 4 месяца 2025 г. в БРС реализуются землетрясения  $K<11.2$  при общем хаотическом распределении эпицентров. Весной, летом и осенью 2025 г. сейсмический процесс становится упорядоченным с отчетливым проявлением сейсмогенерирующих импульсов: АИ (апрель-июнь), ИА (июнь-август), АС (август-сентябрь) и СО (сентябрь-октябрь). В ноябре складывается асейсмичная обстановка, на фоне которой происходят возмущения магнитосферы, способствующие проявлению слабых сейсмических событий (Рассказов и др., 2025а,б). Возникает вопрос о характере химической гидрогеодинамики подземных вод Култукского полигона при снижении сейсмической активности БРС 2025 г.

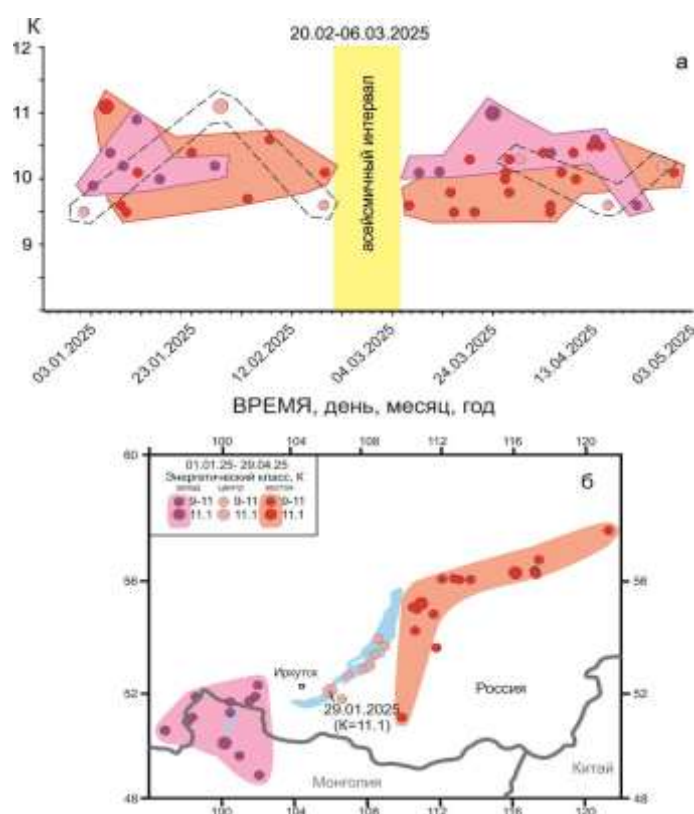
Цель настоящей работы – выяснить характер гидрогеохимических изменений в подземных водах Култукского полигона во время перехода от интервала начальной слабой сейсмичности 2025 г. к сейсмическим импульсам АИ и ИА в контексте общей смены компонентов 10–12 летних геодинамических циклов БРС.

## Определение интервала слабой сейсмичности и сейсмогенерирующих импульсов АИ и ИА

От слабой сейсмичности БРС в январе–апреле 2025 г. к сейсмическим импульсам 30 апреля – 12 июня и 17 июня – 13 августа

В развитии сейсмичности БРС в 2020–2025 гг. чередуются сильные землетрясения ее западной, центральной и восточной частей (Рассказов и др., 2025в). После двух сильных Северо-Байкальских ( $K=13.6$  и  $14.4$ ) и Чулу-тынского ( $K=13.9$ ) землетрясений Северо-Байкальско-Хангайской сейсмической

активизации, реализовавшихся, соответственно, 27 декабря 2023 г., 15 января и 27 ноября 2024 г., сейсмичность ослабевает. С января до конца апреля 2025 г. энергетический класс землетрясений ( $K$ ) в БРС не превышает 11.1. На диаграмме рис. 1а наблюдается пространственное разделение фигуративных полей при заметном асейсмичном интервале 20 февраля – 06 марта 2025 г. Землетрясения распределяются во времени хаотично в ее западной, восточной и центральной частях. Отсутствие порядка обозначает фоновые условия в деформациях земной коры без видимого преобладания действующих сил с востока или запада.



**Рис. 1.** Диаграмма временного распределения землетрясений (а) при пространственном группировании землетрясений на западе, востоке и в центре БРС (б) с 25 декабря 2024 г. до 29 апреля 2025 г. В этом временном интервале проявляются землетрясения энергетического класса ( $K$ ), 11.1, 9–11 и ниже (более слабые землетрясения не показаны). Здесь и далее используются данные о землетрясениях с сайта (Карта..., 2025).

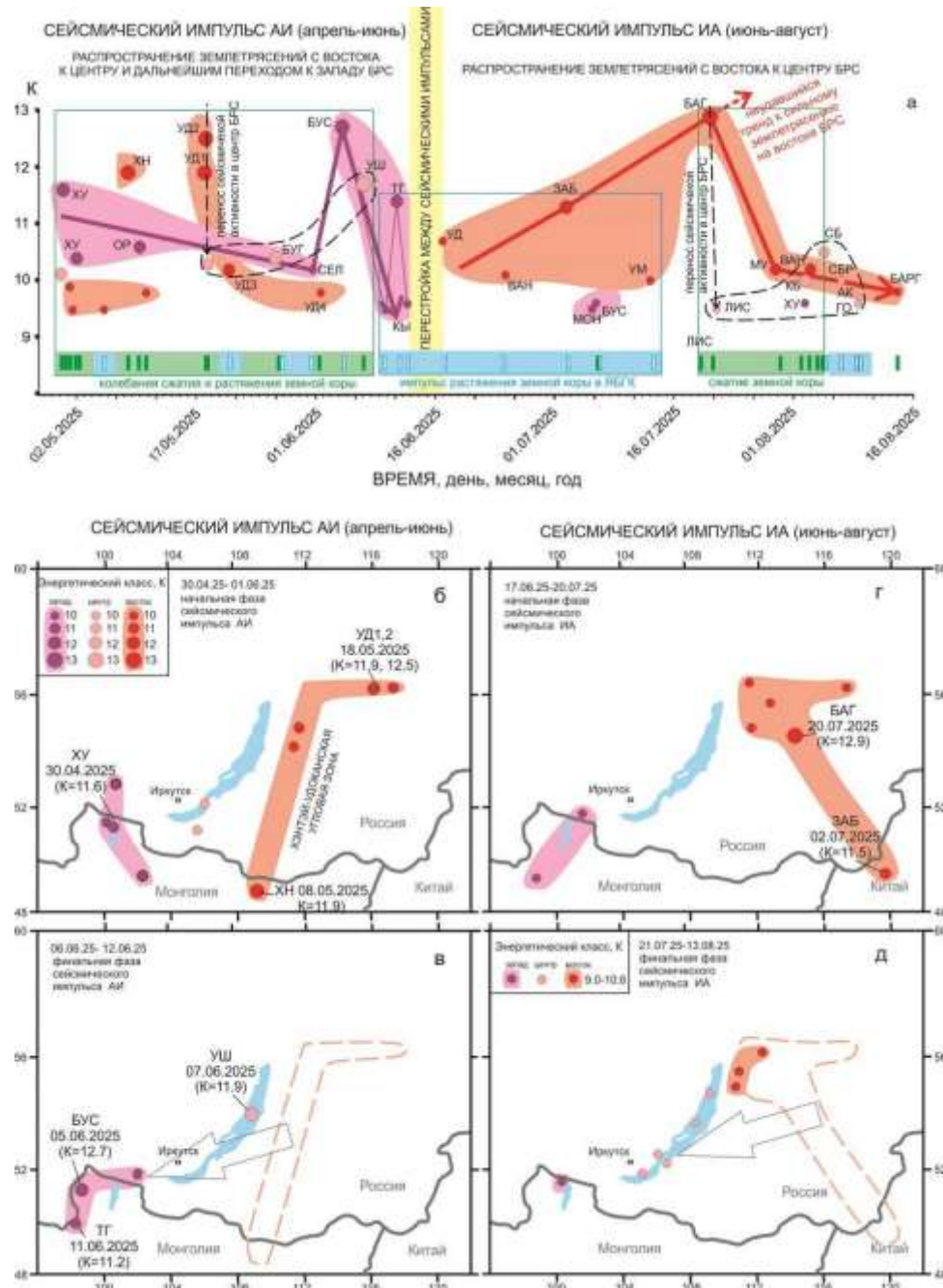
**Fig. 1.** Diagram of temporal distribution of earthquakes (а) with spatial grouping of earthquakes in the west, east and center of the BRS (б) from December 25, 2024 to April 29, 2025. Earthquakes of energy class ( $K$ ) 11.1, 9–11, and lower (weaker earthquakes are not shown) occur in this time interval. From here on, earthquake data from the website (Map..., 2025) is used.

Сейсмический импульс АИ имеет две фазы: начальную (продолжительность около месяца – с 30 апреля до 01 июня) и конечную (продолжительность около недели – с 06 до

12 июня) (рис. 2а). В начальную фазу импульса АИ на востоке БРС Хэнтэйское (ХН) и два Удоканских (УД1 и УД2) землетрясения имеют повышенный энергетический

класс ( $K=12.0-12.9$ ). Эти сейсмические события реализуются на фоне более слабых землетрясений запада БРС ( $K=10.0-11.7$ ). В конечную фазу сейсмического импульса АИ землетрясения, начиная с Бусийнгольского с

повышенным энергетическим классом ( $K=12.7$ ), полностью концентрируются на западе БРС. К концу сейсмического импульса АИ энергетический класс землетрясений  $K$  снижается до 9.0.



**Рис. 2.** Диаграмма временных вариаций землетрясений разного энергетического класса ( $K$ ) с 28 апреля до 13 августа 2025 г. (а) и пространственное распределение этих землетрясений в БРС в фазу запуска (б) и затухания (в) импульса АИ, в фазу запуска (г) и затухания (д) сейсмического импульса ИА. На панели а приводится шкала колебаний сжатия и растяжения земной коры по данным ОВП (Рассказов и др., 2025а). На панелях в и д большими стрелками показаны направления пространственного смещения землетрясений с территорий начальных фаз сейсмических импульсов (поля, перенесенные штриховыми линиями, соответственно, с панелей б и г) на территории конечных фаз сейсмических импульсов. Землетрясения на западе БРС показаны сиреневым цветом (ХУ – Хубсугульское, БУС – Бусийнгольское, ТГ – Тацийнгольское, ОР –

Орликское, СЕЛ – Селенгинское, в верхнем течении, МОН – Мондинское, КЫ – Кыренское), на востоке – красным цветом (УД – Удоканское, ВАН – Верхне-Ангарское, ЗАБ – Забайкальское, УМ – Умхейское, БАГ – Багдаринское, МУ – Муяканское, БАРГ – Баргузинское в северной части хребта), в центре – розовым (БУГ – Бугульдейское, УШ – Ушканье, ЛИС – Листвянское, КБ – Кабанское, СБ – Северо-Байкальское, СБР – Северо-Баргузинское, ГО – Голоуспенское, АК – Академическое).

**Fig. 2.** Diagram of temporal variations of earthquakes of different energy classes (K) from April 28 to August 13, 2025 (a) and spatial distribution of these earthquakes in the BRS in the start-up phase (б) and attenuation (в) of the AJ pulse, in the start-up phase (г) and attenuation (д) of the JA seismic pulse. Panel a shows a scale of compression–extension oscillations in the earth's crust from ORP data (Ras-skazov et al., 2025a). In panels в and д, large arrows indicate the directions of spatial displacement of earthquakes from areas of initial phases of seismic pulses (fields transferred by dashed lines, respectively, from panels б and г) to those of the final phases of seismic pulses. Earthquakes in the west of the BRS are shown in purple (ХУ – Khubsugul, БУС – Busiyngol, ТГ – Tatsiyngol, ОР – Orlik, СЕЛ – Selenga, in the upper current, МОН – Mondy, КЫ – Kyren), in the east – in red (УД – Udokan, ВАН – Verkhnyaya Angara, ЗАБ – Zabaikal'e, УМ – Umkhey, БАГ – Bagdarin, МУ – Muyakan, БАРГ – Barguzin in the northern part of the range), in the center – in pink (БУГ – Buguldeyka, УШ – Ushkaniy, ЛИС – Listvyanka, КБ – Kabansk, СБ – Severnyi-Baikal, СБР – Severnyi Barguzin, ГО – Goloustnoe, АК – Academic Ridge).

Сейсмический импульс ИА также разделяется на две фазы: начальную (месячную) – с 17 июня до 20 июля и конечную (также месячную) – с 21 июля до 13 августа. В начальную фазу импульса ИА доминируют землетрясения востока БРС. За слабыми землетрясениями (Удоканским, УД и Верхне-Ангарским, ВАН) 02 июля следует землетрясение в районе г. Забайкальска (ЗАБ) повышенного энергетического класса ( $K=11.5$ ), а 20 июля в 21 ч. 23 мин. происходит еще более сильное землетрясение в районе пос. Багдарин (БАГ) ( $K=12.9$ ). На следующий день (21 июля), однако, в 15 ч. 55 мин. откликается слабое ( $K=9.5$ ) Листвянское землетрясение центра БРС, которое обозначает переход к конечной фазе сейсмического импульса ИА. В эту фазу проявляются слабые землетрясения в центре БРС. Одновременно землетрясения востока БРС ослабевают; 28 июля следует Муяканское событие, МУ ( $K=10.2$ ) и 2 августа – Верхне-Ангарское, ВАН ( $K=10.2$ ). Единичное событие отзывается в эпицентральной поле афтершоков Хубсугульского землетрясения 11 января 2021 г. В целом слабые землетрясения финальной фазы сейсмического импульса ИА обозначают процесс перераспределения сейсмогенных деформаций с востока в центр БРС (Рассказов и др., 2025а).

Перестройка между импульсами АИ и ИА происходит в течение 5 дней: с 12 июня (КЫ – Кыренское землетрясение на западе БРС, в Тункинской долине) до 17 июня (УД – Удоканское землетрясение на востоке).

Предполагается, что в развитии деформаций земной коры первичным является

приложение к ней сил сжатия или растяжения. Сейсмические импульсы, обозначенные в пространственно-временном распределении эпицентров землетрясений, в сущности, вторичны. Земная кора испытывает всестороннее сжатие под действием сил гравитации, направленных к центру Земли. Силы сжатия усиливаются в зонах конвергенции (взаимного схождения), а силы растяжения – в зонах дивергенции (взаимного расхождения) континентальных блоков. Сжатие инициируется на западе БРС в связи с развитием деформаций в Саяно-Монгольском секторе Индо-Азиатской конвергенции (СМСИАК), растяжение – на востоке БРС в связи с развитием Японско-Байкальского геодинамического коридора (ЯБГК).

Полученный ряд ОВП-оценок состояния коры Култукского полигона при землетрясениях БРС разделяется на временные интервалы 1) 29 апреля – 08 июня, 2) 09 июня – 13 июля, 3) 20 июля – 05 августа и 4) 05–09 августа.

В первом интервале преобладает сейсмогенерирующее действие сжатия. События в условиях растяжения земной коры единичны. Сжатие, усиливающееся в зоне СМСИАК, отражается в развитии сейсмического импульса АИ. Этот интервал начинается с хубсугульских землетрясений (ХУ) запада БРС и заканчивается Бусийнгольским (БУС) запада и Ушканьем (УШ) центра.

Во втором интервале преобладает сейсмогенерирующее действие растяжения. Растягивающие усилия создаются в зоне ЯБГК. Они возникают уже в конце сейсмического

импульса АИ и отражаются в развитии первой половины сейсмического импульса ИА. Таким образом, начало растяжения ЯБГК предшествует перестройке между сейсмическими импульсами (пространственному перераспределению землетрясений с запада на восток БРС). В то же время, импульс растяжения подготавливает Багдаринское землетрясение (БАГ) с повышенным энергетическим классом, которое реализуется в условиях сжатия коры.

В третьем интервале с сейсмогенерирующим действием сжатия осуществляется перенос сейсмической активности с востока (событие БАГ) в центр БРС (событие ЛИС – Листвянка). В условиях сжатия следует серия землетрясений от Муяканского (МУ) до Северо-Байкальского (СБ). Переход к сжатию коры во время сейсмического события БАГ ведет к реализации землетрясений с низким энергетическим классом. Если бы землетрясение БАГ произошло в растягивающейся коре (как это имело место в 2020–2024 гг.), следующее за ним землетрясение могло быть сильнее.

В четвертом интервале воспроизводится сейсмогенерирующее действие растяжения. Три землетрясения этого интервала (Северо-Баргузинское – СБР, Голоустенское – ГО и Академическое – АК), проявляющиеся в центре БРС, обозначают финальную тенденцию перераспределения эпицентров землетрясений сейсмического импульса ИА с востока в центр БРС.

В целом, с одной стороны, определяется действие импульса растяжения ЯБГК на востоке и в центре БРС во втором и четвертом интервалах, с другой стороны, выявляется включение механизма сжатия третьего интервала, предотвращающего усиление сейсмогенных деформаций на востоке и в центре БРС.

### **Опробование, хранение и аналитические исследования подземных вод**

Мониторинг подземных вод Култукского полигона БРС проводится с 2012. Ключевое значение в мониторинге имеют подземные воды ст. 27, для которых определены фоновые составы с концентрацией  $Li = 0.2$  мкг/г. Эти подземные воды имеют наиболее высокое изотопное отношение  $^{234}U/^{238}U$  и наиболее низкое изотопное отношение  $^{87}Sr/^{86}Sr$  и в совокупности составов подземных вод из

милонитов Главного Саянского разлома характеризуют конечный компонент NE (non-equilibrium). Подземные воды других станций Култукского полигона имеют компонентный состав смешения компонента NE с компонентом E (equilibrium), характеризующимся наиболее низким изотопным отношением  $^{234}U/^{238}U$  (около 1) и наиболее высоким изотопным отношением  $^{87}Sr/^{86}Sr$  (около 0.709). Гидрогеохимические данные по подземным водам других мониторинговых станций Култукского полигона используются в исследованиях состояния земной коры в качестве существенной дополнительной информации (Рассказов и др., 2015; Чебыкин, Чувашова, 2023).

Для определения химического элементного состава природная вода фильтруется непосредственно при отборе на месте опробования 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 (Axygen Scientific, Cat.-No. MCT-200-C, США, Мексика), содержащие 40 мкл консерванта. В качестве консерванта используется концентрированная азотная кислота (70%), дважды очищенная с помощью суббойлинговой системы перегонки кислот (Savillex DST-1000 sub-boiling distillation system, Япония), в которую добавляется индий (типично 1000 ppb) в качестве внутреннего стандарта. Законсервированная проба хранится в холодильнике.

Аликвоты консерванта взвешиваются при добавлении в пробирки. Пробирки с отобранными образцами воды взвешиваются. Рассчитывается точное содержание азотной кислоты (типично 2 %) и индия (типично 30 ppb). В подготовленных растворах определяются содержания 72 химических элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 (Чебыкин и др., 2012). Изотопы урана определяются после его выделения на ионно-обменной колонке из отдельной пробы воды. Обычно достаточно 400 мл. Детали методики приведены в работах (Чебыкин и др., 2007, 2015).

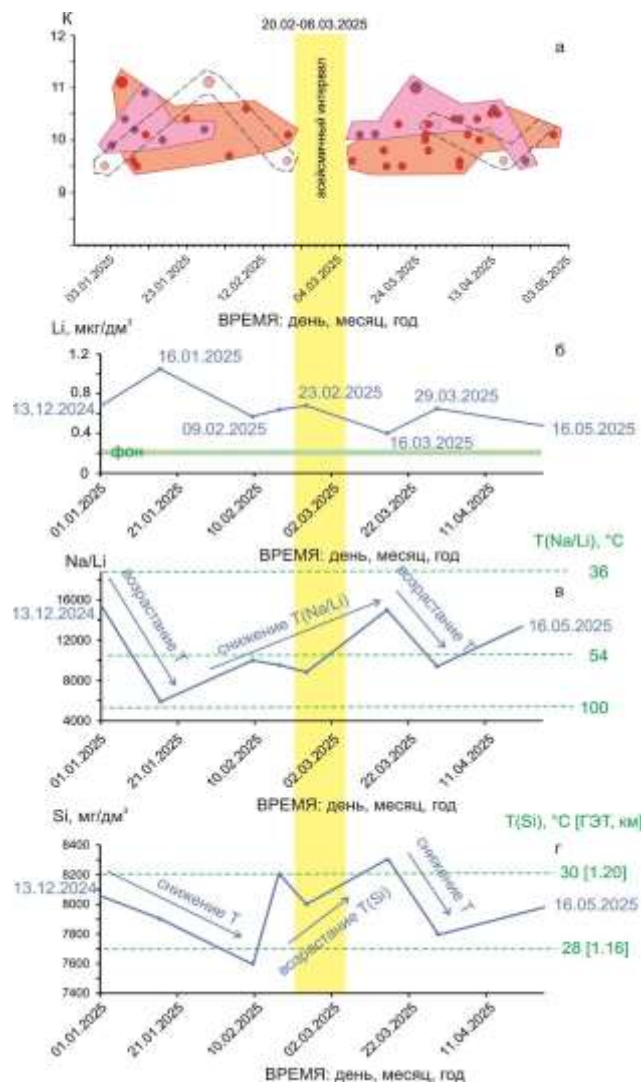
## Результаты

### Термофильные элементы подземных вод

Для химической гидрогеодинамики БРС важное значение имеют термофильные элементы Li, Na и Si. Соотношение первых двух из них (Li и Na) в подземных водах Култукского полигона отражает вариации температуры трения вследствие активизации сейсмических движений в плоскости разлома, концентрация третьего элемента (Si) возрастает вследствие его растворения в воде при

повышении температуры (Ильясова, Снопков, 2023; Чебыкин, Чувашова, 2023).

После Чулутынского землетрясения 27 ноября 2024 г. концентрация лития в подземных водах ст. 27 выходит через 16 дней (13 декабря) на минимум (0.23 мкг/дм<sup>3</sup>), близкий к фоновому значению (0.20 мкг/дм<sup>3</sup>). Через месяц (16 января 2025 г.), однако, концентрация Li возрастает на половину порядка (до 1.05 мкг/дм<sup>3</sup>). В дальнейшем, в течение двух месяцев (до 16 марта), концентрация Li снижается до 0.4 мкг/дм<sup>3</sup>, но через 2 недели (29 марта) увеличивается до 0.65 мкг/дм<sup>3</sup> (рис. 3б).



**Рис. 3.** Диаграмма временного распределения землетрясений на западе, востоке и в центре БРС с 25 декабря 2024 г. до 29 апреля 2025 г. (а) в сопоставлении с диаграммами временных вариаций концентрации Li (б), отношения Na/Li (в) и концентрации Si (г) в подземных водах ст. 27 Култукского полигона. На панели в горизонтальными штриховыми линиями обозначаются значения температуры  $T(\text{Na/Li})$  по геотермометру (Fouillac, Michard, 1981), на панели г – значения температуры  $T(\text{Si})$  по халцедоновой модификации геотермометра (Arnorsson et al., 1983).

**Fig. 3.** Diagram of the temporal distribution of earthquakes in the west, east, and center of the BRS from December 25, 2024 to April 29, 2025 (a) in comparison with the diagrams of temporal variations in the Li concentration (б), Na/Li ratio (в), and Si concentration (г) in groundwater at station 27 of the Kultuk area. In panel в, the horizontal dashed lines indicate the temperature values  $T(\text{Na/Li})$  according to the

geothermometer (Fouillac, Michard, 1981), in panel  $z$  – the temperature values  $T(\text{Si})$  according to the chalcedony modification of the geothermometer (Arnorsson et al., 1983).

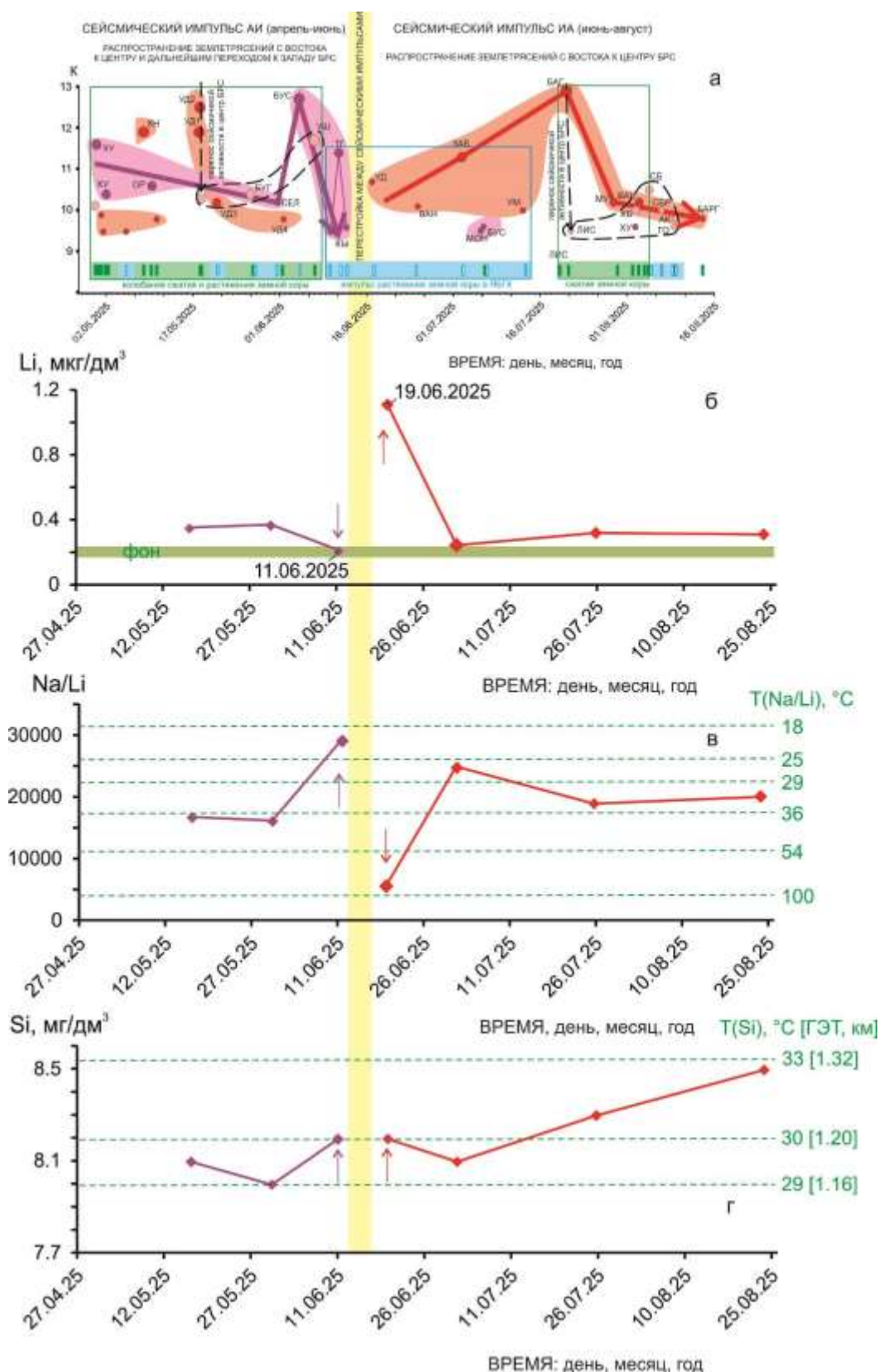
Изменениям концентрации  $\text{Li}$  во времени соответствует изменение температуры трения  $T(\text{Na/Li})$ . Она возрастает при переходе механической энергии в тепловую вследствие движения в плоскости активного разлома. После тектонической подвижки и разогрева в источнике резервуара подземных вод движение замедляется. Порция тепла перераспределяется циркулирующей водой из активной плоскости разлома в окружающие холодные породы. Новая тектоническая подвижка дает новую порцию тепла. В период наблюдений с декабря 2024 г. до апреля 2025 г. устанавливаются два эпизода возрастания температуры трения и два эпизода ее снижения. Сначала (с 13 декабря 2024 г. до 16 января 2025 г.) температура трения  $T(\text{Na/Li})$  возрастает с 25 до 90 °C, затем (до 16 марта) – снижается до 43 °C, до 29 марта – возрастает до 60 °C, до 16 мая – снижается до 40 °C (рис. 3в).

Содержание  $\text{Si}$  растет при возрастании температуры с глубиной в соответствии с региональным геотермическим градиентом 25 °C/км (Голубев, 2007). Его содержание снижается с 13 декабря 2024 г. в течение двух месяцев (до 09 февраля 2025 г.), неравномерно возрастает в течение месяца (до 16 марта) и вновь снижается 29 марта, после чего возрастает до 16 мая. Глубина источника резервуара оценивается интервалом глубинного эквивалента температур (ГЭТ) 1.16–1.20 км (рис. 3г).

Изменения  $T(\text{Si})$  (температуры растворения кремния) в подземных водах и изменения

$T(\text{Na/Li})$  (температуры трения) в целом находятся в противофазе. Сначала температура трения возрастает (происходит тектоническая подвижка), и температура растворения снижается (вода поступает из резервуара с меньшей глубины). С 16 января до 09 февраля тенденция поступления воды с меньшей глубины сохраняется, хотя подвижка прекращается и образовавшаяся при трении порция тепла слегка нивелируется. Релаксация ведет к поступлению воды с большей глубины (с большим содержанием  $\text{Si}$ ) по мере того как аномальная порция тепла в плоскости разлома окончательно исчезает. Новая подвижка 16 марта опять выражается в снижении отношения  $\text{Na/Li}$  (возрастании температуры трения) и снижении  $\text{Si}$  подземных вод (поступлении воды с меньшей глубины).

С наступлением импульса АИ концентрация  $\text{Li}$  в подземных водах ст. 27 слегка превышает фон (0.35–0.37 мкг/дм<sup>3</sup>), а за день до начала перестройки (11 июня 2025 г.) опускается до 0.21 мкг/дм<sup>3</sup>. Эта концентрация близка к среднему значению фона (0.2 мкг/дм<sup>3</sup>). Через 2 дня после перестройки (19 июня) концентрация  $\text{Li}$  (1.2 мкг/дм<sup>3</sup>) возрастает относительно фона на половину порядка, а еще через 12 дней (01 июля) падает до 0.26 мкг/дм<sup>3</sup>, немного не достигая фоновое значение. В ходе дальнейшего развития импульса ИА концентрация  $\text{Li}$  в подземных водах слегка повышается (до интервала 0.32–0.33 мкг/дм<sup>3</sup>) (рис. 4б).



**Рис. 4.** Диаграмма временных вариаций энергетического класса землетрясений (К) импульсов АИ и ИА БРС (а) в сопоставлении с диаграммами временных вариаций концентрации Li (б), отношения Na/Li (в) и концентрации Si (г) в подземных водах ст. 27 Култукского полигона. На панели в горизонтальными штриховыми линиями обозначаются значения температуры  $T(\text{Na/Li})$  по геотермометру (Fouillac, Michard, 1981), на панели г – значения температуры  $T(\text{Si})$  по

халцедоновой модификации геотермометра (Arnorsson et al., 1983). Вертикальными стрелками показаны направления смещения фигуративных точек перед и после сейсмической перестройки 12–17 июня 2025 г.

**Fig. 4.** Diagram of temporal variations of the earthquake energy class (K) in the AJ and JA BRS pulses (a) in comparison with diagrams of temporal variations of the Li concentration (b), Na/Li ratio (c), and Si concentration (z) in groundwater at station 27 of the Kultuk area. In panel c, horizontal dashed lines indicate the temperature values  $T(\text{Na/Li})$  according to the geothermometer (Fouillac, Michard, 1981), in panel z – the temperature values  $T(\text{Si})$  according to the chalcedony modification of the geothermometer (Arnorsson et al., 1983). Vertical arrows indicate directions of displacement of the data points before and after the seismic reorganization of June 12–17, 2025.

Изменения концентрации Li сопровождаются изменениями отношения Na/Li, которое имеет эквивалент температуры трения  $T(\text{Na/Li})$ , рассчитанной по геотермометру (Fouillac, Michard, 1981). Во время импульса АИ отношение Na/Li в подземных водах ст. 27 составляет 16200–16900. За день до перестройки (11 июня 2025 г.) значение этого отношения увеличивается до 29000, а через 2 дня после перестройки (19 июня) резко падает на половину порядка (до 5536). Еще через 12 дней (01 июля) отношение Na/Li возрастает до 25000, а в ходе дальнейшего развития импульса ИА отношение Na/Li несколько снижается и составляет 19100–20000.

Значения температуры трения  $T(\text{Na/Li})$  меняются в широких пределах (20–95 °C). Во время импульса АИ температура трения составляет 36–37 °C, перед перестройкой (11 июня) снижается до 20 °C, после перестройки (19 июня) возрастает до 95 °C, а в дальнейшем (01 июля) снижается до 26 °C. В ходе развития импульса ИА  $T(\text{Na/Li})$  устанавливается в пределах 33–34 °C (рис. 4в). Во время импульсов АИ и ИА температура трения  $T(\text{Na/Li})$  слегка повышается, перед перестройкой падает и резко возрастает после нее, при переходе от импульса АИ к импульсу ИА.

Вариации термофильного элемента Si импульсов АИ и ИА (рис. 4г) заметно различаются с вариациями термофильного отношения Na/Li. Во время импульса АИ концентрация Si в подземных водах составляет 8.0–8.1 мг/дм<sup>3</sup>, увеличиваясь перед перестройкой и после нее до 8.2 мг/дм<sup>3</sup>. В дальнейшем (01 июля) концентрация Si в подземных водах (8.1 мг/дм<sup>3</sup>) снижается до уровня концентрации Si в подземных водах импульса АИ, а в

ходе развития импульса ИА линейно возрастает с течением времени. К 23 августа получается максимальное значение концентрации Si 8.5 мг/дм<sup>3</sup>.

В ходе развития импульсов АИ и ИА температура растворения  $T(\text{Si})$  укладывается, по халцедоновой модификации геотермометра (Arnorsson et al., 1983), в интервал 29–33 °C. Во время импульса АИ температура составляет 29.0–29.5 °C, перед перестройкой и после нее возрастает до 30.0 °C, 01 июля снижается до 29.5 °C и к концу импульса ИА возрастает линейно до 33.0 °C. Из пересчета на региональный геотермический градиент 25 °C/км (Голубев, 2007), получается общий интервал смещения источника подземных вод в резервуаре во время импульсов АИ и ИА от 1.16 до 1.32 км (рис. 4г). В конце импульса ИА источник резервуара подземных вод становится глубже, чем в предимпульсный интервал 2025 г., приблизительно на 120 м.

### Урановые компоненты подземных вод

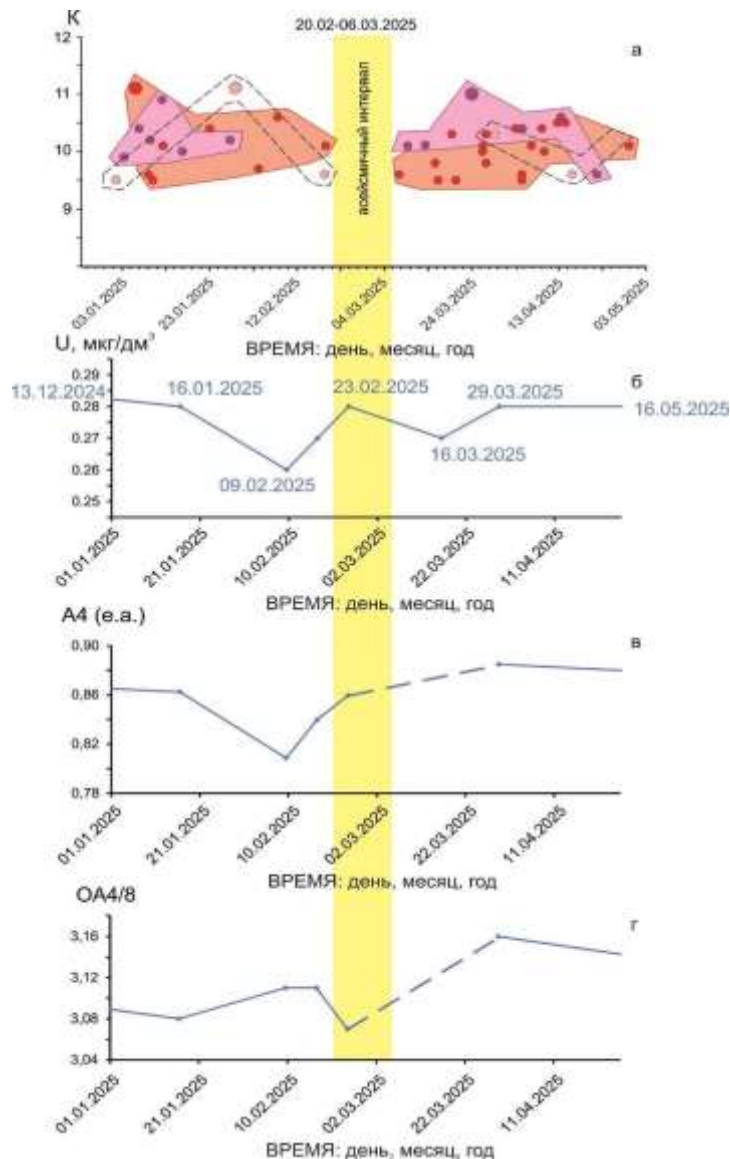
Для компонентов урана определяется его общая концентрация (концентрация  $^{238}\text{U}$ ) в мкг/дм<sup>3</sup>, отношение активностей  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  (ОА4/8) и концентрация  $^{234}\text{U}$  в единицах активности (А4).

С января до апреля 2025 г. концентрация U поддерживается на уровне 0.28 мкг/дм<sup>3</sup> и несколько снижается до и после асейсмичного интервала конца февраля – начала марта (рис. 5б). В вариациях А4 (рис. 5в) наблюдается подобный минимум до асейсмичного интервала. Проявляется тенденция поступления в подземную воду дочернего  $^{234}\text{U}$ , образующегося в результате радиоактивного распада материнского  $^{238}\text{U}$ . Отношение изотопов урана в пробе, отобранной 16 марта, не

определялось, но учитывая зависимость этого компонента от концентрации  $U$ , можно считать, что минимум А4 был и после асейсмичного интервала. Более чувствительное соотношение материнского и дочернего изотопов  $U$  имеет выражение в отношении активностей  $^{234}U/^{238}U$ . Значения ОА4/8 (рис. 4г) возрастают перед асейсмичным интервалом (в условия растяжения) и снижаются во время него (в условиях сжатия).

Во время сейсмического импульса АИ в подземных водах ст. 27, также как до этого

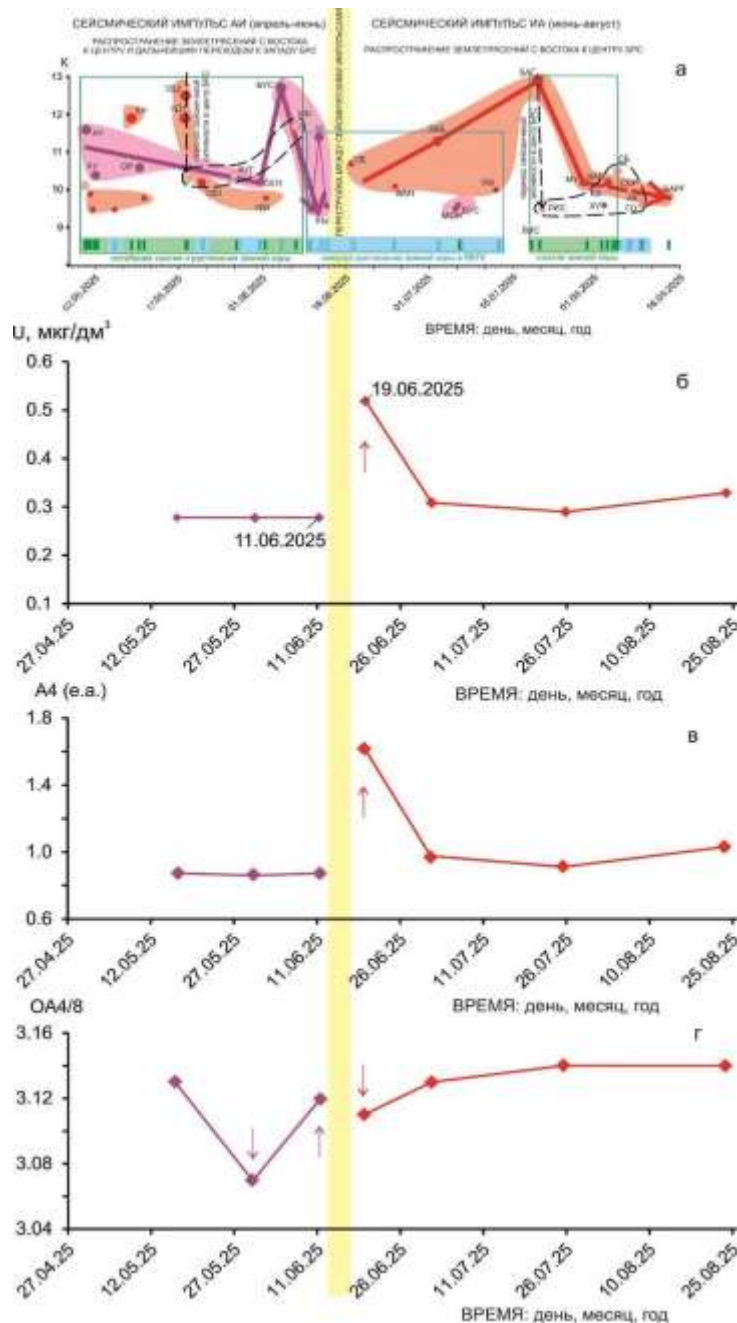
импульса, выдерживается концентрация  $U$  около  $0.28 \text{ мкг/дм}^3$ . На второй день после перестройки и вступления первого (Удоканского) землетрясения импульса ИА 17 июня (т.е. 19 июня) определяется высокая концентрация  $U$  ( $0.52 \text{ мкг/дм}^3$ ). В ходе дальнейшего развития сейсмического импульса ИА концентрация  $U$  снижается сначала до  $0.33 \text{ мкг/дм}^3$ , а затем – еще ниже (находится в интервале  $0.29\text{--}0.33 \text{ мкг/дм}^3$ ) (рис. 6б).



**Рис. 5.** Диаграмма временного распределения землетрясений на западе, востоке и в центре БРС с 25 декабря 2024 г. до 29 апреля 2025 г. (а) в сопоставлении с вариациями концентрации  $U$  (б), А4 (в) и ОА4/8 (г) в подземных водах ст. 27 Култукского полигона. Штриховыми линиями проведены части диаграмм в и г с пропущенными определениями ОА4/8.

**Fig. 5.** Diagram of the temporal distribution of earthquakes in the west, east, and center of the BRS from December 25, 2024 to April 29, 2025 (a) in comparison with variations in concentrations of  $U$  (б), А4 (в) and ОА4/8 (г) in the underground waters of st. 27 Kul'tuk polygon. Dashed lines show parts of diagrams v and g with missing ОА4/8 determinations.

( $\epsilon$ ), and AR (activity ratio) 4/8 ( $\zeta$ ) in groundwater at station 27 of the Kultuk area. Dashed lines indicate parts of diagrams  $\epsilon$  and  $\zeta$  with missing AR4/8 determinations.



**Рис. 6.** Диаграмма временных вариаций энергетического класса землетрясений (K) импульсов АИ и ИА БРС (а) в сопоставлении с вариациями концентрации U (б), A4 (в) и OA4/8 (г) в подземных водах ст. 27 Култукского полигона.

**Fig. 6.** Diagram of temporal variations in the energy class of earthquakes (K) of AJ and JA BRS pulses (a) in comparison with variations in concentration of U (б), A4 (в), and AR (activity ratio) 4/8 ( $\zeta$ ) in groundwater at station 27 of the Kultuk area.

Относительные временные вариации A4 повторяют вариации общего U (рис. 6в). Существенному возрастанию концентрации U после сейсмической перестройки соответствует существенное повышение A4.

Значения OA4/8 широко меняются в подземных водах во время импульса АИ и образуют плавно возрастающую последовательность во время импульса ИА (рис. 6г). OA4/8 возрастает вследствие растяжения

микротрещин, способствующего циркуляции подземных вод, и снижается в результате их сжатия, предотвращающего циркуляцию.

Во время импульса АИ наблюдается чередование согласованного подъема и падения ОВП на ст. 9 и 184 с землетрясениями БРС; выявляются продолжительные эпизоды, соответствующие возрастанию этого показателя (возрастанию сжатия земной коры), и продолжительные эпизоды, соответствующие его снижению (растяжению земной коры). Повышенное значение ОА4/8 (3.13) 16 мая (растяжение микротрещин) сменяется заметным падением ОА4/8 (до 3.07) 30 мая (сжатие микротрещин) (рис. 6г). Землетрясения в эти дни отсутствуют, поэтому сопоставление ОА4/8 с вариациями ОВП не проводится. Подъем ОА4/8 (растяжение микротрещин) до значения 3.12 за один день до начала перестройки (т.е. близкого по времени землетрясению УД 11 июня) (рис. 6г) отвечает общему переходу земной коры БРС в состояние преобладающего растяжения, продолжающегося, судя по вариациям ОВП, во время перестройки и начальной фазы импульса ИА (рис. 6а). В условиях преобладающего растяжения земной коры во время импульса ИА (по вариациям ОВП) образуется плавно возрастающая последовательность значений ОА4/8 от 3.11 19 июня до 3.14 25 июля и 23 августа (рис. 6г) (последовательно нарастающее растяжение микротрещин).

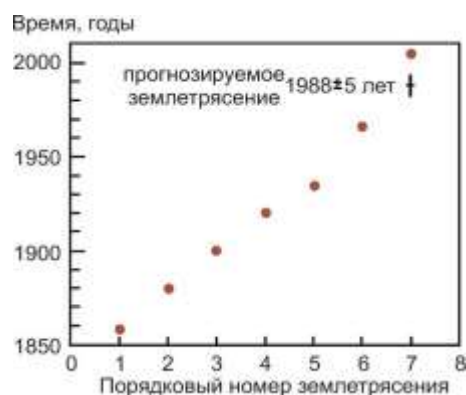
## Обсуждение результатов

### Феномен квазипериодичности развития сейсмического процесса

В работах, направленных на прогноз землетрясений, широко используется их повторяемость во времени с выделением квазипериодов 3, 10, 12 лет и более (Соболев, 1993; Соболев, Пономарев, 2003). В Байкальской сейсмической зоне обращалось внимание на квазипериодичность сильных землетрясений около 10 лет (Шерман, 2014). Учитывалась разность сильнейших сейсмических событий: Южно-Байкальского 25 февраля 1999 г. ( $M=6.0$ ) и Култукского 27 августа 2008 г. ( $M=6.3$ ). Эти землетрясения детально охарактеризованы в работах (Ружич и др., 2002; Радзиминович и др., 2006; Мельникова и др.,

2012). В квазипериодичность 10–12 лет вписывается серия более сильных сейсмических событий Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2023 гг. (Rasskazov et al., 2022).

Повторяемость землетрясений, однако, в природе часто нарушается. Известен пример запада США, где в районе Паркфилда произошло шесть землетрясений  $M \sim 6$  в 1857, 1881, 1901, 1922, 1934 и 1966 годах. В среднем землетрясения в течение длительного времени регулярно реализовались каждые 22 года. Исходя из этой закономерности, следующее землетрясение Паркфилда прогнозировалось в интервале 1983–1993 годов. Геологическая служба США сделала прогноз, согласно которому к 1988 году в районе Паркфилда с вероятностью 95% должно произойти землетрясение магнитудой около 6. Однако землетрясение с близкой магнитудой произошло только 28 сентября 2004 года (рис. 7).



**Рис. 7.** График повторяемости сильных землетрясений (магнитуда около 6) в районе Паркфилд, Калифорния с 1850 года. Вертикальной линией обозначена 5-летняя погрешность прогнозируемого времени седьмого землетрясения (1988 г.). Фактическое время седьмого землетрясения (28 сентября 2004 г.) — кружок, сдвинутый вверх (Stefánsson, 2011).

**Fig. 7.** Graph of the recurrence rate of large earthquakes (magnitude approximately 6) in the Parkfield area, California since 1850. The vertical line shows the 5-year error in the predicted time of the seventh earthquake (1988). The actual time of the seventh earthquake (September 28, 2004) is indicated by the upward-shifted circle (Stefánsson, 2011).

Приведенный пример наглядно демонстрирует нарушение условий, определяющих наблюдаемую регулярность землетрясений.

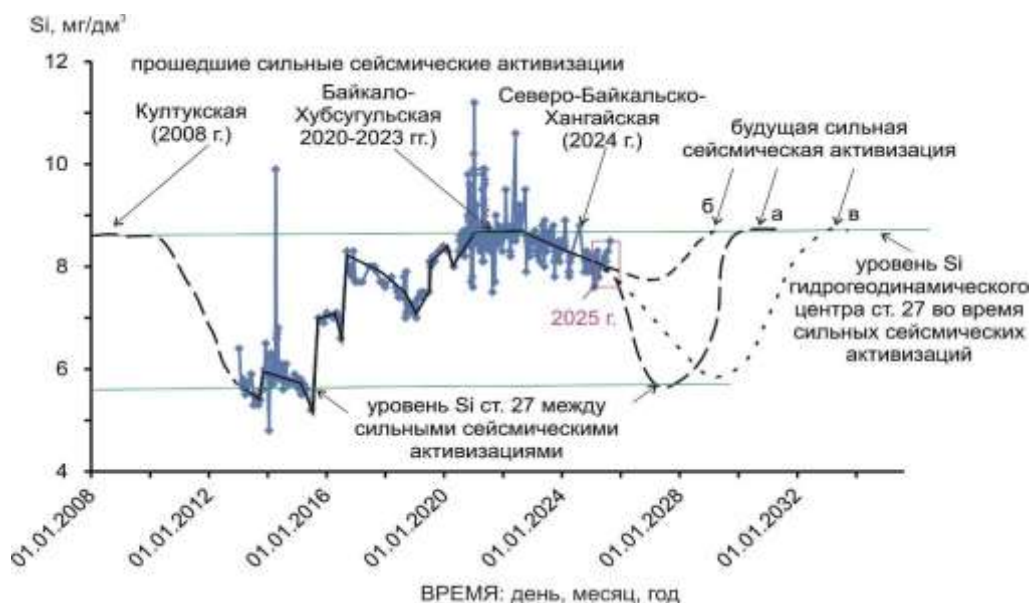
Следовательно, для уверенного прогноза следующего сейсмического события простой констатации регулярности самих землетрясений не достаточно. Необходима более строгая аргументация предположения о предстоящем землетрясении с привлечением дополнительных данных мониторинга о состоянии земной коры.

#### *Содержание Si подземных вод в контексте 10–12-летних сейсмических циклов БРС*

Придерживаясь гипотезы о текущей 10–12-летней цикличности сильных землетрясений в БРС, мы рассматриваем в течение сейсмического цикла ряд: (1) сильное Култукское землетрясение 2008 г. → (2) ослабление землетрясений между сильными сейсмическими активизациями в 2012–2019 гг. → (3) сильные землетрясения 2020–2024 гг. Байкало-Хубсугульской и Северо-Байкальско-Хангайской активизаций → (4) ослабление землетрясений в 2025 г.

Во втором и третьем пунктах обозначенного ряда подземных вод ст. 27 мы определяем весьма существенные изменения Si

подземных вод. В 2013–2015 гг. содержание этого компонента в среднем составляет около  $5.6 \text{ г/дм}^3$ . Во время сильной Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации 2020–2023 гг. образуется гидрогеодинамический центр, имеющий среднее содержание Si  $8.6 \text{ г/дм}^3$ , соответствующее  $T(\text{Si})$  около  $32^\circ\text{C}$ . В течение этой активизации преобладает  $T(\text{Si})$  в интервале  $30\text{--}33^\circ\text{C}$  (глубинный эквивалент температур – ГЭТ –  $1.2\text{--}1.3 \text{ км}$ ). При сильных землетрясениях температура  $T(\text{Si})$  возрастает до  $42^\circ\text{C}$  (ГЭТ до  $1.7 \text{ км}$ ) (Рассказов и др., 2025в). Во время сильной Северо-Байкальско-Хангайской сейсмической активизации 2024 г. отдельные порции подземных вод продолжают поступать из этого же гидрогеодинамического центра. При снижении сейсмичности в 2025 г. содержание Si в подземных водах явно падает (рис. 8). В 2014–2015, 2016, 2017–2019 и 2020–2025 гг. резкий подъем содержания Si сменяется его плавным снижением. В этом отношении вариации Si на отрезке 2020–2025 гг. подобны его вариациям на других временных отрезках, но протекают при максимальном содержании Si и в большем масштабе.



**Рис. 8.** Отражение сейсмической цикличности Байкальской рифтовой системы во временных вариациях концентрации Si подземных вод ст. 27 Култукского полигона. Установленная часть вариационного тренда обозначается черной сплошной линией, предполагаемые части – штриховыми линиями. Предполагаемые штриховые линии проведены исходя из гипотезы о квазипериодичности сильных землетрясений БРС. Кривые б и в предполагают сокращение или расширение временного интервала между сильными сейсмическими активизациями, соответственно,  $<9$  и  $>14$  лет.

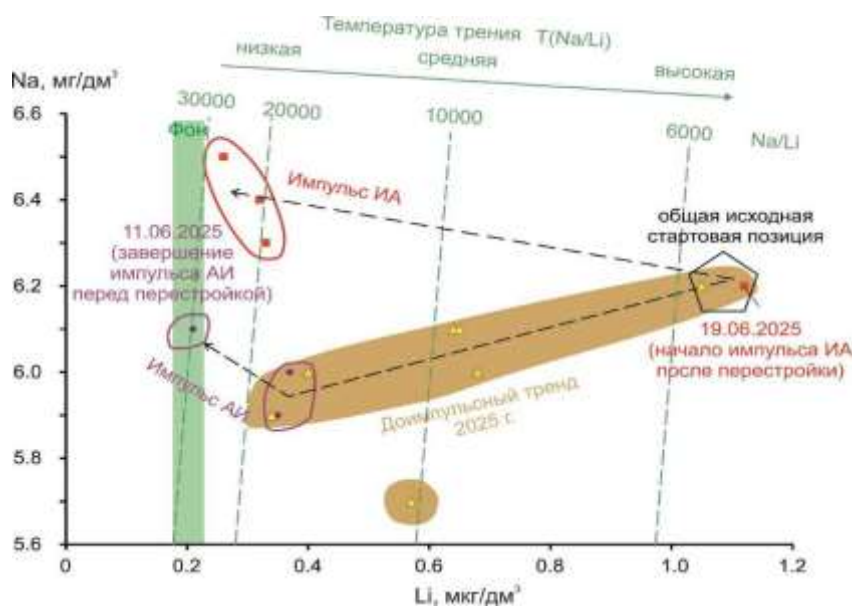
**Fig. 8.** Reflection of seismic cyclicity of the Baikal Rift System in temporal variations of Si concentration in groundwater at station 27 of the Kultuk area. The established part of the trend is highlighted by a solid black line. The hypothetical parts are indicated by dashed lines. The hypothetical dashed lines a

– а' are drawn from the hypothesis on a quasi-periodical strong earthquakes in the BRS of 10–12 years. Curves б and в suggest a reduction or expansion of the time interval between strong seismic reactivations, respectively, <9 and >14 years.

Во время Култукского землетрясения гидрогеохимические исследования не проводились. Если следовать гипотезе циклического развития землетрясений БРС, можно предположить, что в подземных водах при Култукском землетрясении концентрация Si была повышена до уровня гидрогеодинамического центра Байкало-Хубсугульской активизации (~8.6 г/дм<sup>3</sup>). В рамках принятой гипотезы в подземных водах допускается повышенная концентрация Si (~8.6 г/дм<sup>3</sup>) во время будущей сейсмической активизации 2030–2034 гг. (кривая а). Этот сценарий состоится, если содержание Si подземных вод быстро снизится и достигнет уровня Si ст. 27, который регистрировался в 2013–2015 гг. Между тем, в 2025 г. намечается пока только слабое снижение Si. Если такая тенденция продолжится, земная кора останется в возбужденном состоянии и может выйти на новую сейсмическую активизацию в 2028–2029 гг. (кривая б) или раньше. Возможен также сценарий с более длительным постепенным снижением содержания Si и поздним выходом земной коры на сильную сейсмическую активизацию (кривая в).

#### Тренды Na и Li подземных вод 2025 г., переход от сейсмического импульса АИ к импульсу ИА в контексте 10–12-летних сейсмических циклов БРС

На диаграмме Na – Li в 2025 г. отчетливо выделяется тренд доимпульсных подземных вод января–апреля 2025 г. Две фигуративные точки импульса АИ находятся на низколитиевом окончании тренда, а одна точка (11 июня, перед перестройкой) смещается с понижением концентрации лития до уровня фона. Фигуративная точка воды, отобранной сразу после перестройки (19 июня), находится на высоколитиевом окончании тренда доимпульсных подземных вод. Таким образом, в ходе сейсмического импульса АИ и в процессе сейсмической перестройки подземными водами ст. 27 наследуется состояние земной коры, свойственное доимпульсному интервалу 2025 г. с контрастным проявлением низколитиевого (среднетемпературного) и высоколитиевого (высокотемпературного) компонентов. В ходе дальнейшего развития импульса ИА концентрация Na возрастает при низкой температуре трения T(Na/Li) (рис. 9).



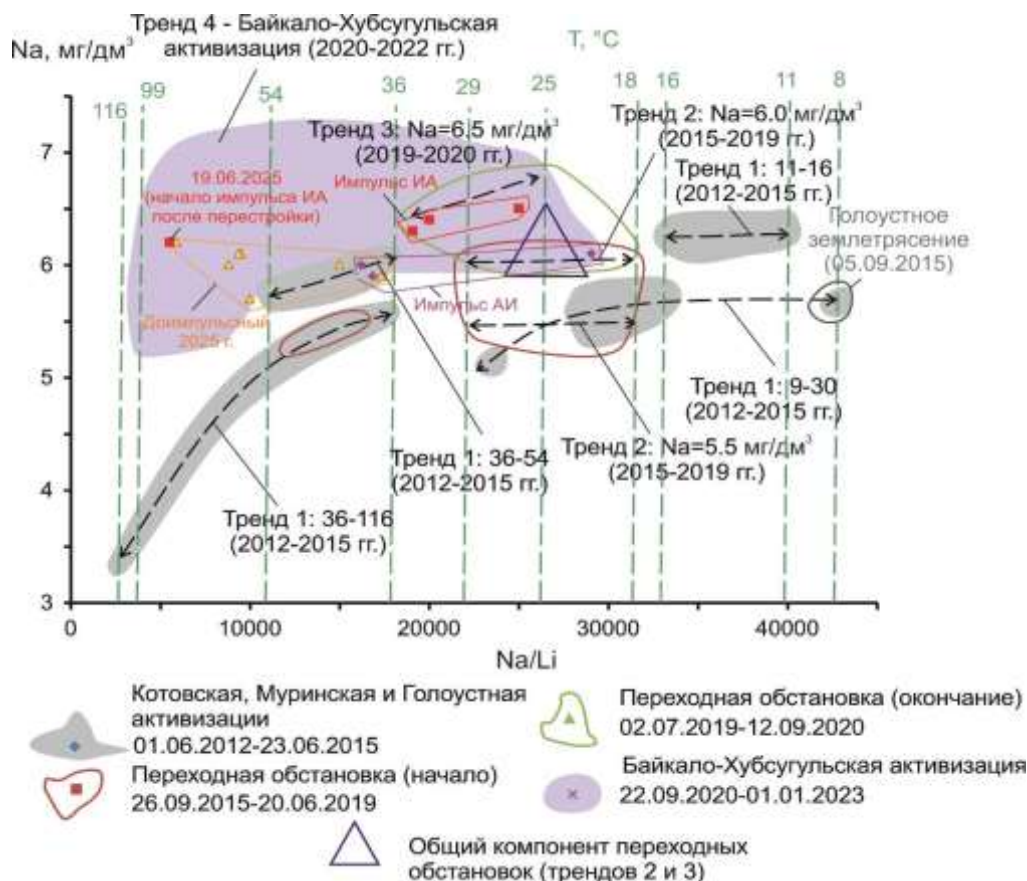
**Рис. 9.** Диаграмма Na – Li подземных вод ст. 27 2025 г. Стрелками показано понижение температуры трения из одной высокотемпературной стартовой позиции с течением времени.

**Fig. 9.** Na versus Li diagram of groundwater at station 27 in 2025. The arrows show decreasing friction temperature over time from one high-temperature starting position.

Мы видим, что температура трения в основном определяется вариациями концентрации Li подземных вод. Импульс АИ продолжает доимпульсный тренд температуры трения  $T(\text{Na/Li})$ . Импульс ИА начинается сразу после перестройки в условиях, характерных для начала доимпульсного температурного тренда трения. Тренд доимпульсного отрезка времени – импульса АИ и тренд импульса ИА обозначают понижение температуры трения

с течением времени. Первый тренд развивается с понижением Na, второй – с его возрастанием.

За весь период гидрогеохимических наблюдений подземные воды ст. 27 имеют широкий диапазон отношения Na/Li, соответствующий низким, средним и высоким температурам трения  $T(\text{Na/Li})$  от 8 до 116 °С (рис. 10).



**Рис. 10.** Распределение фигуративных точек подземных вод ст. 27 2025 г. относительно разно-временных трендов на диаграмме Na – Na/Li. Тренды подземных вод сейсмических активизаций 2012–2015 гг., переходных обстановок 2015–2020 гг. и фигуративное поле Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации показаны по данным (Чебыкин, Чувашова, 2023).

**Fig. 10.** Distribution of groundwater data points of station 27 in 2025 relative to multi-temporal trends on the Na – Na/Li diagram. Trends of groundwater during seismic reactivations in 2012–2015, transitional conditions in 2015–2020, and the data field of the Baikal-Khubsugul seismic reactivation are shown after (Chebykin, Chuvashova, 2023).

Во временном интервале 2012–2015 гг. концентрация Na меняется от 3.5 до 6.5 мг/дм³. На диаграмме Na – Na/Li фигуративные точки группируются в изолированные поля, образующие тренды при высоких и низких температурах трения  $T(\text{Na/Li})$  и объединяющиеся в высокотемпературную и

низкотемпературную совокупности с окончаниями низкого и повышенного содержания Na. Между этими совокупностями трендов существует температурный разрыв в интервале 28–36 °С. При высоких температурах трения (36–116 °С) образуется тренд в виде дуги с низким содержанием Na (3.5–5.5

мг/дм<sup>3</sup>). На отрезке 36–54 °С выстраивается тренд с повышенным содержанием Na (5.7–6.0 мг/дм<sup>3</sup>). При низких температурах трения (8–28 °С) образуется тренд в виде прерывистой дуги с пониженным содержанием Na (5.0–5.6 мг/дм<sup>3</sup>). На отрезке 11–16 °С выстраивается тренд с повышенным содержанием Na (6.2–6.5 мг/дм<sup>3</sup>).

Во временном интервале 2015–2019 гг. сохраняется тенденция образования трендов с низкой концентрацией Na (5.2–5.7 мг/дм<sup>3</sup>) при повышенной температуре трения (36–54 °С) и с повышенной концентрацией Na (5.4–6.1 мг/дм<sup>3</sup>) при пониженной температуре (18–29 °С). По сравнению с температурным диапазоном 8–116 °С подземных вод 2012–2015 гг., температурный диапазон подземных вод 2015–2019 гг. сокращается до 18–53 °С при сохранении температурного разрыва в интервале 28–36 °С. В низкотемпературных составах (18–29 °С) воспроизводится разделение на тренды с низким и повышенным содержанием Na (около 5.5 и 6.0 мг/дм<sup>3</sup>).

В следующем (предсейсмическом) временном интервале 2019–2020 гг. высокотемпературная часть фигуративных точек сокращается. Точки температурного интервала 18–29 °С смещаются от тренда 2: Na=6.0 мг/дм<sup>3</sup> (2015–2019 гг.) с возрастанием Na до 6.9 мг/дм<sup>3</sup> с охватом прежде существовавшего температурного разрыва 29–36 °С. Намечившаяся тенденция смещения точек прогрессирует в сейсмическом интервале 2020–2022 гг., во время которого образуется тренд 4, обозначающий возрастание температуры до 99 °С с относительным снижением концентрации Na в высокотемпературных составах до 5.3 мг/дм<sup>3</sup>.

По характеру температурных вариаций Na подземных вод ст. 27 временные интервалы 2012–2015 и 2015–2019 гг. объединяются во временной отрезок взаимосвязанных событий 2012–2019 гг., а интервалы 2019–2020 и 2020–2022 гг. – во временной отрезок взаимосвязанных событий 2019–2022 гг. Взаимосвязанные события 2012–2019 гг., соответствуют Котовской, Муринской и Голоустной активизациям и началу переходной обстановки. Эти события обозначаются циркулирующими подземными водами с пониженным содержанием Na в широком температурном диапазоне. Взаимосвязанные события 2019–2022 гг. соответствуют предсейсмическому окончанию переходной обстановки и Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации. Эти события обозначаются циркулирующими подземными водами,

обогащенными натрием. После старта от температурного интервала 18–29 °С наблюдается относительное возрастание температуры. Переходное (стартовое для временного отрезка 2019–2022 гг.) содержание Na=6.0 мг/дм<sup>3</sup> при 18–29 °С обозначает общий компонент подземных вод ст. 27.

Фигуративные точки доимпульсных подземных вод 2025 г. (январь–апрель) образуют на рис. 10 фигуративное поле, перекрывающее нижний край фигуративного поля подземных вод Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации и частично совмещается с натриевым высокотемпературным фрагментом подземных вод 2012–2015 гг. С этим же фрагментом совпадают две фигуративные точки подземных вод импульса АИ. Одна фигуративная точка подземных вод этого импульса смещается в область средних температур трения и располагается в области перекрытия фигуративных полей подземных вод переходных обстановок 2015–2019 и 2019–2020 гг. (т.е. попадает в гидрогеодинамический центр подземных вод ст. 27). Тренд подземных вод импульса ИА смещается выше тренда подземных вод импульса АИ и по диапазону температуры трения T(Na/Li) 26–90 °С перекрывает доимпульсный тренд 2025 г. и частично тренд АИ.

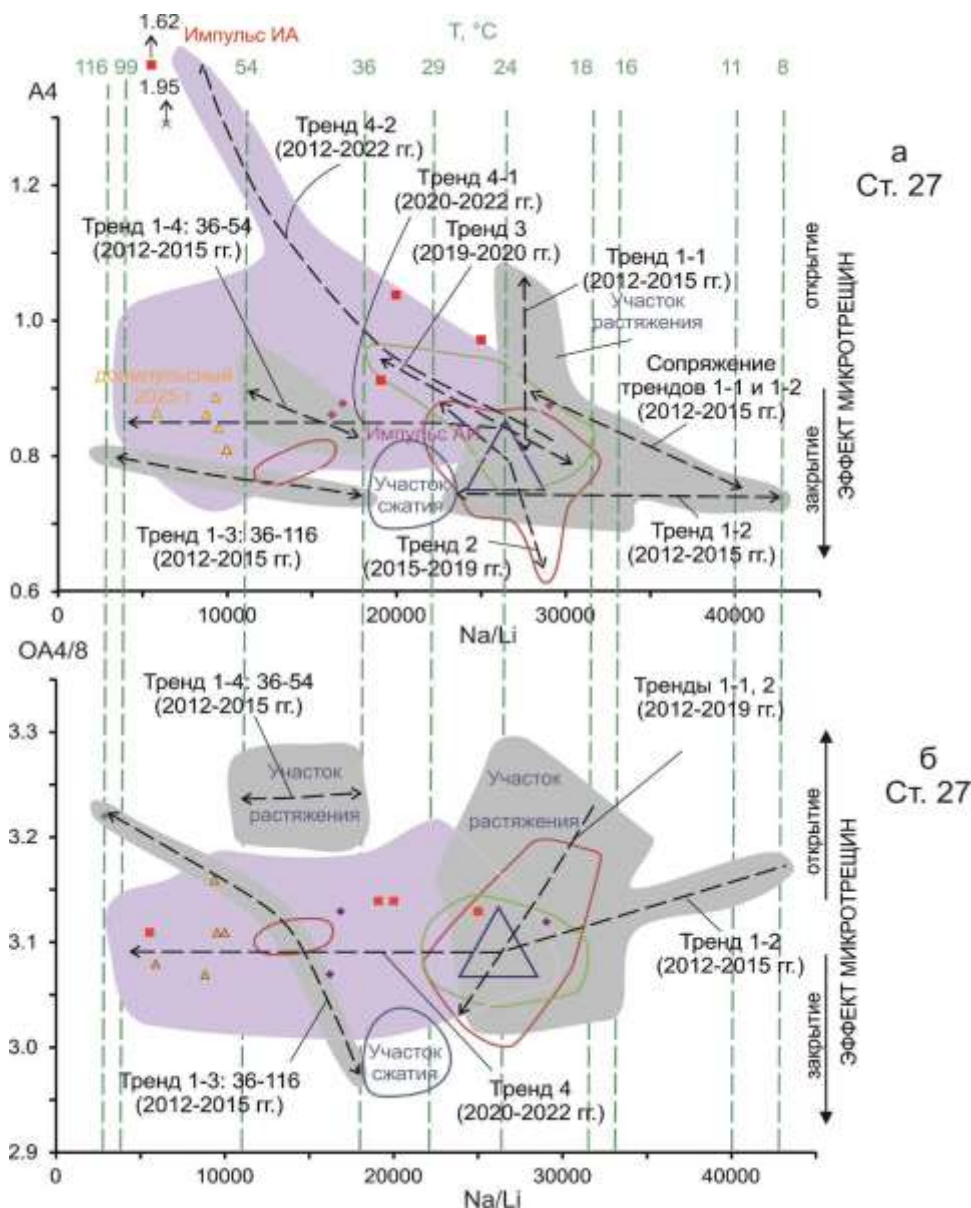
Рассматривая изменения Na и Li в 2012–2022 гг. с переходом от слабой сейсмичности к сильной Байкало-Хубсугульской активизации, нельзя не заметить отсутствие существенного снижения Na (характерного для интервала 2012–2015 гг.) в 2025 г. Более того, концентрация Na несколько возрастает в подземных водах во время сейсмического импульса ИА. Несмотря на относительное снижение энергетических классов землетрясений в 2025 г., по отношению к этим показателям сильных землетрясений предшествующего временного интервала 2020–2024 гг., повышенное содержание Na в подземных водах и существенно варьирующая концентрация Li свидетельствует о состоянии земной коры, характерном для высокой сейсмичности временного интервала 2020–2024 гг. Для возврата земной коры к состоянию 2012–2015 гг. должны произойти изменения подземных вод Култукского резервуара с переходом в дискретные низко-Na тренды.

#### *Тренды урановых компонентов подземных вод в контексте 10–12-летних сейсмических циклов БРС*

Диаграммы А4 – Na/Li и ОА4/8 – Na/Li (рис. 11) подтверждают унаследованный

характер компонентов урана в подземных водах 2025 г. от компонентов подземных вод временного интервала Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации и подчеркивают их отличие от урановых компонентов подземных вод интервала 2012–2015 гг. Вырисовывается единство тренда составов

подземных вод доимпульсного временного отрезка января–апреля с импульсом АИ при заметном отличии тренда составов подземных вод более позднего импульса ИА, т. е. импульса с трендом существенного возрастания А4 при снижении отношения Na/Li (при возрастании температуры трения).



**Рис. 11.** Распределение фигуративных точек подземных вод 2025 г. относительно разновременных трендов подземных вод ст. 27 на диаграммах A4 – Na/Li (a) и OA4/8 – Na/Li (б). Условные обозначения см. рис. 10. Главный гидрогеодинамический центр генерации подземных вод обозначается при  $T(\text{Na/Li}) = 24^\circ\text{C}$ , при температуре более низкой, чем температура участка сжатия, проявляющегося в интервале  $T(\text{Na/Li}) = 28\text{--}36^\circ\text{C}$  (Чебыкин, Чувашова, 2023).

**Fig. 11.** Distribution of groundwater data points in 2025 relative to groundwater trends over time from station 27 in the A4 (activity  $^{234}\text{U}$ ) vs Na/Li (a) and AR4/8 (activity ratio  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) vs Na/Li (b) diagrams. Symbols are as in Fig. 10. The main hydrogeodynamic center of groundwater generation is indicated at the  $T(\text{Na/Li})$  value of about  $24^\circ\text{C}$ , at a temperature lower than the temperature of the compression section, which is displayed in the  $T(\text{Na/Li})$  range of  $28\text{--}36^\circ\text{C}$  (Chebykin, Chuvashova, 2023).

U входит в подземные воды в результате естественных геохимических процессов его высвобождения из вмещающих пород и отложений посредством растворения минералов и/или десорбции U с их поверхности. Степень высвобождения U зависит от состава минералов, содержащих U, степени окисления U и химического состава воды (Fanghänel, Neck, 2002). В окислительных условиях преобладает степень окисления U +6, и U(VI) в основном существует в форме уранил-иона  $(\text{UO}_2)^{2+}$ . Подвижность U в окислительных условиях определяется адсорбцией уранил-иона на поверхность минерала (или десорбцией с его поверхности). Адсорбция U контролируется вариациями pH, ОВП, растворенными карбонатами, фосфатами и природными органическими веществами (Echevarria et al., 2001; Bednar et al., 2007; Zhang et al., 2009). Значительная доля твердофазного U существует в форме уранил-иона, адсорбированного на минеральных поверхностях в окислительных условиях. На высвобождение U сильное влияние оказывает кинетика растворения минералов и десорбции U (Liu et al., 2004; Fox et al., 2012). Восстановительное осаждение U(VI) минералов является эффективным методом иммобилизации U, а окислительное растворение U(IV) – основным механизмом его мобилизации (Finneran et al., 2002; Fredrickson et al., 2002). Химический состав воды влияет на адсорбцию/десорбцию U, изменяя поверхностный заряд и растворимость минералов, степень окисления U, а также форму водных и поверхностных комплексов (Alam, Cheng, 2014).

Хотя по соотношению Na и Li доимпульсные подземные воды и подземные воды импульса ИА ст. 27 имеют близкие стартовые позиции (см. рис. 9), разные значения A4 (и концентрации U) отражают новые условия, установившиеся в резервуаре подземных вод 19 июня 2025 г., во начале импульса ИА, когда возрастает степень окисления подземных вод, способствующая переходу в раствор изотопов  $^{238}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$ . Подобное аномальное обогащение урановым компонентом имеет место в подземных водах ст. 27 13–20 декабря 2020 г. ( $A4=1.05\text{--}1.27$ ,  $U=0.34\text{--}0.41$  мкг/дм<sup>3</sup>), 17 сентября 2021 г. ( $A4=1.29$ ,  $U=0.42$  мкг/дм<sup>3</sup>) и 12 августа 2022 г. ( $A4=1.95$ ,  $U=0.63$  мкг/дм<sup>3</sup>). Это особое косейсмическое состояние подземных вод нуждается в отдельном рассмотрении. Здесь нужно подчеркнуть факт неоднократного воспроизведения сейсмогенного состояния земной коры 19 июня 2025 г., при котором происходило существенное

косейсмическое обогащение ураном подземных вод ст. 27. Обогащение ураном определялось и на других мониторинговых станциях Култукского полигона. Весьма отчетливо зарегистрированы постепенные выходы на максимум концентрации U, значений A4 и ОА4/8 и сход с этих максимумов в подземных водах ст. 184 при подготовке и реализации Быстринского землетрясения 21 сентября 2020 г. (Рассказов и др., 2022).

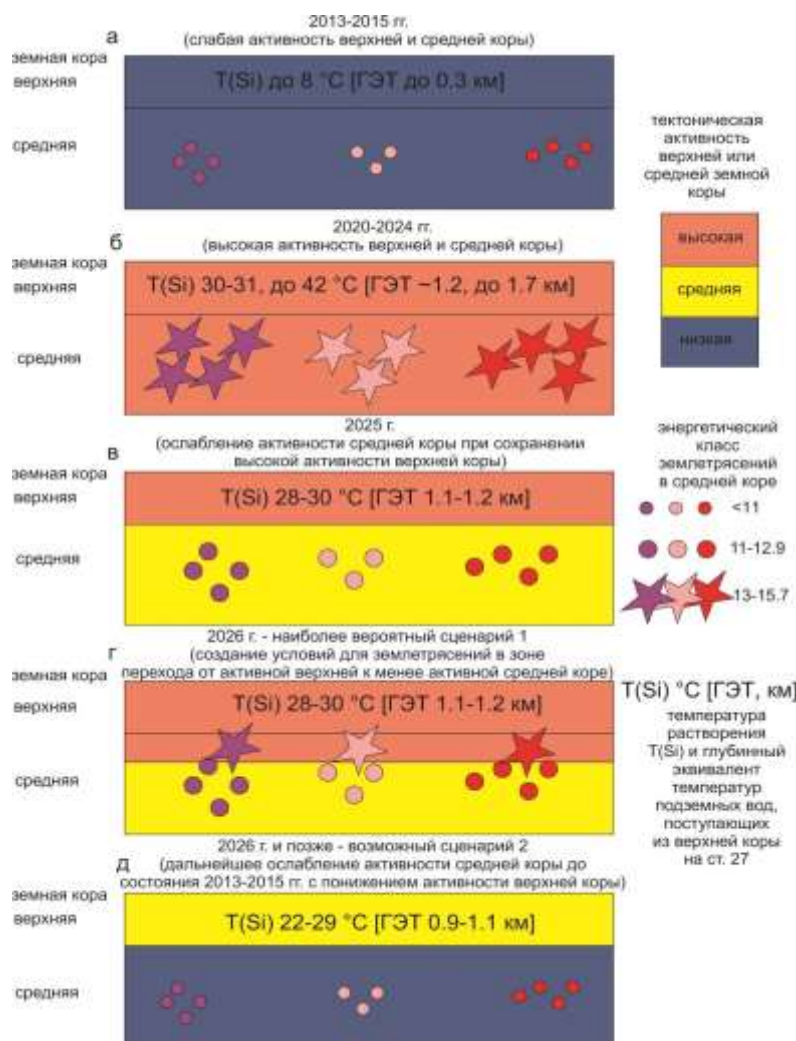
Высокие концентрации U в подземных водах были зарегистрированы до, во время и после землетрясения Лакила, произошедшего в Италии 6 апреля 2009 года ( $M_w = 6.3$ ). Высокие пики этого элемента интерпретировались как показатели проникновения порций флюидов из средней части земной коры в верхнюю (Plastino et al., 2011). Резкое возрастание концентрации урана объяснялось также сейсмическом воздействии на породы, в результате которого образуется перекись водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), резко окисляющая уран и способствующая его переходу в растворенную 6-валентную форму (Freund, 2013). Фактически сейсмическому воздействию подвергаются породы средней коры в области гипоцентров землетрясений. Если эта модель действительно получит подтверждение, возрастание концентрации U в подземных водах ст. 27 может служить маркером потока флюидов из средней коры. Предположение такого контроля косейсмических процессов в земной коре нуждается в дополнительной аргументации.

#### *Соотношение развития процессов в верхней и средней коре БРС*

Итак, гидрогеохимические данные о подземных водах Култукского полигона характеризуют деформационные процессы в резервуаре подземных вод верхней коры, а сейсмичность – деформационные процессы средней коры. Между этими процессами должна существовать парагенетическая связь как между активными слоями разных глубинных уровней единой земной коры.

С учетом низкой активности верхней и средней коры в середине сейсмического цикла (в 2013–2015 гг.), согласованный выход обеих ее частей на высокий уровень активности в 2020–2024 гг. рассматривается как проявление главных событий сейсмического цикла (рис. 12а,б). По записям мониторинговой ст. 27 температура растворения T(Si) подземных вод снижается в 2013–2015 гг. до 8 °C ( $G\Delta T=0.3$  км) и последовательно увеличивается к 2020 г. до значения

геодинамического центра Байкало-Хубсугульской активизации  $T(\text{Si})$  30–31 °C ( $\Gamma\text{ЭТ}=1.2$  км) (Rasskazov et al., 2024).



**Рис. 12.** Схематичные сценарии соотношений процессов, протекающих в верхней и средней частях земной коры БРС: *а* – середина сейсмического цикла в 2013–2015 гг.; *б* – Байкало-Хубсугульская и Северо-Байкальско-Хангайская сейсмические активизации в 2020–2024 гг.; *в* – снижение сейсмичности в 2025 г.; *г, д* – варианты дальнейшего развития процессов в земной коре. В целях упрощения промежуточные состояния земной коры в 2015–2019 и 2019–2020 гг. опускаются.

**Fig. 12.** Schematic scenarios of relationship between processes developed in the upper and middle parts of the earth's crust in the BRS: *a* – the middle of the seismic cycle in 2013–2015; *б* – Baikal-Khubsugul and North Baikal-Hangay seismic reactivations in 2020–2024; *в* – decrease in seismicity in 2025; *г, д* – possible directions for the further development of processes in the earth's crust. For the sake of simplicity, the intermediate states of the earth's crust in 2015–2019 and 2019–2020 are omitted.

Сейсмическая активность БРС в 2025 г. явно снижается относительно сейсмической активности интервала 2020–2024 гг. В развитии гидрогеохимических процессов верхней коры, однако, проявляется инертность. Все показатели химической гидрогеодинамики (термофильные элементы: Na, Li и Si,

урановые компоненты: U, A4, OA4/8) свидетельствуют о сохранении в 2025 г. состояния верхней части земной коры, свойственного для предшествующего временного интервала высокой активности 2020–2024 гг.

С учетом наметившейся тенденции разделения активности в эволюции верхней и

средней коры 2025 г., мы допускаем развитие сценария в земной коре с созданием контраста тектонических движений переходной зоны между ее активной верхней и менее активной средней частями. Усугубление такого контраста может привести к концентрации упругих напряжений в этой переходной зоне, на сравнительно малых глубинах. Не исключен также другой сценарий дальнейшего ослабления активности средней коры до состояния 2013–2015 гг. одновременно с понижением активности верхней коры. В этом случае, сейсмичность БРС на какое-то время войдет в безопасный режим середины сейсмического цикла. Ход предполагаемых сценариев должен отслеживаться постоянным опробованием подземных вод и анализом гидрогеохимических данных.

### **Заключение**

В пространственно-временном распределении землетрясений, вариациях ОВП подземных вод и гидрогеохимических данных выявлены доимпульсный интервал слабой сейсмичности в январе–апреле 2025 г. и последующих сейсмические импульсы: АИ (30 апреля – 12 июня) и ИА (17 июня – 13 августа). Землетрясения первого импульса локализованы на востоке и западе БРС с финальной концентрацией на западе, землетрясения второго смещены на восток БРС с последующим затуханием в центре. Пространственно-временное распределение землетрясений БРС связано с проявлением в земной коре ее западной части сил, вызванных Индо-Азиатской конвергенцией, и в восточной части – сил Японско-Байкальского геодинамического коридора. Сейсмогенные деформации центральной части БРС связаны с преобладанием сил, действующих с запада или востока.

Сейсмогенное состояние земной коры исследовано при сопоставлении данных ОВП, которые регистрировались в подземных водах Култукского полигона в режиме реального времени, и гидрогеохимических данных, которые были получены при редком отборе проб. Вариации изотопного состава урана (снижение/возрастание ОА4/8) в пробах воды, отобранных в день землетрясения или на 1–2 дня позже него хорошо согласуются с данными изменения ОВП на станциях

Култукского полигона, что позволяет рассматривать процессы закрытия/раскрытия микротрещин перколируемых пород и процессы сжатия/растяжения земной коры как согласованные проявления единого процесса.

В контексте развития 10–12-летних сейсмических циклов БРС после сильных землетрясений Байкало-Хубсугульской и Северо-Байкальско-Хангайской активизаций 2020–2024 гг. сейсмичность 2025 г. в целом снижается до энергетического класса  $K < 13$ . Такое снижение может быть следствием перехода земной коры БРС в состояние средней части сейсмического цикла. Об этом может в какой-то мере свидетельствовать относительное сужение диапазона вариаций химических компонентов подземных вод ст. 27 и слабая тенденция снижения содержания Si этой станции. Между тем, возврат подземных вод к низким концентрациям Li, Si и Na, характерным для середины сейсмического цикла 2012–2015 гг. пока не наблюдается. Сохраняются гидрогеохимические параметры подземных вод временного интервала 2020–2024 гг., в котором происходили сильные землетрясения.

Гидрогеохимические характеристики подземных вод свидетельствуют о единой гидрогеодинамике земной коры БРС на начальном отрезке января–апреля и импульса АИ, а также заметном гидрогеодинамическом отличии импульса ИА. Особый интерес представляет общая стартовая позиция высокой температуры трения  $T(\text{Na/Li})$  в резервуаре подземных вод в январе (в начале тренда доимпульсного временного отрезка и импульса АИ) и в июне 2025 г. (в начале импульса ИА) при резком различии состава компонентов урана.

В гидрогеохимических построениях перехода к будущей сильной сейсмической активизации БРС в среднесрочной перспективе от 2025 г. возможно развитие разных сценариев. Мы обращаем внимание на создание контраста тектонических движений в переходной зоне между активной верхней корой и ее средней частью, теряющей активность. Образующийся контраст может привести к концентрации упругих напряжений на сравнительно малых глубинах земной коры.

Возможны и другие сценарии. Чтобы внести определенность в выборе версии развития сейсмичности, необходимо продолжение гидрогеохимического мониторинга.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации проекта Института земной коры СО РАН «Современная геодинамика, механизмы разрушения литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии» (ФВЭФ-2021-0009) и геологического факультета ИГУ «Изучение процессов мантийно-корового взаимодействия и формирования месторождений полезных ископаемых». Аналитические исследования выполнялись на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500se в центре коллективного пользования «Ультрамикроанализ» (ЛИН СО РАН, г. Иркутск). В работе использованы данные о землетрясениях, полученные на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckprf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>) (Карта..., 2025).

### Литература

Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО», 2007. 222 с.

Ильясова А.М., Снопков С.В. Косейсмические вариации термофильного элемента Si подземных вод на западном побережье оз. Байкал // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 72–105. doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.72

Карта эпицентров землетрясений. Иркутск: Байкальский филиал Федерального исследовательского центра Единая геофизическая служба РАН, 2025. <http://www.seis-bykl.ru>

Мельникова В.И., Гилева Н.А., Арефьев С.С., Быкова В.В., Масальский О.К. Култукское землетрясение 2008 г. с  $M_w = 6.3$  на юге Байкала: Пространственно-временной анализ сейсмической активизации // Физика Земли. 2012. № 11. С. 44–62.

Радзиминович Н.А., Мельникова В.И., Саньков В.А., Леви К.Г. Сейсмичность и

сейсмостектонические деформации земной коры Южно-Байкальской впадины // Физика Земли. 2006. № 11. С. 44–62.

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. 2023. Т. 3, № 4. С. 161–181. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.4.161>

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., Снопков С.В., Асламов И.А., Архипенко В.И., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П. Оперативный анализ квазипериодических вариаций ОВП подземных вод и землетрясений Байкальской рифтовой системы в середине 2025 г. // Геология и окружающая среда. 2025а. Т. 5, № 2. С. 46–68. DOI 10.26516/2541-9641.2025.2.46.

Рассказов С.В., Снопков С.В., Асламов И.А., Архипенко В.И., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П., Чувашова И.С. Передовые ОВП записи подземных вод и сейсмичность Байкальской рифтовой системы в конце 2025 г. // Геология и окружающая среда. 2025б. Т. 5, № 4.

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Снопков С.В., Чувашова И.С. Расширяющаяся сейсмичность и парагенетические вариации состава подземных вод в Байкальской рифтовой системе в 2020–2025 гг.: оценка текущего состояния земной коры // Геология и окружающая среда. 2025в. Т. 5, № 2. С. 46–68. DOI 10.26516/2541-9641.2025.2.46.

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.

Ружич В.В., Семенов Р.М., Мельникова В.И. и др. Геодинамическая обстановка в районе Южно-Байкальского землетрясения 25.02.1999 года и его характеристика // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 5. С. 470–483.

Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.

Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. Москва: Наука, 2003. 269 с.

Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. Новосибирское академическое издательство «Гео», 2014. 359 с.

Чебыкин Е.П., Чувашова И.С. Косейсмическая химическая гидрогеодинамика Култукского резервуара подземных вод: индикаторные роли Na/Li,  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$  // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 141–171. DOI 10.26516/2541-9641.2023.1.141.

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

Alam M.S., Cheng T. Uranium release from sediment to groundwater: Influence of water chemistry and insights into release mechanisms // Journal of Contaminant Hydrology. 2014. 164 P. 72–87.

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. Vol. 47. P. 547–566.

Bednar A., Medina V., Ulmer-Scholle D., Frey B., Johnson B., Brostoff W., Larson S. Effects of organic matter on the distribution of uranium in soil and plant matrices // Chemosphere. 2007. Vol. 70, No. 2. P. 237–247.

Echevarria G., Sheppard M.I., Morel J. Effect of pH on the sorption of uranium in soils // J. Environ. Radioact. 2001. Vol. 53, No. 2. P. 257–264.

Fanghänel T., Neck V. Aquatic chemistry and solubility phenomena of actinide oxides/hydroxides // Pure Appl. Chem. 2002. Vol. 74, No. 10. P. 1895–1908.

Finneran K.T., Anderson R.T., Nevin K.P., Lovley D.R. Potential for bioremediation of uranium-contaminated aquifers with microbial U (VI) reduction // Soil Sediment Contam. Int. J. 2002. Vol. 11, No. 3. P. 339–357.

Fox P.M., Davis J.A., Hay M.B., Conrad M.E., Campbell K.M., Williams K.H., Long P.E. Rate-limited U (VI) desorption during a small-scale tracer test in a heterogeneous uranium-contaminated aquifer // Water Resour. Res. 2012. Vol. 48, No. 5. W05512. doi:10.1029/2011WR011472

Fredrickson J.K., Zachara J.M., Kennedy D.W., Liu C., Martine C., Duff M.C., Hunter D.B., Dohnalkova A. Influence of Mn oxides on the reduction of uranium(VI) by the metal-reducing bacterium *Shewanella putrefaciens* // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2002. Vol. 66, No. 18, P. 3247–3262. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(02\)00928-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)00928-6)

Fouillac R., Michard S. Sodium/Lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs // Geothermics. 1981. V. 10. P. 55–70.

Liu C., Zachara J.M., Qafoku O., McKinley J.P., Heald S.M., Wang Z. Dissolution of uranyl microprecipitates in subsurface sediments at Hanford Site, USA // Geochim. Cosmochim. Acta. 2004. Vol. 68, No. 22, P. 4519–4537.

Plastino W., Panza G.F., Doglioni C., Frezzotti M.L., Peccerillo A., De Felice P., Bella F., Povinac P.P., Nisi S., Ioannucci L., Aprili P., Balata M., Cozzella M.L., Laubenstein M. Uranium groundwater anomalies and active normal faulting // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2011. Vol. 288. P. 101–107. DOI 10.1007/s10967-010-0876-y

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov 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.V., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Chebykin E.P. Chemical hydrogeodynamics of the Kultuk groundwater reservoir vs. paragenetically related large earthquakes in the central Baikal Rift System, Siberia // J. Earth Syst. Sci. 2024. Vol. 133. P. 190. <https://doi.org/10.1007/s12040-024-02392-2>

Stefánsson R. Advances in earthquake prediction. Research and risk mitigation. Springer, 2011. 245 p. DOI 10.1007/978-3-540-47571-2

Zhang H., Yang C., Tao Z. Effects of phosphate and fulvic acid on the sorption and transport of uranium(VI) on silica column // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2009. Vol. 279, No.1. P. 317–323. DOI: 10.1007/s10967-007-7177-0

## References

Alam M.S., Cheng T. Uranium release from sediment to groundwater: Influence of water chemistry and insights into release mechanisms // *Journal of Contaminant Hydrology*. 2014. 164 P. 72–87.

Bednar A., Medina V., Ulmer-Scholle D., Frey B., Johnson B., Brostoff W., Larson S. Effects of organic matter on the distribution of uranium in soil and plant matrices // *Chemosphere*. 2007. Vol. 70, No. 2. P. 237–247

Chebykin E.P., Chuvashova I.S. Coseismic chemical hydrogeodynamics of the Kultuk groundwater reservoir: indicator roles of Na/Li,  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ , and  $^{234}\text{U}$  // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 141–171. DOI 10.26516/2541-9641.2023.1.141.

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 the bottom sediments of Lake Baikal // *Geology and Geophysics*. 2007. V. 48, No. 6. C. 604–616.

Chebykin E.P., Rasskazov S.V., Vodneva E.N., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V. First results of  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  monitoring in waters from active faults on the western coast of Southern Baikal // *Reports of the Academy of Sciences*. 2015. V. 460, No. 4. P. 464–467.

Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Vodneva E.N., Rasskazov S.V., Khodger T.V., Grachev M.A. The current state of the waters of the Selenga river on the territory of Russia on the main components and trace elements // *Chemistry for sustainable development*. 2012. V. 20, No. 5. P. 613–631.

Golubev V.A. Conductive and convective heat transfer in the Baikal rift zone. Novosibirsk: Academic publishing house "GEO", 2007. 222 p.

Echevarria G., Sheppard M.I., Morel J. Effect of pH on the sorption of uranium in soils // *J. Environ. Radioact.* 2001. Vol. 53, No. 2. P. 257–264.

Fanghänel T., Neck V. Aquatic chemistry and solubility phenomena of actinide oxides/hydroxides // *Pure Appl. Chem.* 2002. Vol. 74, No. 10. P. 1895–1908.

Finneran K.T., Anderson R.T., Nevin K.P., Lovley D.R. Potential for bioremediation of uranium-contaminated aquifers with microbial U (VI) reduction // *Soil Sediment Contam. Int. J.* 2002. Vol. 11, No. 3. P. 339–357.

Fox P.M., Davis J.A., Hay M.B., Conrad M.E., Campbell K.M., Williams K.H., Long P.E. Rate-limited U (VI) desorption during a small-scale tracer test in a heterogeneous uranium-contaminated aquifer // *Water Resour. Res.* 2012. Vol. 48, No. 5. W05512. doi:10.1029/2011WR011472

Fredrickson J.K., Zachara J.M., Kennedy D.W., Liu C., Martine C., Duff M.C., Hunter D.B., Dohnalkova A. Influence of Mn oxides on the reduction of uranium(VI) by the metal-reducing bacterium *Shewanella putrefaciens* // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2002. Vol. 66, No. 18, P. 3247–3262. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(02\)00928-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)00928-6)

Ilyasova A.M., Snopkov S.V. Coseismic variations of the thermophilic element Si in groundwater on the western coast of Lake Baikal // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 72–105. doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.72

Liu C., Zachara J.M., Qafoku O., McKinley J.P., Heald S.M., Wang Z. Dissolution of uranyl microprecipitates in subsurface sediments at Hanford Site, USA // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2004. Vol. 68, No. 22, P. 4519–4537.

Melnikova V.I., Gileva N.A., Arefiev S.S., Bykova V.V., Masalskiy O.K., 2012. The Kultuk earthquake in 2008 with  $M_w = 6.3$  in the south of Lake Baikal: spatial-temporal analysis of seismic activity // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 48 (11), 44–62.

Plastino W., Panza G. F., Doglioni C., Frezzotti M.L., Peccerillo A., De Felice P., Bella F., Povinec P.P., Nisi S., Ioannucci L., Aprili P., Balata M., Cozzella M. L., Laubenstein M. Uranium groundwater anomalies and active normal faulting // *J Radioanal Nucl Chem.* 2011. Vol. 288. P. 101–107. DOI 10.1007/s10967-010-0876-y

Radziminovich N.A., Melnikov V.I., Sankov V.A., Levi K.G., 2006. Seismicity and seismotectonic deformation of crust South Baikal basin // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 42 (11), 44–62.

Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Snopkov S.V., Arkhipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. First experience in real-time monitoring of coseismic and aseismic ORP, pH, and temperature variations in groundwater from the Kultuk reservoir (Baikal Rift System) // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 4. P. 161–181. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.4.161>

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov 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.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Vodneva E.N., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V., Chechel'nitsky V.V., Gileva N.A. 2015. 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.V., Ilyasova A.M., Bornyakov 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., Snopkov S.V., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Chebykin E.P. Chemical hydrogeodynamics of the Kultuk groundwater reservoir vs. paragenetically related large earthquakes in the central Baikal Rift System, Siberia // *J. Earth Syst. Sci.* 2024. Vol. 133. P. 190. <https://doi.org/10.1007/s12040-024-02392-2>

Rasskazov S.V., Snopkov S.V., Aslamov I.A., Archipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. Operational analysis of weekly quasi-periodical variations in groundwater redox potential and earthquakes of the Baikal Rift System in mid-2025 // *Geology and Environment*. 2025a. Vol. 5, No. 2. P. 46–68. DOI 10.26516/2541-9641.2025.2.46.

Rasskazov S.V., Snopkov S.V., Aslamov I.A., Arkhipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P., Chuvashova I.S. Frontier ORP records of groundwater and seismicity of the Baikal Rift System in the fall of 2025 // *Geology and Environment*. 2025b. Vol. 5, No. 4.

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Chuvashova I.S. Expanding seismicity and paragenetic variations of groundwater compositions in the Baikal Rift System in 2020–2025: Current state assessment of the earth's crust // *Geology and Environment*. 2025b. Vol. 5, No. 2. P. 69–123. DOI 10.26516/2541-9641.2025.2.69.

Ruzhich V.V., Semenov R.M., Melnikova V.I. et al. Geodynamic conditions in the area of the South Baikal earthquake of February 25, 1999 and its

characteristics // *Geology and Geophysics*. 2002. Vol. 43. No. 5. P. 470–483.

Sobolev G.A. Fundamentals of earthquake prediction. Moscow: Nauka, 1993. 313 p.

Sobolev G.A., Ponomarev A.V. Physics of earthquakes and precursors. Moscow: Nauka, 2003. 269 p.

Sherman S.I. The seismic process, and earthquake prediction: tectonophysical concept. Novosibirsk Academic Publishing House "Geo", 2014. 359 p.

Stefánsson R. Advances in earthquake prediction. Research and risk mitigation. Springer, 2011. 245 p. DOI 10.1007/978-3-540-47571-2

Zhang H., Yang C., Tao Z. Effects of phosphate and fulvic acid on the sorption and transport of uranium(VI) on silica column // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2009. Vol. 279, No.1. P. 317–323. DOI: 10.1007/s10967-007-7177-0

**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, 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 the Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies,

tel.: (3952) 51–16–59,

email: rassk@crust.irk.ru

**Чебыкин Евгений Павлович,**

кандидат химических наук, ведущий специалист,

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН

email: epcheb@yandex.ru

**Chebykin Eugene Pavlovich,**

Candidate of Chemical Sciences, leading specialist,

664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,

Institute of the Earth's Crust SB RAS

email: epcheb@yandex.ru

**Снопков Сергей Викторович,**

кандидат геолого-минералогических наук,  
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 Sergei Viktorovich,**

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,  
664025, Irkutsk, Lenin st., 3,  
Irkutsk State University, Faculty of Geology,  
Associate Professor,  
664074, Irkutsk, Kurchatov st., 3,  
Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University,  
Leading Researcher,  
email: snopkov\_serg@mail.ru.

**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,  
664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
Leading Engineer,  
email: ila@crust.irk.ru

**Чувашиова 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,

**Chuvashova Irina Sergeevna,**

candidate of geological and mineralogical sciences,  
664033, Irkutsk, st. Lermontov, 128,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
Senior Researcher,  
tel.: (3952) 51–16–59,  
email: chuvashova@crust.irk.ru

УДК 550.844+546.791.027+632.126  
<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2025.4.99>  
 EDN: SWHNBO

## Передовые ОВП записи подземных вод Байкальской рифтовой системы в конце 2025 г.: магнитосферный контроль слабых землетрясений

С.В. Рассказов<sup>1,2</sup>, И.А. Асламов<sup>3</sup>, С.В. Снопков<sup>2,4</sup>, В.И. Архипенко<sup>3</sup>, А.М. Ильясова<sup>1</sup>,  
 Е.П. Чебыкин<sup>1</sup>, И.С. Чувашова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>3</sup>Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>4</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**Аннотация.** Рассматриваются соотношения вариаций ОВП подземных вод Култукского полигона и землетрясений Байкальской рифтовой системы (БРС) во временном интервале с 24 октября до 31 декабря 2025 г. В начале этого интервала (с 24 до 30 октября) устанавливаются заключительные землетрясения импульса СО (сентябрь-октябрь) с относительно низким энергетическим классом ( $K$  меньше 11.5). После сейсмической структурной перестройки, с 13 до 28 ноября, слабые землетрясения ( $K=9.5-10.5$ ) сопровождают возбуждение магнитосферы, а после следующей сейсмической структурной перестройки, с 08 до 20 декабря, попадают в эпизоды Кр, близкого к 0. Из общего анализа данных, полученных в ноябре и декабре, следует вывод о связи вариаций ОВП подземных вод Култукского полигона и слабых землетрясений БРС в начале и в конце 2025 г. с магнитными бурями на Земле, тогда как в середине 2025 г. расшифровываются 4 сейсмических импульса, во время которых магнитные возмущения не оказывают существенного влияния на состояние земной коры. Сейсмичность 2025 г. характеризуется как процесс, укладывающийся в один год. При реализации сильных землетрясений в предшествующие 2020–2024 годы квазипериодичность сейсмической активности с такой продолжительностью не очевидна, но намечается годичная дискретность процессов земной коры по вариациям концентрации лития (Na/Li температуры) подземных вод ст. 27. Максимумы Li приходятся на первые 5 месяцев каждого года (в период с января до мая). Исходя из этих соотношений делается вывод о том, что сейсмичность начала и конца 2025 г. ослабевает вследствие возрастания температуры (повышения пластичности) в средней коре. Во второй половине 2025 г. обнаружен новый феномен отключения измерительного оборудования в скважинах Култукского полигона из-за землетрясений и магнитных бурь.

**Ключевые слова:** подземные воды, мониторинг, окислительно-восстановительный потенциал, землетрясения, Байкал

## Frontier ORP Records in Groundwater from the Baikal Rift System in the Fall of 2025: Magnetospheric Control of Weak Earthquakes

S.V. Rasskazov<sup>1,2</sup>, I.A. Aslamov<sup>3</sup>, S.V. Snopkov<sup>2,4</sup>, V.I. Arkhipenko<sup>3</sup>, A.M. Ilyasova<sup>1</sup>,

\* Статья получена: 05.12.2025; исправлена: 11.12.2025; принята: 12.12.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рассказов С.В., Снопков С.В., Асламов И.А., Архипенко В.И., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П., Чувашова И.С. Передовые ОВП записи подземных вод Байкальской рифтовой системы в конце 2025 г.: магнитосферный контроль слабых землетрясений // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 4. С. 99–131. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.99. EDN: SWHNBO

Article received: 05.12.2025; corrected: 11.12.2025; accepted: 12.12.2025.

FOR CITATION: Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Snopkov S.V., Arkhipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P., Chuvashova I.S. Frontier ORP records in groundwater from the Baikal Rift System in the fall of 2025: magnetospheric control of weak earthquakes // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 4. P. 99–131. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.99. EDN: SWHNBO

E.P. Chebykin<sup>1</sup>, I.S. Chuvashova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia*

<sup>2</sup>*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

<sup>3</sup>*Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia*

<sup>4</sup>*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract.** Relationships between variations in the oxidation-reduction potential of groundwater in the Kultuk area and earthquakes in the Baikal Rift System (BRS) are considered in the time interval from October 24 to December 31, 2025. At the beginning of this interval (from October 24 to 30), the final earthquakes of the CO (September-October) pulse with a relatively low energy class (K less 11.5) are established. After a seismic structural reorganization, from November 13 to 28, weak earthquakes (K = 9.5–10.5) accompany the excitation of the magnetosphere, and after a next seismic structural reorganization, from December 8 to 20, they fall into episodes of Kp close to 0. From the general analysis of data obtained in November and December, it is inferred that there is a connection between variations in the ORP of the groundwater from the Kultuk area and weak earthquakes of the BRS at the beginning and end of 2025 with magnetic storms on Earth, while in mid-2025, 4 seismic impulses are deciphered, during which magnetic storms do not have a significant impact on the state of the earth's crust. Seismicity in 2025 is characterized as a process confined to one year. During the occurrence of strong earthquakes in preceding interval 2020–2024, the annual quasi-periodicity of seismic activities is not obvious, but an annual discreteness of crustal processes is observed from variations in lithium concentration (Na/Li temperature) of groundwater at station 27. Li concentrations peak in the first five months of each year (from January to May). From these relationships, it is inferred that seismicity in early and late 2025 weakens due to rising temperatures (increasing plasticity) in the middle crust. In the second half of 2025, a new phenomenon was detected: the shutdown of measuring equipment in the Kultuk area boreholes due to earthquakes and magnetic storms.

**Keywords:** groundwater, monitoring, oxidation-reduction potential, earthquakes, Baikal

## Введение

Теоретическое обоснование возможности использования окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) подземных вод для изучения землетрясений было приведено в работах (Balk et al., 2009; Freund, 2013; Baniya et al., 2024), но практически эта возможность до сих пор не реализована. Независимо от теории, авторами настоящей работы было выявлено общее существенное снижение окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) всех подземных вод Култукского полигона при Быстринском землетрясении 22 сентября 2020 г. Измерения проводились портативным прибором «Нанпа». Был сделан вывод об общем характере изменения

ОВП от его несогласованности в разных геологических структурах к согласованию. Исходя из общего отклика ОВП подземных вод на землетрясение, для регистрации ОВП в режиме реального времени в декабре 2023 г. на Култукском полигоне были установлены два сенсора: один – на ст. 9, в краевом Обручевском разломе Южно-Байкальской впадины, другой – на ст. 184, на Култукской тектонической ступени осевой части Байкальской рифтовой системы (БРС) (рис. 1). В процессе анализа данных сенсоров были выявлены разнообразные эффекты, в том числе сопряженные с сейсмогенным состоянием коры (Рассказов и др., 2023, 2024; Асламов и др., 2024; Снопков и др., 2024; Чебыкин и др., 2024).



**Рис. 1.** Схема расположения мониторинговых скважин ст. 9 (Земляничная, КБЖД) и ст. 184 (Школьная) с установленными сенсорами для измерений ОВП, pH и температуры в режиме реального времени на западном побережье оз. Байкал (пос. Култук). Условия установки сенсоров охарактеризованы в работе (Рассказов и др., 2023).

**Fig. 1.** Layout of monitoring wells station 9 (Zemlyanichnyi, Circum-Baikal Railway) and station 184 (Shkolnaya) on the western coast of Lake Baikal (Kultuk settlement) with installed sensors for real-time measuring ORP, pH, and temperature. The installation conditions of the sensors are described by (Rasskazov et al., 2023).

В 2025 г. проводились регулярные наблюдения ОВП. Результаты оперативного анализа данных мониторинга по 5–7 дневным временным отрезкам публиковался в статьях в ходе их получения (Рассказов и др., 2025а,б,в,г). В начале 2025 г. анализ данных, касающихся сейсмичности, оказался затрудненным из-за мешающих эффектов многочисленных магнитных бурь. С 30 апреля, однако, вариации ОВП стали отчетливо проявляться в связи с землетрясениями БРС. Повышенные значения ОВП обеих станций мониторинга соответствовали землетрясению в условиях сжатия земной коры, пониженные значения этого показателя – землетрясению в условиях растяжения. Первые закономерности вариаций ОВП в связи с развитием сейсмичности были намечены к началу июля, а к 19 августа были обозначены силовые импульсы сейсмогенных деформаций апреля-июня (АИ) и июня-августа (ИА). К 24 октября разработан подход к анализу передовых записей ОВП, полученных в оперативном режиме в начале осени. Между тем, ряд данных гидрогеодинамического

мониторинга Култукского полигона показал, что в верхней коре БРС в 2025 г. по-прежнему сохраняется состояние, свойственное сильным землетрясениям 2020–2024 гг. (Рассказов и др., 2025д).

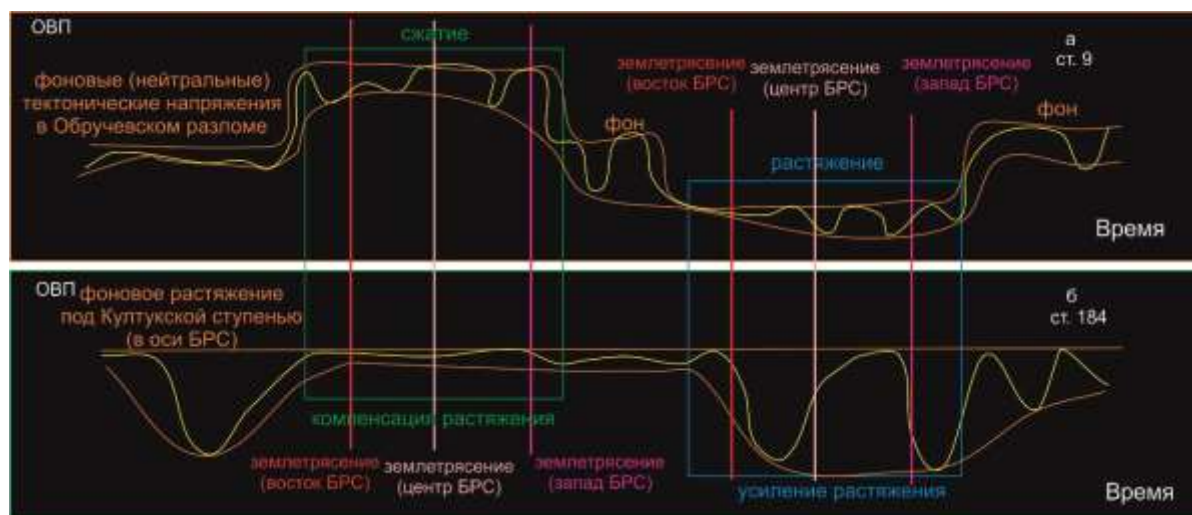
Цель настоящей статьи – оценить текущее сейсмогенное состояние земной коры БРС по передовым непрерывным записям ОВП подземных вод с выделением сил, генерирующих землетрясения во временном интервале с 24 октября до конца 2025 г.

### **Методика обработки данных**

Для выявления действия сейсмогенерирующих сил растяжения и сжатия в земной коре проводится отслеживание изменений ОВП в режиме реального времени с ежедневным детальным анализом соотношений этого параметра с сейсмичностью. Выявляются связи землетрясений, происходящих в разных частях БРС, с эпизодами согласованных вариаций ОВП подземных вод ст. 9 и 184, связанных либо с проявлением сжатия в краевом Обручевском разломе Южно-Байкальской впадины БРС и одновременной

компенсацией растяжения под Култукской тектонической ступенью (в оси БРС), либо с проявлением растяжения в Обручевском

разломе при одновременном усилении растяжения под Култукской тектонической ступенью (рис. 2).



**Рис. 2.** Схематичные диаграммы интерпретации откликов ОВП на землетрясения разных частей БРС при сжатии и растяжении земной коры в Обручевском разломе – под ст. 9 (а) и при компенсации и усилении растяжения под Култукской тектонической ступенью – под ст. 184 (б). Здесь и далее информация по землетрясениям БРС дается цветом: на востоке – красным, в центре – розовым, на западе – малиновым. Сжатие отображается зеленым цветом, растяжение – синим.

**Fig. 2.** Schematic diagrams interpreting responses of the ORP to earthquakes in different parts of the BRS during crustal compression and extension in the Obryuchev Fault – under station 9 (a) and during compensation and amplification of extension beneath the Kultuk tectonic step – under station 184 (b). From here on, information on BRS earthquakes is color-coded: red in the east, pink in the center, and crimson in the west. Compression is shown in green, extension in blue.

Измерения ОВП подземных вод проводятся иногда с сильной прокачкой скважины ст. 9. Прокачки ст. 184 в целом слабее прокачек ст. 9. Разница в прокачках скважин отражается в разных диапазонах вариаций температуры подземных вод. Графики ОВП совмещаются во времени с графиками температуры, которая во время прокачки подземных вод скважин может меняться, либо оставаться стабильной. Графики температурных вариаций рассматриваются как дополнительная характеристика, полезная для корректной интерпретации мониторинговых данных.

Вариации pH подземных вод не рассматриваются, поскольку выяснение причин кислотно-щелочных переходов подземных вод требует специального анализа данных, выходящего за рамки задач, связанных с оперативным отслеживанием изменений ОВП,

направленным на оценку сейсмогенных деформаций земной коры.

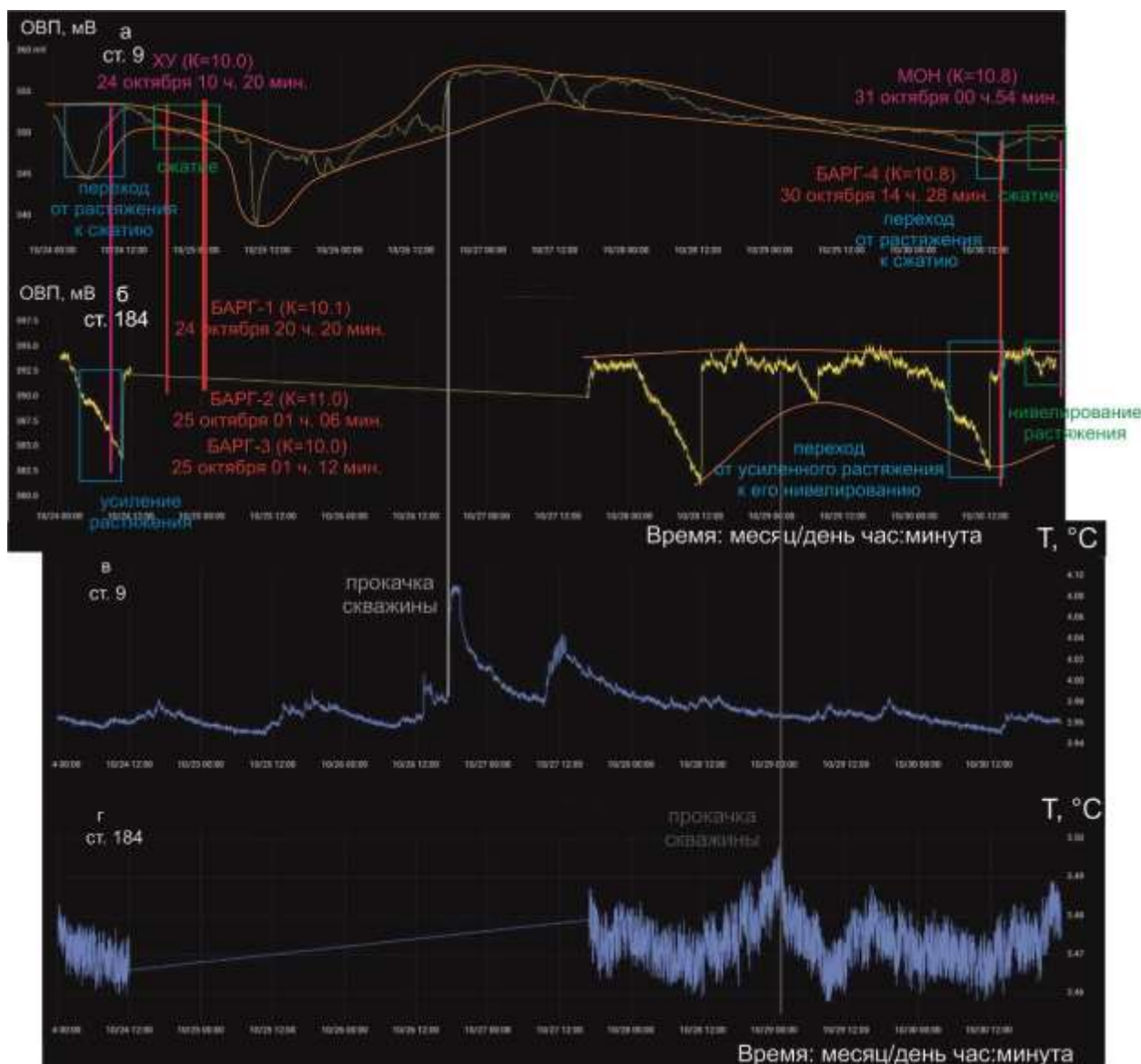
### **Результаты анализа мониторингового ряда ОВП в соотношении с землетрясениями (24 октября – 31 декабря 2025 г.)**

24 – 30 октября

Землетрясения интервала 24–30 октября реализуются в стиле Байкало-Хубсугульской активизации, в которой главное Хубсугульской землетрясение 11 января 2021 г. ( $K=15.7$ ,  $M=6.8$ ), произошедшее на западе БРС, сопровождалось многочисленными афтершоками. Кластером афтершоков была маркирована сейсмоактивная акватория северо-западного Хубсугула и прилегающая ей сухопутная территория Прихубсугулья.

24 октября в 10 ч. 20 мин. в Хубсугульском кластере проявляется слабое сейсмическое событие ХУ ( $K=10.0$ ), которое служит в качестве спускового механизма для активизации сейсмичности на востоке БРС, в северной части Баргузинского хребта, где 10 ч. спустя происходит землетрясение БАРГ-1 ( $K=10.1$ ), а еще через 5 ч. – землетрясения БАРГ-2

( $K=11.0$ ) и БАРГ-3 ( $K=10.0$ ). После асейсмичного эпизода, длящегося 5.5 дней, 30 октября там же происходит еще одно землетрясение (БАРГ-4,  $K=10.8$ ), а 12 часов спустя – Мондинское землетрясение (МОН,  $K=10.8$ ) (рис. 3). Последнее возвращается на запад БРС и реализуясь вблизи Хубсугульского афтершокового кластера.



**Рис. 3.** Диаграммы вариаций ОВП 24–30 октября 2025 г. в подземных водах ст. 9 (а) и ст. 184 (б) в сопоставлении с вариациями температуры в подземных водах этих же станций (в, г). Здесь и далее информация по землетрясениям БРС приводится по местному времени с корректировкой относительно данных сайта (Карта..., 2025). ХУ – Хубсугул (кластер афтершоков), БАРГ – север Баргузинского хребта, МОН – Монды.

**Fig. 3.** Diagrams of ORP variations on October 24–30 in groundwater of station 9 (a) and station 184 (b) in comparison with temperature variations in groundwater of the same stations (c, d). From here on, information on BRS earthquakes is given in local time with adjustments in relation to the data from (Map..., 2025). ХУ – Khubsugul (cluster of aftershocks), БАРГ – north of the Barguzin ridge, МОН – Mondy.

Наблюдается зарождение неустойчивости земной коры в ослабленной Хубсугульской зоне, отклик сейсмических событий на севере Баргузинского хребта и отдача сейсмогенных деформаций вблизи Хубсугульской ослабленной зоны. Эти взаимосвязанные сейсмические события запада и востока БРС продолжаются 7 дней.

Перед землетрясением ХУ 24 октября ОВП подземных вод ст. 184 находится в глубоком минимуме, а ОВП подземных вод ст. 9 выходит из минимума на максимум. Косейсмическое ОВП подземных вод ст. 184 отвечает растяжению под Култукской тектонической ступенью (в оси БРС). Косейсмическое ОВП подземных вод ст. 9 свидетельствует о выходе земной коры в Обручевском разломе из состояния растяжения и ее переходе в состояние сжатия. Следовательно, землетрясение ХУ соответствует согласованному растяжению земной коры. Последующие землетрясения БАРГ-1–БАРГ-3 происходят при повышенном ОВП ст. 9, соответствующем проявлению сжатия в Обручевском разломе.

30 октября, перед землетрясением БАРГ-4, ОВП подземных вод ст. 9 и 184 согласованно переходит от минимумов к максимумам. Косейсмическое ОВП подземных вод обеих станций создается общим растяжением земной коры. В ночь с 30 на 31 октября сохраняются повышенные значения ОВП подземных вод ст. 9 и 184, свидетельствующие о реализации землетрясения МОН в условиях сжатия земной коры.

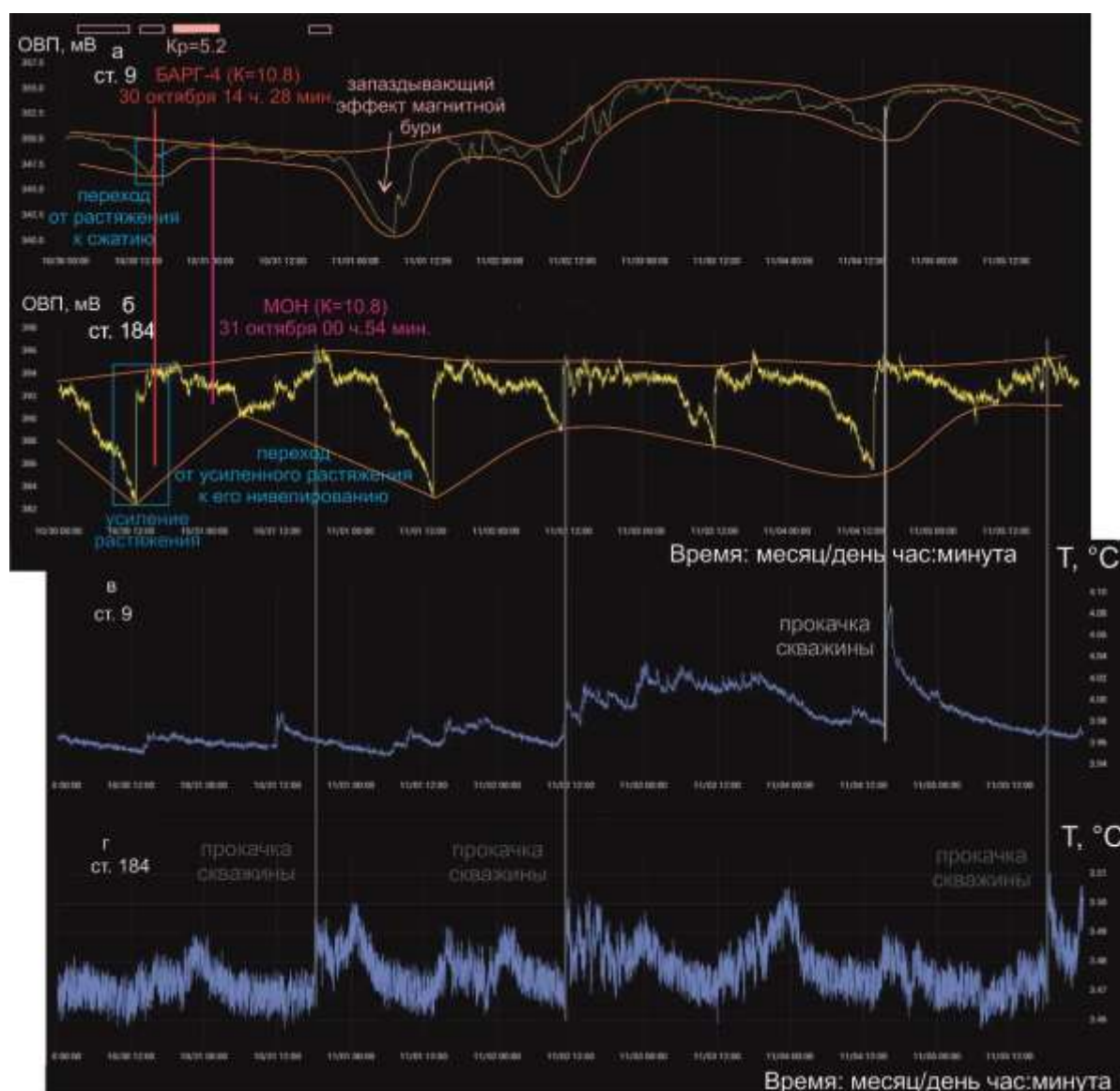
Обращает на себя внимание также чередование глубоких и неглубоких минимумов ОВП ст. 184. Чередование через день началось 21 октября, во время Бусийгольского землетрясения (БУС,  $K=12.3$ ) (Рассказов и

др., 2025д). В этот день было проведено гидрогеохимическое опробование станций Култукского полигона. В подземных водах устья ст. 9 (КБЖД) портативным прибором Hanna в 16 ч. 30 мин. получено значение ОВП 300 мВ, а в подземных водах устья ст. 184 в 16 ч. 50 мин. – значение ОВП 306 мВ.

Вывод: состояние земной коры БРС характеризуется упорядоченным чередованием глубоких и неглубоких минимумов ОВП ст. 184, начавшимся 21 октября во время землетрясения БУС ( $K=12.3$ ). После него в том же упорядоченном чередовании глубоких и неглубоких минимумов ОВП ст. 184 реализуются серии землетрясений на западе и востоке БРС 24 и 30 октября при одинаковых условиях перехода от растяжения к сжатию земной коры.

#### *30 октября – 5 ноября*

На первый день этого временного интервала (30 октября), входящий в предшествующий интервал 24–30 октября, приходится землетрясение БАРГ-4 и МОН. Вечером 30 октября происходит небольшая магнитная буря ( $K_p=5.2$ ) с предшествующими и последующими слабыми эффектами возбуждения ионосферы. Запаздывающий эффект магнитной бури отражается 1 ноября в виде глубокого минимума ОВП. Возможно, ее последствия ощущаются также в менее выразительном минимуме 2 ноября (рис. 4). Чередование глубоких и неглубоких минимумов ОВП подземных вод ст. 184, начавшееся 21 октября, нарушается 2 ноября, когда за неглубоким минимумом следуют два минимума с последовательным увеличением глубины, а амплитуда следующего минимума уменьшается.



**Рис. 4.** Диаграммы вариаций ОВП 30 октября – 5 ноября 2025 г. в подземных водах ст. 9 (а) и ст. 184 (б) в сопоставлении с вариациями температуры в подземных водах этих же станций (в, г).

**Fig. 4.** Diagrams of ORP variations on October 30 – November 05 in groundwater of station 9 (a) and station 184 (b) in comparison with temperature variations in groundwater of the same stations (c, d).

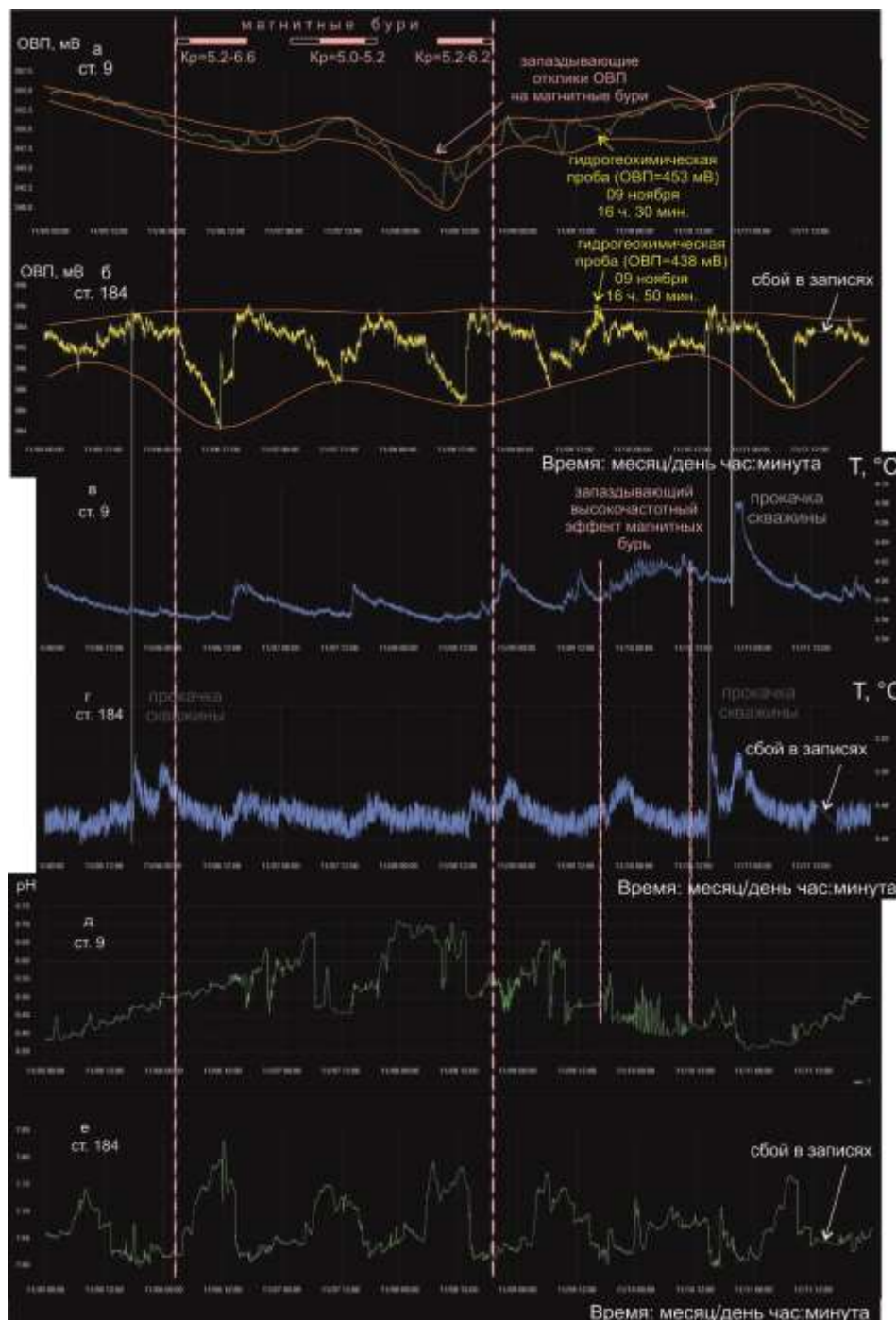
Вывод: в интервале 30 октября – 5 ноября состояние земной коры определяется чередованием глубоких и неглубоких минимумов ОВП подземных вод ст. 184, начавшимся 21 октября при землетрясении БУС и завершившимся 2 ноября после взаимосвязанной серии землетрясений ХУ–БАРГ–МОН 24–30 октября, спровоцированной событием ХУ в Хубсугульском афтершоковом кластере. 31 октября начинается асейсмичный временной интервал.

#### 5–11 ноября

В этом интервале в течение трех суток (6–8 ноября) возобновляются магнитные бури, отзывающиеся в запаздывающих ОВП-минимумах подземных вод ст. 9. В подземных водах ст. 9 регистрируются также аномальные высокочастотные колебания температуры и pH с 16 ч. 30 мин. 10 ноября до 10 ч. 00 мин. 11 ноября, запаздывающие относительно магнитных бурь. Колебания этих параметров более чувствительны к магнитным бурям, чем колебания ОВП. Кроме того, 11 ноября с 12 ч. 54 мин. до 17 ч. 08 мин. (в

течение 4 ч. 14 мин.) вследствие прошедших магнитных бурь происходит сбой в

измерениях ст. 184 (рис. 5). Асейсмичный интервал продолжается.



**Рис. 5.** Диаграммы вариаций ОВП 05–11 ноября 2025 г. в подземных водах ст. 9 (а) и ст. 184 (б) в сопоставлении с вариациями температуры (в, г) и pH (д, е) в подземных водах этих же станций. Графики pH помещаются на этом рисунке дополнительно, чтобы продемонстрировать более высокую чувствительность этого параметра подземных вод ст. 9 к магнитным бурям.

**Fig. 5.** Diagrams of ORP variations on October 24–30 in groundwater of station 9 (a) and station 184 (b) in comparison with temperature (в, г) and pH (д, е) variations in groundwater of the same stations. The pH graphs are included in this figure to demonstrate the higher sensitivity of these groundwater parameters at station 9 to magnetic storms.

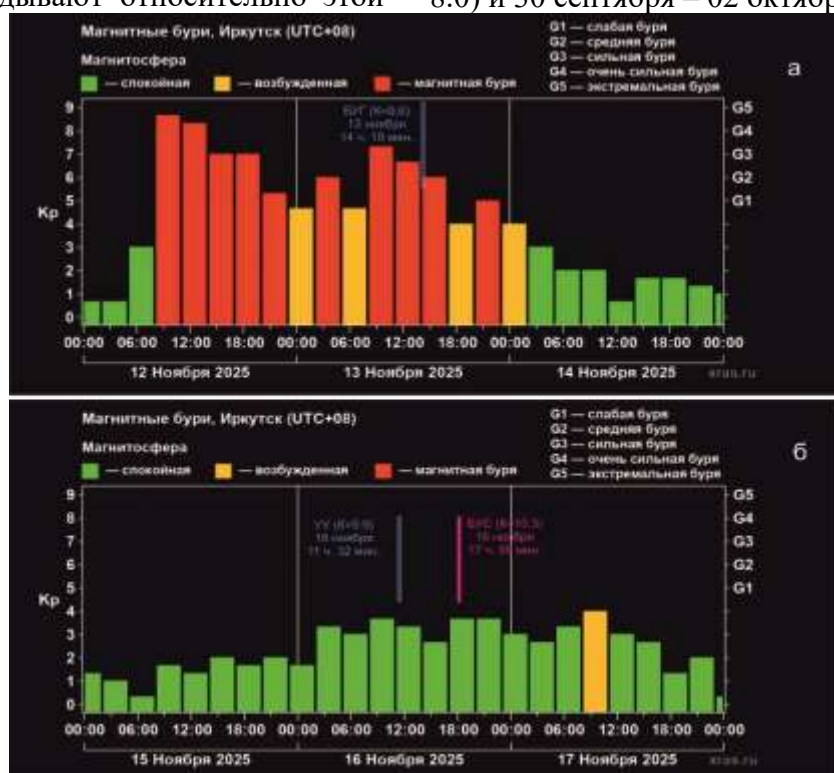
Вывод: в интервале с 06 до 08 ноября происходят три магнитные бури (Кр до 6.6) с невыразительными запаздывающими откликами в подземных водах ст. 9 в интервале 08–11 ноября. Запаздывающий отклик магнитных бурь ощущается в высокочастотных колебаниях температуры и рН ст. 9 10–11 ноября. 11 ноября с 12 ч. 54 мин. до 17 ч. 08 мин. (в течение 4 ч. 14 мин.) вследствие прошедших магнитных бурь происходит сбой в измерениях ст. 184. Землетрясения отсутствуют.

### 11–17 ноября

В этом временном интервале снова происходит магнитная буря, но, в отличие от магнитной бури, рассредоточенной в предшествующую неделю на 3 отдельных дня, новая сконцентрирована в едином интервале, длившемся почти двое суток. Буря начинается 12 ноября в интервале 8–11 ч. резко (начальное Кр=8.7) и продолжается с варьирующими значениями Кр более 5.0 (до 02 ч. 14 ноября) (рис. 6). Отклики ОВП в подземных водах ст. 9 в целом запаздывают относительно этой

магнитной бури и подразделяются на высокочастотную фазу их вступления (с 20 ч. 13 ноября до 14 ч. 15 ноября) и низкочастотную фазу завершения с 14 ч. 15 ноября до 18 ч. 16 ноября). Высокочастотные отклики магнитной бури наблюдаются в разноамплитудных вариациях температуры и рН подземных вод ст. 9 (рис. 7).

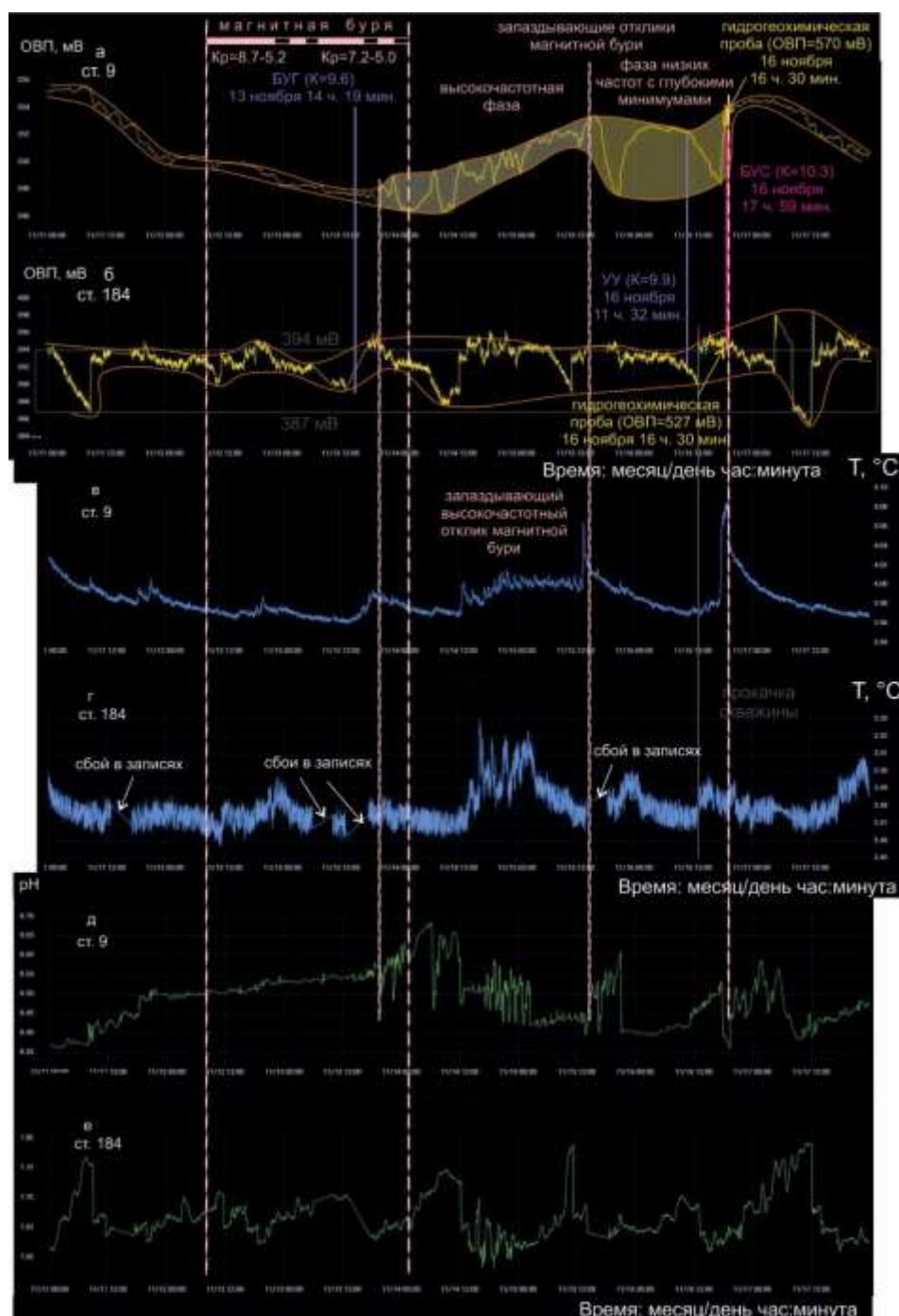
По значению Кр=8.7 эта магнитная буря – сильнейшая в 2025 г. Мы обращаем внимание на новые сбои записей ОВП, Т и рН ст. 184 перед магнитной бурей (11 ноября, с 12 ч. 54 мин. до 17 ч. 08 мин., продолжительность остановки измерений 4 ч. 14 мин.), во время магнитной бури (13 ноября, с 06 ч. до 10 ч. 16 мин., продолжительность остановки измерений 4 ч. 12 мин.; с 12 ч. 54 мин. до 17 ч. 36 мин., продолжительность остановки измерений 4 ч. 42 мин.) и после магнитной бури (15 ноября, с 14 ч. 16 мин. до 18 ч. 26 мин., продолжительность остановки измерений 4 ч. 10 мин.). Близкие по силе магнитные бури происходили в 2025 г. 01–02 января (Кр до 8.0), 16–17 апреля, (Кр до 7.5), 01–03 июня (Кр до 8.0) и 30 сентября – 02 октября (Кр до 7.2).



**Рис. 6.** Соотношение слабых землетрясений центра и запада БРС с наиболее сильной магнитной бурей 2025 г., произошедшей 12–13 ноября 2025 г. (а), и последующим едва заметным поднятием Кр 16–17 ноября (б). Сначала, 13 ноября, реализуется Бугульдейское землетрясение (БУГ), затем, 16 ноября, – Улан-Удэнское (УУ) и Бусийнгольское (БУС). Здесь и далее использованы данные сайта магнитных бурь Иркутска [https://xras.ru/magnetic\\_storms.html](https://xras.ru/magnetic_storms.html)

**Fig. 6.** Correlation of weak earthquakes in the central and western BRS with the strongest magnetic storm of 2025, which occurred on November 12–13, 2025 (a), and the subsequent barely noticeable

uplift of Kr on November 16–17 (δ). First, on November 13, the Buguldeyka earthquake (БУГ) occurred, followed on November 16 by the Ulan-Ude (УУ) and Busiyngol (БУС) earthquakes. Data from the Irkutsk magnetic storm website, [https://xras.ru/magnetic\\_storms.html](https://xras.ru/magnetic_storms.html), are used here and below.



**Рис. 7.** Диаграммы вариаций ОВП 11–17 ноября 2025 г. в подземных водах ст. 9 (а) и ст. 184 (б) в сопоставлении с вариациями температуры (в, з) и рН (д, е) в подземных водах этих же станций. Графики рН помещаются на этом рисунке дополнительно, чтобы продемонстрировать более высокую чувствительность этого параметра подземных вод ст. 9 к магнитным бурям. Значения ОВП гидрогеохимических проб измерены 16 ноября в подземных водах устьевых частей скважин. В записях ст. 184 наблюдаются 4 отключения измерительной аппаратуры в виде спрямленных участков.

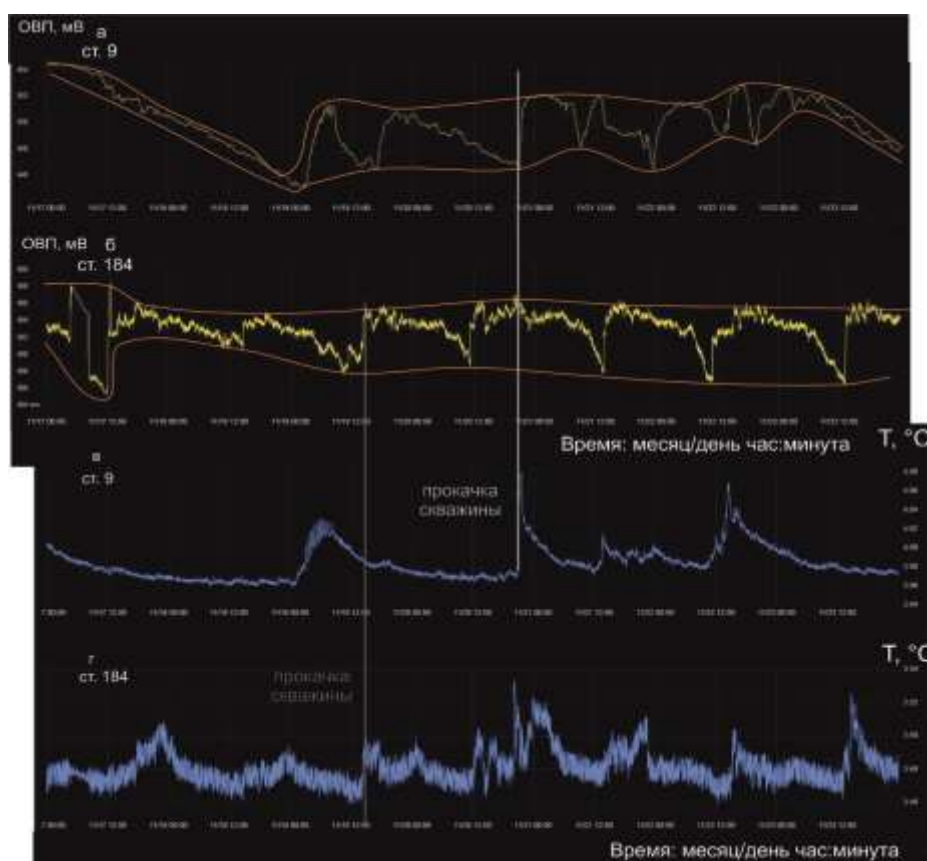
**Fig. 7.** Diagrams of ORP variations on November 11–17, 2025 in groundwater of station 9 (a) and station 184 (b) in comparison with temperature (в, з) and pH (д, е) variations in groundwater of the

same stations. The pH graphs are included in this figure to demonstrate the higher sensitivity of these groundwater parameters at station 9 to magnetic storms. The ORP values of hydrogeochemical samples were measured on November 16 in groundwater at the wellheads. In the records of station 184, 4 disconnections of measuring equipment are observed in the form of straightened sections.

Вывод: в асейсмичном интервале, начавшемся в БРС 31 октября, проявляется слабая сейсмичность, наведенная внешним воздействием на Землю сильнейшей магнитной бури 2025 г. (Кр до 8.7). Магнитная буря 12–13 ноября служит триггером для слабых землетрясений БУГ, УУ и БУС, вызванных 13 и 16 ноября в центре и на западе БРС. Устанавливаются сбои записей ОВП, Т и рН ст. 184 перед магнитной бурей, во время и после нее. Остановка измерений составляла от 4 ч. 42 мин. во время магнитной бури 13 ноября до 4 ч. 14 мин. – 4 ч. 10 мин. до и после нее.

#### 17–23 ноября

В этом интервале нет ни землетрясений, ни магнитных бурь. В записях ОВП ст. 9 хорошо выражен начальный узкий нисходящий тренд 17 и 18 ноября, конечный узкий нисходящий тренд 23 ноября и промежуточная расширенная часть с большими амплитудами. В записях ОВП ст. 184 наблюдается аномальный большеамплитудный участок 17 ноября, сокращение амплитуды минимума 18 ноября и возрастание амплитуд минимумов к концу недели (рис. 8).



**Рис. 8.** Диаграммы вариаций ОВП 11–17 ноября 2025 г. в подземных водах ст. 9 (а) и ст. 184 (б) в сопоставлении с вариациями температуры (в, г) и рН (д, е) в подземных водах этих же станций. В отсутствии возбуждения магнитосферы землетрясения не проявляются.

**Fig. 8.** Diagrams of ORP variations on November 11–17, 2025, in groundwater at station 9 (a) and station 184 (б) in comparison with temperature (в, г) and pH (д, е) variations in groundwater at the same stations. Without magnetospheric excitation, earthquakes do not occur.

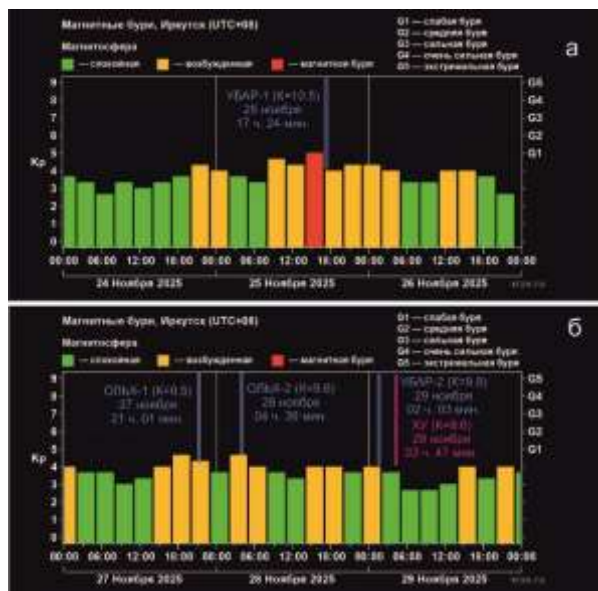
Вывод: с 17 до 23 ноября наблюдается спокойное (асейсмичное) состояние земной коры.

#### 23–29 ноября

Подобно землетрясениям БУГ, УУ и БУС, вызванным 13 и 16 ноября магнитной бурей,

в этом временном интервале проявляются землетрясения, связанные с дополнительным возбуждением магнитного поля Земли. Слабое возбуждение магнитосферы сопровождается слабыми землетрясениями Усть-Баргузин–Ольхонского кластера Среднего Байкала, происходящими на асейсмичном фоне в наиболее ослабленной центральной части

БРС, с финальной отдачей в афтершоковом кластере Хубсугульского землетрясения (11 января 2021 г.). 27 ноября, реализуется Усть-Баргузинское землетрясение (УБАР-1,  $K=10.5$ ), 27 и 28 ноября – два Ольхонских (ОЛЬХ-1,2,  $K=9.5, 9.6$ ), вновь Усть-Баргузинское (УБАР-2,  $K=9.8$ ) и, наконец, Хубсугульское землетрясение (ХУ,  $K=9.6$ ) (рис. 9).



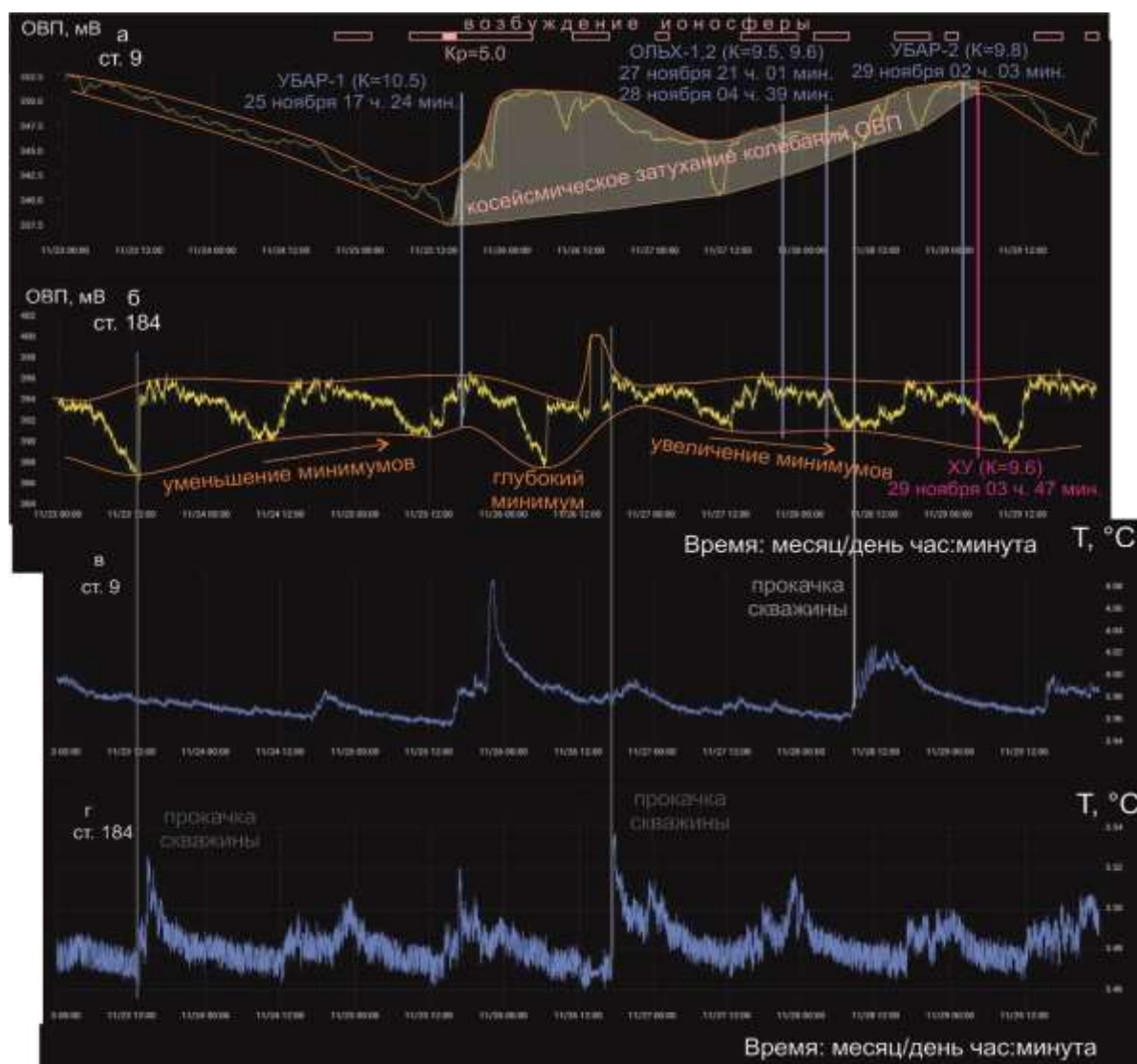
**Рис. 9.** Соотношение слабых землетрясений Усть-Баргузин–Ольхонского кластера Среднего Байкала с эпизодами слабого возбуждения магнитосферы во временных интервалах 24–26 ноября (а) и 27–29 ноября 2025 г. (б). Кластер образуют землетрясения: Усть-Баргузинские УБАР-1 (25 ноября) и УБАР-2 (29 ноября) и Ольхонские ОЛЬХ-1,2 (27–28 ноября). В финале происходит отдача землетрясением в наиболее ослабленной зоне Хубсугульского афтершокового кластера (ХУ,  $K=9.6$ ) запада БРС.

**Fig. 9.** The correlation of weak earthquakes of the Ust-Barguzin–Olkhon cluster of Middle Baikal with episodes of weak magnetospheric excitation in the time intervals of November 24–26 (a) and November 27–29, 2025 (b). The cluster is formed by earthquakes: Ust-Barguzin УБАР-1 (November 25) and УБАР-2 (November 29) and Olkhon ОЛЬХ-1,2 (November 27–28). In the final stage, an earthquake occurs in the most weakened zone of the Khubsugul aftershock cluster (ХУ,  $K=9.6$ ) in the west of the BRS.

В записях ОВП ст. 9 выражен начальный узкий нисходящий тренд 23–25 ноября, меняющийся вечером 25 ноября на восходящий тренд с проявлением землетрясения УБАР-1. Землетрясения ОЛЬХ-1,2, УБАР-2 и ХУ реализуются при более высоких значениях ОВП, чем землетрясение УБАР-1. В отличие от деления на высокочастотную и низкочастотную фазы в записях ОВП 14–16 ноября ст. 9, регистрирующих эффекты сильнейшей магнитной бури 12–13 ноября 2025 г., в записях ОВП 25–29 ноября этой станции, регистрирующих эффекты слабого возбуждения

ионосферы, подобных фаз не наблюдается. Выявляется начальный косейсмический подъем ОВП и затухание колебаний в процессе реализации слабых сейсмических событий (рис. 10а).

В записях ОВП ст. 184 наблюдается некоторое сокращение амплитуд минимумов с 23 до 25 ноября. После землетрясения УБАР-1 образуется глубокий минимум 26 ноября, после которого амплитуда минимума резко сокращается. На фоне дальнейшего возрастания амплитуд реализуются землетрясения ОЛЬХ-1,2, УБАР-2 и ХУ (рис. 10б).



**Рис. 10.** Диаграммы вариаций ОВП 23–29 ноября 2025 г. в подземных водах ст. 9 (а) и ст. 184 (б) в сопоставлении с вариациями температуры в подземных водах этих же станций (в, г).

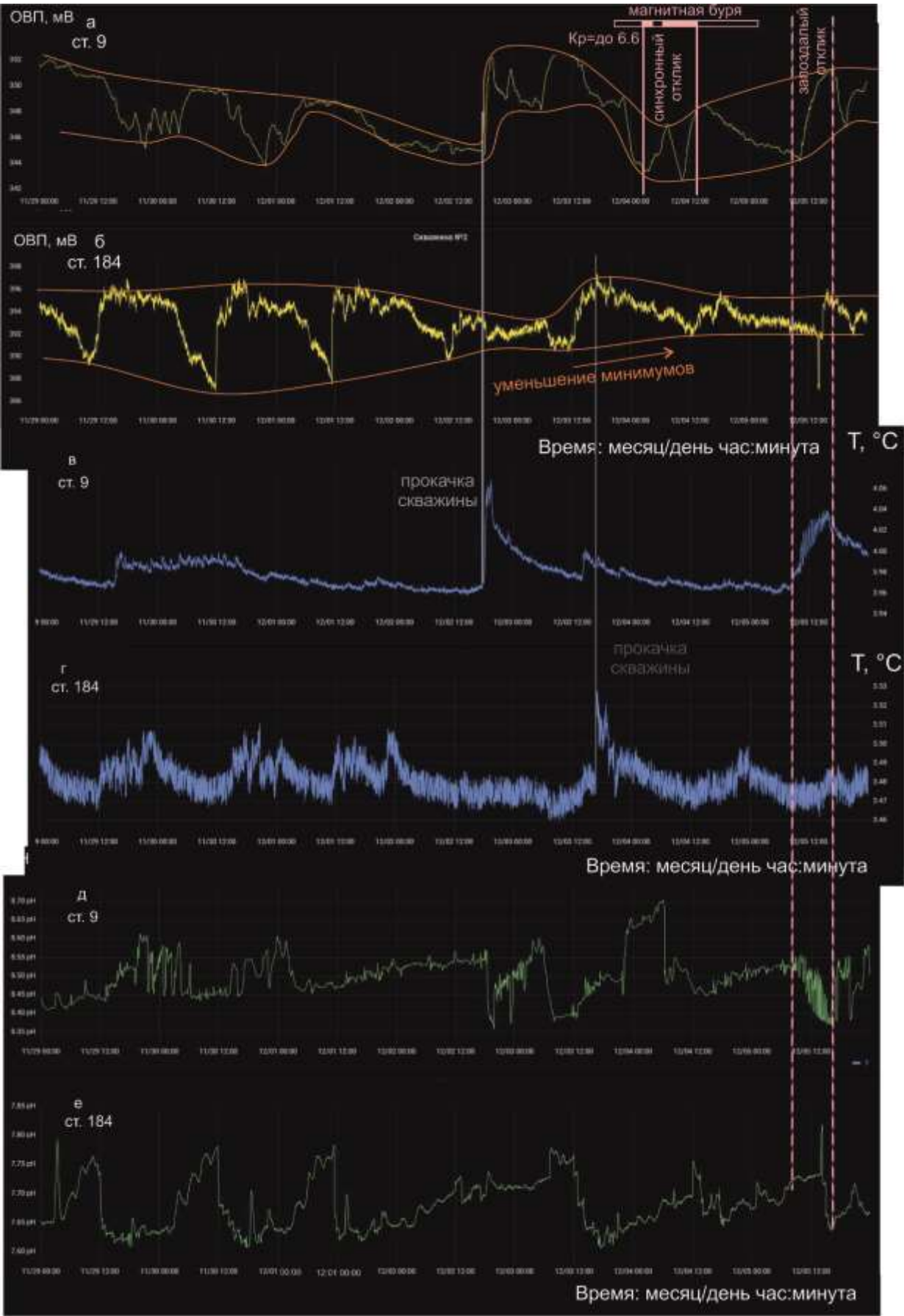
**Fig. 10.** Diagrams of ORP variations on November 23–29 in groundwater of station 9 (a) and station 184 (b) in comparison with temperature variations in groundwater of the same stations (v, z).

Вывод: во временном интервале, начавшемся в БРС 31 октября, продолжаются эффекты слабой сейсмичности, наведенной внешним воздействием на Землю сильнейшей магнитной бури 2025 г, произошедшей 12–13 ноября ( $K_p$  до 8.7). Землетрясения спровоцированы в Усть-Баргузин–Ольхонском кластере ослабленной структуры земной коры Среднего Байкала с финальной отдачей событием в Хубсугульском афтершоковом кластере. Наведение землетрясений слабо возбужденной магнитосферой Земли 25–29 ноября в наиболее ослабленном центре БРС с отдачей на запад повторяет первичную

концентрацию землетрясений в центре БРС и отдачу на запад предшествующих наведенных событий 12–16 ноября.

#### 29 ноября – 05 декабря

Снова происходит магнитная буря, начинающаяся слабым возбуждением ионосферы в 20 ч. 03 декабря. 04 декабря в интервале 02–05 ч. следует проявление средней бури G2 ( $K_p=6.6$ ), а в интервале 08–14 ч. идет слабая буря G1 ( $K_p=5.0$ ). Ионосферы остается в возбужденном состоянии с 20 ч. 03 декабря до 02 ч. 05 декабря.



**Рис. 11.** Диаграммы вариаций ОВП 29 ноября – 5 декабря 2025 г. в подземных водах ст. 9 (а) и ст. 184 (б) в сопоставлении с вариациями температуры (в, з) и pH (д, е) в подземных водах этих же станций. Графики pH помещаются на этом рисунке дополнительно, чтобы продемонстрировать более высокую чувствительность этого параметра подземных вод ст. 9 к магнитной буре.

**Fig. 11.** Diagrams of ORP variations on November 29 – December 05, 2025 in groundwater of station 9 (a) and station 184 (b) in comparison with temperature (в, з) and pH (д, е) variations in groundwater of the same stations. The pH graphs are included in this figure to demonstrate the higher sensitivity of these groundwater parameters at station 9 to magnetic storms.

Синхронно с магнитной бурей наблюдаются 2 глубоких минимума ОВП ст. 9 и уменьшение амплитуды минимумов ст. 184. Запоздалый отклик на магнитную бурю выражен в подъеме значений ОВП ст. 9 и в подобном (асинхронном) подъеме значений ОВП ст. 184. Наведенные запоздалые эффекты более отчетливо выражены в высокочастотных вариациях температуры и pH ст. 9 (квазипериодичность минимумов 30 мин.). Основным варьирующий параметр – температура. В зависимости от температуры меняются значения pH (рис. 11).

Подобные запоздалые отклики Т и pH наблюдались после трех магнитных бурь, произошедших 06–08 ноября, и в высокочастотную фазу запоздалого отклика на наиболее сильную магнитную бурю 2025 г., произошедшую 12–14 ноября. Сходство запоздалых эффектов магнитных бурь свидетельствует об однотипных процессах, которые вызываются этими магнитными бурями в земной коре. Магнитная буря 03–06 декабря отличается от названных ноябрьских магнитных бурь отсутствием землетрясений наблюдаемого диапазона К (более 8.5).

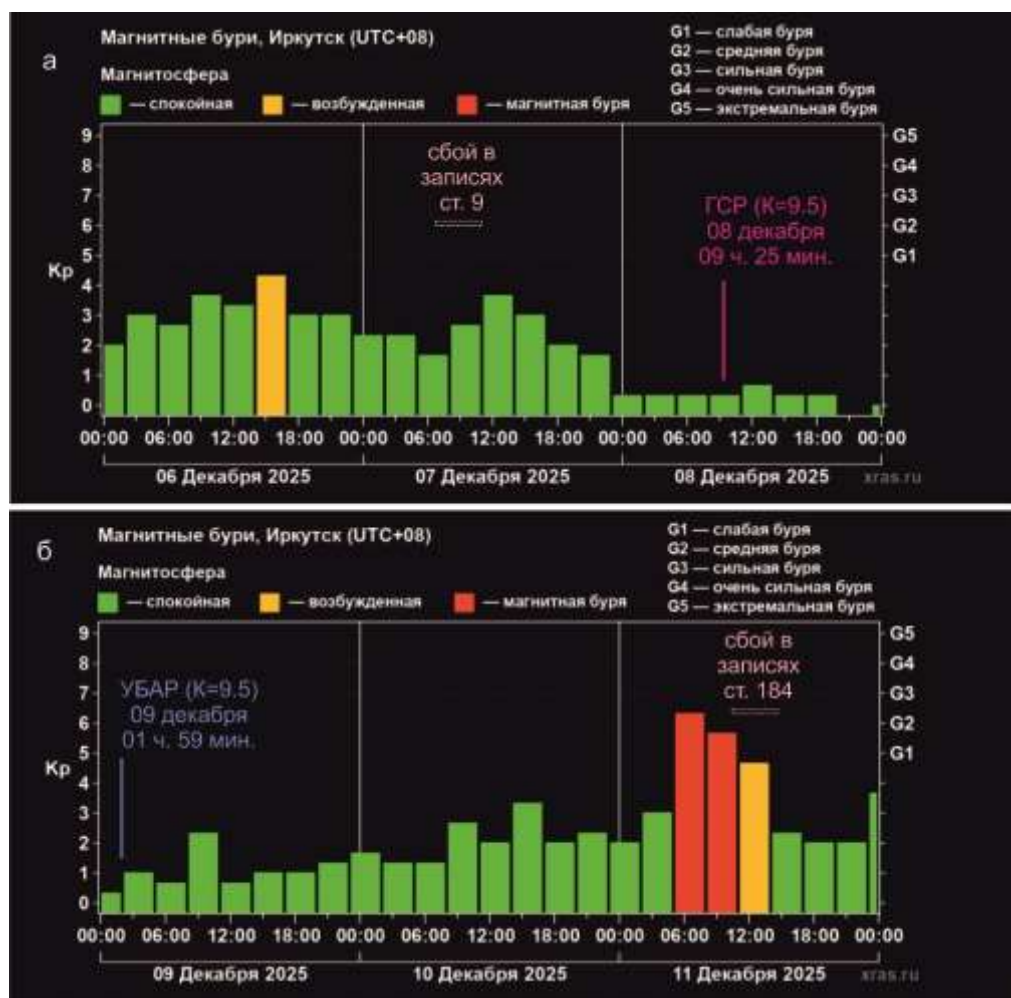
Температурная нестабильность может отражать процессы перехода механической энергии в тепловую в активной плоскости разлома, которые выявляются Na–Li

термометрией подземных вод (Rasskazov et al., 2024).

Вывод: магнитная буря 03–05 декабря проявляется в вариациях наблюдаемых параметров ОВП, pH и Т подземных вод станций мониторинга подобно косейсмическим магнитным бурям предшествующих недель ноября. В отличие от них, магнитная буря 03–05 декабря не вызывает слабых землетрясений в наблюдаемом диапазоне К (более 8.5).

#### 05–11 декабря

В этом интервале наблюдается сбой записей ОВП, Т и pH ст. 9. 07 декабря в 07 ч. 02 мин. измерения на этой станции останавливаются и возобновляются в 11 ч. 18 мин. Продолжительность остановки измерений составляет 4 ч. 16 мин. После завершения магнитной бури 03–05 декабря (в 02 ч. 05 декабря) сохраняется слегка повышенное Кр с выходом на эпизод возбужденной магнитосферы 06 декабря с 14 до 17 ч., а 08 декабря Кр резко снижается. Записи ОВП подземных вод ст. 9 останавливаются 07 декабря после магнитной бури 03–05 декабря до резкого снижения Кр (рис. 12). На ст. 184 измерения останавливаются во время и после магнитной бури 11 ноября с 12 ч. 54 мин. до 17 ч. 08 мин. Продолжительность остановки измерений составляет 4 ч. 14 мин.

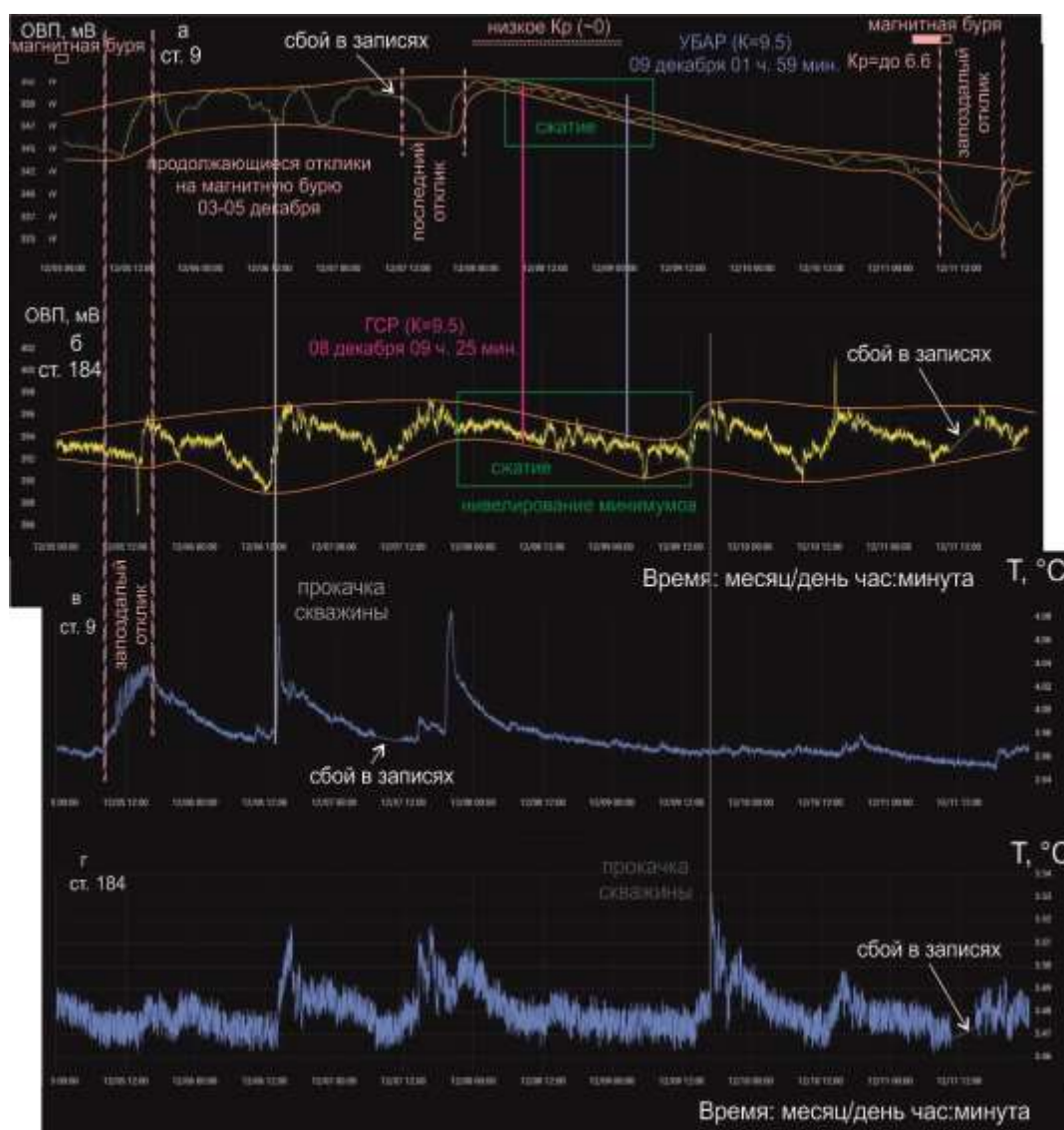


**Рис. 12.** Соотношение эпизодов сбоя мониторинговых записей подземных вод с состоянием магнитосферы в Иркутске 06–08 декабря 2025 г. (а) и 09–11 декабря (б). В первом интервале на фоне спокойной магнитосферы дает сбой ст. 9, во втором – во время и сразу после магнитной бури дает сбой ст. 184.

**Fig. 12.** Correlation of groundwater monitoring record failure episodes with the magnetosphere state in Irkutsk on December 6–8, 2025 (a) and December 9–11 (b). In the first interval, station 9 fails against the background of a quiet magnetosphere; in the second, station 184 fails during and immediately after a magnetic storm.

Переход от магнитной бури 03–05 декабря к низкому Кр обозначается на ст. 9 отрезком с расширенной амплитудой вариаций ОВП 05–07 декабря. Далее, во время низкого Кр, наблюдаются малоамплитудные вариации ОВП с постепенным снижением этого параметра до магнитной бури 11 декабря. На фоне

низкого Кр реализуются два слабых землетрясения (K=9.5): одно из них – в зоне Главного Саянского разлома (ГСП) 08 декабря, другое – в Усть-Баргузинском кластере землетрясения (УБАР) 09 декабря (рис. 13).



**Рис. 13.** Диаграммы вариаций ОВП 05–11 декабря 2025 г. в подземных водах ст. 9 (а) и ст. 184 (б) в сопоставлении с вариациями температуры в подземных водах этих же станций (в, г).

**Fig. 13.** Diagrams of ORP variations on December 05–11 in groundwater of station 9 (a) and station 184 (б) in comparison with temperature variations in groundwater of the same stations (в, г).

Вывод: наблюдаются вариации ОВП при изменении состояния магнитосферы от сильной магнитной бури ( $K_p=6.6$ ) до нулевого значения  $K_p$ . Между магнитными аномалиями реализуются землетрясения, по-прежнему, только в центре и на западе БРС. По возрастанию ОВП подземных вод обеих мониторинговых станций определяются условия косейсмического сжатия земной коры.

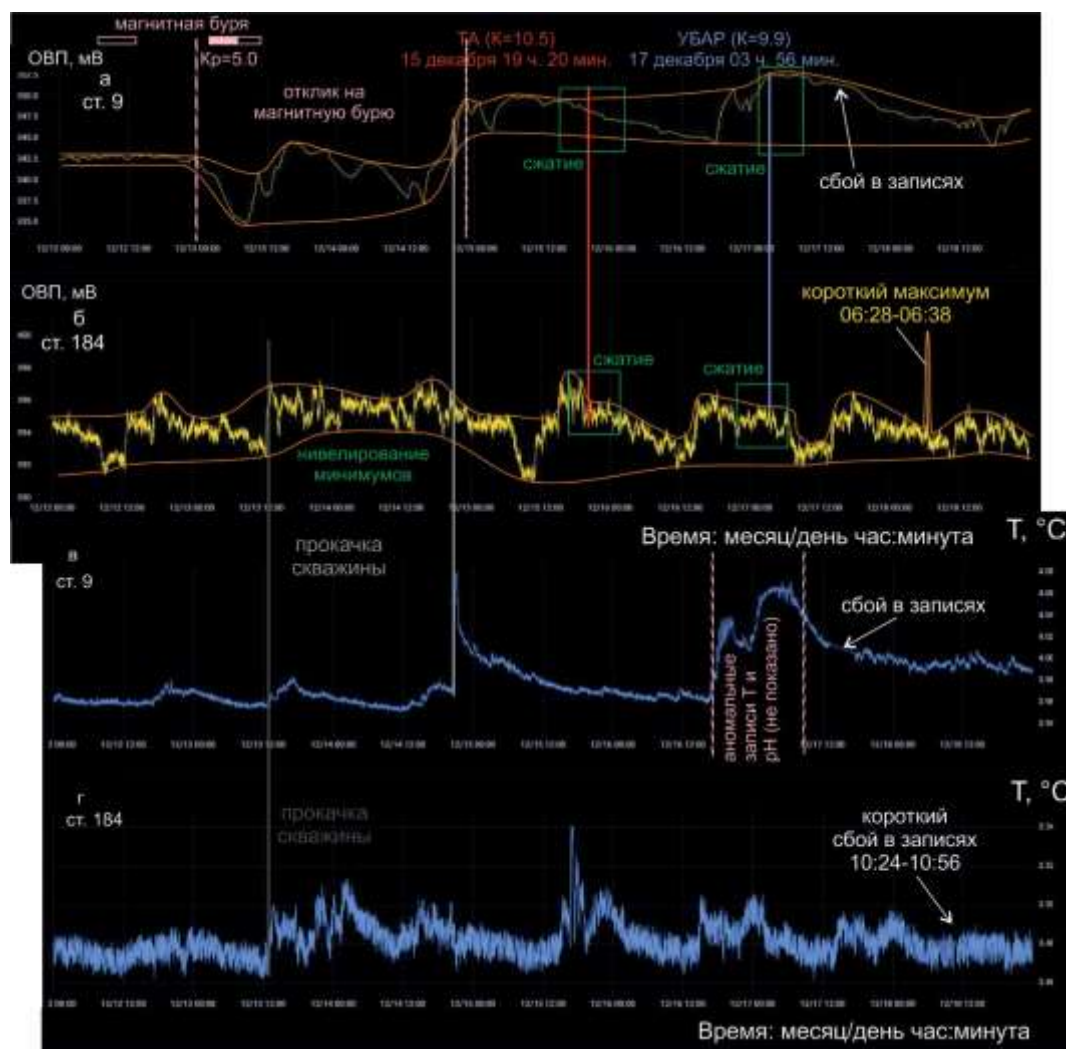
#### 12–18 декабря

13 декабря в утренние часы заканчивается возбужденное состояние магнитосферы при  $K_p=5$ . Во время этой бури образуется

глубокий минимум ОВП ст. 9 с последующими запаздывающими колебаниями, заканчивающимися 14 декабря вечером. В этом временном интервале магнитной бури и запаздывающего отклика на нее ст. 9 на ст. 184 наблюдается нивелирование минимумов. 15 декабря вечером реализуется землетрясение на востоке БРС (ТА, Таксимо,  $K=10.5$ ), за которым (17 декабря) следует землетрясение в центре БРС (УБАР, Усть-Баргузин,  $K=9.9$ ). Обоим землетрясениям соответствуют повышенные значения ОВП, свидетельствующие о косейсмическом состоянии сжатия земной

коры. Перед землетрясением УБАРГ и во время этого землетрясения (16–17 декабря) на ст. 9 наблюдаются аномальные высокочастотные записи температуры и pH с последующим отключением измерительного оборудования. Позже (18 декабря) выявляются

аномалии на ст. 184: короткий ярко выраженный максимум ОВП в интервале 06 ч. 28 мин. – 06 ч. 38 мин. и короткий сбой в записях этой станции в интервале 10 ч. 24 мин. – 10 ч. 56 мин. (рис. 14).



**Рис. 14.** Диаграммы вариаций ОВП 12–18 декабря 2025 г. в подземных водах ст. 9 (а) и ст. 184 (б) в сопоставлении с вариациями температуры в подземных водах этих же станций (в, г).

**Fig. 14.** Diagrams of ORP variations on December 12–18 in groundwater of station 9 (a) and station 184 (b) in comparison with temperature variations in groundwater of the same stations (в, г).

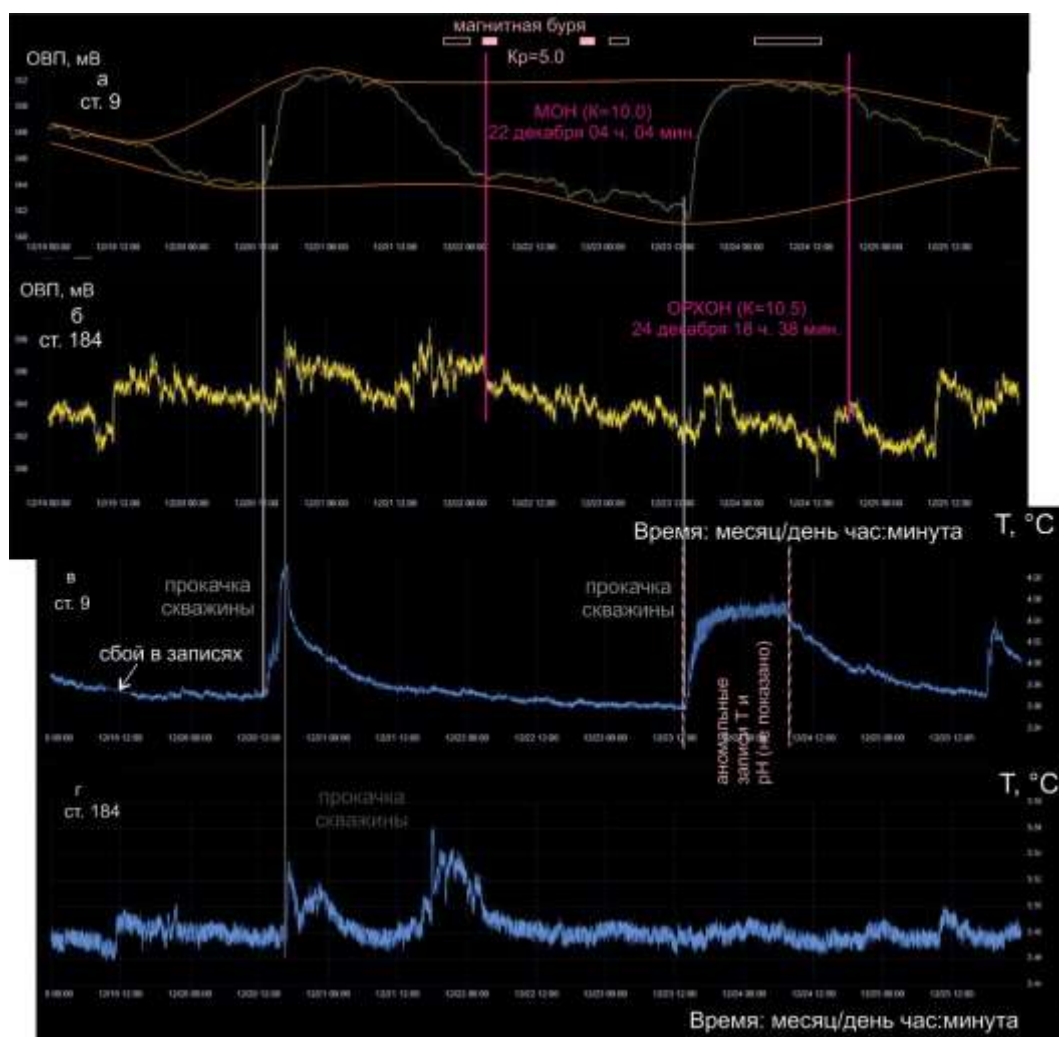
Вывод: наблюдается зависимость вариаций ОВП от магнитной бури 13 декабря с запаздывающими колебаниями. 15 и 17 декабря следуют землетрясения: 15 декабря – на востоке БРС, 17 декабря – в Усть-Баргузинском кластере центра БРС с аномалиями в записях ОВП ст. 9. Затем, 18 декабря, аномалии проявляются в записях на ст. 184.

#### 19–25 декабря

В начале этого интервала, 19 декабря в интервале с 09 ч. 32 мин. до 13 ч. 54 мин., происходит временное отключение ст. 9. Позже опять проявляется магнитная буря. Хотя она слабая ( $K_p=5.0$ ), со временем проявления этой магнитной бури опять совпадает

Мондинское землетрясение (МОН) 22 декабря в 04 ч. 04 мин. ( $K=10.0$ ). 23 декабря прокачка ст. 9 во второй половине дня сопровождается аномальными высокочастотными колебаниями температуры и pH. В это время возбуждается магнитосфера. После перехода

магнитосферы в спокойный режим, 24 декабря в 18 ч. 38 мин., реализуется слабое землетрясение ( $K=10.5$ ) на удаленной к югу территории – в верховьях р. Орхон (Восточный Хангай) (рис. 15).



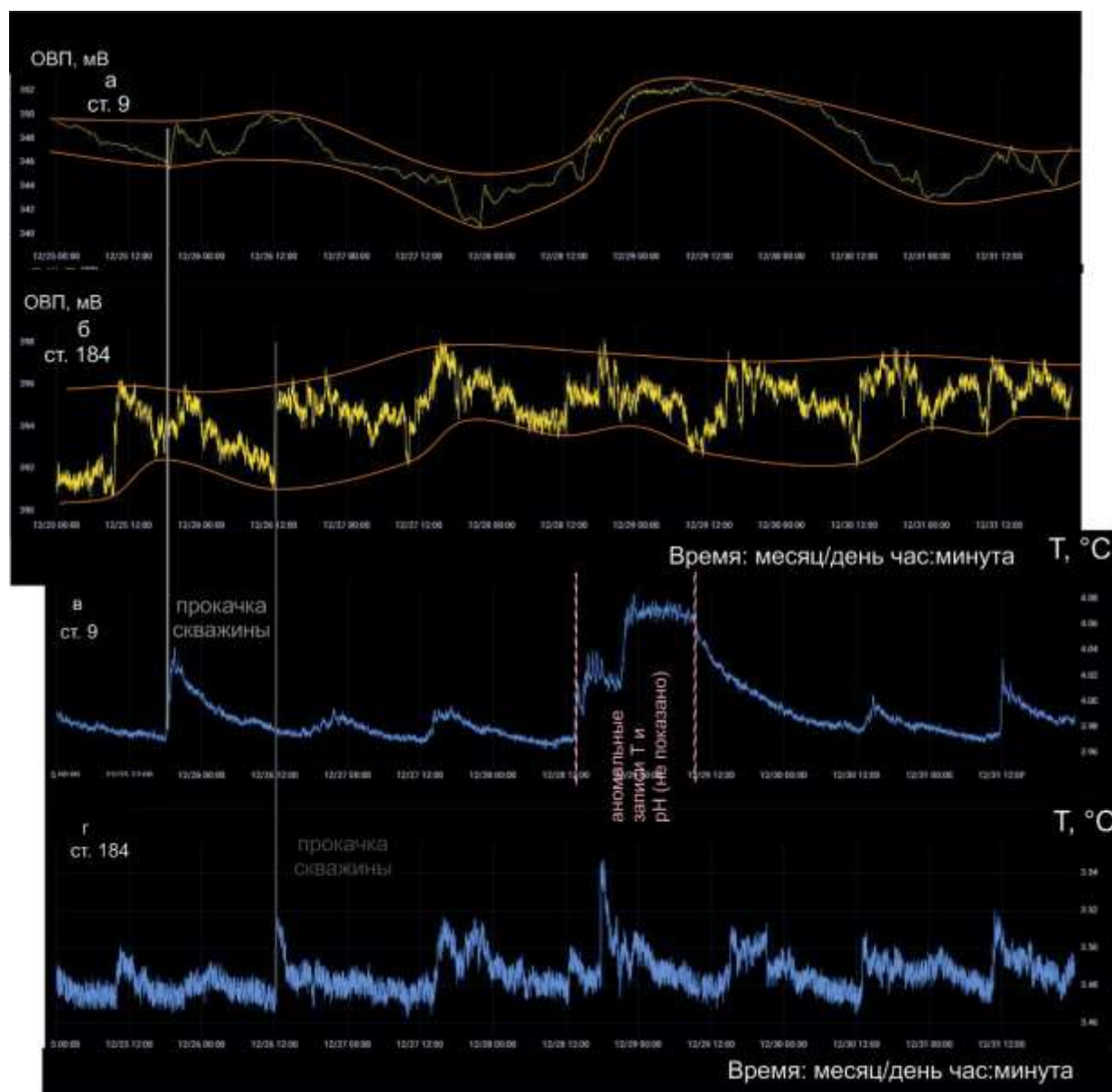
**Рис. 15.** Диаграммы вариаций ОВП 19–25 декабря 2025 г. в подземных водах ст. 9 (а) и ст. 184 (б) в сопоставлении с вариациями температуры в подземных водах этих же станций (в, з).

**Fig. 15.** Diagrams of ORP variations on December 19–25 in groundwater of station 9 (a) and station 184 (b) in comparison with temperature variations in groundwater of the same stations (v, z).

Вывод: в этом интервале наблюдается совпадение во времени слабого землетрясения ( $K=10.0$ ) 22 декабря со слабой магнитной бурей ( $K_p=5.0$ ). В записях T и pH ст. 9 проявляются аномалии 19 и 23–24 декабря в виде временного отключения станции и высокочастотных колебаний.

#### 25–31 декабря

В последнюю неделю 2025 г. землетрясений и магнитных бурь не происходит. Наблюдается единственное осложнение записей ст. 9 высокочастотными колебаниями во второй половине 28 декабря и в первой половине 29 декабря (рис. 16). Эти колебания не имеют очевидного объяснения.



**Рис. 16.** Диаграммы вариаций ОВП 25–31 декабря 2025 г. в подземных водах ст. 9 (а) и ст. 184 (б) в сопоставлении с вариациями температуры в подземных водах этих же станций (в, г).

**Fig. 16.** Diagrams of ORP variations on December 25–31 in groundwater of station 9 (a) and station 184 (б) in comparison with temperature variations in groundwater of the same stations (в, г).

Вывод: 2025 г. заканчивается в условиях низкой сейсмической активности.

### Обсуждение

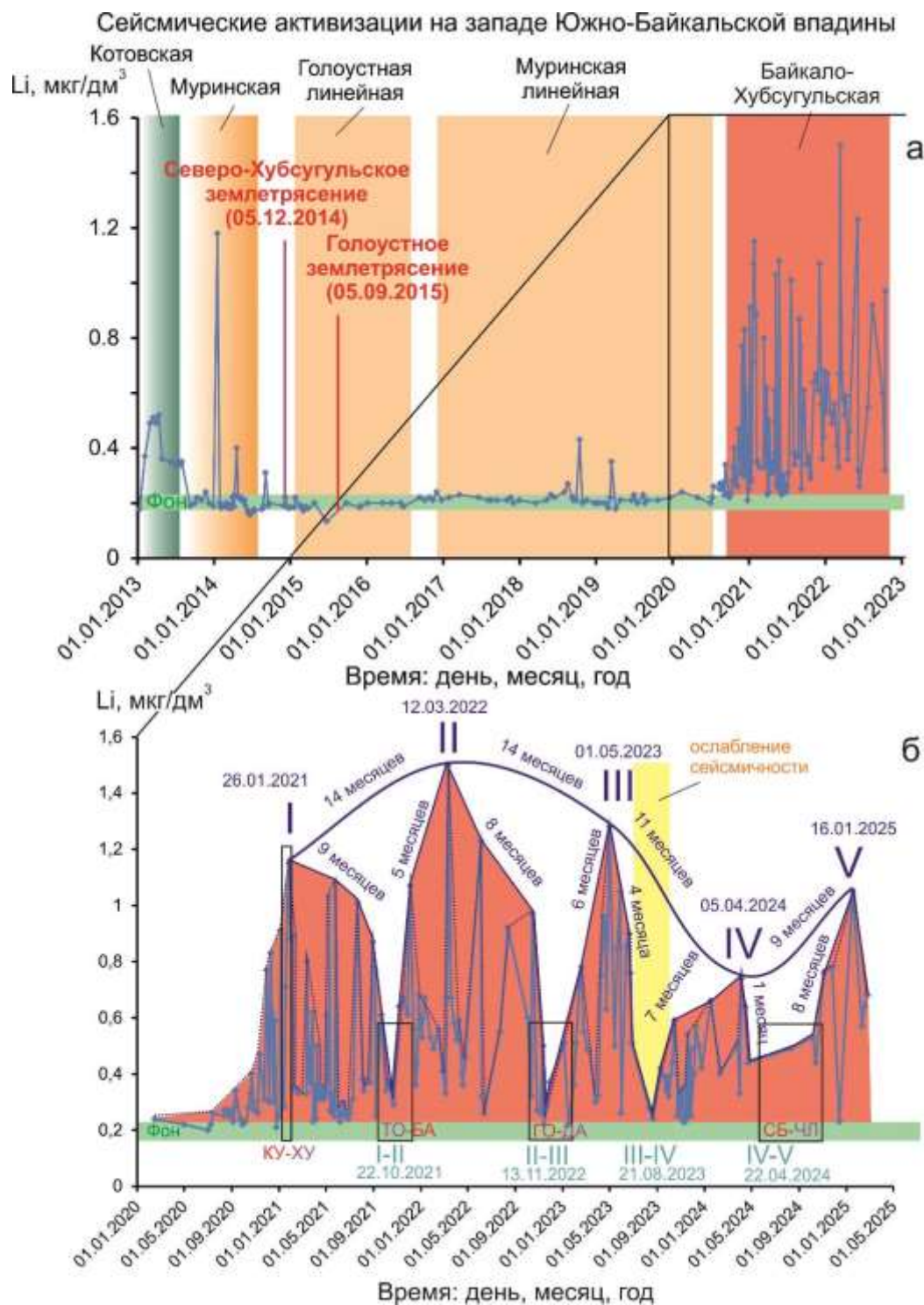
*Слабая и возрастающая сейсмичность 2025 г. как отражение скрытой годичной квазипериодичности процессов в земной коре, установившейся в 2020–2024 гг.*

В 2020–2025 гг. намечается годичная дискретность процессов земной коры по

вариациям концентрации лития и Na/Li отношения (температуры) подземных вод ст. 27 (Рассказов и др., 2025в,д). Пять максимумов Li приходятся на первые 5 месяцев каждого года (в период с января до мая): I – 26 января 2021 г., II – 12 марта 2022 г., III – 1 мая 2023 г., IV – 05 апреля 2024 г. и V – 16 января 2025 г. После максимума I (26.01.2021) через 9 месяцев образуется минимум Li (22.10.2021), от которого до следующего максимума II проходит около 5 месяцев. После максимума II

(12.03.2022) через 8 месяцев образуется минимум Li (13.11.2022), от которого до следующего максимума III проходит около 6 месяцев. Между максимумами I и III имеется сходство по продолжительности вариационных интервалов, составляющих около 14

месяцев. В дальнейшем интервалы между максимумами и минимумами сокращаются до 11 и 9 месяцев (рис. 17). Годичная квазипериодичность сейсмической активности не очевидна.

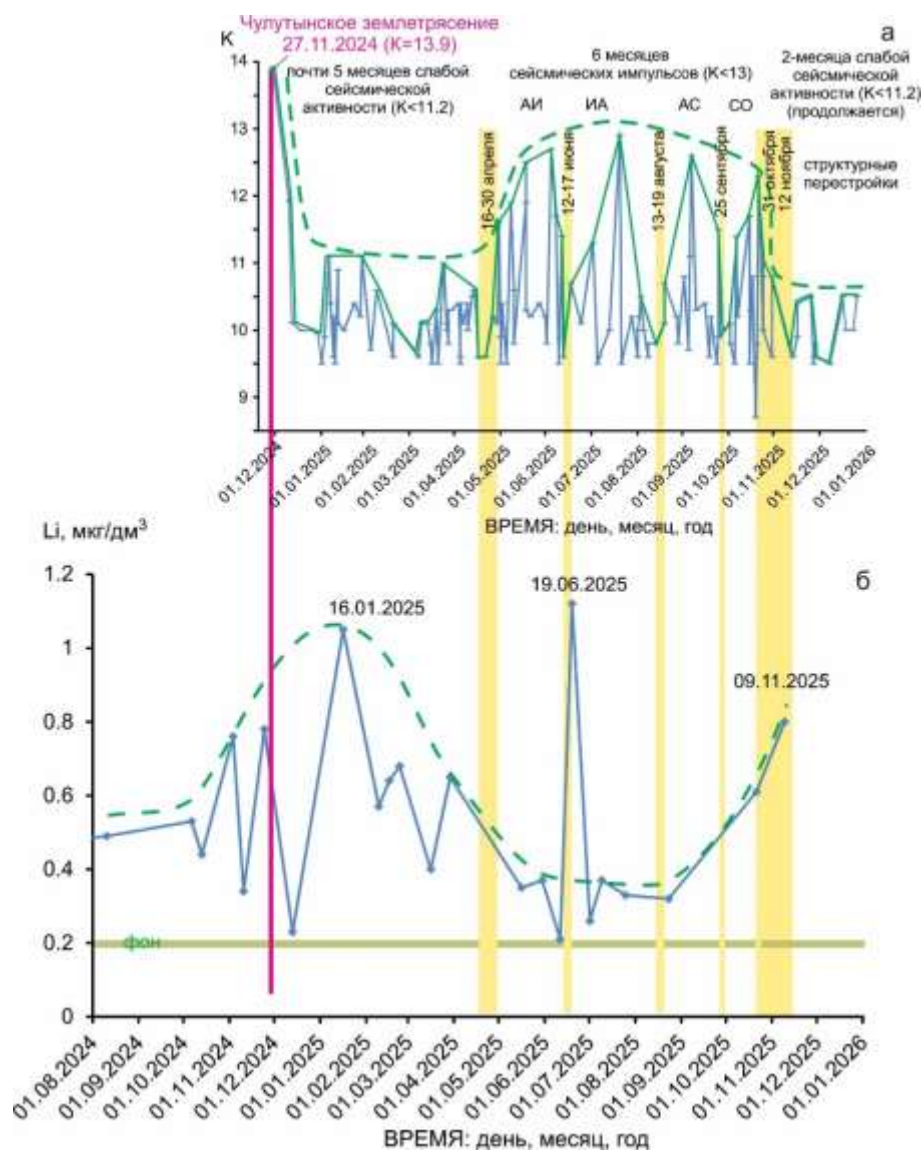


**Рис. 17.** Диаграммы вариаций концентрации Li в подземных водах ст. 27 Култукского полигона в 2013–2022 гг. (а) и в 2020–2025 гг. (б). Сейсмическая перестройка КУ–ХУ соответствует максимуму Li, другие сейсмические перестройки (ТО–БА, ГО–ДА, ДА–СБ и СБ–ЧЛ) соответствуют минимумам Li. Отрезки временной шкалы на панели а – 1 год, на панели б – 4 месяца.

**Fig. 17.** Diagrams of Li variations in groundwaters from station 27 of the Kultuk area during the entire observation time interval of 2013–2022 (a) and in 2020–2025 (b). The seismic reorganization КУ–ХУ corresponds to the maximum of Li, while other seismic reorganizations (ТО–БА, ГО–ДА, ДА–СБ, and СБ–ЧЛ) correspond to the minimum of Li. The time scale segments in panel a are 1 year, in panel b – 4 months.

В 2025 г. наблюдается слабая сейсмичность в начале года (с 1 января до 29 апреля), 4 сейсмических импульса (с 30 апреля до 31 октября) и снижение сейсмической активности в конце года (в ноябре и декабре). Сейсмические импульсы генерируются и прекращаются вследствие структурных перестроек,

сопровождающихся снижением энергетического класса землетрясений 16–30 апреля, 12–17 июня, 13–19 августа, 25 сентября и 31 октября. Сейсмичность проявляется в рамках одного года с ее возрастанием и снижением (рис. 18a).



**Рис. 18.** График соотношений слабой и повышенной сейсмической активности в БРС в 2025 г. (a) в сопоставлении с вариациями Li в подземных водах ст. 27 Култукского полигона (б). В интервале 12–17 июня 2025 г. имеет место не только сейсмическая, но и гидрогеохимическая структурная перестройка БРС. Другие структурные перестройки были только сейсмическими, т.е. ограничивались сменой характера пространственного распределения эпицентров землетрясений.

**Fig. 18.** Graph of relationship between weak and elevated seismic activities in the BRS in 2025 (a) in comparison with variations in Li in groundwater at station 27 of the Kultuk area (б). Between June 12 and 17, 2025, both seismic and hydrogeochemical structural reorganizations occurred in the BRS. Other structural changes were purely seismic, i.e., limited to changes in the spatial distribution of earthquake epicenters.

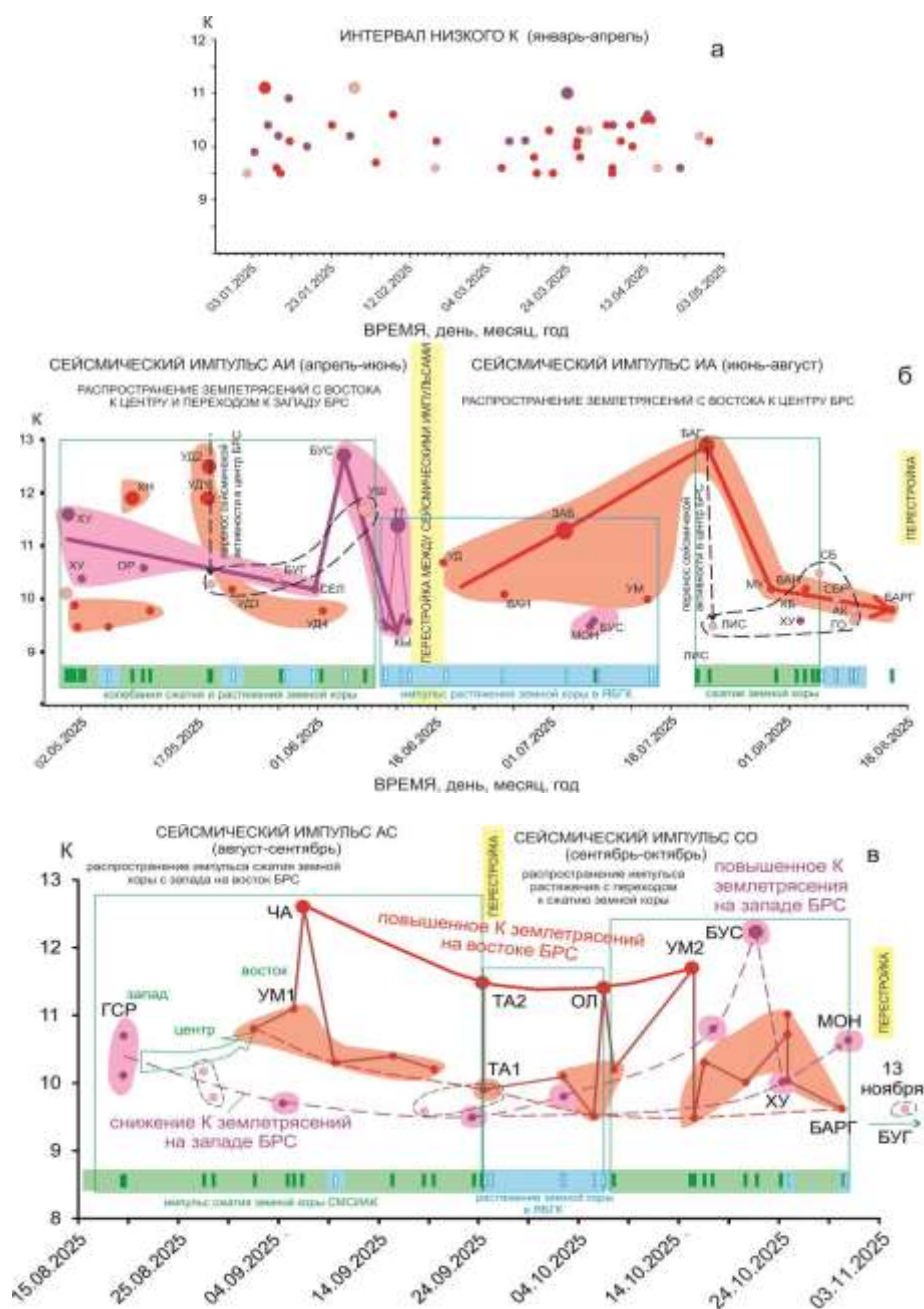
Последнее сильное землетрясение временного интервала 2020–2024 гг. – Чулутынское ( $K=13.9$ ) – происходит 27 ноября 2024 г. при варьирующей концентрации Li в широком диапазоне (от 0.35 до 0.80 мкг/дм<sup>3</sup>). В середине декабря 2024 г. концентрация Li снижается до фонового значения 0.2 мкг/дм<sup>3</sup>, а в середине января 2025 г. возрастает до максимума 1.03 мкг/дм<sup>3</sup>. В это время реализуются слабые землетрясения ( $K<11.2$ ). Концентрация Li к временному интервалу сейсмических импульсов АИ-ИА-АС-СО снижается и находится в основном в интервале 0.2–0.4 мкг/дм<sup>3</sup>. Единственное исключение – высокая концентрация Li (1.15 мкг/дм<sup>3</sup>) в пробе, отобранной 19 июня 2025 г., после структурной перестройки между импульсами АИ и ИА. Во время последнего сейсмического импульса СО и после его завершения (в ноябре) концентрация Li в подземных водах возрастает.

Возрастание Li и снижение Na (понижение отношения Na/Li) в подземных водах отражает возрастание температуры равновесия глинистый минерал–вода (Fouillac, Michard, 1981). В подземных водах БРС T(Na/Li) возрастает во время сейсмических активизаций вследствие тектонических движений с выделением механической энергии трения в плоскости разлома, содержащей глинку трения. В начале и в конце 2025 г. концентрация Li и T(Na/Li) в подземных водах ст. 27 возрастает, но энергетический класс землетрясений при этом снижается. Такое соотношение может объясняться возрастанием температуры в области генерации землетрясений (в средней

коре), способствующим повышению пластичности среды, в которой предотвращается накопление упругих напряжений. Можно предположить также, что повышение концентрации Li и T(Na/Li) в подземных водах в начале и в конце 2025 г. связано с усилением магнитных бурь. Таким образом, в возрастании Li и снижение Na проявляются два фактора: трение в сейсмоактивной плоскости разлома и возникновение электрических токов, наведенных в земной коре магнитными бурями. В некоторых случаях с магнитными бурями слабые землетрясения связаны непосредственно.

*Дискретность сейсмогенерирующих процессов на западе, востоке и в центре БРС в 2025 г.*

После начальной слабой сейсмической активности 2025 г. в БРС следуют сейсмические импульсы АИ и ИА, реализующиеся под действием сил, производных Японско-Байкальского геодинамического коридора (ЯБГК) и Саяно-Монгольского сектора Индо-Азиатской конвергенции (СМСИАК). При зарождении очередного импульса проявляются силы, которые приводят к преимущественной концентрации сейсмической энергии либо на востоке, либо на западе БРС. Развитие сейсмогенерирующих процессов ведет к затуханию сейсмичности либо на западе (если действует сжатие СМСИАК), либо в центре БРС (если действует растяжение ЯБГК). От середины августа до конца октября 2025 г. различаются силовые импульсы АС (августа – сентябрь) и СО (сентябрь – октябрь) (рис. 19).



**Рис. 19.** Диаграммы временных интервалов проявлений хаотических землетрясений низкого энергетического класса (К) (а) и сейсмических импульсов БРС в 2025 г.: б – импульсы АИ и ИА, в – импульсы АС и СО. Цветом выделены данные из разных частей БРС: красным – с востока, сиреневым – с запада, розовым – с центра. В нижних частях панелей б и в показаны определения условий косейсмического сжатия земной коры (закрашенные зеленые столбики) и условий косейсмического растяжения земной коры (бело-голубые столбики). В начале ряда наблюдений панели в зеленая стрелка обозначает миграцию землетрясений импульса АС с запада через центр на восток БРС. Землетрясения в кластерах: ХУ – Хубсугул (кластер афтершока землетрясения 12 января 2021 г.), ХН – Хэнтэй, ОР – Орлик, УД – Удокан, БУГ – Бугульдейка, СЕЛ – Селенга, БУС – Бусийнгол, УШ – Ушканий, ТГ – Тацийн-Гол, КЫ – Кырен, ВАН – Верхняя Ангара, ЗАБ – Забайкальск, МОН – Монды, УМ – Умхей, БАГ – Багдарин, ЛИС – Листвянка, МУ – Муякан, КБ – Кабанск, СБ – Северо-Байкальск, ГО – Голоустное (Большое), БАРГ – Баргузин (северная часть хребта), АК – Академический, ГСР – Главный Саянский разлом, ЧА – Чара, ТА – Таксимо, ОЛ – Олекма.

**Fig. 19.** Diagrams of the time intervals of displaying chaotic earthquakes of low energy class (K) (a) and seismic pulses of the BRS in 2025:  $\delta$  – АИ и ИА импульсы,  $\epsilon$  – АС и СО импульсы. Data from different parts of the BRS are highlighted in color: red – from the east, lilac – from the west, pink – from the center. The lower parts of panels  $\delta$  and  $\epsilon$  show definitions of the conditions of coseismic compression of the earth's crust (filled green bars) and those of coseismic extension of the earth's crust (white and blue bars). At the beginning of the observation series of panel  $\epsilon$ , the green arrow indicates the migration of earthquakes of the АС pulse from the west through the center to the east of the BRS. Earthquakes in clusters: ХУ – Khuvs gul (aftershock cluster of the earthquake of January 12, 2021), ХН – Khentei, ОР – Orlik, УД – Udokan, БУГ – Buguldeika, СЕЛ – Selenga, БУС – Busiyngol, УШ – Ushkany, ТГ – Tatsiyngol, КЫ – Kyren, ВАН – Upper Angara, ЗАБ – Zabaikalsk, МОН – Mondy, УМ – Umkhey, БАГ – Bagdarin, ЛИС – Listvyanka, МУ – Muyakan, КБ – Kabansk, СБ – Severo-Baikalsk, ГО – Goloustnoye (Bolshoye), БАРГ – Barguzin (northern part of the range), АК – Akademichesky, ГСР – Main Sayan Fault, ЧА – Chara, ТА – Taksimo, ОЛ – Olekma.

Силовой импульс АС сменяет во времени импульс растяжения ИА, запущенный в ЯБГК, и начинается землетрясениями 19 августа на западе БРС. С течением времени землетрясения силового импульса АС мигрируют в центр БРС с более поздним смещением на восток БРС. Во время землетрясений преобладает сжатие земной коры, включая самое сильное (Чарское,  $K=12.5$ ) сейсмическое событие импульса АС. После землетрясения ЧА, однако, реализуется одиночное землетрясение на востоке БРС в условиях растяжения земной коры. В конце импульса АС наблюдаются слабые землетрясения, происходящие в условиях сжатия на западе, в центре и на востоке БРС.

Силовой импульс СО начинается 25 сентября с землетрясения ТА2 повышенного энергетического класса ( $K=11.5$ ), для которого определяются условия растяжения земной коры. Предшествующее ему слабое землетрясение ТА1 имеет в записях ОВП характеристики сжатия земной коры. Последующие сейсмические события, включая Олекминское (ОЛ), характеризуются условиями растяжения земной коры, производными ЯБГК. Затем землетрясения вновь реализуются в условиях сжатия земной коры.

Обращает на себя внимание общее снижение энергетического класса землетрясений в середине мониторингового ряда импульсов АС-СО запада БРС относительно начала и окончания событий этой территории. В начале, 19 августа в 21 ч. 57 мин., на западе БРС происходит землетрясение Главного Саянского разлома (ГСР,  $K=10.7$ ), а в конце, 21 октября в 17 ч. 14 мин., реализуется Бусийн-гольское землетрясение (БУС) с более высоким энергетическим классом ( $K=12.3$ ). На западе БРС повторяется тенденция пространственного перераспределения землетрясений Северо-Байкальско-Хангайской сейсмической активизации 2024 г. с севера (район

Орлика, ГСР) на юг (Чулута, Бусийн-Гол). В связи с таким ходом событий возможен вариант интерпретации, предполагающей развитие импульса АС от начала до конца мониторингового ряда АС-СО с переходом в сентябре-октябре от сжатия востока БРС к растяжению.

#### *ОВП записи и землетрясения ноября и декабря в контексте событий 2025 г.*

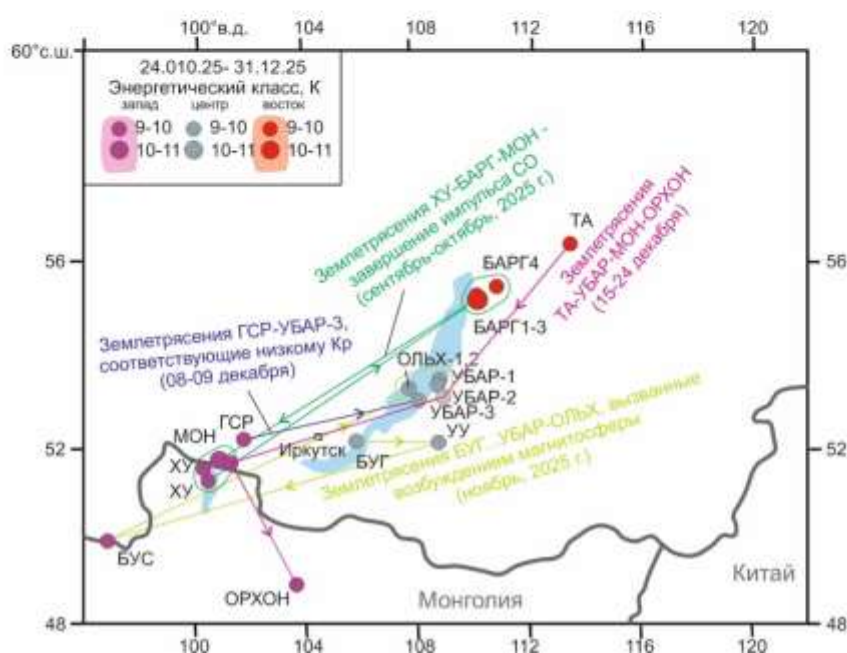
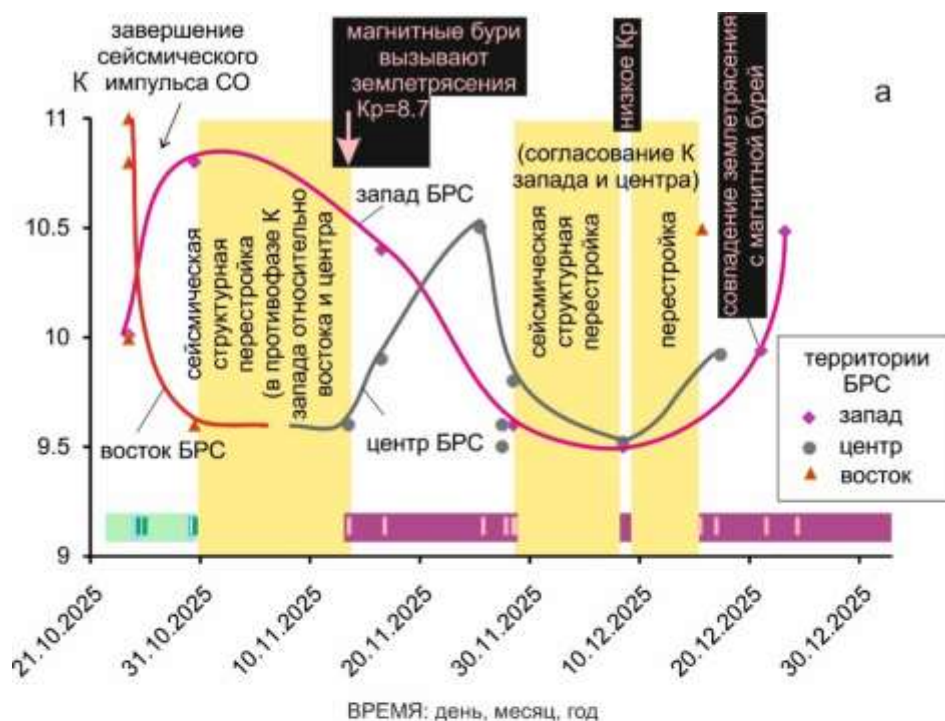
Последовательность сейсмических событий всей Байкало-Хубсугульской активизации в общем наследует триггерный эффект Хубсугульской ослабленной зоны, производный главного (Хубсугульского) землетрясения 11 января 2021 г. ( $K=15.7$ ). После главного Хубсугульского землетрясения в кластере локализовались многочисленные афтершоки. С течением времени их количество сокращалось. Но в сокращенном количестве землетрясения, локализованные в Хубсугульском афтершоковом кластере, стали проявляться как триггерные события.

В 2025 г. от афтершокового кластера ХУ осуществляется запуск сейсмичности импульса АИ событиями 30 апреля ( $K=11.6$ ) и 2 мая ( $K=10.4$ ). В течение сейсмических импульсов АИ и ИА землетрясения запада БРС не совпадают с Хубсугульским афтершоковым кластером. Еще одно событие ХУ происходит в Хубсугульском афтершоковом кластере только в конце импульса ИА, при снижении энергетических классов землетрясений и пространственной локализации эпицентров вдоль оси БРС. Такая пространственно-временная избирательность сейсмических событий в Хубсугульском афтершоковом кластере характеризует эти события как показатели запускающих моментов в сейсмическом сценарии 2025 г.

После землетрясения ХУ 24 октября Хубсугульского афтершокового кластера следует серия землетрясений БАРГ1–4 → МОН

(интервал 24–30 октября). Серия землетрясений БУГ→УУ→БУС→УБАР→ОЛЬХ, вызванных солнечными возмущениями магнитосферы, начинается и завершается в интервале 13–28 ноября в наиболее ослабленной структуре центра БРС. Разное происхождение серий финала импульса СО и ноябрьских землетрясений влечет за собой общее относительное смещение эпицентров к югу. В

декабре характер соотношения землетрясений с магнитными бурями меняется. Землетрясения не совпадают и не запаздывают относительно магнитных бурь. Наоборот, два землетрясения (ГСР и УБАР-3) соответствуют аномально низкому Кр. Эпицентр землетрясения ГСР смещен к северо-западу относительно эпицентров других землетрясений запада БРС (рис. 20).



**Рис. 20.** График временного изменения K в конце октября, ноябре и декабре 2025 г. (a) и пространственное распределение землетрясений окончания импульса СО (землетрясения ХУ – БАРГ – МОН) и группирование более поздних слабых землетрясений по разным условиям

реализации (б). После сильнейшей магнитной бури 12 ноября ( $K_p=8.7$ ) наблюдается переход от противофазного соотношения  $K$  землетрясений запада относительно землетрясений востока и центра к согласованному  $K$  землетрясений запада и центра БРС. Землетрясения вызваны возбуждением магнитосферы во временном интервале ноября 2025 г. (землетрясения БУГ – УУ (Бугульдейка – Улан-Удэ) – БУС – УБАР (Бусийн-Гол – Усть-Баргузин) – ОЛЬХ (Ольхон), а в декабре землетрясения ГСР (Главный Саянский разлом) и УБАР реализуются при низком  $K_p$ .

**Fig. 20.** Graph of the temporal change in  $K$  at the end of October, November and December 2025 (a) and the spatial distribution of earthquakes at the end of the CO impulse (earthquakes XY – БАПГ – МОН) and grouping of later weak earthquakes with different conditions of implementation (б). After the strongest magnetic storm on November 12 ( $K_p=8.7$ ), a transition is observed from the antiphase ratio of earthquakes in the west relative to earthquakes in the east and center to a consistent  $K$  of earthquakes in the west and center of the BRS. Earthquakes are caused by excitation of the magnetosphere in the time interval of November 2025 (earthquakes БУГ – УУ (Buguldeika – Ulan-Ude) – БУС – УБАР (Busiyn-Gol – Ust-Barguzin) – ОЛЬХ (Olkhon), and in December the earthquakes ГСР (Main Sayan Fault) and УБАР are realized at low  $K_p$ .

### *Особенности соотношения ОВП с магнитными бурями*

В имеющихся публикациях часто утверждается, что сейсмичность Земли связана с активностью Солнца. С одной стороны, указывается на корреляцию с солнечной активностью глобальной сейсмичности, не связанной с локальными процессами кластеризации (Marchitelli et al., 2020). С другой стороны, создается теоретический сценарий влияния на ионосферу косейсмических процессов, происходящих в земной коре (Freund, 2013). В последней работе выстраивается теория, согласно которой магматические и метаморфические породы содержат дефекты. При тектоническом напряжении они высвобождают дефектные электроны в кислородно-анионной подрешетке, известные как положительные дырки. Эти носители заряда обладают высокой подвижностью и способны перетекать из напряженных пород в окружающие ненапряженные породы. Они образуют электрические токи, которые испускают электромагнитное излучение, иногда импульсами, иногда непрерывно. Предполагается, что появление положительных дырок на границе раздела земля–воздух может привести к ионизации воздуха, часто исключительно положительной. Соответственно, подъем ионизированного воздуха вверх приводит к конденсации облаков. Восходящий поток положительных ионов вызывает нестабильность мезосферы, мезосферные молнии, изменения

полного электронного содержания (ПЭС) на нижней границе ионосферы и турбулентность электрического поля.

Импульсы электрического тока ст. 9 обычно запаздывают на 1–2 дня (реже на несколько дней) относительно магнитных бурь в ионосфере, публикуемых для Иркутска на сайте ([https://xras.ru/magnetic\\_storms.html](https://xras.ru/magnetic_storms.html)). В ноябре и декабре 2025 г. слабые землетрясения совпадали также частично с самими магнитными бурями. Выяснение причин запаздывания требует постановки специальных исследований. Здесь же нужно подчеркнуть, что записи ОВП ст. 9 содержат эффекты, вызванные всеми без исключения магнитными бурями в период наблюдений с декабря 2023 г. до конца 2025 г., тогда как в записях ОВП ст. 184 подобные эффекты в течение всего этого времени не зарегистрированы. Следовательно, ст. 9 получает электрические сигналы магнитных бурь благодаря особому пространственному положению считывающего устройства.

Во-первых, ст. 9 находится в зоне активного краевого Обручевского разлома Южно-Байкальской впадины, тогда как ст. 184 располагается на Култукской тектонической ступени, в осевой части рифтовой структуры. Тектонические напряжения активной краевой части впадины отличаются от тектонических напряжений внутренней части рифтовой структуры. В условиях сжатия и растяжения этой зоны могут создаваться электрические

токи, перетекающие из напряженных пород в окружающие ненапряженные породы. В условиях преобладающего растяжения земной коры под Култукской тектонической ступенью электрических токов с положительным зарядом не образуется.

Во-вторых, сенсор ст. 9 находится приблизительно на уровне зеркала оз. Байкал, в отличие от сенсора ст. 184, расположенного на 20 м выше этого уровня. Особое высотное расположение сенсора отражается в ОВП-откликах магнитных бурь, выраженных в разной степени. 8-ми суточная серия ОВП-импульсов 20–27 марта 2024 г., вызванная сильнейшей магнитной бурей 2024 г. (Кр до 8), начинается малоамплитудными (около 1 мВ) колебаниями, частично сглаживается и прогрессирует до глубоких минимумов с отрицательным зарядом, достигающих 138 мВ (Чебыкин и др., 2024). ОВП-импульсы усиливались пьезоэлектрическими эффектами толстого ледового покрова Байкала. Зимой и весной следующего года ледовый покров Байкала был тонким. ОВП-эффекты магнитных бурь были слабее. В отсутствие ледостава на оз. Байкал ОВП-эффекты магнитных бурь также проявлялись, но слабее – в виде глубоких одиночных минимумов и иногда в виде линий с зубчатой конфигурацией (Рассказов и др., 2025в).

Сильнейшая магнитная буря 2025 г. (Кр до 8.7), произошедшая 12–14 ноября, служит триггером слабых землетрясений БРС, происходящих 13–16 ноября на асейсмичном ноябрьском фоне в наиболее ослабленной центральной части БРС. Предшествующая слабая магнитная буря (Кр до 6.6), произошедшая 06–08 ноября на асейсмичном ноябрьском фоне, не влечет за собой землетрясений. Последующая слабое возмущение магнитосферы 24–25 ноября сопровождается Усть-Баргузинским землетрясением (УБАР) 25 ноября, а продолжающемуся возмущению магнитосферы 26–28 ноября соответствуют два Ольхонских землетрясения (ОЛЬХ) 27 и 28 ноября. Несмотря на сравнительно низкую

активность ионосферы, в активизации слабых землетрясений 25–28 ноября центра БРС сказывается электрохимический эффект, запущенный сильной магнитной бурей 13 ноября. Эпицентры землетрясений находятся в наиболее ослабленной центральной части структуры БРС. Еще одно слабое землетрясение (МОН, Мондинское) совпадает с магнитной бурей 22 декабря.

Отключения оборудования – сбои в мониторинговых записях в связи с землетрясениями и магнитными бурями

С сентября до декабря 2025 г. наблюдаются сбои в записях. Оборудование поддерживается автономным электропитанием, поэтому через какое-то время включается. Перерыв в наблюдениях имеет продолжительность от 4 ч. 10 мин. до 4 ч. 42 мин.

Первые сбои в записях на ст. 184 происходят 24–25 сентября в связи с проявлением двух землетрясений в кластере Таксимо (ТА-1 и ТА-2) (см. рис. 10 (Рассказов и др., 2025г)). Затем сбои в записях наблюдаются на обеих станциях 08 октября в связи с проявлением землетрясения в кластере Умхей (УМ) (см. рис. 12 (Рассказов и др., 2025г)). В ноябре и декабре сбои в записях 11, 13, 15 ноября и 07, 11 декабря ст. 184 сопровождают магнитные бури.

Указанные сбои в записях сопоставляются по продолжительности с аномальными высокочастотными вариациями температуры и рН ст. 9. Высокочастотные аномалии наблюдаются на этой станции 27 июня 2025 г. (см. рис. 3 и 4 (Рассказов и др., 2025в), а в конце 2025 г. – 19, 28 ноября и 05, 23–24 декабря.

Оба эффекта (сбои в записях и высокочастотные аномалии) отсутствуют в ходе всего интервала предшествующих наблюдений. Эти эффекты можно рассматривать как характерные отклики процессов, протекающих в земной коре во второй половине 2025 г.

### **Заключение**

Мы рассмотрели соотношения вариаций ОВП подземных вод Култукского полигона и

землетрясений Байкальской рифтовой системы во временном интервале с 24 октября до 31 декабря 2025 г. В начале этого интервала (с 24 до 30 октября) мы установили заключительные землетрясения импульса СО с относительно низким энергетическим классом ( $K < 11.5$ ). После структурной перестройки, с 13 до 28 ноября мы определили связь слабых землетрясений ( $K = 9.5 - 10.5$ ) с возбуждением магнитосферы, а после следующей структурной перестройки, с 08 до 20 декабря, – соответствие слабых землетрясений эпизоду низкого  $K_p$ .

Из общего анализа данных, полученных в ноябре и декабре, мы сделали вывод о связи вариаций ОВП подземных вод Култукского полигона и слабых землетрясений БРС в начале и в конце 2025 г. с магнитными бурями, тогда как в середине 2025 г. расшифровали 4 сейсмических импульса, во время которых магнитные бури не оказали существенного влияния на состояние земной коры. Повторяющиеся временные совпадения землетрясений с магнитными бурями, выраженными в вариациях ОВП подземных вод, могут свидетельствовать о действии магнитных бурь в качестве одного из спусковых механизмов слабых землетрясений.

Мы характеризуем сейсмичность 2025 г. как процесс, укладывающийся в один год. При реализации сильных землетрясений в 2020–2024 гг. годовая квазипериодичность сейсмической активности не очевидна, но намечается годовая дискретность процессов земной коры по вариациям концентрации лития и  $Na/Li$  отношения (температуры) подземных вод ст. 27. Максимумы  $Li$  приходятся на первые 5 месяцев каждого года (в период с января до мая). Концентрация  $Li$  возрастает в начале и в конце 2025 г. при снижении сейсмической активности, возможно, из-за влияния участвовавших магнитных бурь. Во второй половине 2025 г. обнаружен новый феномен отключения измерительного оборудования в скважинах Култукского полигона из-за землетрясений и магнитных бурь.

## Благодарности

Работа проводится 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»). В работе использованы данные о землетрясениях, полученные 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 Федерального исследовательского центра Единая геофизическая служба РАН, 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, рН и температуры подземных вод Култукского резервуара в режиме реального времени (Байкальская рифтовая система) // Геология и окружающая среда. 2023. 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

о окружающая среда. 2024. Т. 4, № 1. С. 42–60. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.42>

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. 2025а. Т. 5, № 1. С. 114–128. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.114.

Рассказов С.В., Снопков С.В., Асламов И.А., Архипенко В.И., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П. Оперативный анализ квазипериодических вариаций ОВП подземных вод и землетрясений Байкальской рифтовой системы в середине 2025 г. // Геология и окружающая среда. 2025б. Т. 5, № 2. С. 46–68. DOI 10.26516/2541-9641.2025.2.46.

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Снопков С.В., Чувашова И.С. Расширяющаяся сейсмичность и парагенетические вариации состава подземных вод в Байкальской рифтовой системе в 2020–2025 гг.: оценка текущего состояния земной коры // Геология и окружающая среда. 2025в. Т. 5, № 2. С. 46–68. DOI 10.26516/2541-9641.2025.2.46.

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Снопков С.В., Асламов И.А., Архипенко В.И., Ильясова А.М. Оперативный анализ растяжения и сжатия земной коры в Байкальской рифтовой системе по вариациям ОВП подземных вод в режиме реального времени: оценка соотношений силовых и сейсмических импульсов // Геология и окружающая среда. 2025г. Т. 5, № 3. С. 126–170. DOI 10.26516/2541-9641.2025.3.126.

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Снопков С.В., Ильясова А.М. Землетрясения Байкальской рифтовой системы в 2025 г.: снижение сейсмичности без изменений гидрогеодинамики // Геология и окружающая среда. 2025д. Т. 5, № 4.

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>

Balk M., Bose M., Ertem G., Rogoff D.A., Rothschild L.J., Freund F.T. Oxidation of water to hydrogen peroxide at the rock-water interface due to stressactivated electric currents in rocks // *Earth and Planetary Science Letters*. 2009. Vol. 283, No. 1–4. P. 87–92. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.03.044>.

Baniya S., Paudel S.R., Angove M.J., Acharya G., Wagle A., Khatri M., Ngo H.H., Guo W., Mainali B. Theoretical and earthquake-induced groundwater chemistry changes: A perspective // *Journal of Hydrology*. 2024. Vol. 643, 131917. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131917>

Fouillac R., Michard S. Sodium/Lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs // *Geothermics*. 1981. Vol. 10. P. 55–70.

Freund F. Earthquake forewarning – A multidisciplinary challenge from the ground up to space // *Acta Geophysica*. 2013. V. 61, no. 4. P. 775–807. DOI: 10.2478/s11600-013-0130-4

Marchitelli V., Troise C., Harabaglia P., Valenzano B., De Natale G. On the long range clustering of global seismicity and its correlation with Solar activity: A new perspective for earthquake forecasting // *Front. Earth Sci*. 2020. Vol. 8. 595209. doi: 10.3389/feart.2020.595209

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Snopkov 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*. 2024b. Vol. 133, 190. <https://doi.org/10.1007/s12040-024-02392-2>

## 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>

Balk M., Bose M., Ertem G., Rogoff D.A., Rothschild L.J., Freund F.T. Oxidation of water to

hydrogen peroxide at the rock-water interface due to stressactivated electric currents in rocks // Earth and Planetary Science Letters. 2009. Vol. 283, No. 1–4. P. 87–92. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.03.044>.

Baniya S., Paudel S.R., Angove M.J., Acharya G., Wagle A., Khatri M., Ngo H.H., Guo W., Mainali B. Theoretical and earthquake-induced groundwater chemistry changes: A perspective // Journal of Hydrology. 2024. Vol. 643, 131917. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131917>

Fouillac R., Michard S. Sodium/Lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs // Geothermics. 1981. Vol. 10. P. 55–70.

Freund F. Earthquake forewarning – A multidisciplinary challenge from the ground up to space // Acta Geophysica. 2013. V. 61, no. 4. P. 775–807. DOI: 10.2478/s11600-013-0130-4

Map of earthquake epicenters. Irkutsk: Baikal Branch of the Federal Research Center Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, 2025. <http://www.seis-bykl.ru>

Marchitelli V., Troise C., Harabaglia P., Valenzano B., De Natale G. On the long range clustering of global seismicity and its correlation with Solar activity: A new perspective for earthquake forecasting // Front. Earth Sci. 2020. Vol. 8. 595209. doi: 10.3389/feart.2020.595209

Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Snopkov S.V., Arkhipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. First experience in real-time monitoring of coseismic and aseismic ORP, pH, and temperature variations in groundwater from the Kultuk reservoir (Baikal Rift System) // Geology and Environment. 2023. 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. Real-time monitoring of oxidation-reduction potential in groundwater from the Kultuk area in late 2023 – early 2024: comparison of electric effects with earthquakes in the central Baikal Rift System // Geology and Environment. 2024. Vol. 4, No. 1. P. 42–60. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.42>

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 geomagnetic storms in early 2025 // Geology and Environment. 2025a. Vol. 5, No. 1. P. 114–128 DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.114.

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Chuvashova I.S. Expanding seismicity and paragenetic variations of groundwater compositions in the Baikal Rift System in 2020–2025: Current state assessment of the earth's crust // Geology and Environment. 2025b. Vol. 5, No. 2. P. 69–123. DOI 10.26516/2541-9641.2025.2.69.

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Snopkov S.V., Aslamov I.A., Arkhipenko V.I., Ilyasova A.M. Operational analysis of crustal extension and compression in the Baikal Rift System from real-time variations in groundwater oxidation-reduction potential: assessment of the relationship between force and seismic pulses // Geology and Environment. 2025r. Vol. 5, No. 3.

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Snopkov S.V., Ilyasova A.M. Earthquakes of the Baikal rift system in 2025: a decrease in seismicity without changes in hydrogeodynamics // Geology and Environment. 2025d. Vol. 5, No. 4.

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Snopkov 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. 2024b. Vol. 133, 190. <https://doi.org/10.1007/s12040-024-02392-2>

Rasskazov S.V., Snopkov S.V., Aslamov I.A., Arkhipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. Operational analysis of weekly quasi-periodical variations in groundwater redox potential and earthquakes of the Baikal Rift System in mid-2025 // Geology and Environment. 2025f. Vol. 5, No. 2. P. 46–68. DOI 10.26516/2541-9641.2025.2.46.

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>

**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 Vasilevich**

doctor of geological and mineralogical sciences, professor,  
664025, 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 the Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies,  
tel.: (3952) 51–16–59,  
email: rassk@crust.irk.ru

**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, Ulan-Batorskaya st., 3,  
Limnological Institute SB RAS,  
email: ilya\_aslamov@bk.ru

**Снопков Сергей Викторович,**

кандидат геолого-минералогических наук,  
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 Sergei Viktorovich,**

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,  
664003, Irkutsk, Lenin str., 3,  
Irkutsk State University, Faculty of Geology,  
Associate Professor,  
664074, Irkutsk, Kurchatov st., 3,  
Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University,  
Leading Researcher,  
email: snopkov\_serg@mail.ru.

**Архипенко Владислав Иванович,**

664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,  
Лимнологический институт СО РАН,  
главный специалист по электронике,  
email: vladarxip@gmail.com

**Arkhipenko Vladislav Ivanovich,**

664033, Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3,  
Limnological Institute SB RAS,  
Main Electronics Engineer,  
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,  
664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
Leading Engineer,  
email: ila@crust.irk.ru

**Чебыкин Евгений Павлович,**  
кандидат химических наук,  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,  
Институт земной коры СО РАН,  
664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1А,  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,  
старший научный сотрудник,  
email: epcheb@yandex.ru

**Chebykin Eugene Pavlovich,**  
Candidate of Chemical Sciences,  
664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
664033, Irkutsk, Favorskiy st., 1A,  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,  
Senior Researcher,  
email: epcheb@yandex.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,  
**Chuvashova Irina Sergeevna,**  
candidate of geological and mineralogical sciences,  
664033, Irkutsk, st. Lermontov, 128,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
Senior Researcher,  
tel.: (3952) 51–16–59,  
email: chuvashova@crust.irk.ru

---

## ГЕОЛОГИЯ НЕФТИ И ГАЗА

УДК 553.98:552.54(571.5)

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2025.4.132>

EDN: RVGZVL

### Влияние тектонических нарушений на формирование вторичной кальцитизации осинского горизонта на территории Непско-Ботубинской антеклизы

А.Р. Валиуллин<sup>1</sup>, В.А. Захарова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Группа компаний «Газпром нефть», г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия

**Аннотация.** Осинский горизонт (пласт Б1) Непско-Ботубинской антеклизы характеризуется сложным геологическим строением и широким развитием вторичных процессов, среди которых кальцитизация оказывает существенное негативное влияние на фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) коллектора. Актуальной задачей является поиск факторов, контролирующих пространственное распределение зон вторичной кальцитизации для улучшения прогноза качества коллектора. Целью исследования является установление взаимосвязи между развитием тектонических нарушений и интенсивностью вторичной кальцитизации в пласте Б1 осинского горизонта. В работе использован комплексный подход, включающий анализ данных литологического каротажа (LithoScanner) и микроимиджерного каротажа (FMI) по 12 скважинам, интерпретацию данных сейсморазведки и электроразведки, а также результаты построения бассейновой и геомеханической моделей. Комплексный анализ позволил установить не только обратную зависимость между близостью к Тымпучиканскому надвигу и содержанием вторичного кальцита, но и выявить совпадение простирания проводящих трещин с направлением надвига. Это служит прямым доказательством того, что тектонические нарушения служили дренирующей системой для миграции минерализованных флюидов, что предотвращало осаждение кальцита. Сделан вывод о том, что близость к надвигу является качественным критерием для прогнозирования зон с улучшенными ФЕС пласта Б1, что открывает возможности для эффективного планирования геологоразведочных работ на слабоизученных участках со схожим тектоническим строением.

**Ключевые слова:** осинский горизонт, вторичная кальцитизация, тектонические нарушения, Тымпучиканский надвиг, фильтрационно-емкостные свойства, коллектор, LithoScanner, бассейновое моделирование

\* Статья получена: 19.11.2025; исправлена: 25.11.2025; принята: 05.12.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Валиуллин А.Р., Захарова В.А. Влияние тектонических нарушений на формирование вторичной кальцитизации осинского горизонта на территории Непско-Ботубинской антеклизы // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 4. С. 132–140. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.132. EDN: RVGZVL

Article received: 19.11.2025; corrected: 25.11.2025; accepted: 05.12.2025.

FOR CITATION: Valiullin A.R., Zakharova V.A. Influence of Tectonic Faults on the Formation of Secondary Calcification of the osinsky horizon within the Nepa-Botuoba Antecline // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 4. P. 132–140. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.132. EDN: RVGZVL

# Influence of Tectonic Faults on the Formation of Secondary Calcitization of the Osinsky Horizon within the Nepa-Botuoba Antecline

A.R. Valiullin<sup>1</sup>, V.A. Zakharova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gazprom нефть company group, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Tyumen State University, Tyumen, Russia

**Abstract.** The osinsky horizon (Reservoir B1) of the Nepa-Botuoba Antecline is characterized by complex geology and widespread secondary processes, among which calcitization significantly deteriorates reservoir properties. Identifying factors controlling the spatial distribution of secondary calcitization zones is crucial for improving reservoir quality prediction. This research aims to establish a relationship between tectonic fault development and the intensity of secondary calcitization in Reservoir B1 of the osinsky horizon. An integrated approach was used, including analysis of lithological (LithoScanner), and microimager (FMI) logging data from 12 wells, interpretation of seismic and electro-tomography data, and results from basin and geomechanical modeling. The comprehensive analysis revealed not only an inverse relationship between the proximity to the Tympuchikan Thrust and the secondary calcite content but also a coincidence between the strike of conductive fractures and the thrust direction. This provides direct evidence that the tectonic faults acted as a drainage system for the migration of mineralized fluids, which prevented calcite precipitation. It is concluded that the proximity to the thrust is a qualitative criterion for predicting zones with improved reservoir properties in Reservoir B1, offering opportunities for effective exploration planning in understudied areas with similar structural settings.

**Keywords:** osinsky horizon, secondary calcitization, tectonic faults, Tympuchikan Thrust, reservoir properties, reservoir, LithoScanner, basin modeling

## Введение

Коллектор пласта Б1 состоит преимущественно из доломита и характеризуется вторичной кальцитизацией, которая ухудшает фильтрационно-емкостные свойства коллектора (Городнов и др., 2012). При этом на данном этапе у нас нет понимания как спрогнозировать вторичные преобразования в межскважинном пространстве. Как отмечает автор Н.В. Мельников, 2018 г., возможно содержание кальцита связано с гипсометрическими отметками палеоусловий. Также, возможно есть связь с локальной трещиноватостью, которая могла создать благоприятные условия для просачивания воды вверх по разрезу из-за чего снижается кальцитизация коллектора.

Чтобы проработать данные гипотезы и найти закономерности по площадному распространению вторичного кальцита мы обратились к бассейновой модели территории исследования.

Приведем основные этапы формирования территории (рис. 1):

в рифейское время в Восточной Сибири отложения формировались в прогибах, произошло заложение рифейских авлакогенов, представленных в бассейновой модели узкими грабенами, происходило раскрытие Палеоазиатского океана;

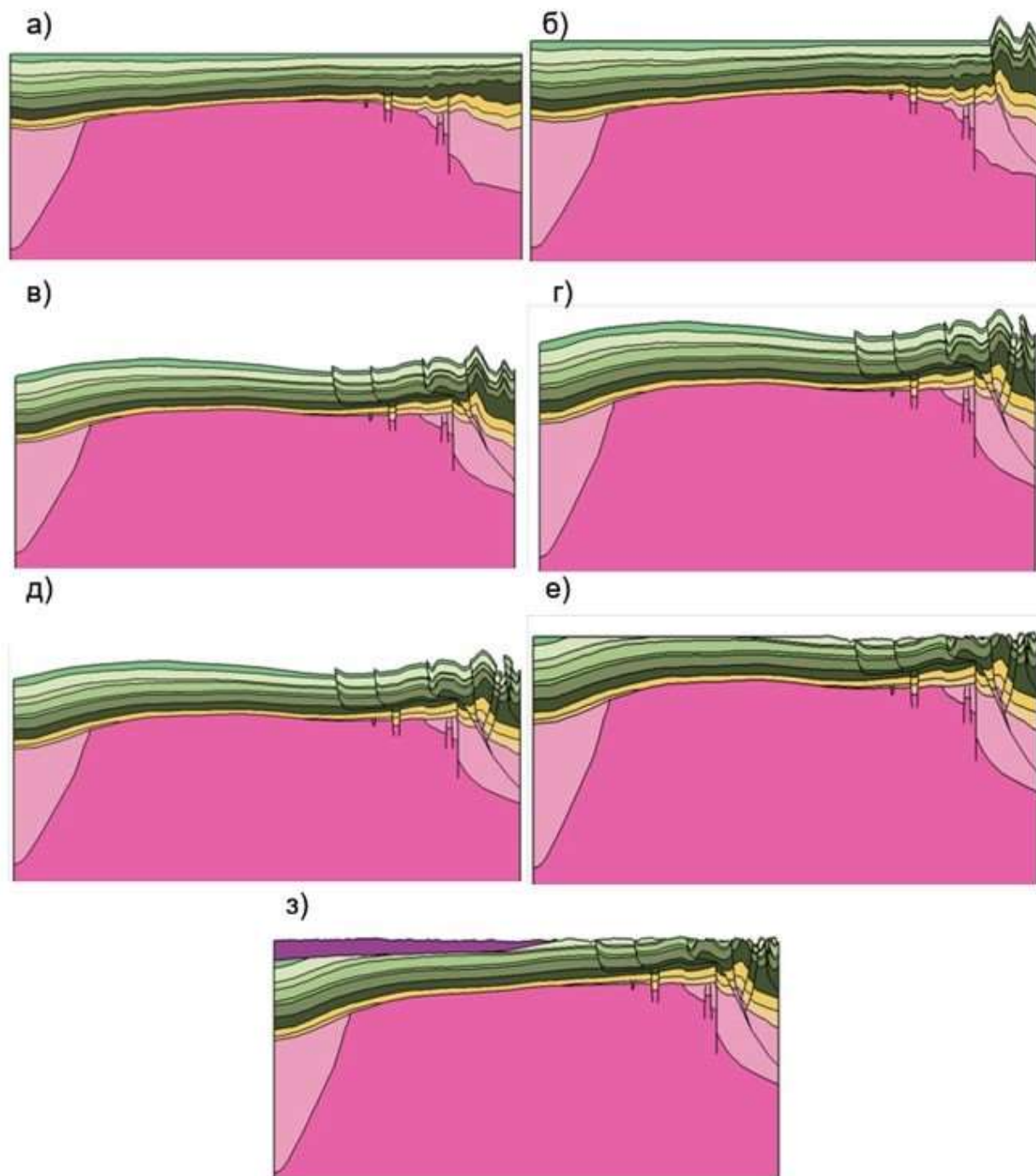
в результате байкальской складчатости на рубеже рифей-вендского времени произошло смятие и деформация рифейских отложений с их последующей частичной или полной эрозией. Этот этап не учтен в модели в связи с отсутствием информации по нему (геометрия слоев, степень сжатия и т. д.);

в венд-ордовикское время шло постепенное погружение Непско-Ботуобинской антеклизы и накопление осадков преимущественно в условиях пассивной континентальной окраины;

в позднем кембрии-ордовике на территории антеклизы были зафиксированы перемены в осадконакоплении, являющиеся результатом деятельности салаирской складчатости;

на рубеже силура-девона в результате коллизии Баргузинского террейна произошло формирование Байкало-Патомской складчатой области, выраженное образованием

надвиговых деформаций на территории НБА  
и в Предпатомском прогибе.



**Рис. 1.** Этапы формирования территории исследования. Соотношение вертикального масштаба к горизонтальному 1:30.

а) преддеформационный разрез; б) начало надвигообразования: первый надвиг; в) продвижение фронта надвигов; г) образование обратных надвигов; д) завершение надвигообразования; е) эрозия; з) современный разрез.

**Fig. 1.** Stages of the formation of the study territory. The ratio of the vertical scale to the horizontal scale is 1:30.

а) Pre-deformation section; б) Initiation of thrusting: the first thrust; в) Advance of the thrust front; г) Formation of back thrusts; д) Completion of thrusting; е) Erosion; з) Present-day section.

### **Исходные данные**

На исследуемом месторождении пробурено 12 скважин, в которых записан литосканер, по анализу результатов которого делаем вывод, что карбонатные породы состоят преимущественно из доломита, с вторичной кальцитизацией, также в некоторых из этих скважин записан Formation MicroImager, на основании которого была построена геомеханическая модель. Также на территории месторождения выполнены 3D сейсморазведочные работы в 2012–2016 гг., в добавок к ним выполнялись электроразведочные работы, результаты которых могут дополнить сейсмическую информацию. Бассейновая модель хоть и не строилась локально для данного месторождения, но описывает более обширную территорию, которая включает в себя и участок работ.

### **Методы исследования**

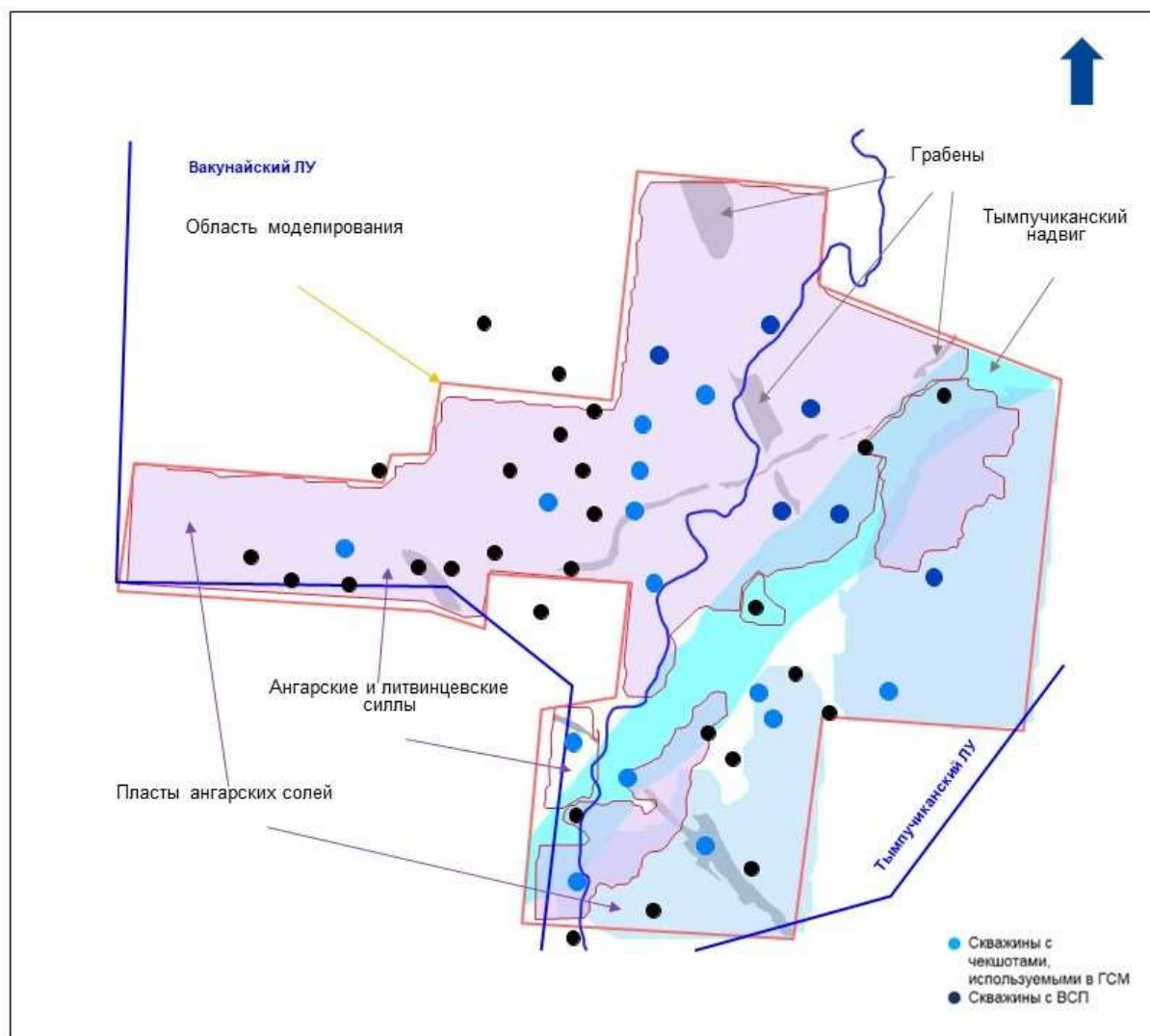
Для решения поставленной задачи был применен комплекс методов, включающий интерпретацию данных сейсморазведки и электроразведки (ЗСБ), геомеханическое моделирование, а также анализ данных ГИС.

Следует отметить, что построение обоснованной глубинно-скоростной модели со сложностями использования сейсмических и скважинных данных, которые вызваны как геологическими, так и техническими причинами. К первым относится сложное строение территории. В основании разрез представлен кристаллическим фундаментом, осложнённым грабенами и выступами. Фундамент

перекрывается терригенным комплексом мощностью от более чем 200 м в Ербогачено-Чуйском грабене до десятка метров с уменьшением в северо-западном направлении с полным выклиниванием в зонах выступов фундамента. Выше разрез представлен переслаиванием акустически контрастных карбонатно-галогенных слоёв, перекрытых в верхней части терригенными отложениями.

Территорию исследования пересекает региональный Тымпучиканский надвиг (рис. 2), генетически являющийся фронтальным рампом Байкало-Патомского складчатонадвигового пояса. Надвигом и парагенетическими надвигами, и взбросами затронуты породы усольской свиты и рельеф. Помимо прочего разрез осложнён интрузивными телами (дайками и силлами). Дайками разрез нарушен от фундамента до дневной поверхности, хотя большая часть даек затухает в средней карбонатно-галогенной части разреза. В породы ангарской и литвинцевской свит внедрены силлы долеритов. Основной силл, мощностью до 100 м располагается в толще ангарской свиты в западной части, бронирован Тымпучиканским надвигом. Второстепенный силл ангарской свиты и силл литвинцевской свиты приурочены к антиклинальной складке надвига, частично выходят на поверхность.

Также в разрезе выделяются зоны скупивания галогенных пород ангарской и бельской свит по обеим сторонам от надвига. В зоне надвига предполагается область растворения и отсутствия солей ангарской и бельской свит.



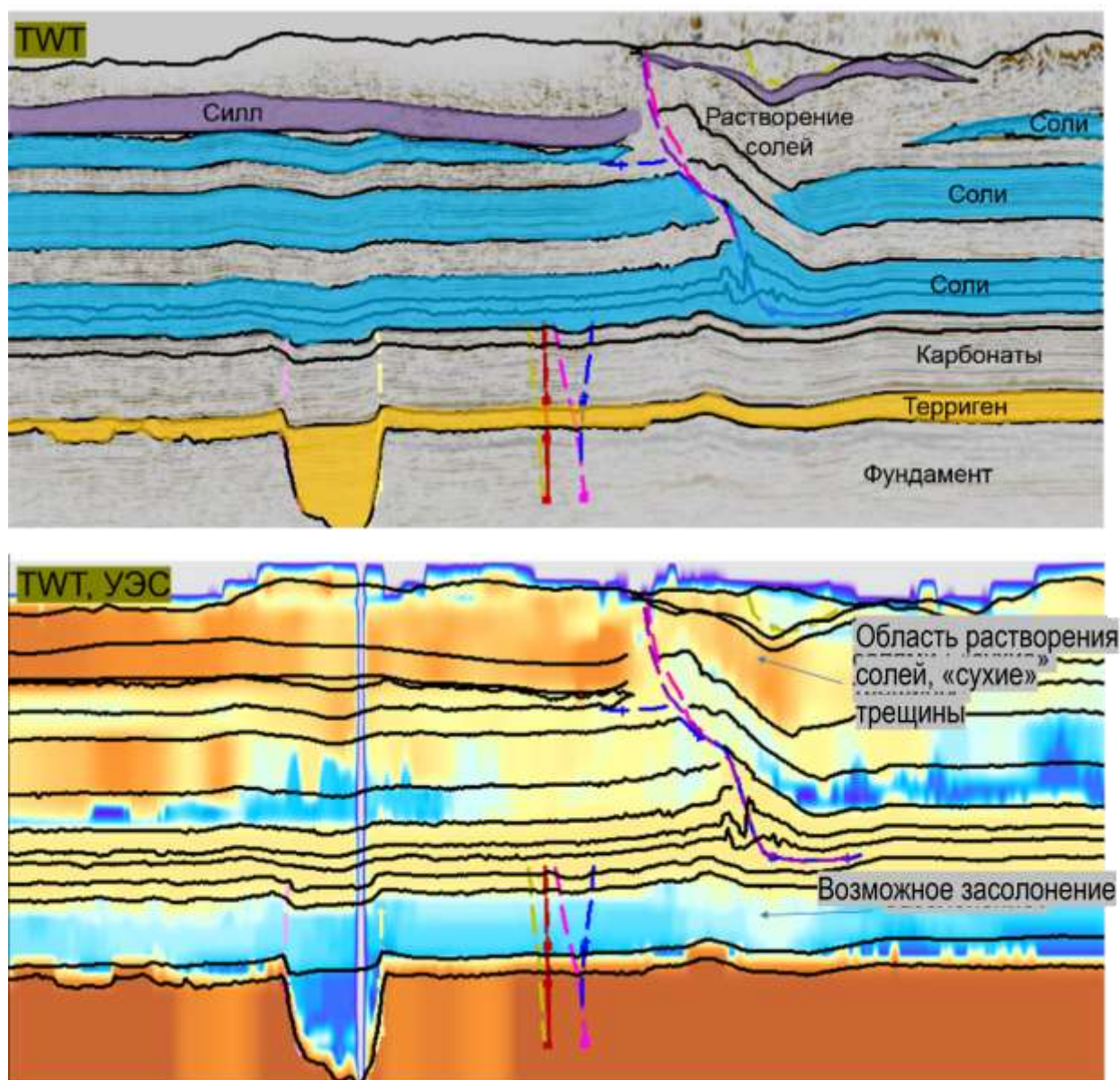
**Рис. 2.** Карта геологических объектов и структур Тымпучиканского и Вакунайского ЛУ.

**Fig. 2.** Map of geological objects and structures of the Tympuchikan and Vakunaysky License Areas.

Несмотря на сравнительно не высокую разрешающую способность метода становления поля в ближней зоне (ЗСБ) и, возможную недостоверность, вызванную некорректной инверсией в отличной структурной модели, анализ данных ЭРР позволил уточнить интерпретацию сейсмических материалов.

На кубе удельного электрического сопротивления (УЭС), полученного в результате инверсии полевых электроразведочных

данных ЗСБ выделяются зоны развития траппового комплекса (рис. 3). На разрезах сопротивления оранжевого цвета соответствует большому сопротивлению, синие – меньшему. Ввиду низкого качества сейсмических данных в приповерхностной зоне интерпретация профилей мЗСБ позволила уточнить зону складки Тымпучиканского надвига – добавлены осложняющие взбросы, выделены интрузивные тела.



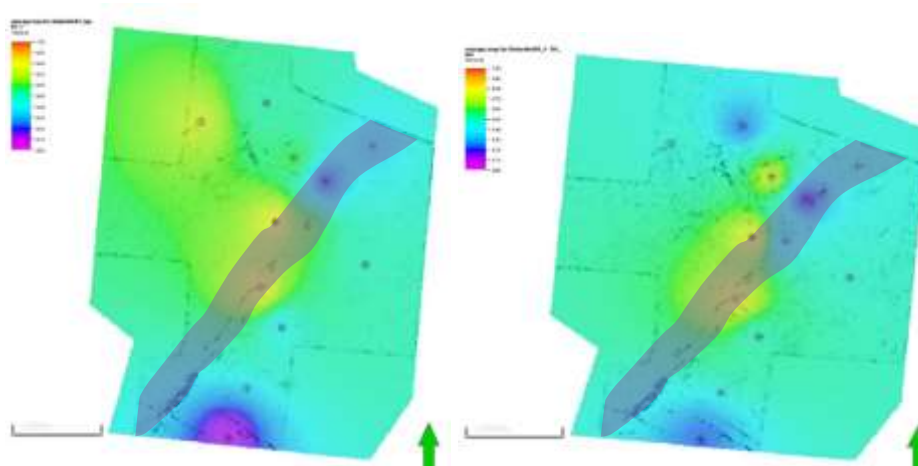
**Рис. 3.** Сейсмический разрез нанесенной интерпретацией геологических объектов (сверху), разрез куба УЭС (снизу).

**Fig. 3.** Seismic section with interpreted geological objects (top), section of the resistivity cube (bottom).

### Результаты исследования

Анализируя полученные результаты (понимание тектонических особенности развития района работ, а также петрографический состав пород в скважинах) обнаруживается закономерность содержания кальцита в скважинах с записанным lithoscanner в зависимости от их территориального расположения. По результатам обнаружена связь между

низким содержанием кальцита и локализацией Тымпучинканского надвига (рис. 4). Отсюда можно сделать вывод, что механизм кальцитизации связан с длительным нахождением воды, насыщенной минералами кальцита (рассолами) в пласте, и в тех зонах, где выше по разрезу есть тектонические нарушения, по которым минерализованная вода могла уходить – содержание вторичного кальцита ниже.



**Рис. 4.** Сравнение наложением карты по данным Ant-Tracking и данным LitoScanner по содержанию кальциту по кровельной части пласта Б1 (слева) и по подошвенной части пласта Б1 (справа).

**Fig. 4.** Comparison by overlay of the Ant-Tracking data map and LithosScanner data on calcite content in the top part of Reservoir B1 (left) and the bottom part of Reservoir B1 (right).

Также для проверки этой гипотезы был проведен анализ направленности проводящих трещин по данным микроимиджерного каротажа (FMI). Установлено, что преобладающее направление простирания проводящих трещин совпадает с простиранием Тымпучиканского надвига: СВ ( $30^{\circ}$ - $50^{\circ}$ ) – ЮЗ ( $210^{\circ}$ - $230^{\circ}$ ). Это может быть подтверждением того, что надвиг и связанная с ним трещиноватость формируют единую проводящую систему, которая могла служить каналом для миграции минерализованных флюидов и оттока рассолов, насыщенных кальцитом.

### Обсуждение результатов

После седиментации и литификации карбонатных осадков, когда происходило осаждение метеорных и седиментационных вод, насыщенных ионами кальция и гидрокарбоната, произошли активные тектонические движения, создавшие систему высокопроницаемых каналов в районе Тымпучиканского надвига. В зонах, прилегающих к надвику, создались условия для направленного оттока минерализованных вод, насыщенных ионами  $\text{Ca}^{2+}$ . Постоянный вынос этих ионов из порового пространства пласта не позволял раствору достигать химического равновесия, необходимого для осаждения кальцита. Таким образом, вблизи каналов дренирования сам процесс кальцитизации подавлялся. Порода

в этих зонах сохранили свои первичные или ранние вторичные ФЕС, не будучи ухудшены поздней кальцитизацией.

Интерпретация данных электроразведки (ЗСБ) качественно подтверждает предложенную модель. На кубе удельного электрического сопротивления (УЭС) в изучаемом интервале отчетливо выделяются линейные аномалии высокого сопротивления (см. рис. 3), приуроченные к зоне влияния Тымпучиканского надвига. В карбонатных породах подобные аномалии интерпретируются как зоны развития вторичной трещиноватости и кавернозности. Предположительно эти трещины были заполнены высокоомным флюидом (углеводородами), что и обусловило высокие значения УЭС.

Данное наблюдение согласуется с гипотезой о том, что тектонические нарушения выполняли роль дренажной системы. Высокоомные линейные зоны, совпадающие с надвигом, маркируют пути, по которым происходила миграция флюидов. Именно по этим каналам минерализованные воды, насыщенные ионами кальция, могли дренироваться из пласта Б1, предотвращая процессы вторичной кальцитизации и формируя, таким образом, зоны с улучшенными ФЕС, выявленные по данным LithoScanner.

Наши выводы согласуются с исследованиями В.С. Воробьева и др., 2016, 2017 гг.,

которые также отмечают, что основными факторами, определяющими галитизацию пород, являются палеотектоническая активность района, близость к разломам, вдоль которых проходила миграция солей, и гидродинамическая связь песчаных тел с зонами нисходящей фильтрации высокоминерализованных рассолов.

Возможно, трещины присутствуют и ниже пласта Б1, но на данный момент сейсмические данные не позволяют нам достоверно выделить их в силу низкой разрешающей способности.

### Выводы

На основе комплекса геолого-геофизических данных установлена устойчивая обратная зависимость между близостью к зоне Тымпучиканского надвига и содержанием вторичного кальцита в породах пласта Б1. Это подтверждается данными LithoScanner по 12 скважинам, которые показывают, что минимальные содержания кальцита фиксируются в непосредственной близости от тектонического нарушения.

Предложена качественная генетическая модель, согласно которой тектонические нарушения служили каналами для дренирования минерализованных пластовых флюидов. Вынос ионов кальция вдоль этих зон предотвращал их осаждение в виде цемента, что объясняет лучшие коллекторские свойства в околоповерхностных частях разлома.

Установлено, что близость к надвигу может использоваться как качественный критерий для прогнозирования зон с улучшенными ФЕС в пределах осинского горизонта. Это позволяет выделять перспективные участки для планирования геологоразведочных работ даже в условиях отсутствия количественных сейсмических прогнозов, что актуально для слабоизученных участков с аналогичным тектоническим строением.

Показана эффективность комплексного подхода, интегрирующего данные ГИС (LithoScanner, FMI), сейсморазведки (Ant-Tracking) и электроразведки (ЗСБ) для решения задач прогноза вторичных изменений коллекторов. Совместный анализ разнородных данных позволил перейти от констатации факта к построению причинно-

следственной модели формирования свойств коллектора.

### Литература

Городнов А.В., Черноглазов В.Н., Давыдова О.П. Определение фильтрационно-емкостных свойств засоленных коллекторов в терригенных отложениях Непского свода Восточной Сибири // Научно-технический вестник Каротажник. Тверь : 2012. Вып. 12 (222). С. 25–41.

Воробьев В.С., Чеканов И.В., Клиновая Я.С. Модель распространения терригенных коллекторов и засоленных песчано-гравелитистых отложений в пределах месторождений центральной части Непского свода // Геология нефти и газа. Москва : 2017, №3. С. 47–60.

Воробьев В.С. Закономерности распределения коллекторов и интервалов засоления в терригенном комплексе венда Чонской группы месторождений (Восточная Сибирь) / В.С. Воробьев, Л.Н. Шакирзянов, Е.А. Жуковская // Тез. конф. Проблемы и опыт разработки трудноизвлекаемых запасов нефтегазоконденсатных месторождений. Санкт-Петербург : 2015.

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

### References

Gorodnov A.V. Determination of filtration-capacity properties of salinized reservoirs in terrigenous deposits of the Nepa Arch of Eastern Siberia / A.V. Gorodnov, V.N. Chernoglazov, O.P. Davydova // Scientific and Technical Bulletin "Karotazhnik". Tver : 2012. Vol. 12 (222). P. 25–41.

Vorobiev V.S. Model of distribution of terrigenous reservoirs and salinized sandy-gravelly deposits within the fields of the central part of the Nepa Arch / V.S. Vorobiev, I.V. Chekanov, Ya.S. Klinovaya // Geology of Oil and Gas. Moscow : 2017, No. 3. P. 47–60.

Vorobiev V.S. Patterns of distribution of reservoirs and salinization intervals in the Vendian terrigenous complex of the Chonsk group of fields (Eastern Siberia) / V.S. Vorobiev, L.N. Shakirzyanov, E.A. Zhukovskaya // Abstracts of the conference "Problems and Experience in Developing Hard-to-Recover Reserves of Oil and Gas Condensate Fields". Saint Petersburg : 2015.

Melnikov N.V. Vendian-Cambrian Salt-Bearing Basin of the Siberian Platform (Stratigraphy, History

of Development) / N.V. Melnikov. 2nd ed. Novosibirsk : SNIIGGiMS Publishing House, 2018. 177 p.

**Валиуллин Артур Расимович,**  
Группа компаний «Газпром нефть»,  
190000, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Почтамтская, д. 3-5,  
главный специалист,  
тел: +7(3452) 685 670 (доб. 6392),  
email: Valiullin.ar@gazprom-neft.ru  
**Valiullin Artur Rasimovich,**  
Gazprom нефt company group,  
3–5, Pochtamtamskaya st., 190000, Saint Petersburg, Russia,  
Main Specialist,  
tel: +7(3452) 685 670 (dob. 6392),  
email: Valiullin.ar@gazprom-neft.ru

**Захарова Валерия Александровна,**  
Тюменский государственный университет,  
625003, Россия, Тюмень, ул. Володарского, д. 6,  
специалист,  
email: Zakharova.va@contractor.gazprom-neft.ru  
**Zakharova Valeriia Aleksandrovna,**  
Tyumen State University,  
6, Volodarskogo str. 625003, Tyumen, Russia,  
Specialist,  
email: Zakharova.va@contractor.gazprom-neft.ru

---

# ВУЛКАНИЗМ, НОВЕЙШАЯ ГЕОДИНАМИКА

УДК 550.42.14+551.21+552.333+(51)  
<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2025.4.141>  
 EDN: PUHFZV

## Геохимическая оценка дифференциации в лавовых слоях и пространственной смены вулканических источников предголоценовой тефрит-трахибазальтовой серии в высоком горном хребте Большой Саян и Окинской впадине

С.В. Рассказов<sup>1,2</sup>, Д.И. Парфенов<sup>2</sup>, З.Б. Галсанов<sup>3</sup>, Б.Д. Шарастепанов<sup>3</sup>, А.П. Папаев<sup>3</sup>, С.В. Снопков<sup>2,4</sup>, Т.А. Ясныгина<sup>1</sup>, И.С. Чувашова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>3</sup>Орликская средняя школа, Орлик, Россия

<sup>4</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**Аннотация.** В работе приводятся результаты сравнительных геохимических исследований предголоценовых трахибазальтов и тефритов в северной части позднекайнозойского Окинского вулканического поля – Усть-Жомболокского лавового покрова Окинской впадины и лавовых потоков и шлаковых конусов верховьев р. Жом-Болок и пади Хи-Гол в осевой части хр. Большой Саян. По морфологии поверхности лавовых слоев обеих территорий предполагается концентрирование остаточных расплавов в трубоподобных каналах с последующим удалением из них и обрушением кровли. В обнажениях Усть-Жомболокского лавового покрова Окинской впадины выявляется тренд снижения  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  со слабым относительным снижением магниевого числа  $\text{Mg\#}$  пород переходной фации между фациями закалки и остаточного расплава «трубы». Тренд отражает контроль перераспределения компонентов совместной кристаллизацией титанавгита и плагиоклаза на ранней стадии периферического отвердевания базальтового слоя. В породах остаточного расплава в трубоподобных каналах лавовых слоев Усть-Жомболокского покрова повышается  $\text{SiO}_2$  и снижается  $\text{Sr}$ . В породах доступных для опробования верхних частей незэродированных лавовых потоков осевой части хр. Большой Саян различаются тренды фракционирования оливина с участием Са-плагиоклаза (с повышенным  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и без участия Са-плагиоклаза (с низким  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Последний тренд соответствует котектике оливин+титанавгит. Тренд фации «трубы» (котектика титанавгит+плагиоклаз с варьирующим  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  при узком диапазоне  $\text{Mg\#}$ ) в породах осевой части хр. Большой Саян не идентифицируется. Выявляется изменение геохимических характеристик пород, свидетельствующее о малоглубинном плавлении слабо амфиболизированного, безгранатового пироксенитового материала под Окинской впадиной и более глубинного, обогащенного амфиболом, гранатсодержащего, перидотитового – под осевой частью хр. Большой Саян. Подчеркивается значение

Статья получена: 08.12.2025; исправлена: 19.12.2025; принята: 26.12.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рассказов С.В., Парфенов Д.И., Шарастепанов Б.Д., Папаев А.П., Снопков С.В., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С. Геохимическая оценка дифференциации в лавовых слоях и пространственной смены вулканических источников предголоценовой тефрит-трахибазальтовой серии в высоком горном хребте Большой Саян и Окинской впадине // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 4. С. 141–171. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.141. EDN: PUHFZV

Article received: 08.12.2025; corrected: 19.12.2025; accepted: 26.12.2025.

FOR CITATION: Rasskazov S.V., Parfenov D.I., Sharastepanov B.D., Papaev A.P., Snopkov S.V., Yasnygina T.A., Chuvashova I.S. Geochemical assessment of differentiation in lava layers and spatial change in volcanic sources for pre-Holocene tephrite-trachybasalt series in the High Great Sayan Range and Oka Basin // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 4. P. 141–171. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.141. EDN: PUHFZV

последнего (предголоценового) поступления магматических расплавов с глубин коромантийного перехода (КМП) и мантии в Байкальской рифтовой системе (БРС). Обращается внимание на различие источников финального вулканизма северной части Окинского вулканического поля и Чулутынской зоны Центральной Монголии: вовлечение в плавление материала обедненной литосферы в первой из них и проявление ОИБ-подобного материала – во второй.

**Ключевые слова:** базальты, поздний плейстоцен, голоцен, Восточные Саяны

## Geochemical Assessment of Differentiation in Lava Layers and Spatial Change in Volcanic Sources for pre-Holocene Tephrite-Trachybasalt Series in the High Great Sayan Range and Oka Basin

S.V. Rasskazov<sup>1,2</sup>, D.I. Parfenov<sup>2</sup>, Z.B. Galsanov<sup>3</sup>, B.D. Sharastepanov<sup>3</sup>, A.P. Papaev<sup>3</sup>, S.V. Snopkov<sup>2,4</sup>, T.A. Yasnygina<sup>1</sup>, I.S. Chuvashova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia*

<sup>2</sup>*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

<sup>3</sup>*Orlik Secondary School, Orlik, Russia*

<sup>4</sup>*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract.** We present the results of comparative geochemical studies of pre-Holocene trachybasalts and tephrites in the northern part of the late Cenozoic Oka volcanic field — the Ust-Zhombolok lava cover in the Oka Basin and lava flows and cinder cones of the upper reaches in the Zhombolok River and the Khi-Gol valley at the axial part of the Great Sayan Range. From surface morphology of lava layers in both areas, it is assumed that residual melts were concentrated in pipe-like channels, followed by their removal and roof collapse. Outcrops of the Ust-Zhombolok lava flow of the Oka Basin reveal a trend toward decreasing  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  with a slight relative decrease in magnesium number (Mg#) of transitional facies rocks between the quench and residual melt facies of the "pipe." The trend reflects a control of component redistribution by co-crystallization of titanite and plagioclase at the early stage of peripheral solidification of lava layers. In the residual melts of the pipe-like channels within lava layers of the Ust-Zhombolok cover,  $\text{SiO}_2$  increases and Sr decreases. In the rocks of the upper parts of the uneroded lava flows of the axial part of the Bolshoi Sayan Range accessible for sampling, trends in olivine fractionation with the participation of Ca-plagioclase (with elevated  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) and without the participation of Ca-plagioclase (with low  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) are distinguished. The latter trend corresponds to the olivine + titanite cotectic. The trend of the "pipe" facies (titanite-augite + plagioclase cotectic with variable  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  and a narrow range of Mg#) in the rocks of the axial part of the Bolshoi Sayan Range is not identified. Changes in the geochemical signatures of rocks are revealed, indicating shallow melting of slightly amphibolized, garnet-free pyroxenite material beneath the Oka Basin and deeper, amphibole-enriched, garnet-bearing, peridotite one beneath the axial part of the Great Sayan Range. The importance of the last (pre-Holocene) influx of magmatic melts from the depths of the crust-mantle transition (CMT) and underlying mantle in the Baikal Rift System (BRS) is emphasized. Attention is drawn to the differences between sources of a final volcanism in the northern Oka volcanic field and Chulutyn zone of Central Mongolia: involvement in melting of the depleted lithosphere in the former, and displaying of OIB-like material in the latter.

**Keywords:** basalts, late Pleistocene, Holocene, Eastern Sayans

### Введение

Процессы позднекайнозойского образования высоких горных хребтов и впадин в Саянах и Центральной Монголии сопровождаются вулканизмом, источники которого в

основном имеют геохимические характеристики литосферных протолитов. Характеристики мантии, подобной источникам базальта океанических островов (ОИБ), устанавливаются для них в исключительных случаях (Рассказов и др., 2012, 2015; Чувашова и др.,

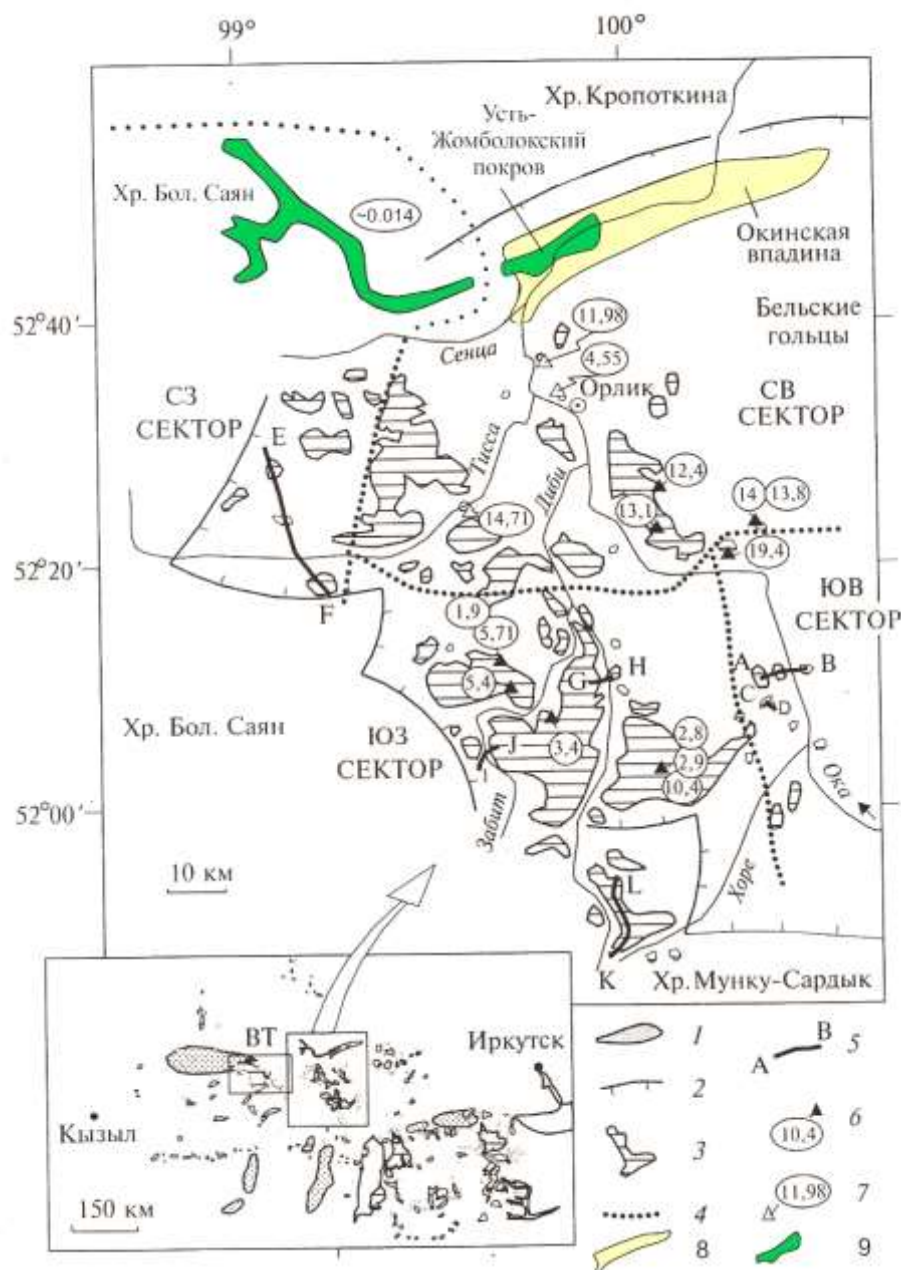
2022). В позднекайнозойском развитии рельефа Внутренней Азии ведущую роль играл процесс образования горных сооружений. Территория, занятая впадинами, составляет здесь не более 10 % (Флоренсов, 1960). Возникает вопрос о характере глубинных процессов, сопровождающих преобразование коры и мантии под высокими горными хребтами и впадинами.

Изучение кристаллических включений в базальтах Тункинской впадины Байкальской рифтовой системы (БРС) показало распространение железо-магнезиальных пород при отсутствии в них амфибола или слюды. В родственных поликристаллических включениях из нека высокого Тункинского хребта был обнаружен амфибол как главная железо-магнезиальная фаза. Этот минерал играет существенную роль в петрогенезисе вулканических пород высокого хребта Удокан, на котором концентрируется позднекайнозойский вулканизм в восточной части БРС (Рассказов, 1985), а также хребта Токинский Становик (Семенова и др., 1984; Рассказов и др., 2000). В глубинных включениях из вулканических пород внутренней опущенной части Витимского плоскогорья амфибол не играет существенной роли (Рассказов, Чувашова, 2018). Имел ли амфибол какое-либо значение в источниках базальтовых расплавов, излившихся на других высоких горных хребтах Внутренней Азии, в частности, в Саянах? Различались ли в Саянах источники одновозрастного вулканизма высокого горного хребта и впадины?

При составлении государственной геологической карты масштаба 1:50 000 в юго-восточной части Восточных Саян в 1980-х гг. Окинской экспедицией ПГО

«Бурятгеология» вулканические и осадочные породы верхнего кайнозоя были расчленены на три свиты: нижне-средне миоценовую сорокскую, верхнемиоценовую хирписинскую и плиоцен-эоплейстоценовую хирбэсинскую (Рассказов, 1993). Базальты сорокской свиты на юго-восточной окраине Окинського поля (в ЮВ секторе) изливались 20–18 млн лет назад, а на северо-западной окраине (в СЗ секторе) – 17–16 млн лет назад. Базальты хирписинской свиты в северо-восточной части Окинського вулканического поля (СВ сектор) изливались около 14 млн лет назад, а в юго-западной части (ЮЗ сектор) – 11–8 млн лет назад. Лавы хирбэсинской свиты начали извергаться в СВ, ЮВ и ЮЗ секторах около 5 млн лет назад и продолжались в ЮЗ секторе Окинського вулканического поля (в предгорьях Большого Саяна) до 1 млн лет назад (рис. 1).

Лавы ЮВ и СВ секторов Окинського поля сопоставляются по возрасту с лавами, извергавшимися восточнее, на Урикском вулканическом поле, с 20 до 10 млн лет назад, а лавы СЗ сектора этого же поля – с лавами, извергавшимися западнее, на хр. Улуг-Арга в Восточной Туве, 17–16 и около 8 млн лет назад. Восточно-Тувинское поле образовалось в результате многочисленных извержений, происходивших в последние 2.3 млн лет (Рассказов и др., 1989, 2000; Ярмолюк и др., 1999). Четвертичные лавы Восточно-Тувинского вулканического поля разделяются с лавами ЮЗ сектора Окинського вулканического поля, частично перекрывающимися по возрасту с лавами Восточной Тувы, высоким хр. Большой Саян, воздымавшимся вместе с хр. Мунку-Сардык в последние 10 млн лет (Rasskazov et al., 2003).



**Рис. 1.** Пространственно-возрастное распределение вулканических пород на Окинском вулканическом поле (Рассказов, 1993; Рассказов и др., 2000). 1 – впадина; 2 – тектонический эскарп; 3 – вулканический останец; 4 – граница между вулканическими секторами; 5 – линии основных изученных разрезов; 6 – K–Ar датировка, млн лет; 7 –  $^{40}\text{Ar}$ – $^{39}\text{Ar}$  датировка, млн лет; 8 – Окинская впадина; 9 – пост-хирбэсинские (предголоценовые) лавы. Вулканические секторы Окинского плоскогорья выделены по различным возрастным интервалам лавовых извержений. Пост-хирбэсинские лавы хр. Большой Саян относятся к СЗ сектору, Усть-Жомболокского покрова в Окинской впадине – к СВ сектору. Прямоугольник ВТ на врезке обозначает местоположение крупного четвертичного Восточно-Тувинского поля.

**Fig. 1.** Spatial-temporal distribution of volcanic rocks on the Oka plateau (Rasskazov et al., 2000). 1 – basin; 2 – tectonic escarp; 3 – volcanic remnant; 4 – boundary between volcanic sectors; 5 – lines of cross-sections; 6 – K–Ar age, Ma; 7 –  $^{40}\text{Ar}$ – $^{39}\text{Ar}$  age, Ma; 8 – Oka basin; 9 – post-Khirbes (Late Pleistocene) lavas. Volcanic sectors of the Oka plateau are defined by different timing of lava eruptions. The post-Khirbes lavas of the Bolshoi Sayan range belong to the NW sector, and the Ust-Zhombolok cover in the Oka Basin to the NE sector. Rectangle BT in inset is an area of the large Quaternary East Tuva volcanic field.

Для оценки современного состояния земной коры Восточных Саян важно понимание характера эволюции финального пост-хирбэсинского вулканизма, который проявился в северной части Окинско-го вулканического поля. Последние вулканические извержения Восточных Саян распространились в конце плейстоцена вдоль долины р. Жом-Болок, от осевой части хр. Большой Саян (вулканы и лавовые потоки пади Хи-Гол и сопредельных территорий) до Окинской впадины (Усть-Жомболокский вулканический покров). В финале четвертичных событий Восточной Тувы вулканические извержения контролировались субширотным Жомболокским разломом, протягивающимся из Восточной Тувы до хр. Кропоткина. Эти вулканические проявления находились за северной рамкой площади картирования 1980-х гг. и служили объектом исследований более поздних работ (Рассказов и др., 1989, 2000; и др.).

Цель настоящей статьи – выполнить сравнительный анализ геохимических данных, полученным по предголоценовым лавам, извергавшимся в СЗ и СВ секторах Окинско-го вулканического поля (т.е. в речных долинах осевой части хр. Большой Саян и в Окинской впадине) для оценки дифференциации расплавов в потоке лавы и пространственной смены источников излившихся глубинных расплавов.

### **Пост-хирбэсинский вулканизм: общая характеристика вулканических построек Окинской впадины и хр. Большой Саян**

Вулканический пост-хирбэсинский фрагмент хр. Большой Саян относится к СЗ сектору Окинско-го вулканического поля, фрагмент Усть-Жомболокского покрова – к его СВ сектору.

В осевой части хр. Большой Саян молодые вулканические конусы и пространственно связанные с ними лавовые потоки неоднократно посещались исследователями Восточных Саян. Отчеты о выполненных наблюдениях представлены в работах (Кропоткин,

1867; Обручев, Лурье, 1954; Адамович и др., 1959; Гросвальд, 1965; Медведев, 1970; Киселев и др., 1979; и др.). Вулканические постройки находятся здесь в глубоких трогах, врезанных на глубину до 800 м в древнюю денудационную поверхность хребта, поднятую на высоту 2500–2700 м. Лавы не расчленены глубинной эрозией, поэтому для опробования доступны только внешние части лавовых потоков и пирокластический материал шлаковых конусов (рис. 2).

Наиболее хорошо сохранившиеся постройки подробно охарактеризованы в монографии (Киселев и др., 1979, с. 42–43).

*«Вулкан Кропоткина, расположенный в вершине пади Хи-Гол, имеет форму усеченного конуса высотой 110–120 м. Его основание лежит на абсолютной высоте около 1960 м. Диаметр основания конуса 530–550 м, кратера – 210–220 м, глубина кратерной воронки около 50 м, диаметр ее днища 26 м. Пологовыпуклые склоны вулкана имеют угол 30–35°, а вогнутые стенкн кратера опускаются под углом до 45–50°. Конус сложен буровато-красными и черными сыпучими шлаками, пемзовидными туфами, лапиллями и вулканическими бомбами различной формы до 50–70 см в поперечнике. В пирокластах встречаются оплавленные обломки кварца и пород кристаллического фундамента.*

*Вулкан Перетолчина находится в 3 км северо-восточнее вулкана Кропоткина, у правого борта долины Хи-Гола, имеющей здесь меридиональное простирание. Седловина между склоном троговой долины и шлаковым конусом поднимается до 60 м над подножием вулкана. Она сложена туфами, перекрывающими борт долины. Основание, несколько вытянутое на север, имеет диаметр 500–550 м и расположено на высоте 1920 м. Кратер окружен террасовидной площадкой шириной 40–50 м с полукольцевым валом высотой до 5–8 м. Глубина кратера 35–45 м.*



**Рис. 2.** Вулканы и лавовые потоки в осевой части хр. Большой Саян. *а* – панорама вершин хребта с вулканическим конусом Перетолчина и лавовыми потоками, не расчлененными глубинной эрозией; *б* – рисунок вершины пади Хи-Гол с вулканами и серповидным озером. Над поверхностью базальтового потока возвышаются вулканы Старый, Кропоткина и Перетолчина (Киселев и др., 1979); *в* – вулкан Перетолчина; *г* – вулкан Кропоткина. Используются фотографии из Интернета.

**Fig. 2.** Volcanoes and lava flows at the axial part of the Great Sayan Range: *a* – panorama of the ridge peaks with the Peretolchin volcanic cone and lava flows not dissected by deep erosion; *b* – drawing of the Khi-Gol valley with volcanoes and a sickle-like lake. Stary, Kropotkin, and Peretolchin volcanoes rise above the surface of the basalt flow (Kiselev et al., 1979); *в* – Peretolchin volcano; *г* – Kropotkin volcano. Photos from the Internet are used.

В отличие от вулкана Кропоткина большая часть вулкана Перетолчина задернована и покрыта редким чахлым лесом. На его северном склоне выделяется меридиональная трещина, на простирании которой размещаются лавовые купола и шлаковые постройки.

Вулкан Старый расположен рядом с вулканом Кропоткина у границы базальтового потока, и его шлаки перекрывают основание троговой долины. Внутри овального (390–

480 м) сильно разрушенного вулкана вложены еще три небольших кратера со шлаковыми кольцевыми валами. Из них наиболее хорошо сохранился северный, разделенный узкими снижающимися к середине перемычками. В его кратере находится еще один шлаковый конус высотой около 15 м с кратером 25 м в поперечнике. Высота сохранившегося внешнего кольцевого вала Старого вулкана колеблется от 5–10 до 50–60 м.

Пирокластические образования в устье р. Гурба-Нурта описаны Адамовичем и др. (1959). Они связывают накопление рыхлого вулканического материала с деятельностью не менее 10 насаженных на ригель и прорванных «серповидных кратеров», достигающих в поперечнике 40–60 м. Следы активной эксплозивной деятельности раннего этапа извержений сохранились также в виде плаща пирокластов на склонах троговой долины у вулканов Старый и Перетолчина. На поверхности потока у северного подножия вулкана Перетолчина выделяется группа из четырех бескратерных лавошлаковых конусов высотой от 5–7 до 25–30 м с диаметром основания до 200 м. Конусы иногда окаймляются 5–6-метровыми кольцевыми валами окисленной шлаковой лавы. От основания северного из них отходит широкий поток базальтов, сливающийся с поверхностью основного лавового поля. Еще севернее выделяется сложная вулканическая постройка в виде широкой разветвляющейся трещины длиной около 0.5 км, обрамленной шлаколавовым валом. На южную часть вала насажены небольшие шлаковые конусы, усыпанные вулканическими бомбами. Днище трещины, возможно, являющейся магмовыводящим каналом, покрыто лавой жерловой фации. Невысокий шлаковый вал шириной около 25 м ограничивает с юго-востока заболоченную депрессию на лавовом поле между вулканами. На северо-западном крае депрессии в 500–700 м от вулкана Перетолчина возвышаются три шлаковых конуса высотой 15, 8 и 5 м, расположенных цепочкой субширотного ( $285^\circ$ ) простирания.

В районе вулканов и в других местах над потоком поднимаются крупные лавовые купола, достигающие в поперечнике 150–200 м и в высоту 15–20 м и более. Они разбиты зияющими радиальными трещинами глубиной 10–15 м. В центре куполов иногда находятся кратерообразные углубления, от их подножия отходят потоки базальтов, перекрывающие лавы более ранней фазы излияния. Хорошо прослеживаются, например, штоки глыбовой лавы, излившейся из купола у подножия вулкана Кропоткина. Мощность его 4–5 м, длина не превышает 3–4 км. Благодаря волнистой поверхности видно, как лава с обеих сторон огибала вулканы Кропоткина и Старый и образовала подпруженное серповидное озеро в вершине долины Хи-Гол.

О лавовом потоке, заполнившем долину р. Жом-Болок, сложилось представление как о

едином магматическом теле, протягивающемся на 85 км (Киселев и др., 1979, с. 41).

«Поверхность Жом-Болокского базальтового потока, повторяя общий уклон долины, на расстоянии 70 км от вулкана Кропоткина до Оки снижается на 700 м. Она сложена преимущественно глыбовыми аа-лавами в виде беспорядочного нагромождения обломков и плит базальтов и шлакобазальтов. Ближе к центрам излияния наблюдается скорлуповатая и волнистая поверхность лавы. Местами встречаются участки с характерными канатными лавами.

Поверхность потока осложнена лавовыми вздутиями и куполами, валами коробления, западинами и депрессиями различного размера. Лавовые валы коробления высотой до 10–15 м приурочены к боковым частям потока, разбиты глубокими зияющими трещинами и протягиваются на сотни метров... Куполовидные вздутия обычно не превышают первых десятков метров в поперечнике и в большинстве случаев обрушены с образованием гротов при вытекании жидкой лавы из-под отвердевшего свода. Округлые или вытянутые по течению западины и провалы часто связаны с проседанием и обрушением кровли потока, но в истоках Жом-Болока и Хи-Гола встречаются крупные кратерообразные воронки, обрамленные кольцевым валом из шлакобазальтов высотой 3–5 м. Эти лавовые кратеры имеют правильную округлую форму до 70–100 м в поперечнике и глубину 15–20 м и более. Дно их сложено пористыми и шлаковидными лавами со следами кипения и бурного выделения газов».

Финальные лавовые потоки и вулканы долины р. Жом-Болок и пади Хи-Гол относились к голоцену по геоморфологическому соотношению с моренами» (Киселев и др., 1979, стр. 44) «Последниково́й 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 верхне-четвертичные 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. Конец лавового потока доходит до правого борта долины Оки в 7 км ниже устья Жом-Болока...

Голоценовый (последниково́й) вулканизм развивался в несколько этапов. Базальты, излившиеся на первом этапе, объединились в мощный поток лавы и заполнили

днище долины р. Жом-Болок и ее верхних притоков. Продукты эксплозивной деятельности этого этапа сохранились в виде пирокластических образований на склонах долины Хи-Гол. Позднее образовались вулкан Старый и серповидные кратеры на ригеле р. Гурба-Нурта. Излияния лавы сократились в масштабах, и центры их полностью переместились в верхнюю часть долины Жом-Болока. Заключительный этап вновь начинался с эксплозивной деятельности. Закупорка трещин привела к формированию вулканов Кропоткина и Перетолчина, шлаковых и лавовых валов и куполов. Закончилась вулканическая деятельность локальными трещинными излияниями маломощных потоков базальтовой лавы (Медведев, 1970)».

Возраст моренных отложений в троговой долине р. Жом-Болок не определялся. Между тем, под лавами Усть-Жомболокского покрова и выше него были обнаружены отложения лессов, которые свидетельствуют об образовании этого покрова во время оледенения, т.е. до голоцена. Для вулканических извержений северной части Окинского вулканического поля геологически обоснован предголоценовый возраст около 14 тыс. лет (Рассказов и др., 2024, 2025).

Представительные данные о составе вулканических пород осевой части хр. Большой Саян (содержаниях в них петрогенных оксидов, микроэлементов и отношениях изотопов Nd и Sr) приведены в статье (Ярмолюк и др., 2003). Эти данные используются в настоящей работе для сопоставлений с данными, полученными для вулканических пород Усть-Жомболокского покрова.

Усть-Жомболокский лавовый покров отделен от лавового потока, затопившего верховья троговой долины р. Жом-Болок, конечной мореной, перегородившей долину ниже устья р. Шарзы. В прорези каньона моренного вала шириной первые десятки метров, базальты отсутствуют. Большой объем лав Усть-Жомболокского лавового покрова вряд ли мог поступить через узкую прорезь каньона с верховьев Жом-Болока. Лавы Усть-Жомболокского покрова должны были излиться из местных магмовыводящих каналов Окинской впадины.

Усть-Жомболокский лавовый покров занимает площадь около 30 км<sup>2</sup> в центральной части Окинской впадины. Он слегка вытянут вдоль Окинской впадины (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-Жомболокского лавового покрова находится на абсолютной высоте около 1370 м, его восточной части – на высоте 1295–1300 м и ниже.

Для «долинных» лавовых потоков характерны провалы кровли, связанные с ее обрушением в результате удаления расплава из трубоподобных каналов их внутренних частей. В работе (Ярмолюк и др., 2003) предполагалось изменение состава остаточных расплавов в потоках по мере их извлечения из трубоподобных каналов с последовательным продвижением от верховьев к низовьям р. Жом-Болок. В Окинской впадине лавы Усть-Жомболокского вулканического покрова глубоко расчленены, поэтому имеется возможность прямого тестирования гипотезы такой смены состава.

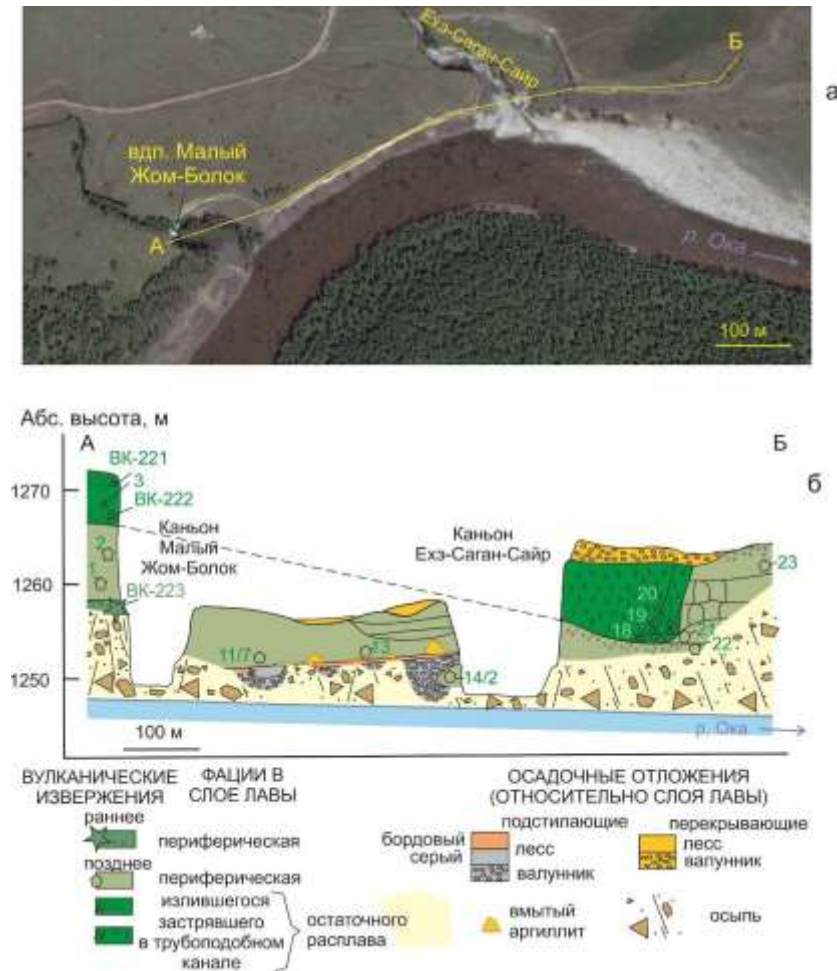
В лавовых слоях Усть-Жомболокского покрова породы относятся по составу к трем кристаллизационным фациям: 1) внешней фации закалки, 2) переходной фации дифференциации и 3) внутренней фации остаточного расплава (рис. 3). Во внешней фации закалки лавового слоя породы быстро кристаллизуются с образованием вулканического стекловатого базиса. В переходной фации развивается дифференциация кристаллизующегося расплава по плагиоклаз-титанавгитовой котектике. Во внутренней фации остаточного расплава его подвижность в лавовом слое сохраняется во время консолидации переходной зоны. Если в такой консолидированной стенке образуется разрыв, остаточный расплав прорывается на поверхность с обрушением кровли трубоподобного канала.

Вулканические породы Окинской впадины были первоначально опробованы С.В. Рассказовым и А.М. Рогачевым в 1990-м г. на водопаде Малый Жом-Болок с участием американских геологов Дж. Лура, С. Бауринга и Т. Хоша. Обр. ВК-223, отобранный во время этих работ из основания обнажения толщи, имеет тефритовый состав и относится к ранней фазе вулканических извержений. Степень распространения лав этого типа в Усть-Жомболокском лавовом покрове пока не ясна. Два других образца (ВК-221 и ВК-222) были отобраны из верхней части обнажения, в которой породы представляют собой продукт субаэральных извержений, о чем свидетельствует насыщенность кровли лавового слоя порами. Эти породы имеют трахибазальтовый состав и характеризуют

излившиеся расплавы поздней (основной) фазы вулканических извержений.

В 2024 г. было выполнено дополнительное опробование обнажения водопада Малый Жом-Болок. Отобраны образцы пористых лав поздней вулканической фазы (обр. Zhb-3-24) и лав массивного сложения с крупноглыбовой отдельностью, расположенных стратиграфически ниже. Последние относятся к переходной фации поздней вулканической

фазы Усть-Жомболокского лавового покрова. В целом, последовательность лавовых слоев водопада Малый Жом-Болок состоит из 3-х стратиграфических единиц: тефритового слоя раннего вулканического извержения, трахибазальтового закалочного слоя основного извержения и сингенетичного слоя остаточного расплава, излившегося на земную поверхность из трубоподобной внутренней части покрова (рис. 3).



**Рис. 3.** Положение линии разреза АБ на космоснимке Google Earth (а) и схематичный разрез Усть-Жом-Болокого 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 (2024).

**Fig. 3.** Position of the section line АБ on the Google Earth space image (а) and the schematic Malyi Zhom-Bolok section of the Ust-Zhom-Bolok volcanic cover (б). 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 (2024) are omitted.

Контакт переходной фации трахибазальтов с трахибазальтами фации остаточного расплава, перемещенного в трубоподобном канале лавового слоя, обнаружен ниже по течению р. Оки от каньона Ехэ-Саган-Сайр, на расстоянии 100–160 м. На восточном мысу

каньона р. Ехэ-Саган-Сайр обнажаются два лавовых слоя, прослеживающихся вдоль обнажения вниз по р. Оке. На расстоянии 50–60 м верхний поток базальта с толстостолбчатой отдельностью сохраняет монолитность, но затем начинает фрагментироваться (рис. 4а).

В нем образуются трещины, заполненные спекшимися комками пористого трахибазальта (рис. 4б), обособляются блоки с веерообразной толстостолбчатой отдельностью (рис. 4в) и фрагменты массивной породы в виде пластин (рис. 4г). Латеральный переход к фрагментированной структуре базальтового слоя свидетельствует о кристаллизации магматического расплава в нестабильных

условиях, которые создавались на краю трубоподобного канала лавового слоя. В эндоконтакте закристаллизовавшегося материала «трубы» отобраны образцы Zhb-18-24, Zhb-19-24 и Zhb-19-20; в экзоконтакте – обр. Zhb-21-24. В подстилающем потоке взят обр. Zhb-22-24, в верхней части закаленных лавовых слоев – обр. Zhb-23-20.



**Рис. 4.** Латеральный переход от трубоподобной части лавового слоя с толстостолбчатой отдельностью к краевой фрагментированной части «трубы» на контакте с вмещающими закаленными лавами (а) и детали фрагментации: заполнение трещины спекшимися комками пористого базальта между фрагментами массивной породы (б), веерообразная толстостолбчатая отдельность в обособившемся блоке (в) и фрагмент массивной породы в виде пластины (г). На панели а желтыми прямоугольниками показано местоположение фрагментов панелей б–г.

**Fig. 4.** Lateral transition from a pipe-like part of the lava layer with thick-columnar jointing to the marginal fragmented part of the “pipe” at the contact with the host quenched lavas (a) and fragmentation details: filling of a crack with fused lumps of porous basalt between fragments of massive rock (b), fan-shaped thick-columnar jointing in an isolated block (v), and a fragment of massive rock in the form of a plate (z). In panel a, yellow rectangles show the location of fragments of panels b–z.

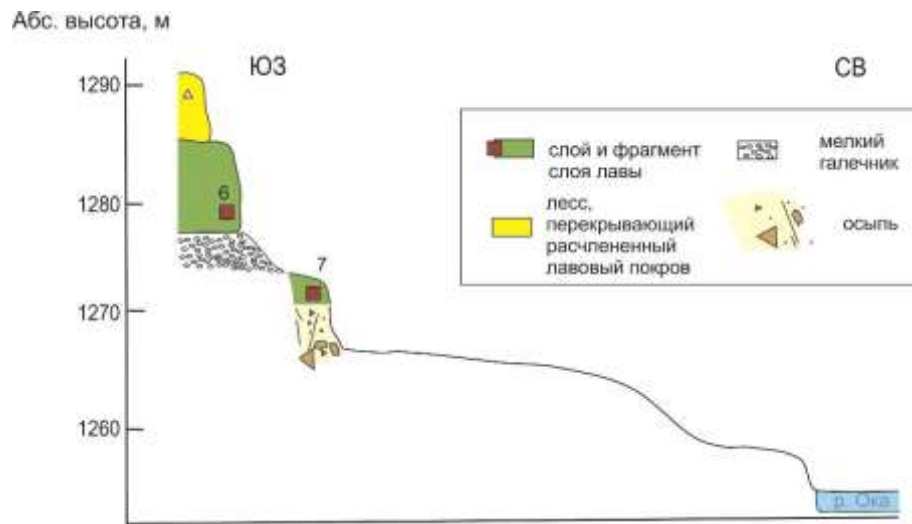
На профиле АБ рис. 3, в северном борту р. Ока между каньонами Малый Жом-Болок и Ехэ-Саган-Сайр, протягивается стенка, сложенная базальтами и осадочными отложениями. Протяженность стенки от мыса каньона Малый Жом-Болок до мыса каньона Ехэ-

Саган-Сайр составляет 340 м. Вдоль стенки обнажается единый лавовый слой мощностью до 8 м с толстостолбчатой отдельностью. Трахибазальты Zhb-11/7-24 и Zhb-13-24 сопоставляются по составу с трахибазальтами Zhb-1-24 и Zhb-2-24 переходной фации

каньона Малый Жом-Болок. Состав обр. Zhb-14/2-24, отобранного из нижней части крупного фрагмента вулканической породы, расположенного на уровне слоя валунника мыса каньона Ехэ-Саган-Сайр, не отличается от состава пород трахибазальтовой стенки и может представлять собой оползневой блок, отторженный от этой стенки.

Вулканические породы опробованы также в разрезе района р. Номто-Гол. Этот разрез отличается от разреза Малый Жом-Болок.

Здесь, в широкой долине р. Оки, имеются два террасовидных уступа, выработанные в процессе ее формирования. В верхней части склона долины лежит лавовый слой, перекрытый лессами. Ниже слоя лав залегает мелкий галечник. Крупные блоки вулканических пород, которые находятся ниже по склону, подобны по составу породам лавового слоя. Следовательно, они могут представлять собой его оползневые фрагменты (рис. 5).



**Рис. 5.** Схематичный разрез вулканогенно-осадочной толщи в районе Номто-Гола. Местоположение разреза показано на рис. 1 в статье (Рассказов и др., 2024). Состав обр. Zhb-7-24 подобен составу обр. Zhb-6-24. Фрагмент Zhb-7-24 может относиться к слою Zhb-6-24 и представлять собой оползневой фрагмент этого слоя. Составы вулканических пород из этого разреза подобны составам пород переходной фации позднего (основного) вулканического извержения Усть-Жом-болокского покрова, обозначенной в разрезе АБ на рис. 3.

**Fig. 5.** Schematic section of volcanogenic-sedimentary strata in the Nomto-Gol area. Location of the section is shown on Fig. 1 of (Rasskazov et al., 2024). The composition of sample Zhb-7-24 is similar to the one of sample Zhb-6-24. Fragment Zhb-7-24 may belong to a layer Zhb-6-24 and represent a landslide fragment from this layer. Compositions of volcanic rocks from this section are similar to those of rocks of the transitional facies of the late (main) volcanic eruption of the Ust-Zhombolok cover, designated in section АБ (Fig. 3).

### Методика аналитических исследований

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

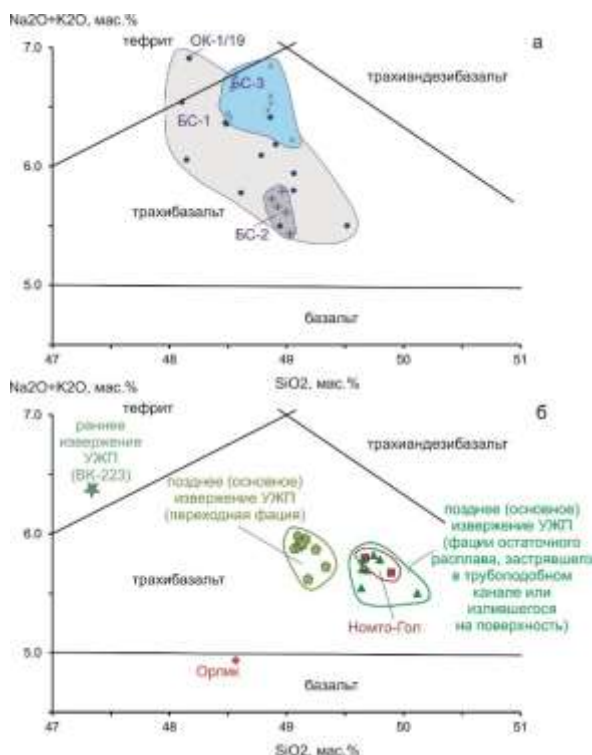
измерений использовали многоэлементные стандартные растворы. В качестве внутренних стандартов вводили In и Bi. Для контроля точности анализа использовали международные сертифицированные стандартные образцы BHVO-2, AGV-2, JA-2, DNC-1a.

## Результаты

### Классификационное положение вулканических пород на диаграмме щелочи–кремнезем

На классификационной диаграмме щелочи–кремнезем фигуративные точки

предголоценовых вулканических пород северной части Окинского вулканического поля в основном попадают в поле трахибазальта. В поле тефрита смещается точка обр. ВК-223 раннего извержения Усть-Жомболокского покрова и точка обр. ОК-1/19 хр. Большой Саян (рис. 6).



**Рис. 6.** Классификационная диаграмма щелочи–кремнезем для предголоценовых вулканических пород северной части Окинского вулканического поля: *а* – осевая часть хр. Большой Саян; *б* – Окинская впадина. Сокращения: БС – Большой Саян, УЖП – Усть-Жомболокский покров. Показаны разделительные линии тефрита, трахибазальта и базальта (Le Bas, Streckeisen, 1991; Классификация..., 1997). Содержания петрогенных оксидов пересчитаны на 100 мас.% за вычетом удаленной влаги ( $H_2O$ ) и потерь при прокаливании (ППП).

**Fig. 6.** Alka-silica classification diagram for pre-Holocene volcanic rocks from the northern Oka volcanic field: *a* – axial part of the Great Sayan Range; *b* – Oka Basin. Abbreviations: БС – Bolshoi Sayan, УЖП – Ust-Zhombolok cover. Dividing lines of tephrite, trachybasalt, and basalt are shown after (Le Bas, Streckeisen, 1991; Classification..., 1997). Contents of major oxides are recalculated to 100 wt.% excluding removed moisture ( $H_2O$ ) and loss on ignition (LOI).

Трахибазальты позднего (основного) извержения Усть-Жомболокского покрова в закаленной фации содержат 49.1–49.5 мас.%  $SiO_2$ , в трубоподобном канале и излившемся из него потоке – 49.6–50.2 мас.%  $SiO_2$ . В остаточных расплавах обособленных трубоподобных каналов в Усть-Жомболокском покрове концентрация  $SiO_2$  возрастает. Породы разреза Номто-Гол сопоставляются по составу с породами позднего (основного) извержения Мало-Жомболокского разреза в остаточных расплавах трубоподобных каналов.

Вулканические породы финальных извержений в хр. Большой Саян на классификационной диаграмме щелочи–кремнезем (с учетом концентраций Ba, Rb и Sr, см. далее) разделяются на 3 группы: породы гр. 1 образуют рассеянную тефрит-трахибазальтовую совокупность фигуративных точек, породы гр. 2 смещены в нижнюю часть поля трахибазальта, породы гр. 3 – в верхнюю часть этого поля. Точки пород фации остаточных расплавов позднего извержения Усть-Жомболокского покрова приходятся на наименее щелочной конец тефрит-трахибазальтового

тренда пород хр. Большой Саян. Породы переходной фации позднего извержения Усть-Жомболокского покрова отличаются повышенным содержанием кремнезема и не имеют аналогов среди пород осевой высокогорной части хр. Большой Саян.

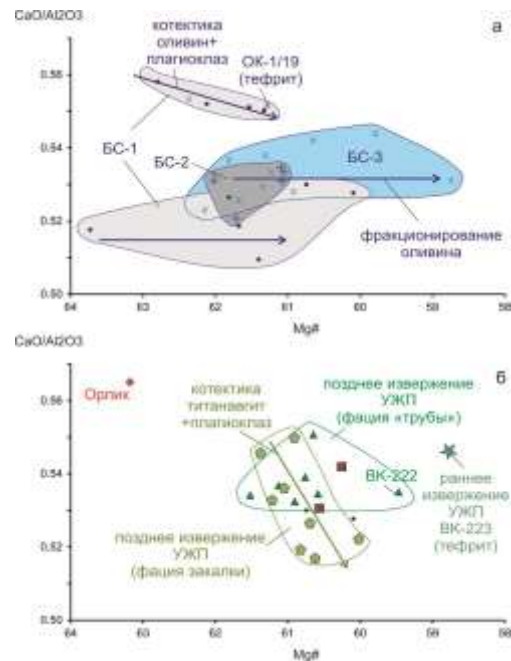
Фигуративная точка лавового потока хирбэсинской свиты района пос. Орлик на классификационной диаграмме щелочи–кремнезем попадает в поле базальта.

#### Тренды вулканических пород на диаграмме $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Mg\#}$

Обособление остаточного расплава внутри лавового слоя происходит на фоне снижающейся температуры, сопровождающейся выделением кристаллических фаз и концентрированием расплавленного материала с участием флюидов. Из расплавов выделяются минеральные фазы: оливин, титанавгит и плагиоклаз. Оливин кристаллизуется на ликвидусе поднимающегося с глубины расплава с относительным снижением в нем магнезиального числа  $\text{Mg\#} = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ , атомные количества при коррекции  $\text{Fe}^{3+} = 0.15\text{Fe}_{\text{общ}}$ . Плагиоклаз не содержит Mg и Fe, но отделение Са-плагиоклаза выражается в снижении отношения  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Роль оливина и плагиоклаза выявляется на диаграмме  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Mg\#}$  (рис. 7). Титанавгит содержит все оксиды, поэтому может внести искажения в тренды кристаллизации оливина и плагиоклаза.

Породы переходной фации лавового слоя Усть-Жомболокского покрова образуют отчетливый тренд снижения  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  со слабым относительным снижением  $\text{Mg\#}$ . Тренд соответствует котектике титанавгит+плагиоклаз, реализующейся при атмосферном давлении на ликвидусе трахибазальтового расплава. Он отражает контроль перераспределения компонентов совместной кристаллизацией титанавгита и плагиоклаза на ранней стадии периферического отвердевания базальтового слоя. Породы остаточного расплава лавовых слоев Усть-Жомболокского покрова сохраняют в основном соотношение  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Mg\#}$  начала тренда. Исключение составляет единственная порода (обр. ВК-222) фации «трубы», характеризующаяся заметным эффектом фракционирования оливина (снижением  $\text{Mg\#}$  без изменения отношения  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Тефрит ВК-223 отличается от других пород Усть-Жомболокского покрова низким значением  $\text{Mg\#}$  при повышенном отношении  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Базальт хирбэсинской свиты района Орлика имеет

высокое значение  $\text{Mg\#}$  при максимальном отношении  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ .



**Рис. 7.** Диаграмма  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Mg\#}$  для предголоценовых вулканических пород северной части Окинского вулканического поля: *a* – осевая часть хр. Большой Саян; *б* – Окинская впадина. Магнезиальное число  $\text{Mg\#} = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$  рассчитывается в атомных количествах (а.к.) при коррекции  $\text{Fe}^{3+} = 0.15\text{Fe}_{\text{общ}}$ . Усл. обозначения см. рис. 6.

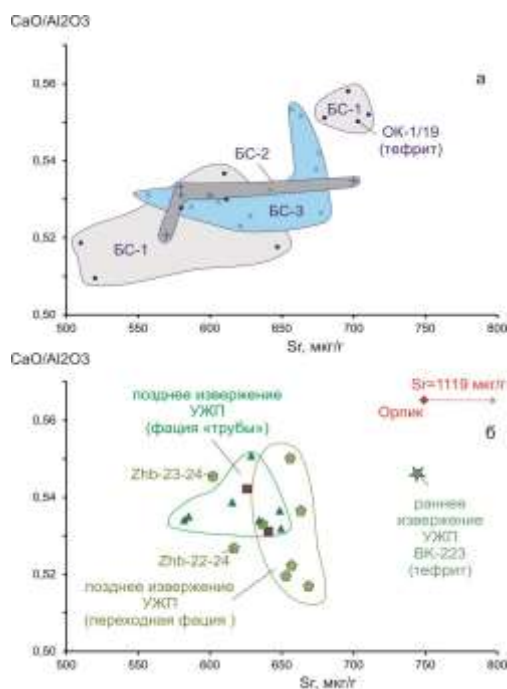
**Fig. 7.**  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  versus  $\text{Mg\#}$  diagram for pre-Holocene volcanic rocks from the northern Oka volcanic field: *a* – axial part of the Great Sayan Range; *b* – Oka Basin. Magnesium number  $\text{Mg\#} = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$  is recalculated in atomic quantities with the correction  $\text{Fe}^{3+} = 0.15\text{Fe}_{\text{total}}$ . Symbols are as in Fig. 6.

В пост-хирбэсинских породах осевой части хр. Большой Саян различаются тренды фракционирования оливина, начинающиеся при повышенном и низком отношениях  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Тренд повышенного  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  (0.55–0.56) отчетливо выражен в снижении  $\text{Mg\#}$  от 63 до 61 котектической кристаллизацией оливина и Са-плагиоклаза в породах гр. БС-1. Тренд низкого  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  в общем соответствует фракционирования оливина с возрастанием этого отношения в породах гр. БС-1 от 0.51–0.52 до 0.53 при снижении  $\text{Mg\#}$  от 64 до 60. Породы гр. БС-2 характеризует узкий диапазон  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  (0.52–0.53) при узком диапазоне  $\text{Mg\#}$  (61–62). В породах гр. БС-3 диапазон отношения  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  расширяется (0.52–0.54) с образованием тренда

фракционирования оливина со значениями  $Mg\#$  от 62 до 59. В образовании трендов, начинающихся от состава с низким  $CaO/Al_2O_3$ , возможно, существенную роль играет, наряду с кристаллизационной дифференциацией оливина, кристаллизационная дифференциация титанавгита. Тренд фации «трубы» (котектика титанавгит+плагиоклаз) в пост-хирбэсинских породах осевой части хр. Большой Саян не идентифицируется.

Поскольку в предголоценовых породах плагиоклаз включается в авгит-плагиоклазовую и оливин-плагиоклазовую котектическую кристаллизацию, на рис. 8 приводится диаграмма  $CaO/Al_2O_3 - Sr$ . Вулканические породы гр. БС-1 хр. Большой Саян с низким отношением  $CaO/Al_2O_3$  имеют концентрации  $Sr$  в интервале 510–650 мкг/г. В породах этой же группы с высоким отношением  $CaO/Al_2O_3$  концентрация  $Sr$  возрастает до интервала

680–710 мкг/г. Группы БС-2 и БС-3 имеют промежуточные значения этих показателей. Фигуративные точки пород Окинской впадины частично попадают в фигуративные поля пород хр. Большой Саян. Тефрит ВК-223 раннего вулканического извержения Усть-Жомболокского поля обогащен стронцием ( $Sr=744$  мкг/г). В породах позднего извержения в группе переходной фации (авгит-плагиоклазовая котектика) наблюдается в основном слегка повышенная концентрация  $Sr$  (650–670 мкг/г), в двух образцах этой группы ( $Zhb-22-24$  и  $Zhb-23-24$ ) концентрация  $Sr$  снижается. В породах позднего извержения в группе фации «трубы» концентрация  $Sr$  в целом ниже. В базальте хирбэсинской свиты района Орлика концентрация  $Sr$  существенно выше, чем в предголоценовых породах (1119 мкг/г).



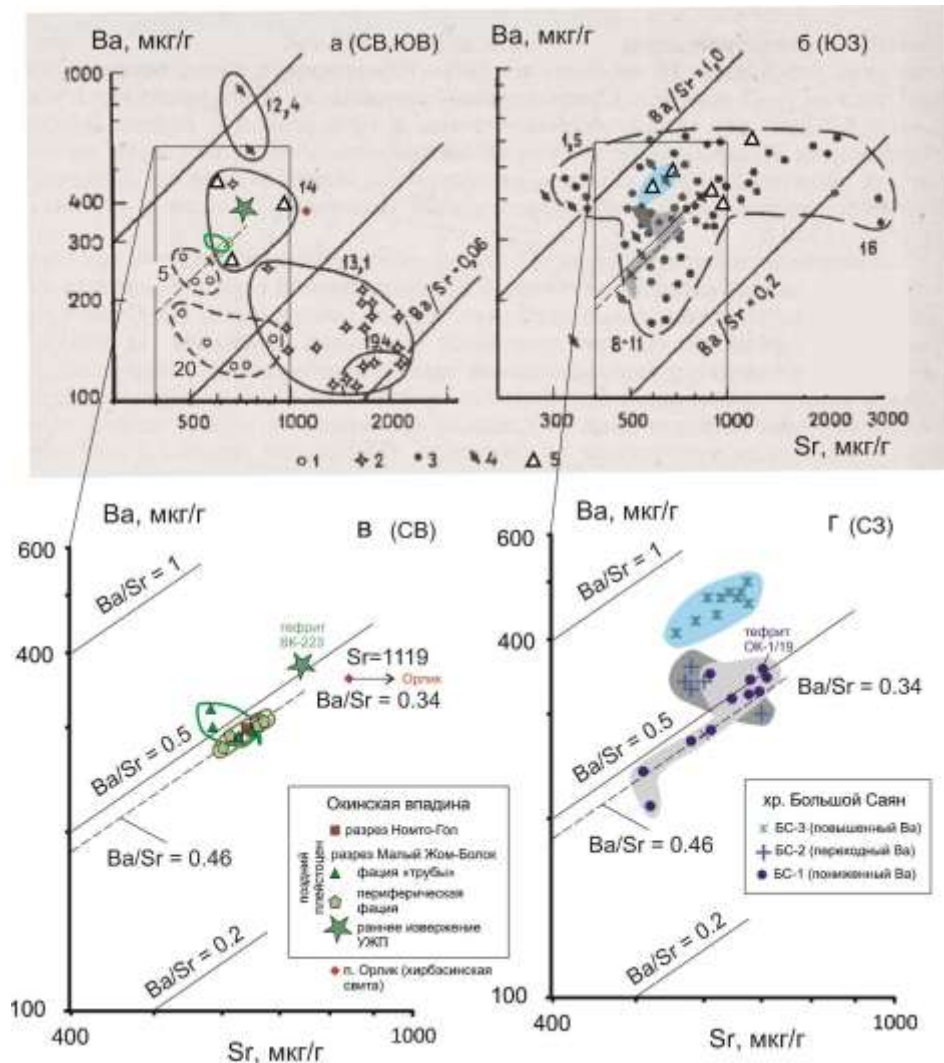
**Рис. 8.** Диаграмма  $CaO/Al_2O_3 - Sr$  для предголоценовых вулканических пород северной части Окинского вулканического поля: *а* – осевая часть хр. Большой Саян; *б* – Окинская впадина. Усл. обозначения см. рис. 6.

**Fig. 8.**  $CaO/Al_2O_3$  versus  $Sr$  diagram for pre-Holocene volcanic rocks from the northern Oka volcanic field: *a* – axial part of the Great Sayan Range; *b* – Oka Basin. Symbols are as in Fig. 6.

#### Группирование вулканических пород по концентрациям $Ba$ , $Sr$ , $K$ и $Rb$

При обосновании легенды Восточно-Саянской серии геологических карт в качестве критериев выделения вулканических стратиграфических единиц верхнего кайнозоя

использовалась возрастная смена геохимических характеристик вулканических пород. В качестве эффективного параметра группирования разновозрастных пород по составу использовались содержания  $Ba$  и  $Sr$  (рис. 9).



**Рис. 9.** Диаграммы Ba – Sr для базальтов Окинского вулканического поля. *a* – СВ, ЮВ секторов всего позднего кайнозоя; *б* – то же его ЮЗ сектора; *в* – СВ сектора от плиоцена до конца плейстоцена; *г* – СЗ сектора конца плейстоцена. На панелях *a* и *б*: 1 – базальты разреза В (рис. 1); 2 – щелочные базальты из разрезов А, Б, Г (рис. 1); 3 – щелочные базальты из разрезов Л, М, Н и П (рис. 1); 4 – андезибазальты и кварц-нормативные толеиты из разных разрезов; 5 – тефриты из разных разрезов. На панели *в* различаются две группы базальтов из разреза Малый Жом-Болок: одна представлена породами из нижней части вулканического покрова, другая – из верхней части. Показан состав базальта хирбэсинской свиты в долине Оки у пос. Орлик. На панели *г* различаются группы 1, 2 и 3 пост-хирбэсинских базальтов долины р. Жом-Болок и вулканов пади Хи-Гол. Панели *a* и *б* из монографии (Рассказов, 1993), на панели *в* используются новые данные авторов, на панели *г* – данные из работы (Ярмолук и др., 2003). Содержания Ba и Sr в работе (Рассказов, 1993) определялись методом спектрального анализа.

**Fig. 9.** Ba versus Sr diagrams for basalts of the Oka volcanic field. *a* – NE, SE sectors of the entire late Cenozoic; *б* – the same for its SW sector; *в* – NE sector from the Pliocene to the pre-Holocene; *г* – NW sector of the pre-Holocene. In panels *a* and *б*: 1 – basalts of section B (Fig. 1); 2 – alkali basalts from sections А, Б, Г (Fig. 1); 3 – alkali basalts from sections Л, М, Н, and П (Fig. 1); 4 – basaltic andesites and quartz-normative tholeiites from different sections; 5 – tephrites from different sections. In panel *в*, two groups of basalts from the Malyy Zhom-Bolok section are distinguished: one is represented by rocks from the lower part of the volcanic cover, another one – from the upper part. The composition of basalt of the Khibers Formation in the Oka River valley near the Orlik village is shown. Panel *г* distinguishes groups 1, 2, and 3 of the post-Khibers basalts from the Zhom-Bolok River valley and the volcanoes of the Khi-Gol valley. Panels *a* and *б* are from the monograph (Rasskazov, 1993), panel *в* uses new data

of the authors, and panel *z* uses data from (Yarmolyuk et al., 2003). The Ba and Sr contents in (Ras-skazov, 1993) were determined by spectral analysis.

В СВ и ЮВ секторах Окинського вулканічного поля базальти сорокської свити (вік 20–19 млн років) збагачені стронцієм і обеднені барієм. В більш молодих базальтах хирписинської і хирбзсинської свит (вік 14–5 млн років) вміст барію зростає з відносним зниженням вмісту стронцію.

В ЮЗ частині Окинського плоскогор'я характер групування порід за вмістом Ba і Sr змінюється від стратона до стратону. Базальти сорокської свити (вік 20–17 млн років) збагачені стронцієм і барієм. В базальтах хирписинської свити (вік 11–8 млн років) вміст стронцію і барію знижується, а в базальтах хирбзсинської свити (вік 1.5 млн років) вміст барію зростає при зниженні вмісту стронцію.

В СВ секторі Окинського вулканічного поля ключове значення має склад порід хирписинської свити віком близько 14 млн років. На діаграмі Ba–Sr фігуративне поле порід цього віку знаходиться між фігуративними полями порід тієї ж території з віком близько 13 і 12 млн років. Точки порід вікової генерації 13 млн років зміщуються з зниженням концентрації барію при зростанні стронцію (до складу віком 19.4 млн років в стратотипі сорокської свити), а точки порід віком 12 млн років, навпаки, зміщуються з зростанням концентрації барію при збереженій концентрації стронцію (рис. 9а).

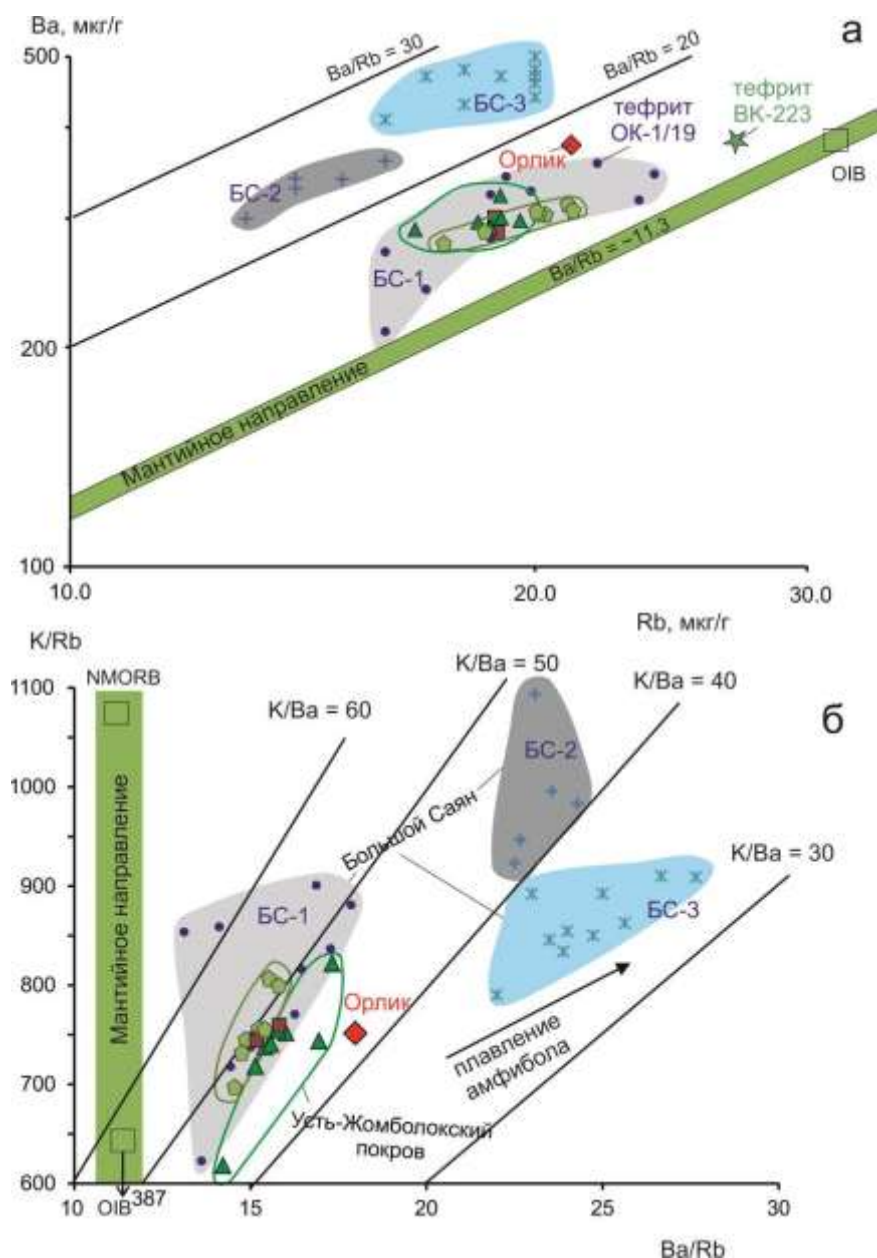
З урахуванням виявлених просторово-вікових варіацій Ba і Sr в породах всього Окинського вулканічного поля, пост-хирбзсинські джерела магматических расплавів його північної частини також розділяються за цими елементами.

Фігуративні точки предголоценових вулканічних порід Усть-Жомболокського покрива перекривають фігуративне поле

порід СВ сектору Окинського поля віком близько 14 млн років. В породах нижньої частини розрізу вулканічного покрива відношення Ba/Sr становить близько 0.34, а в породах верхньої частини розрізу частково відповідає цьому ж значенню, а частково зростає до 0.6. Вулканічні породи з розрізу Номто-Гола мають відношення Ba/Sr близько 0.34. Лавовий потік хирбзсинської свити в районі пос. Орлик суттєво збагачений стронцієм (рис. 9в).

Фігуративні точки предголоценових вулканічних порід Великого Саяна перекривають складові вікового тренду 8–11 млн років (рис. 8б) і розділяються на групи з варіюючими концентраціями Ba при вузькому діапазоні Sr (рис. 9г). Група 1 частково порівнюється за концентраціями Ba і Sr породами Усть-Жомболокського покрива і частково має більш низькі концентрації цих елементів при збереженому відношенні Ba/Sr=0.34.

Подібно розподіленню Ba і Sr трахібазальтів групи БС-1 (хр. Великий Саян) і Усть-Жомболокського покрива, концентрації K і Rb цих порід територій також порівнювані. Групи БС-2 і БС-3 (хр. Великий Саян) помітно зміщені від них з зростанням відношення Ba/Rb і зниженням відношення K/Ba. Підвищення Ba відносно Sr і відносно K і Rb свідчить про утворення виплавки під хр. Великий Саян в амфібол-змішувачем джерелі (рис. 10). Порооди Усть-Жомболокського покрива трохи зміщені від складових, що відповідають мантийному напрямку (OIB – MORB). Порооди групи гр. БС-1 (хр. Великий Саян) продвинуті від мантийного напрямку далі і, відповідно, повинні містити в джерелі більше амфібола.



**Рис. 10.** Диаграммы Ba – Rb (a) и K/Rb – Ba/Rb (б) для базальтов Окинского вулканического поля. Условные обозначения см. рис. 6.

**Fig. 10.** Ba versus Rb (a) and K/Rb versus Ba/Rb (б) diagrams for basalts from the Oka volcanic field. Symbols are as in Fig. 6.

### Обсуждение

В обсуждении полученных данных мы сначала сосредоточим внимание на характере дифференциации расплава в переходной фазии лавовых потоков Окинской впадины, затем аргументируем происхождение предголоценовых магм северной части Окинского вулканического поля из материала, обедненного комплементарно средней и нижней

земной коре в области коромантийного перехода и подстилающей мантии, поставим вопрос о переходе от источников, содержащих амфибол и гранат к безгранатовым менее амфиболизированным источникам предголоценовых извержений на этой территории в контексте общей латеральной смены очагов плавления под высокими горными хребтами и впадинами БРС и, наконец, сделаем акцент на значении предголоценового импульса

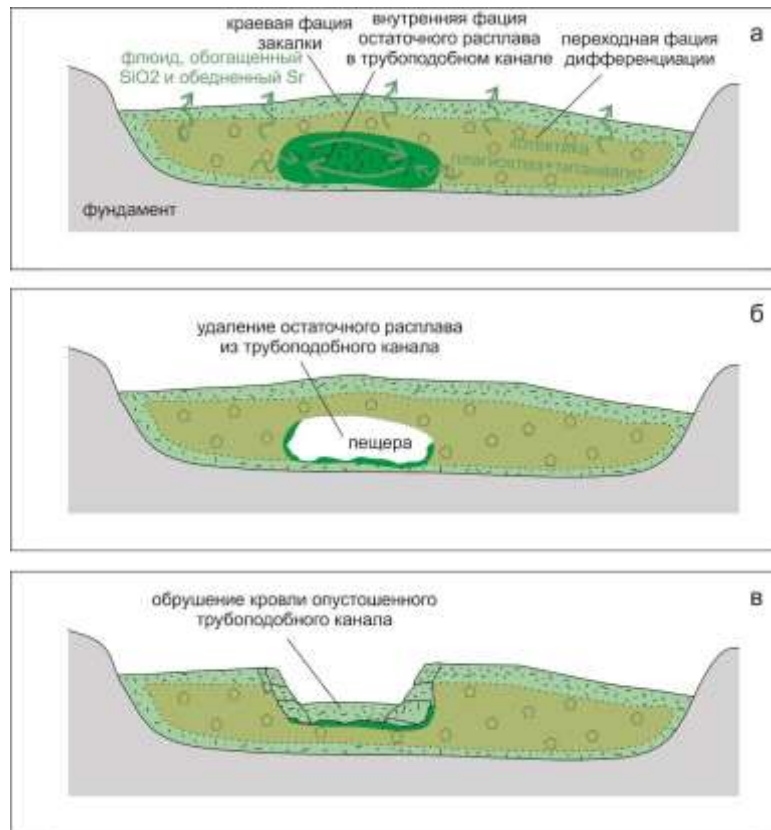
поступления глубинных базальтовых магм в контексте вулканизма позднего плейстоцена и голоцена БРС.

*Дифференциация расплава в переходной фации лавовых потоков Окинской впадины*

Итак, при опробовании внутренних обнаженных частей лавовых потоков Окинской впадины выявлены внутренняя фация остаточного расплава в трубоподобном канале и переходная фация, в которой состав расплава меняется вследствие кристаллизационной дифференциации при одной атмосфере вдоль котектики плагиоклаз+титанавгит. Образование титанавгит–плагиоклазового (безоливинового) парагенезиса было установлено в эссекситовых линзах лавовой толщи сорокской свиты в разрезе Ехэ-Хэйрэгтэ СЗ сектора Окинского вулканического поля (разрез Б на рис. 1). Толщина эссекситовых линз превышает здесь 2 м. Отношение  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  в эссекситах повышено (0.60–0.717) при низком содержании  $\text{MgO}$  (4.34–4.35 мас. %). В плагиоклазе концентрируется  $\text{Sr}$ . Вмещающие лавы сорокской свиты имеют базальт-трахибазальтовый состав при содержании суммы щелочей ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) от 3.3 до 5.6 мас.%. Концентрация  $\text{Sr}$  достигает в этих породах 2100 мкг/г, а в эссекситовых линзах несколько снижается (до 1200 мкг/г). В кровле 2-метровой линзы, протягивающейся на несколько сот метров, обнаружены небольшие (мощность до 2 см) микросиенитовые

линзочки, образовавшиеся вследствие флюидной концентрации материала, отделившегося от эссекситовой линзы. Содержание  $\text{SiO}_2$  в микросиените – 54.58 мас.%,  $\text{MgO}$  – 0.75 мас.%,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 5.0 мас.%,  $\text{K}_2\text{O}$  – 6.0 мас.%. Весьма показательно снижение концентрации  $\text{Sr}$  в микросиенитовой линзе до 150 мкг/г в результате концентрации этого элемента в плагиоклазе эссексита (Рассказов, 1993).

В предголоценовых лавовых слоях Окинской впадины наблюдается подобный процесс флюидной дифференциации расплавов переходной фации из единой излившейся однородной порции материала позднего извержения. Кристаллизация этого минерального парагенезиса в отвердевающей стенке переходной зоны лавового слоя между зоной заделки и каналом остаточного расплава сопровождается отделением флюида, обогащенного  $\text{SiO}_2$ . Этот флюид отделяется от активной переходной зоны, в которой зарождается процесс, реализовавшийся в образовании эссекситовых и микросиенитовых линз Ехэ-Хэйрэгтэ. Флюид в основном выходит через закаленную поверхность лавового слоя, но частично проникает также в остаточный расплав трубоподобного канала. В результате растворения флюида, подобного по составу микросиенитовой линзе Ехэ-Хэйрэгтэ, в остаточном расплаве лавовых слоев Окинской впадины возрастает  $\text{SiO}_2$  одновременно со снижением  $\text{Sr}$  (рис. 11).



**Рис. 11.** Схема кристаллизационных фаций лавового слоя. После вулканического извержения во внутренней трубоподобной части лавового слоя обособляется остаточный расплав (а), который может частично или полностью удалиться в процессе отвердевания и дифференциации переходной фации (б), что ведет к обрушению кровли опустошенного трубоподобного канала (в).

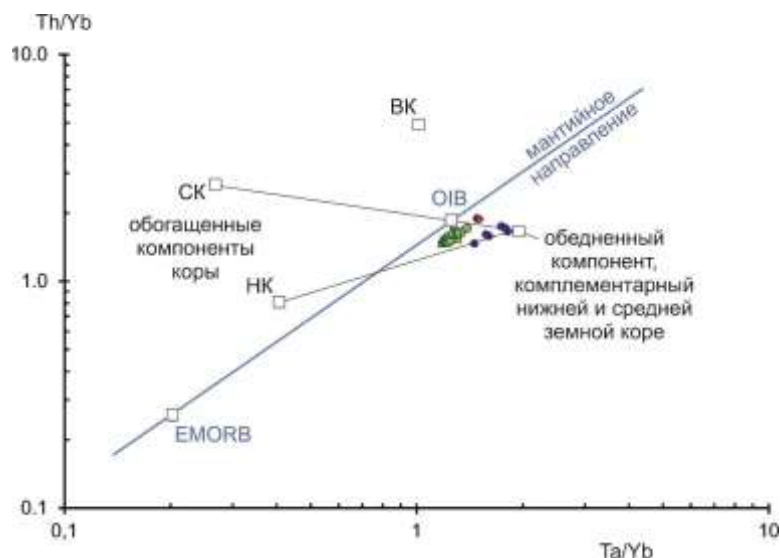
**Fig. 11.** Schematic drawing of crystallization facies within a lava layer. After a volcanic eruption, residual melt is released in the inner pipe-like portion of the lava layer (a), which can be partially or completely removed during the solidification and differentiation of the transitional facies (б), resulting in collapse of a roof of the emptied pipe-like channel (в).

В закаленной поверхности потока компоненты могут частично удаляться во флюидной фазе, резко отделяющейся от расплава без дополнительного выделения кристаллических фаз. Если остаточный расплав удаляется из трубоподобного канала с обрушением его кровли, доступными для опробования остаются породы краевой фации закалки в обрушенных и не обрушенных частях поверхности лавового слоя.

*Происхождение предголоценовых магм северной части Окинского вулканического поля из материала, обедненного комплементарно средней и нижней земной коре в области коромантийного перехода и подстилающей мантии*

На диаграмме Th/Yb – Ta/Yb фигуративные точки всех предголоценовых

вулканических пород северной части Окинского вулканического поля смещены правее мантийного направления. Это смещение свидетельствует о проявлении тренда обеднения мантийных источников. Большее смещение точек пород гр. БС-1 хр. Большой Саян от мантийного направления, по сравнению с точками пород Усть-Жомболокского покрова, соответствует более обедненным источникам. Направление тренда обусловлено комплементарным отделением из мантийных источников обогащенных компонентов средней и нижней частей земной коры (рис. 12).



**Рис. 12.** Диаграмма Th/Yb – Ta/Yb для предголоценовых пород северной части Окинского вулканического поля. Условные обозначения см. рис. 6. Мантийное направление обозначают составы OIB и EMORB (Sun, McDonough, 1989). Составы нижней, средней и верхней коры (соответственно, HK, CK и BK) из работы (Rudnick, Fountain, 1995). Для пород БС-2 и БС-3 (хр. Большой Саян) концентрации Th, Ta и Yb не определялись.

**Fig. 12.** Th/Yb versus Ta/Yb diagram for pre-Holocene rocks from the northern Oka volcanic field. Symbols are as in Fig. 6. The mantle direction is indicated by the OIB and EMORB compositions (Sun, McDonough, 1989). The compositions of the lower, middle, and upper crust (HK, CK, and BK, respectively) are from (Rudnick, Fountain, 1995). For the БС-2 and БС-3 groups of rocks (Bolshoy Sayan Range), the concentrations of Th, Ta, and Yb were not determined.

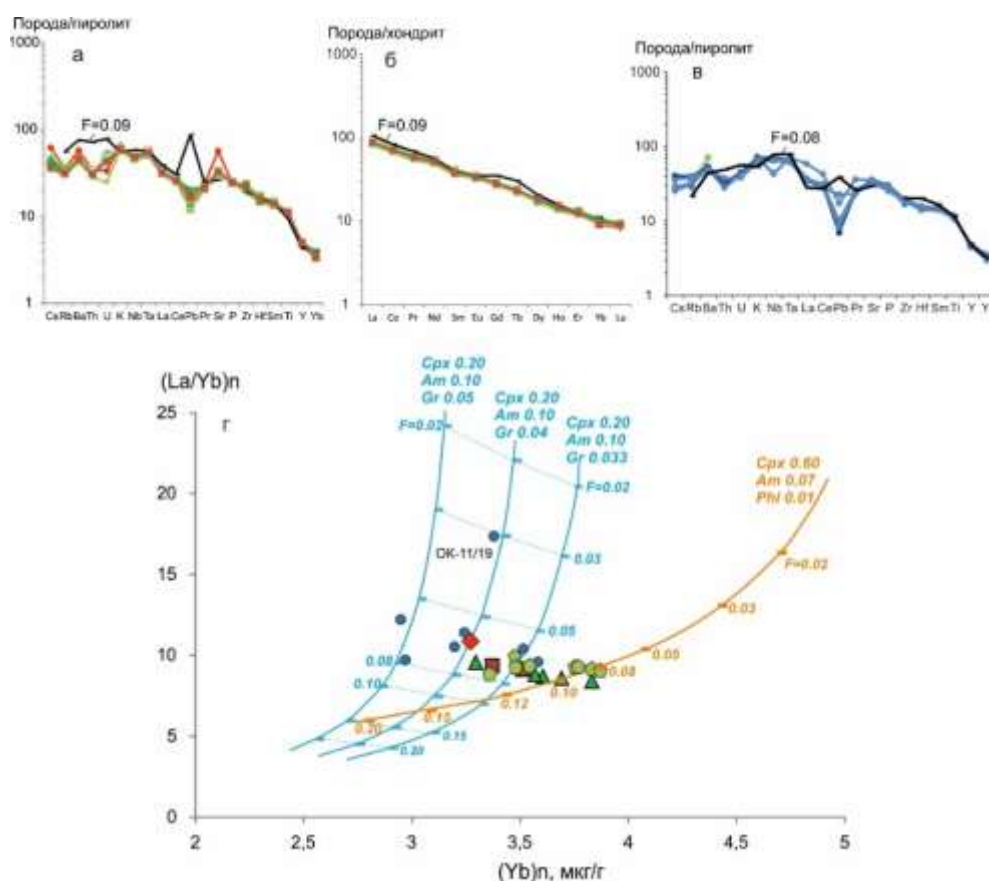
Магматические расплавы вулканов Тарят-Чулутынского вулканического поля Центральной Монголии извергались около 50 и 9 тыс. лет назад из однородного OIB-подобного источника, который эпизодически активизировался на этом вулканическом поле начиная с 1.2 млн лет назад. В позднем кайнозое Центральной Монголии OIB-подобные источники, соответствующие мантийному направлению на диаграмме Th/Yb – Ta/Yb, были характерны для пород последних 10 млн лет Чулутынской зоны трансенсии, проявлявшей активность на Верхне-Чулутынском и Тарят-Чулутынском вулканических полях. На других позднекайнозойских полях Центральной Монголии породы отклонялись на диаграмме Th/Yb – Ta/Yb ниже мантийного направления, т.е., подобно предголоценовым породам северной части Окинского вулканического поля, они были производными из источников, комплементарно обедненных материалом земной коры (Чувашова и др., 2022).

Мы обращаем внимание на различие источников финального вулканизма северной части Окинского вулканического поля и Чулутынской зоны Центральной Монголии: вовлечение в плавление материала обедненной литосферы в первой из них и проявление OIB-подобного материала – во второй.

*Переход от амфибол-гранат-содержащих к менее амфиболизированным источникам предголоценовых извержений в северной части Окинского вулканического поля и общая латеральная смена очагов плавления под высокими горными хребтами и впадинами БРС*

Вариации бария, стронция, калия и рубидия в предголоценовых лавах хр. Большой Саян и Усть-Жомболокского покрова свидетельствуют об участии в плавлении амфибола (см. рис. 9, 10). Эти элементы находятся в начале ряда несовместимости элементов к пиролитовому модельному составу мантии (Sun, McDonough, 1989) и меняются

относительно состава пиролита, если в источнике присутствует амфибол.



**Рис. 13.** Графики результатов микроэлементного моделирования источников предголоценовых вулканических пород северной части Окинского вулканического поля. Усл. обозначения предголоценовых вулканических пород см. рис. 6. Черными линиями на графиках а–в показаны модельные составы. Сравниваются составы предголоценовых пород и рассчитанных модельных составов, производных гранатсодержащего и безгранатового источников: а) несовместимые элементы вулканических пород Окинской впадины, нормированные к пиролиту, б) редкоземельные элементы, нормированные к хондриту в вулканических породах Окинской впадины, в) несовместимые элементы вулканических пород хр. Большой Саян, нормированные к пиролиту. На панели г показано распределение фигуративных точек вулканических пород относительно модельных кривых для трех вариантов гранатсодержащего источника с меняющимся содержанием граната и одного варианта безгранатового источника. В гранатсодержащем источнике вулканических пород хр. Большой Саян минимум в полтора раза больше амфибола и в 5 раз меньше клинопироксена, чем в безгранатовом источнике вулканических пород Окинской впадины.  $F$  – степень частичного плавления.

**Fig. 13.** Graphs of the results of trace element modeling of the sources of pre-Holocene volcanic rocks from the northern part of the Oka volcanic field. Symbols for pre-Holocene volcanic rocks are as in Fig. 6. The black lines in graphs а–в show the model compositions. The compositions of the pre-Holocene rocks are compared with the calculated model compositions derived from garnet-bearing and garnet-free sources: а) incompatible elements of volcanic rocks from the Oka Basin, normalized to pyroxene, б) rare earth elements, normalized to chondrite in volcanic rocks from the Oka Basin, в) incompatible elements of volcanic rocks of the Great Sayan Range, normalized to pyroxene. Panel г shows the distribution of data points of volcanic rocks relative to model curves for three versions of a garnet-bearing source with varying garnet content and one version of a garnet-free source. The garnet-bearing source of volcanic rocks from the Great Sayan Range contains at least one and a half times more amphibole

and five times less clinopyroxene than the garnet-free source of volcanic rocks from the Oka Basin. F is the degree of partial melting.

На рис. 13 и 14 иллюстрируются результаты расчета процесса образования магматического расплава в источнике по модели равновесного плавления (Shaw, 1970) с коэффициентами распределения минерал/расплав и составами минералов, использованными в статье по вулканизму ЮВ Монголии (Rasskazov et al., 2025). Микроэлементный состав источника принимается на основе пиролита с добавлением средних содержаний клинопироксена, граната, амфибола и

флогопита в мантийных ксенолитах из базальтов БРС (кроме базальтов Бартойской группы вулканов, данные из работ Ащепков и др., 2003; Ionov et al., 1997; Litasov et al., 2000; Ashchepkov et al., 2011). Содержание Ta в амфиболе рассчитывается на основе содержания Nb и соотношения Nb/Ta, содержания Th и U в амфиболе используется из работы (Zheng et al., 2006). Содержание минералов в модельных источниках приводится в табл. 1.

Таблица 1

Минеральный состав магматических источников базальтов Окинского вулканического поля по данным микроэлементного моделирования

Table 1

Mineral composition of magmatic sources for basalts of the Oka volcanic field according to trace-element partial-melting modeling

| Минерал           | Окинская впадина |                             | Осевая часть хр. Большой Саян |                             |
|-------------------|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
|                   | Доля в источнике | Доля в плавящемся материале | Доля в источнике              | Доля в плавящемся материале |
| Ol                | 0.12             | 0.24                        | 0.417–0,44                    | 0.45                        |
| Orx               | 0.20             | 0.10                        | 0.25                          | 0.10                        |
| Cpx               | 0.60             | 0.60                        | 0.20                          | 0.25                        |
| Grt               | нет              | нет                         | 0.033–0,05                    | 0.05                        |
| Amph              | 0.07             | 0.05                        | 0.10                          | 0.15                        |
| Phl               | 0.01             | 0.01                        | нет                           | нет                         |
| Степень плавления | 8–12 %           |                             | 3–9 %                         |                             |

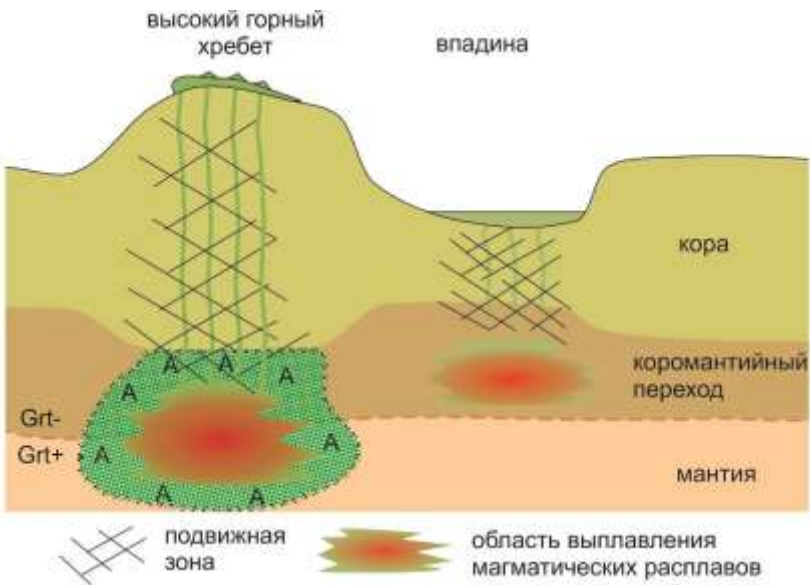


Рис. 14. Схема генерации магм в малоглубинном источнике под впадиной и более глубинном под высоким горным хребтом. Под впадиной вовлекается в плавление слабо амфиболитизированный безгранатовый материал коромантийного перехода, под высоким горным хребтом –

амфиболизированный (А) материал не только безгранатовой зоны коромантийного перехода, но и гранатсодержащей мантии.

**Fig. 14.** Schematic drawing of magma generation in a shallow source beneath a basin and a deeper source beneath a high mountain ridge. Beneath the basin, slightly amphibolized garnet-free material of the crust–mantle transition is involved in melting; beneath the high mountain range, amphibolized (А) material from the both garnet-free zone of the crust-mantle transition and garnet-bearing mantle is involved in melting.

На диаграмме  $(La/Yb)_n - (Yb)_n$  точки составов базальтов Окинской впадины располагаются на тренде повышения содержания Yb при почти неизменном значении La/Yb. Такое положение точек выплавки – приблизительно постоянное соотношение легких и тяжелых РЗЭ при существенном изменении содержания тяжелых РЗЭ – характерно для плавления безгранатовых источников. Максимальная доля амфибола в модельном источнике базальтов Окинской впадины, исходя из содержания в них несовместимых микроэлементов, таких как Rb, Ba, K, Nb, Ta, Zr, Hf, не превышает 7 %. Сравнительно крутой наклон нормированных спектров РЗЭ базальтов Окинской впадины в такой модели обеспечивается плавлением клинопироксена, а не амфибола или граната.

В гранатсодержащем источнике вулканических пород гр. БС-1 хр. Большой Саян содержится минимум в полтора раза больше амфибола, чем в безгранатовом источнике вулканических пород Окинской впадины. Из-за отсутствия данных по микроэлементам, источники вулканических пород групп БС-2 и БС-3 не моделируются. Содержание амфибола в источниках пород этих двух групп должно быть еще выше, поскольку породы обогащены барием и имеют высокие отношения Ba/Rb и K/Rb (см. рис. 9, 10). Кроме того, базальты Окинской впадины образовались при более высоких степенях частичного плавления, чем вулканические породы хребта Большой Саян.

Тренд от малоглубинного (безгранатового) источника к более глубинному (гранатсодержащему) реализовался в Камарско-Становой зоне трансенсии (юго-западное побережье Байкала) 18–12 млн лет назад. На вулкане Метео около 18.1 млн лет назад извергались выплавки высоких степеней плавления ( $F$  до 0.2) из обедненного литосферного безгранатового источника. Через 500 тыс. лет источник углубился под этим вулканом в

гранатсодержащую мантию с уменьшением степени частичного плавления ( $F$  снилось до 0.08). В дальнейшем (в интервале 16–12 млн лет назад) на Култукском, Сухом и Быстринском вулканах обособились малоглубинные (безгранатовые) и глубинные (гранатсодержащие) источники (Рассказов и др., 2013).

Плавление амфибол-содержащего реститового материала на уровне гранатсодержащих мантийных парагенезисов под хр. Большой Саян и плавление материала, содержащего меньшее количество амфибола, на безгранатовом (менее глубинном) уровне коромантийного перехода под Окинской впадиной согласуется с общей тенденцией генерации базальтовых расплавов на юге Сибири под высокими горными хребтами из глубинных амфибол-содержащих источников и под впадинами – из малоглубинных источников без амфибола (Рассказов, 1985). Амфибол, встречающийся в составе родственных полиминеральных включений и мегакристаллов, имеет К–Аг датировки, слегка превышающие возраст вмещающих лав (например, Рассказов и др., 2000), что свидетельствует о развитии амфиболизации на неотектоническом этапе, в процессе роста высоких горных хребтов.

Исключение из правила «высокий горный хребет – амфиболсодержащий источник вулканизма» – Бартойская группа ранне-среднеплейстоценовых вулканов. Она находится в периферическом прогибе Байкальской рифтовой зоны, испытывающим относительное опускание в квартере, т.е. во время активности этих вулканов. Амфибол распространяется здесь в виде мегакристаллов и входит в состав полиминеральных кристаллических включений. Для включения зеленого амфиболового лерцолита р538/10 из пирокластических отложений вулкана Большого, извергавшегося 0.79 млн лет назад ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  возраст (Рассказов и др., 1996), получена К–Аг датировка 4 млн лет (измерения С.Б. Брандта

и И.С. Брандта в лаборатории изотопии и геохронологии ИЗК СО РАН). Судя по соотношению калия и радиогенного аргона, амфибол кристаллизовался под бартойскими вулканами в процессе плиоценового преобразования глубинных источников.

Здесь нужно отметить, однако, присутствие амфибола в древнем ксеногенном материале из пирокластических отложений бартойских вулканов. Для цирконового мегакристалла измерены соотношения изотопов Pb, соответствующие возрасту 282 млн лет (определение С.А. Бауринга в Массачусетском технологическом институте США). Такое значение характеризует возраст гранитов территории Забайкалья. Древние изохронные даты были получены также в Rb–Sr и Sm–Nd изотопных системах полиминеральных включений из этого местонахождения (Юпов et al., 1992). Следовательно, глубинные включения местонахождения Бартойской группы вулканов относятся к категории частично чужеродных по отношению к вмещающим вулканическим породам. В отличие от новообразованного амфибол-содержащего материала под высокими горными хребтами, амфибол-содержащий материал под периферическим прогибом Байкальской рифтовой зоны был унаследован от древнего литосферного субстрата.

*Значение предголоценового импульса поступления глубинных базальтовых магм в контексте вулканизма позднего плейстоцена и голоцена БРС*

Проявление пост-хирбэсинского вулканизма северной части Окинского вулканического поля приобретает особый смысл в сопоставлении с близкими по времени вулканическими проявлениями позднего плейстоцена – голоцена в других районах БРС.

Датирование вулканических пород Тарятской впадины Центральной Монголии U–Th методом и методом  $^{14}\text{C}$  показало извержение около 50 тыс. лет назад вулканов Однобокий, Лиственничный и Сосновый, насаженных на субширотных разрыв, а около 9 тыс. лет назад – вулкана Хорго, который контролировался разрывом северо-восточного простирания. Сменившийся контроль вулканических извержений воспринимается как прообраз

сейсмоактивной структуры субмеридиональной Чулутынской зоны с правосторонней транстенсией.

Определение геохимических характеристик вулканических пород выявило отчетливую временную смену компонентов вулканических пород тефритового и тефрифенолитового состава Тарят-Чулутынского вулканического поля на уровне мантийных источников. От извержений 50 тыс. лет назад к извержениям около 9 тыс. лет назад возросла степень частичного плавления мантийных источников (Чувашова и др., 2007; Чувашова и др., 2022). По U–Th-изотопной систематике вулканических пород глубинная динамика области плавления в Восточных Саянах определялась накоплением и стаиванием мощных ледовых покровов, тогда как в Центральной Монголии какое-либо влияние ледников на плавление отсутствовало (Рассказов и др., 2014).

Наиболее молодая вулканическая постройка Улуг-Арга Восточно-Тувинского поля имеет K–Ar и U–Th оценки возраста около 50 тыс. лет (Ярмолук и др., 1999; Рассказов и др., 2014), т.е. образовалась приблизительно в одно время с субширотной линией вулканов Тарят-Чулутынского поля: Однобокий, Лиственничный и Сосновый.

В предголоценовое время в северо-восточной части БРС, на хр. Удокан, извергались базальты трещинного вулкана Сыни и плагиоклазовые трахиты вулкана Трахитового в условиях растяжения земной коры в направлении северо-восток – юго-запад. В сущности, подъем глубинных расплавов из мантии на хр. Удокан реализовался 14–12 тыс. лет назад в условиях особого тектонического контроля, отличающегося от современного деформационного состояния земной коры. Направление действующих сил изменилось на современное около 9 тыс. лет назад. С этого времени земная кора растягивалась в направлении северо-запад – юго-восток. Извергались более дифференцированные трахитовые расплавы вулканов Аку, Долинный и Чепе, не связанные с подпиткой глубинными мантийными расплавами. На этих вулканах вскрывался внутрикоровых очаг магмы (Рассказов, 1999; Чувашова и др., 2007).

В северной части Окинского вулканического поля извергались только глубинные магматические расплавы, производные мантии и коромантийного перехода. Предголоценовое поступление глубинных магм на востоке и западе БРС могло быть синхронным. В связи с предголоценовым поступлением мантийных базальтовых магм на хр. Удокан и отсутствием более поздней глубинной подпитки голоценовый возраст вулканов и потоков в осевой части хр. Большой Саян (в случае, если он будет обоснован) приобретет особый смысл продолжающейся глубинной подпитки под этим горным сооружением. Переходу от малоглубинной магомгенерации под Окинской впадиной к более глубинной под хр. Большой Саян сопутствуют продвинутые процессы флюидного преобразования источников с развитием амфиболизации. Усиление роли плавления материала за счет водных флюидов может способствовать продлению активного вулканизма на хр. Большой Саян, по сравнению с вулканизмом Окинской впадины, по аналогии с общим флюидным продлением извержений в Восточной Азии относительно предголоценового импульса Внутренней Азии (Чувашова и др., 2007).

### **Заключение**

Предголоценовые трахибазальты и тефриты Усть-Жомболокский лавового покрова в Окинской впадине относятся к СВ сектору Окинского вулканического поля, тогда как одновозрастные и близкие по составу лавовые потоки и шлаковые конусы верховьев р. Жом-Болок и пади Хи-Гол в осевой части хр. Большой Саян – к СЗ сектору этого поля. Породы этих территорий разделены между собой Шарзакской моренной перемычкой и были производными местных центров извержений. Исходя из различия структурных условий вулканизма территорий, проведены сравнительные исследования глубинных источников вулканизма осевой части высокого горного хребта и впадины. По результатам микроэлементного моделирования выявлено плавление амфибол-содержащего реститового материала на уровне

гранатосодержащих мантийных парагенезисов под хр. Большой Саян и плавление материала с меньшим количеством амфибола на безгранатовом (менее глубинном) уровне коромантийного перехода под Окинской впадиной. Такая пространственная смена источников согласуется с общей тенденцией генерации базальтовых расплавов на юге Сибири под высокими горными хребтами из амфибол-содержащих источников и под впадинами – из источников без амфибола.

По морфологии поверхности лавовых слоев обеих территорий предполагается концентрирование остаточных расплавов в трубоподобных каналах с последующим удалением из них и обрушением кровли. В обнажениях Усть-Жомболокского лавового покрова Окинской впадины выявляется тренд снижения  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  со слабым относительным снижением  $\text{Mg\#}$  пород переходной фации, отражающим контроль перераспределения компонентов совместной кристаллизацией титанавгита и плагиоклаза на ранней стадии периферического отвердевания базальтового слоя. В породах остаточного расплава в трубоподобных каналах лавовых слоев Усть-Жомболокского покрова повышается  $\text{SiO}_2$  и снижается  $\text{Sr}$ . В осевой части хр. Большой Саян доступны для опробования верхние закаленные части незэродированных лавовых потоков. Здесь различаются два тренда фракционирования оливина: 1) с участием Са-плагиоклаза (с повышенным  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и 2) без участия Са-плагиоклаза (с низким  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) – предположительно, с участием титанавгита. Тренд фации «трубы» (котектика титанавгит+плагиоклаз с варьирующим  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  при узком диапазоне  $\text{Mg\#}$ ) в породах осевой части хр. Большой Саян не идентифицируется.

### **Благодарности**

Настоящая работа является продолжением исследований Жом-Болокского лавового покрова с участием студентов геологического факультета ИГУ и школьников Орликской средней школы Окинского района (Рассказов

и др., 2024, 2025). Работы были организованы директором школы Б.Д. Шарастепановым и зам. директора по воспитательной работе А.П. Папаевым. 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.

## 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.
- Ащепков И.В., Травин А.В., Сапрыкин А.И., Андре Л., Герасимов П.А., Хмельникова О.С. О возрасте ксенолитсодержащих базальтов и мантийной эволюции в Байкальской рифтовой зоне // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 11. С. 1162–1190.
- Гросвальд М.Г. Развитие рельефа Саяно-Тувинского нагорья. М.: Наука, 1965. 167 с.
- 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.
- Классификация магматических (изверженных) пород и словарь терминов. Рекомендации подкомиссии по систематике изверженных пород Международного союза геологических наук: Пер. с англ. М.: Недра, 1997. 248 с.
- Кропоткин П.А. Поездка в Окинский караул // Записки Сибирского отделения Императорского Русского географического об-ва. 1867. Кн. 9/10. <https://oldcancer.narod.ru/Geography/PAK-PvOk.htm>
- Медведев М.Е. Жом-Болокский поток базальтов и вулканы пади Хи-Гол в Восточном Саяне. Информационный бюллетень (1967–1968 гг.). Иркутск, 1970.
- Обручев С.В., Лурье М.Л. Вулканы Кропоткина и Перетолчина в Восточном Саяне. Труды Лаборатории вулканов. Вып. 8. М.: Изд-во АН СССР, 1954.
- 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., Чувашова И.С. Вулканизм и трансформация на северо-востоке Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2018. 383 с. ISBN 978-5-6041446-3-3
- Рассказов С.В., Бовен А., Иванов А.В., Семенова В.Г. Среднечетвертичный вулканический импульс в Олекмо-Становой подвижной системе:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирование вулканитов Токинского Становика // Тихоокеанская геология, 2000, № 4. С. 19–28.
- Рассказов С.В., Богданов Г.В., Медведева Т.И. К минералогии амфиболсодержащих глубинных включений из базальтов Тункинской впадины Байкальской рифтовой зоны // Записки Всесоюзного Минералогического общества. 1989б. Вып. 4. Ч. 118. С. 56–64.
- 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., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Фефелов Н.Н., Саранина Е.В. Калиевая и каликатовая вулканические серии в кайнозое Азии. Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО». 2012. 351 с.
- Рассказов С.В., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Фефелов Н.Н., Саранина Е.В.

Вулканические серии Южно-Хангайского плато – краевой структуры Хангайского орогена: преобразование источников кайнозойских базальтов мантии Дзабханского микроконтинента // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Вып. 8. Труды X Российско-Монгольской конференции «Солнечно-земная физика и сейсмогеодинамика Байкало-Монгольского региона». Институт земной коры СО РАН, Институт солнечно-земной физики СО РАН, 2015. С. 75–86.

Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С., Михеева Е.А., Снопков С.В. Култукский вулкан: пространственно–временная смена магматических источников на западном окончании Южно-Байкальской впадины в интервале 18–12 млн лет назад // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2013. Vol. 4, No. 2. P. 135–168. doi:10.5800/GT2013420095.

Семенова В.Г., Соловьева Л.В., Владимиров Б.М. Глубинные включения в щелочных базальтоидах Токинского Становика. Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1984. 119 с.

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

Флоренсов Н.А. Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. М.–Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1960. 258 с.

Чувашова И.С., Рассказов С.В., Ясныгина Т.А. Трассирование потенциальной сейсмической структуры в Тарятской 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.

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.

Ashchepkov I.V., Andre L., Downes H., Belyatsky B.A. Pyroxenites and megacrysts from Vitim picrite-basalts (Russia): polybaric fractionation of rising melts in the mantle // *J. Asian Earth Sciences*. 2011. Vol. 42. P. 14–37. doi:10.1016/j.jseaes.2011.03.004

Ionov, D.A., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y. Volatile-bearing minerals and lithophile trace elements in the upper mantle // *Chem. Geol.* 1997. Vol. 141. P. 153–184. doi: 10.1016/S0009-2541(97)00061-2

Ionov D.A., Kramm U., Stosch H.-G. Evolution of the upper mantle beneath the southern Baikal rift zone: an Sr–Nd isotope study of xenoliths from the Bartoy volcanoes // *Contrib. Miner. Petrol.* 1992. Vol. 111. P. 235–247.

Le Bas M.J., Streckeisen A.L. The IUGS systematics of igneous rocks // *J. Geol. Soc. London*. 1991. Vol. 148. P. 825–833.

Litasov K.D., Foley S.F., Litasov Yu.D. Magmatic modification and metasomatism of the subcontinental mantle beneath the Vitim volcanic field (East Siberia): evidence from trace element data on pyroxenite and peridotite xenoliths from Miocene picrobasalt // *Lithos*. 2000. Vol. 54. P. 83–114. doi:10.1016/s0024-4937(00)00016-5

Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Yasnygina T.A., Saranina E.V. Late Cenozoic high and low temperature magma generation from primordial and age-modified mantle materials beneath Dariganga in Southeast Mongolia: Factors of mantle degassing and adiabatic upwelling // *Geosystems and Geoenvironment*. 2024. Vol. 3. 100295. doi: 10.1016/j.geogeo.2024.100295

Rudnick R.L., Fountain D.M. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective // *Reviews of Geophysics*. 1995. Vol. 33. P. 267–309. doi: 10.1029/95RG01302

Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes / *Magmatism in the ocean basins* // *Geol. Soc. Spec. Publ.* 42. 1989. P. 313–345. doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19

Zheng J., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Zhang M., Pearson N., Luo Zh. The lithospheric mantle beneath the southwestern Tianshan area, northwest China // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2006. Vol. 151. P. 456–479. doi: 10.1007/s00410-006-0071-x

## 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.
- Ashchepkov I.V., Andre L., Downes H., Belyatsky B.A. Pyroxenites and megacrysts from Vitim picrite-basalts (Russia): polybaric fractionation of rising melts in the mantle // *J. Asian Earth Sciences*. 2011. Vol. 42. P. 14–37. doi:10.1016/j.jseaes.2011.03.004
- Ashchepkov I.V., Travin A.V., Saprykin A.I., Andre L., Gerasimov P.A., Khmelnikova O.S. Age of xenolith-bearing basalts and mantle evolution in the Baikal rift zone // *Russian Geol. Geophys.* 2003. No. 11. P. 1121–1149.
- 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.
- Classification of igneous rocks and glossary. Recommendations of the Subcommittee on Taxonomy of Igneous Rocks of the International Union of Geological Sciences: Trans. from English. Moscow: Nedra, 1997. 248 p.
- 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.
- Grosvald M.G. Development of the relief of the Sayan-Tuva Highlands. Moscow: Nauka, 1965. 167 p.
- Florensov N.A. Mesozoic and Cenozoic basins of the Baikal region. Moscow–Leningrad: Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1960. 258 p.
- Ionov, D.A., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y. Volatile-bearing minerals and lithophile trace elements in the upper mantle // *Chem. Geol.* 1997. Vol. 141. P. 153–184. doi: 10.1016/S0009-2541(97)00061-2
- Ionov D.A., Kramm U., Stosch H.-G. Evolution of the upper mantle beneath the southern Baikal rift zone: an Sr–Nd isotope study of xenoliths from the Bartoy volcanoes // *Contrib. Miner. Petrol.* 1992. Vol. 111. P. 235–247.
- 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.
- Le Bas M.J., Streckeisen A.L. The IUGS systematics of igneous rocks // *J. Geol. Soc. London*. 1991. Vol. 148. P. 825–833.
- Litasov K.D., Foley S.F., Litasov Yu.D. Magmatic modification and metasomatism of the subcontinental mantle beneath the Vitim volcanic field (East Siberia): evidence from trace element data on pyroxenite and peridotite xenoliths from Miocene picrobasalt // *Lithos*. 2000. Vol. 54. P. 83–114. doi:10.1016/s0024-4937(00)00016-5
- Medvedev M.E. The Zhom-Bolok basalt flow and the Khi-Gol valley volcanoes in the Eastern Sayan mountains." *Information Bulletin (1967–1968)*. Irkutsk, 1970.
- Obruchev S.V., Lurye M.L. The Kropotkin and Peretolchin volcanoes in the Eastern Sayan mountains // *Proceedings of the Volcano Laboratory*. Issue 8. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1954.
- 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 Range, Eastern Siberia // *Volcanology and Seismology*. 1999. No. 2. P. 70–74.
- Rasskazov S.V., Chuvashova I.S. Volcanism and transtension in the northeastern Baikal Rift System. Novosibirsk, Academic Publishing House «GEO», 2018. 384 p.]. doi: 10.21782/B978-5-6041446-3-3
- Rasskazov S.V., Bogdanov G.V., Medvedeva T.I. On mineralogy of amphibole-bearing deep-seated inclusions from basalts of the Tunka basin in the Baikal rift zone // *Notes of the All-Soviet-Union Mineralogical Society*. 1989b. Vol. 118, No. 4. P. 56–64.
- 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., Chuvashova I.S., Yasnygina T.A., Fefelov N.N., Saranina E.V. Potassic and potassic-sodic volcanic series in the Cenozoic of Asia. Novosibirsk: Academic Publishing House "GEO". 2012. 351 p.

Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Yasnygina T.A., Fefelov N.N., Saranina E.V. Volcanic series from the south Hangay Plateau – marginal structure of the Hangay orogen: reformation of sources for Cenozoic basalts in the mantle of the Dzabkhan microcontinent. Modern geodynamics and hazardous natural processes in Central Asia. Issue 8. Proceedings of the X Russian-Mongolian Conference "Solar-terrestrial physics and seismogeodynamics of the Baikal-Mongolian region". Institute of the Earth's Crust SB RAS, Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, 2015. P. 75–86.

Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Yasnygina T.A., Saranina E.V. Late Cenozoic high and low temperature magma generation from primordial and age-modified mantle materials beneath Dariganga in Southeast Mongolia: Factors of mantle degassing and adiabatic upwelling // Geosystems and Geoenvironment. 2024. Vol. 3. 100295. doi: 10.1016/j.geogeo.2024.100295

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., Mikheeva E.A., Snopkov S.V. The Kultuk Volcano: spatial-temporal change of magmatic sources at the western terminus of the South Baikal basin between 18 and 12 Ma // Geodynamics & Tectonophysics. 2013. Vol. 4, No. 2. P. 135–168. doi:10.5800/GT-2013-4-2-0095

Rudnick R.L., Fountain D.M. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective // Reviews of Geophysics. 1995. Vol. 33. P. 267–309. doi: 10.1029/95RG01302

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.

Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes / Magmatism in the ocean basins // Geol. Soc. Spec. Publ. 42. 1989. P. 313–345. doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19

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.

Zheng J., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Zhang M., Pearson N., Luo Zh. The lithospheric mantle beneath the southwestern Tianshan area, northwest China // Contrib. Mineral. Petrol. 2006. Vol. 151. P. 456–479. doi: 10.1007/s00410-006-0071-x

**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 Geo-  
chronological Studies,  
tel.: (3952) 51–16–59,  
email: rassk@crust.irk.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

**Галсанов Золто Бэликович,**  
пос. Орлик, Окинский район Бурятской рес-  
публики,  
Орликская средняя школа,  
учащийся 7-го класса,  
**Galsanov Zolto Belikovich,**  
Orlik settlement, Sayot district, Buryat Republic,  
Orlik Secondary School,  
school student,

**Шарастепанов Баир Дашеевич,**  
кандидат географических наук,  
пос. Орлик, Окинский район Бурятской рес-  
публики,  
Орликская средняя школа,  
директор,  
email: orlik\_school@mail.ru  
**Sharastepanov Bair Dasheevich**  
Candidate of Geography,  
Orlik settlement, Sayot district, Buryat Republic,  
Orlik Secondary School,  
Director,  
email: orlik\_school@mail.ru

**Папаев Алексей Пурбоевич**  
кандидат географических наук,  
пос. Орлик, Окинский район Бурятской рес-  
публики,  
Орликская средняя школа,  
зам. директора по воспитательной работе,  
email: papaev13@rambler.ru  
**Papaev Alexey Purboevich,**

*Candidate of Geography,  
Orlik settlement, Okinsky district, Buryat Repub-  
lic,  
Orlik Secondary School,  
Deputy Director for Educational Work,  
email: papaev13@rambler.ru*

**Снопков Сергей Викторович,**  
кандидат геолого-минералогических наук, до-  
цент,  
664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,  
Иркутский государственный университет,  
геологический факультет,  
доцент,  
664074, г. Иркутск, ул. Курчатова, 3,  
Сибирская школа геонаук, Иркутский нацио-  
нальный исследовательский технический универ-  
ситет,  
ведущий научный сотрудник,  
email: snopkov\_serg@mail.ru  
**Snopkov Sergey Viktorovich,**  
Candidate of Geological and Mineralogical Sci-  
ences,  
664025, Irkutsk, Lenin st., 3,  
Irkutsk State University, Faculty of Geology  
assistant professor,  
664074, Irkutsk, Kurchatov st., 3,  
Siberian School of Geosciences, Irkutsk National  
Research Technical University,  
Leading Researcher,  
email: snopkov\_serg@mail.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 sci-  
ences,  
664033, Irkutsk, st. Lermontova, 128,  
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 sci-  
ences,*

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

---

УДК 550.34

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2025.4.172>

EDN: QCIPKI

## From Icequake to Earthquake

S.A. Bornyakov<sup>1</sup>, A.A. Dobrynina<sup>1</sup>, Y. Guo<sup>2</sup>, L. Yao<sup>2</sup>, A.N. Shagun<sup>1</sup>, Y. Zhuo<sup>2</sup>,  
V.A. Sankov<sup>1</sup>, D.V. Salko<sup>1</sup>, A.I. Miroshnichenko<sup>1</sup>, A.A. Karimova<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Institute of the Earth's Crust, Irkutsk, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Geology of China Earthquake Administration, Beijing, China*

<sup>3</sup>*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

**Abstract.** There was performed instrumental deformation and seismic monitoring of the ice cover of Lake Baikal. Evidence was found for an autowave nature of ice deformations before icequakes. Autowave dynamics of deformations in the ice cover is a consequence of self-organization the ice cover as a structurally inhomogeneous medium in a critical state. The self-organization of the deformation process is confirmed by the results of processing the time series data by structural function curvature analysis method (SFCAM) and by spectral analysis method based on the Lomb-Scargl periodogram. The analysis of seismic monitoring data for the ice cover showed that the autowave processes are characterized by constant frequency 0.1 Hz.

The revealed features of the occurrence of deformations and microseismic vibrations of ice before ice strikes are compared with those identified previously for the occurrence of rock deformations before the last strong earthquakes in the southern Baikal region - Kultuk, Bystrinsky and Kudara. It is shown that as well as the icequakes, the earthquakes were preceded by self-organization of the deformation process. The self-organization of the deformation process and low-frequency autowave oscillations below and above 0.1 Hz, which occur before icequakes and earthquakes, can be considered as their inevitable precursors.

**Keywords:** icequake, earthquake, self-organization, precursor

## От льдотрясения к землетрясению

С.А. Борняков<sup>1</sup>, А.А. Добрынина<sup>1</sup>, Ю. Го<sup>2</sup>, Л. Яо<sup>2</sup>, А.Н. Шагун<sup>1</sup>, Ю. Чжо<sup>2</sup>, В.А. Саньков<sup>1</sup>, Д.В. Салко<sup>1</sup>, А.И. Мирошниченко<sup>1</sup>, А.А. Каримова<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Институт земной коры, Иркутск, Россия*

<sup>2</sup>*Институт геологии Китая Администрация по землетрясениям, Пекин, Китай*

<sup>3</sup>*Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия*

**Аннотация.** Проведен инструментальный деформационный и сейсмический мониторинг ледяного покрова озера Байкал. Обнаружен автоволновой характер деформаций льда перед ледовыми ударами. Автоволновая динамика деформаций в ледовом покрове является следствием деформационной самоорганизации ледового покрова как структурно неоднородной среды, находящейся в критическом состоянии. Наличие самоорганизации подтверждается результатами обработки временных рядов данных методом анализа кривизны структурных функций

---

Статья получена: 18.12.2025; исправлена: 20.12.2025; принята: 26.12.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Борняков С.А., Добрынина А.А., Го Ю., Яо Л., Шагун А.Н., Чжо Ю., Саньков В.А., Салко Д.В., Мирошниченко А.И., Каримова А.А. От ледяного землетрясения к землетрясению // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 4. С. 172–192. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.172. EDN: QCIPKI

Article received: 18.12.2025; corrected: 20.12.2025; accepted: 26.12.2025.

FOR CITATION: Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Guo Y., Yao L., Shagun A.N., Zhuo Y., Sankov V.A., Salko D.V., Miroshnichenko A.I., Karimova A.A. From icequake to earthquake // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 4. P. 172–192. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.172. EDN: QCIPKI

(МАКСФ) и методом спектрального анализа на основе периодограммы Ломба-Скаргла. Анализ данных сейсмического мониторинга ледяного покрова показал, что автоволновые процессы характеризуются постоянной частотой 0.1 Гц.

Выявленные особенности возникновения деформаций и микросейсмических колебаний льда перед ударами льда сравниваются с выявленными ранее особенностями возникновения деформаций горных пород перед последними сильными землетрясениями в Южном Прибайкалье – Култукским, Быстринским и Кударским. Показано, что землетрясениям, как и ледотрясениям, предшествовала самоорганизация деформационного процесса. Самоорганизацию деформационного процесса и низкочастотные автоволновые колебания ниже и выше 0.1 Гц, которые возникают перед ледовыми ударами и перед землетрясениями, можно рассматривать как их неизбежные предвестники.

**Ключевые слова:** ледотрясение, землетрясение, самоорганизация, предвестник

## Introduction

Ice has a wide range of mechanical properties and behaves either as an elastic-viscoplastic body or as an elastic body depending on the temperature and strain rate (Budd, 1989; Durham et. al., 2010; Petrovic, 2003). The deformation and destruction of ice are accompanied by seismic effects called "icequake" by analogy with tectonic earthquakes. The research of icequakes in glacier and sea ice has led to the emergence of a new seismological direction – cryoseismology (Podolskiy and Walter, 2016). Seismological studies of glaciers are mainly aimed at studying their structure, internal deformations, and spatial displacements along the base. These studies have shown that the icequakes caused by glacier-related processes are divided into low-frequency and high-frequency events, with frequencies from  $10^{-3}$  to  $10^2$  Hz and moment magnitudes from  $M^{-3}$  to  $M^7$  (Podolskiy and Walter, 2016; Helmstetter, 2022; and others).

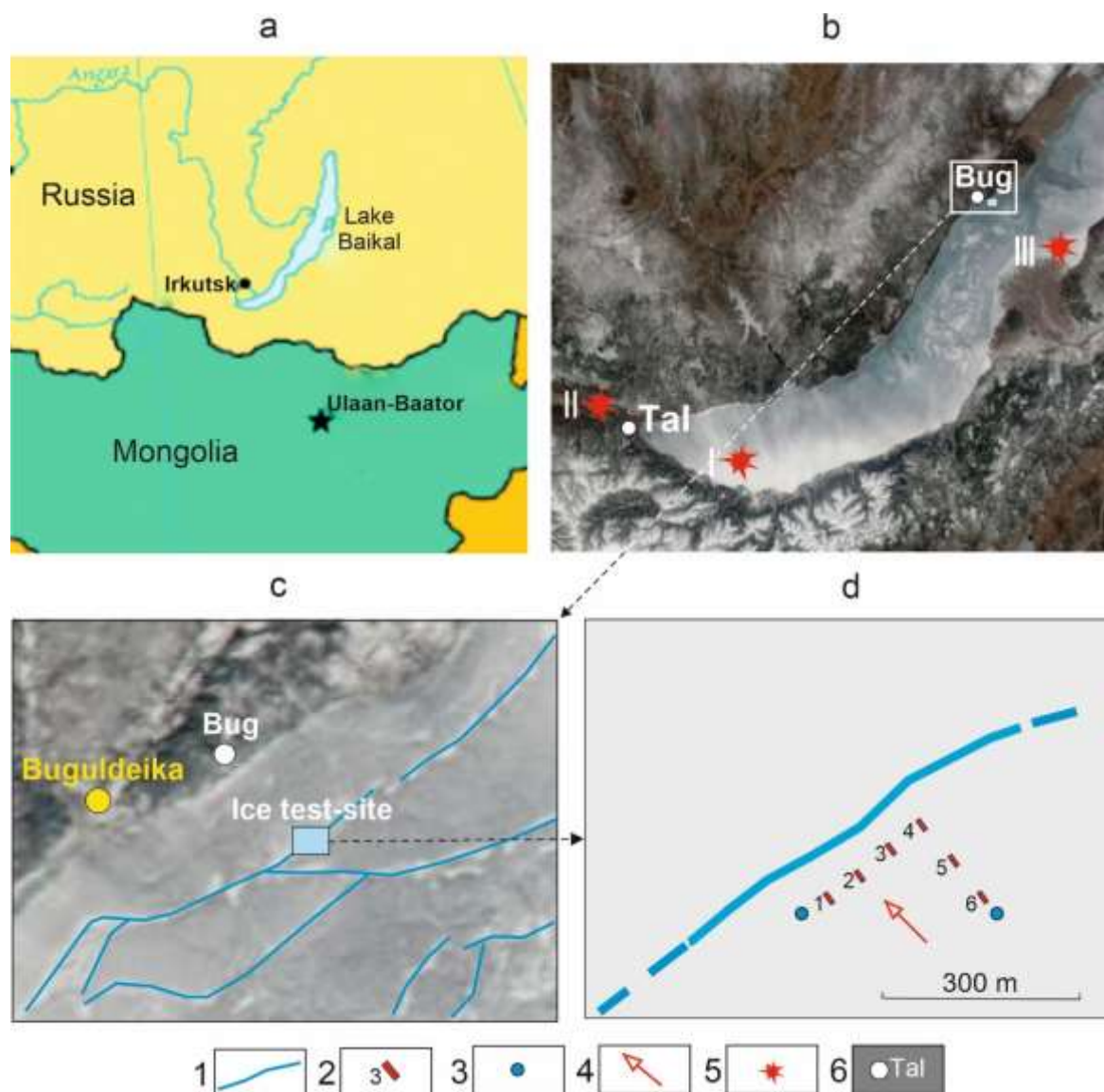
The main causes of icequakes are gravity and thermal expansion of ice. The first factor is constant and does not change over time. The second factor is seasonal and actively manifests itself in spring and summer when the air temperature

rises. At the same time, the temperature of the glacier changes slowly due to its large volume, as a result of which the accumulation of high stresses, sufficient to generate icequakes therein, takes a long time.

There is a significant change in relation to ice-covered lakes in the regions with a sharply continental climate. An illustrative example is Lake Baikal (Fig. 1). Its small ice thickness averaging 0.8-1 m and sharp changes in spring temperatures from  $-5-10$  °C at night to  $+5-10$  °C during the day lead to rapid heating of the ice and a sharp increase in its volume due to thermal expansion and destruction with manifestation of seismic effects.

The mechanical behavior of the ice cover under slow deformations is similar to that of the lithosphere under long-term tectonic stresses (Dobretsov et. al., 2007, 2013; Ruzhich et. al., 2009). This suggests that the patterns of icequake preparation are also fitting with the preparation of earthquakes.

The authors carried out instrumental deformation and seismic monitoring of the ice cover of Lake Baikal in order to identify the patterns of icequake preparation and to verify those using tectonic earthquakes as an example.



**Fig. 1.** Location of Lake Baikal (a), test site location on the ice cover (b, c) and the layout of equipment thereon (d).

1 – permanent cracks; 2 – strain sensor; 3 – seismic station; 4 – directions of movement of the ice cover; 5 – epicenter of the Kudara earthquake.

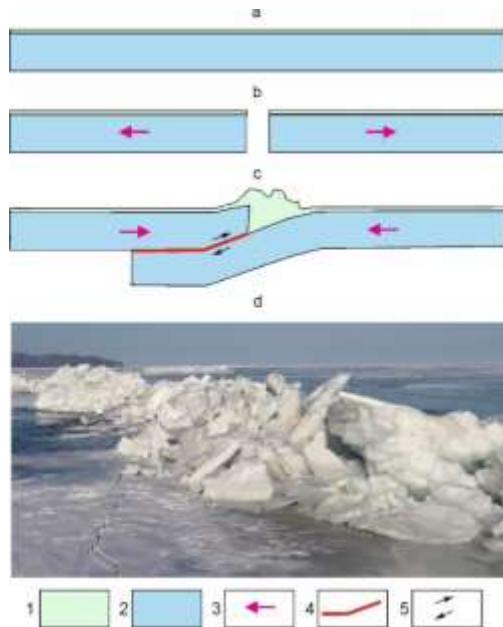
**Рис. 1.** Расположение озера Байкал (a), расположение испытательного полигона на ледяном покрове (b, c) и расположение оборудования на нём (d).

1 – постоянные трещины; 2 – датчик деформации; 3 – сейсмическая станция; 4 – направления движения ледяного покрова; 5 – эпицентр землетрясения в Кударе.

### Object of monitoring

In winter, the ice cover of Lake Baikal undergoes the formation of multi-kilometer permanent cracks which have opening-closing behavior with variations in negative air temperatures (Fig. 2 a, b). In spring, mainly in the first half of March, the daytime air temperature can rise to

positive values. This is accompanied by a significant increase in the volume of the ice cover due to its thermal expansion and an increase in tangential compression stresses therein. Under the influence of these stresses, the contact between the ice plates in the permanent crack becomes broken, and one of the plates is pushed under the other (Fig. 2 b, d).



**Fig. 2.** A schematic representation of the formation of permanent shear fracture (b) in the ice cover (a) and its subsequent transformation into an underthrust during thermal expansion of ice (c). (d) a photograph of the underthrust zone formed in the ice cover of Lake Baikal. 1 – snow; 2 – ice; 3 – direction of movement of the ice plates; 4 – a periodic activation of the contact between the ice plates; 5 – direction of relative movement of the ice plates when there occurs an activation of contact therebetween.

**Рис. 2.** Схематическое изображение образования постоянного сдвигового раскола (b) в ледяном покрове (a) и его последующего превращения в подтолчок при тепловом расширении льда (c). (d) фотография зоны подтолчка, образовавшейся в ледяном покрове озера Байкал. 1 – снег; 2 – лёд; 3 – направление движения ледяных плит; 4 – периодическая активация контакта между ледяными плитами; 5 – направление относительного движения ледяных плит при активации контакта между ними.

Underthrusting and the subsequent activation of periodically freezing contact between the ice plates by the "stick-slip" mechanism are accompanied by icequakes, what can be seen in the «video-ice». The preparation of icequakes, which takes place at small time intervals of a few hours, makes them a unique object for instrumental observations. The observed similarity between the mechanical deformation behavior of the ice cover and that of the lithosphere can provide useful information for the development of methods for moderate- and short-term prediction of tectonic earthquakes (Dobretsov et al., 2007, 2013; Ruzhich et al., 2009).

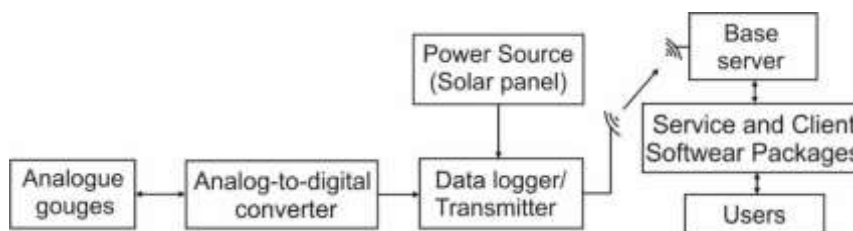
The object of monitoring was one of the permanent cracks, located 4 km from the shore in the southern Lake Baikal (coordinates  $52^{\circ}31'06.27''$ ;  $106^{\circ}13'06.72''$ ) (Fig. 1).

## 2. Experimental setups and processing methods

There were two types of instrumental monitoring of the ice cover performed near the underthrust: deformation and seismic.

### 2.1. Equipment for deformation monitoring

Deformation measurement was carried out using an instrumental complex (IC) (Bornyakov and Salko, 2016). The IC includes a data collection-transmission unit (DCTD), analog-to-digital converters (ADC), analog sensors, an autonomous power supply system (APSS), a remote base server, and client-server control software packages (Fig. 3). The IC is designed to receive deformation signals, take their accurate time-related measurements, compile a flash-memory dataset, and transfer the datasets to the remote base server via the on-line mobile communication system.

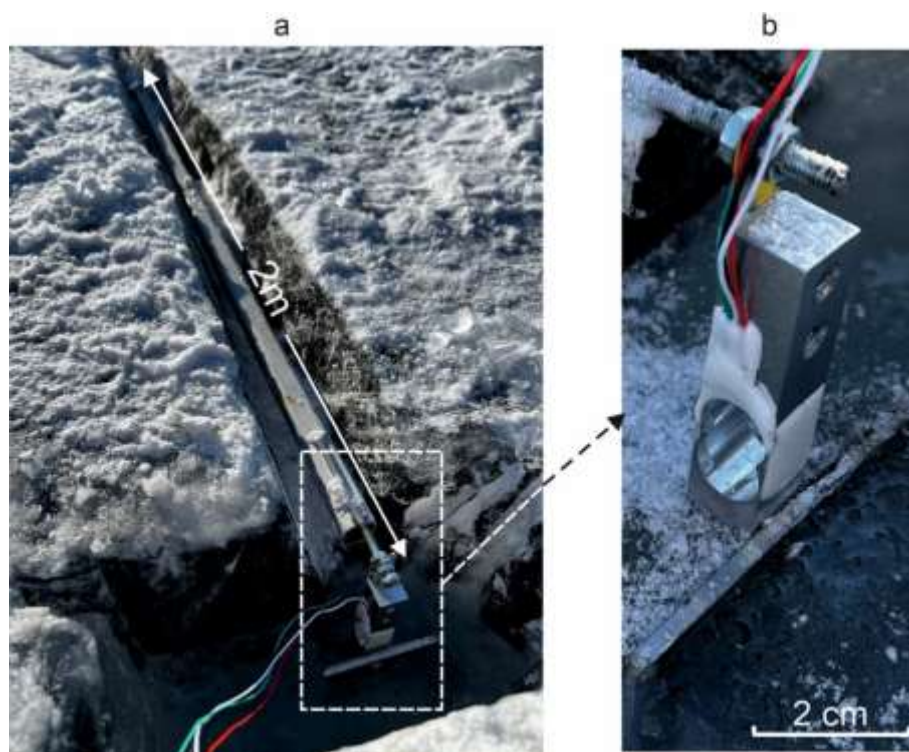


**Fig. 3.** A block diagram of the instrumental complex designed for deformation monitoring.

**Рис. 3.** Блок-схема инструментального комплекса, предназначенная для мониторинга деформаций.

The measuring element of the IC is a rod sensor with a base of 2 m. There were used six monitoring sensors. The sensors were installed 50 m apart from each other perpendicular to the

direction of the permanent crack strike at a distance of 15 m therefrom (Fig. 4). The sensor was polled with a discreteness of 4 Hz.



**Fig. 4.** A rod sensor frozen in the ice cover of Lake Baikal (a) and its enlarged fragment (b).

**Рис. 4.** Стержневой датчик, замороженный в ледяном покрове озера Байкал (a) и его увеличенный фрагмент (b).

## 2.2. Equipment for seismic monitoring

Seismic vibrations of the ice cover were recorded by Baikal-7HR seismic stations with SK-1 sensors (<https://www.gsras.unu/uploads/files/Dataloggers/Bairal-7HR.pdf>).

## 2.3. Methods of monitoring data processing

To process deformation monitoring data, there were used the spectral analysis (SPA) method based on the Lomb-Scargla periodogram (Lomb, 1976; Scargle, 1982, 1989; Savransky, 2023) and the structural functions curvature analysis method (SFCAM) (Vstovsky, 2006; Vstovsky and Bornyakov, 2010).

## 2.4. Methods of seismic data processing

The seismic data processing was performed by methods of spectral-time analysis (STAN) and polarization analysis of 30-minute periods in microseismic motion records. The STAN

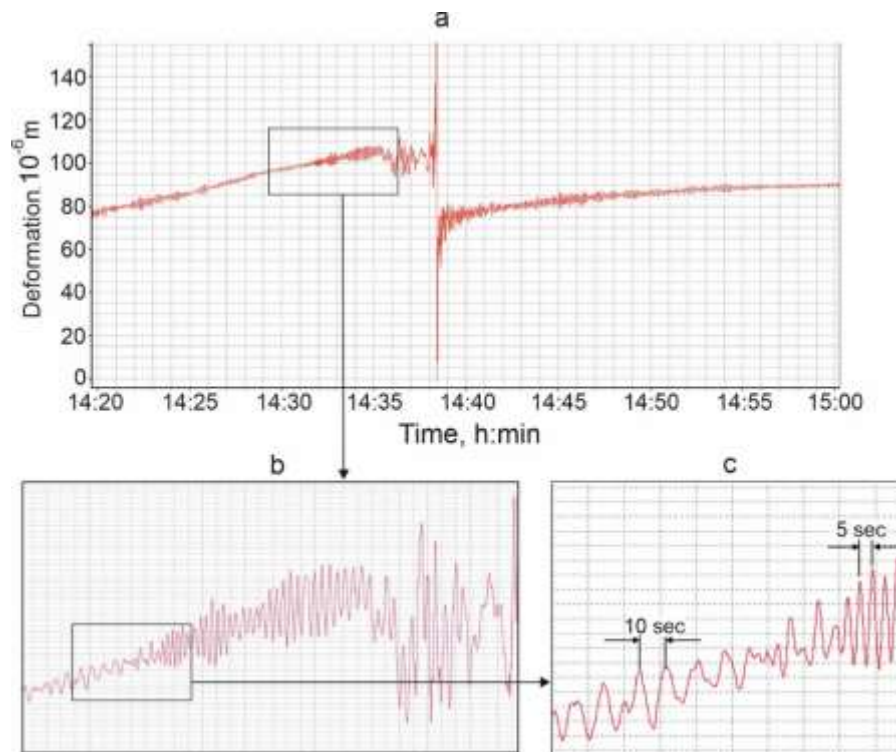
method is based on an estimate of current spectrum of the part of a signal corresponding to short-length sliding time window (the length was selected to be from 10 to 60 seconds). At such an estimate, the power spectrum of a signal occurs depending on both frequency and location (middle part or right edge) of the window. The polarization analysis, or plotting the patterns of directional motion of the particles in seismic waves, is made in two planes: north-south – east-west (NS-EW) and horizontal – vertical (H-Z). The directional patterns show the predominant direction of particle motion in a medium and ones are also used to determine the type of a seismic wave.

## Results

The main result of deformation monitoring was the detection of the autowave nature of ice deformations occurring before icequake (Fig. 5

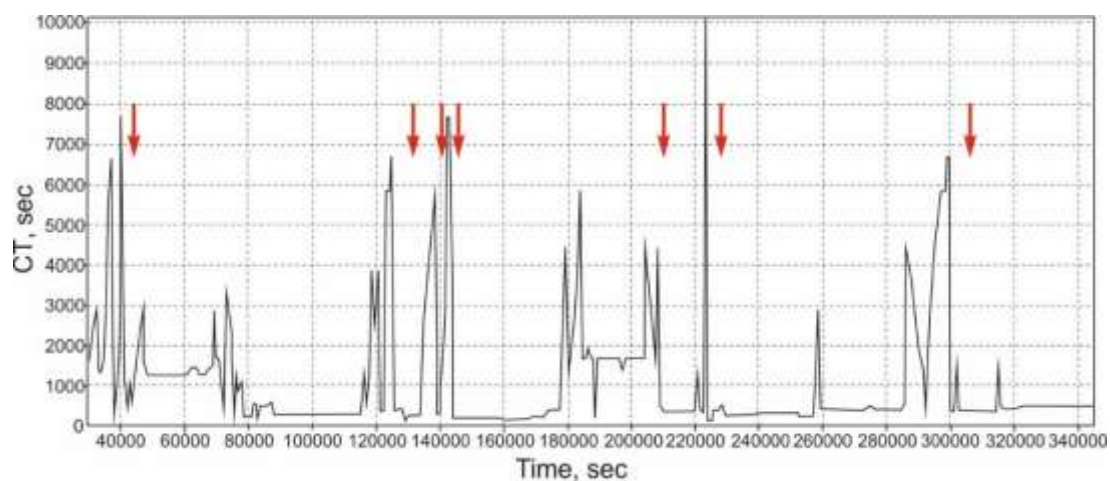
a). Beginning some minutes or a few tens of minutes before the impact, this process develops with an increase in the amplitude of oscillations, often with a multiple reduction in their period (Fig. 5 b, c). Immediately before an icequake, such an orderly nature of oscillations changes to chaotic, with an increase in their amplitude and period. The periods of self-oscillations are 0.1-0.2 Hz.

Figure 6 and Figure 7 show the results of processing the deformation monitoring data by SFCAM and SPA methods, respectively. In the first case, the processing involved the data for March 8, 9, 10 and 11, when there occurred several strong icequakes (Fig. 6). In the second case, there was performed a processing of the data for March 7, with one strong icequake (Fig. 7).



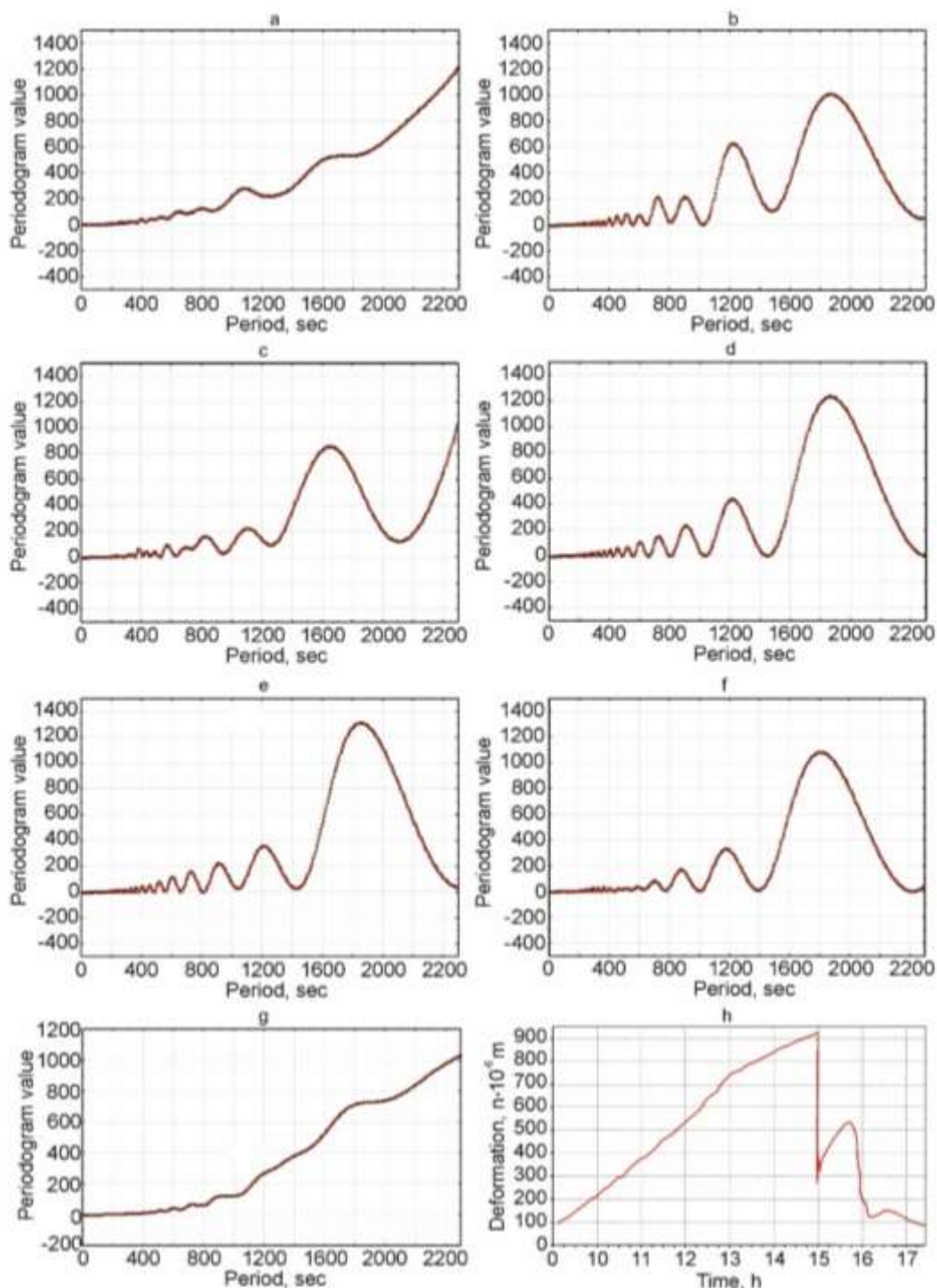
**Fig. 5.** An example of the autowave nature of ice deformations that occur before an ice strike (a) and its details (b, c).

**Рис. 5.** Пример автоволновой природы деформаций льда, происходящих перед ударом о лёд (a), и его детали (b, c).



**Fig. 6.** A graph of variations of the correlation time parameter on March 8, 9, 10 and 11. The arrows mark the moments of occurrence of the most powerful icequakes.

**Рис. 6.** График вариаций параметра корреляционного времени на 8, 9, 10 и 11 марта. Стрелки отмечают моменты самых мощных ледяных землетрясения.



**Fig. 7.** Spectrograms of ice deformation time series from 09. 00 to 16.00 March 7, 2021 for hourly intervals: 09.00-10.00 (a); 10.00-11.00 (b); 11.00-12.00 (c); 12.00-13.00 (d); 13.00-14.00 (e); 14.00-15.00 (f); 15.00-16.00 (g). h – graphical representation of the initial data.

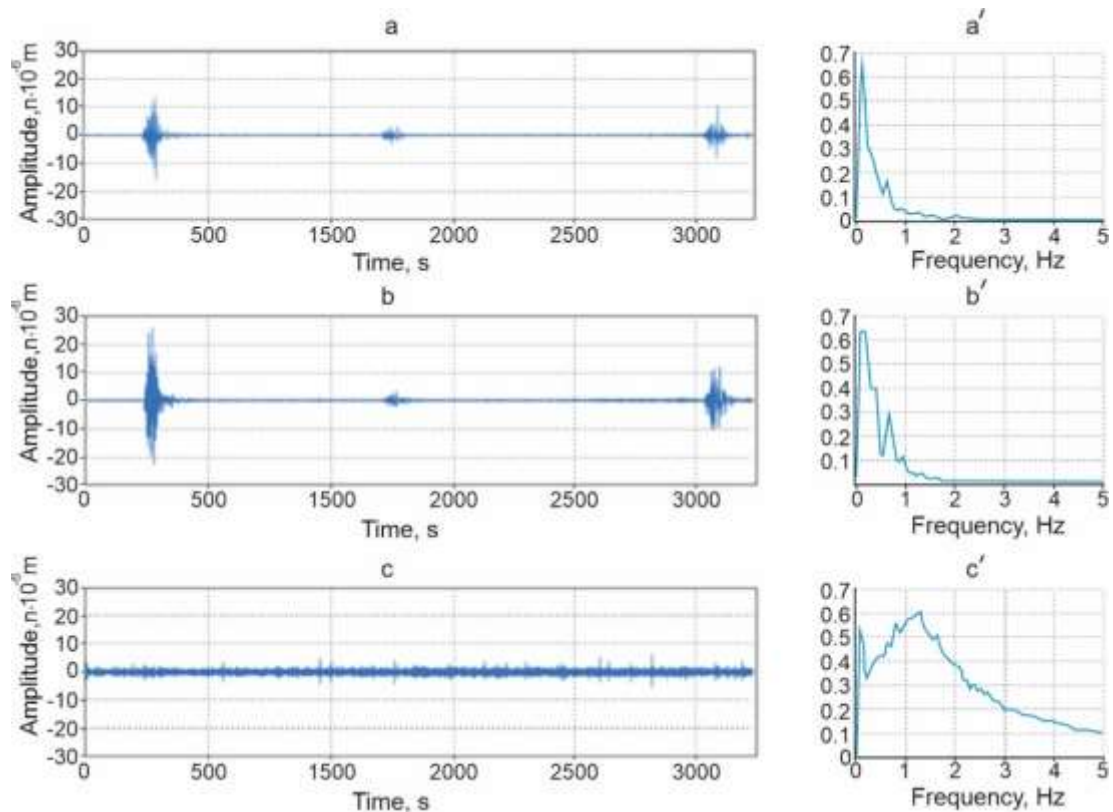
**Рис. 7.** Спектрограммы временных рядов деформации льда с 09.00 до 16.00 7 марта 2021 года для часовых интервалов: 09.00–10.00 (a); 10.00–11.00 (b); 11.00–12.00 (c); 12.00–13.00 (d); 13.00–14.00 (e); 14.00–15.00 (f); 15.00–16.00 (g). h – графическое представление начальных данных.

The results of seismic monitoring of the ice cover showed that variations in the level of fluctuations of the ice cover depend on the temperature of ice, which determines the level of stresses therein. Root-mean-square amplitudes of micro-seismic background at low air temperatures in the morning hours are an order of magnitude lower than those recorded in the day time when the temperature rises by 5–10 degrees.

In the morning hours, self-oscillations occur only in the horizontal plane with a period of 20–30 minutes, a frequency of approximately 0.1

Hz, and a pulse duration of 60÷150 seconds (Fig. 8). Unlike the horizontal component, the vertical does not show any pronounced self-oscillations and has a wide frequency range (0÷8 Hz.), though there is a weakly pronounced peak at a frequency of 0.1 Hz.

In the daytime, self-oscillations are well-pronounced in all three directions (Fig. 9 a). The spectral peaks, corresponding to the fundamental frequency of 0.1 Hz, are better pronounced (Fig. 9 b). In this case, the period of occurrence of self-oscillations is reduced to 5–15 minutes.



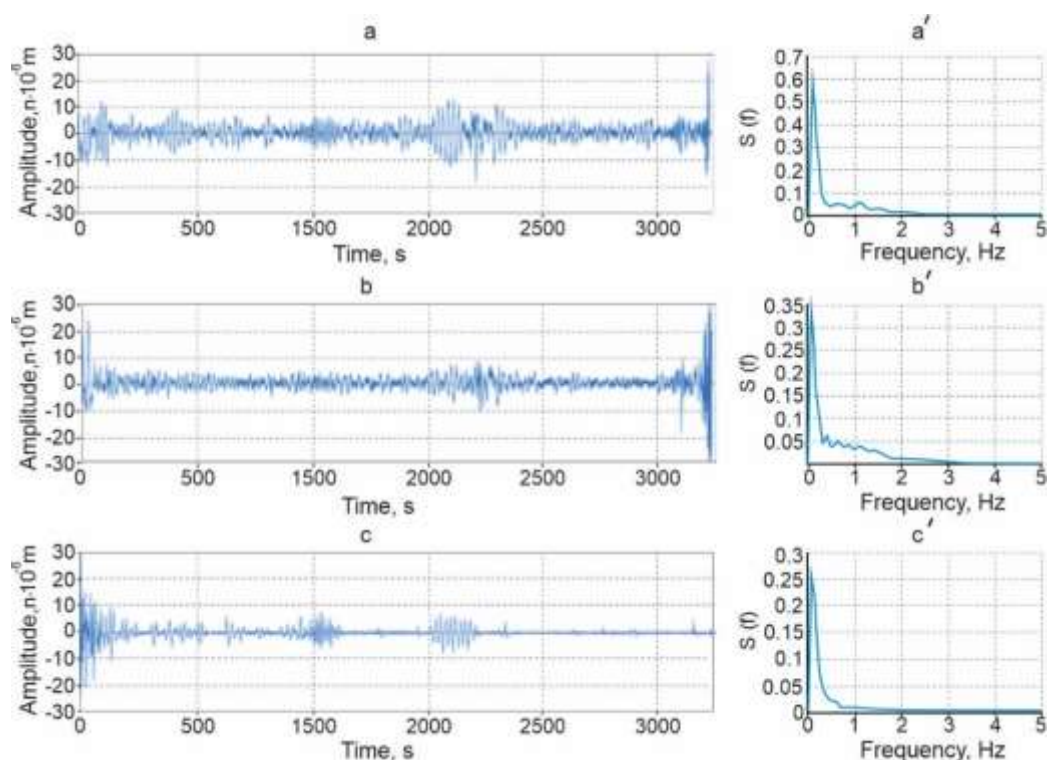
**Fig. 8.** An example of self-oscillations and their spectra in the morning time.

**Рис. 8.** Пример самоколебаний и их спектров утром.

Figure 9 shows an example of typical fluctuations of the ice cover and their daytime spectra before icequakes.

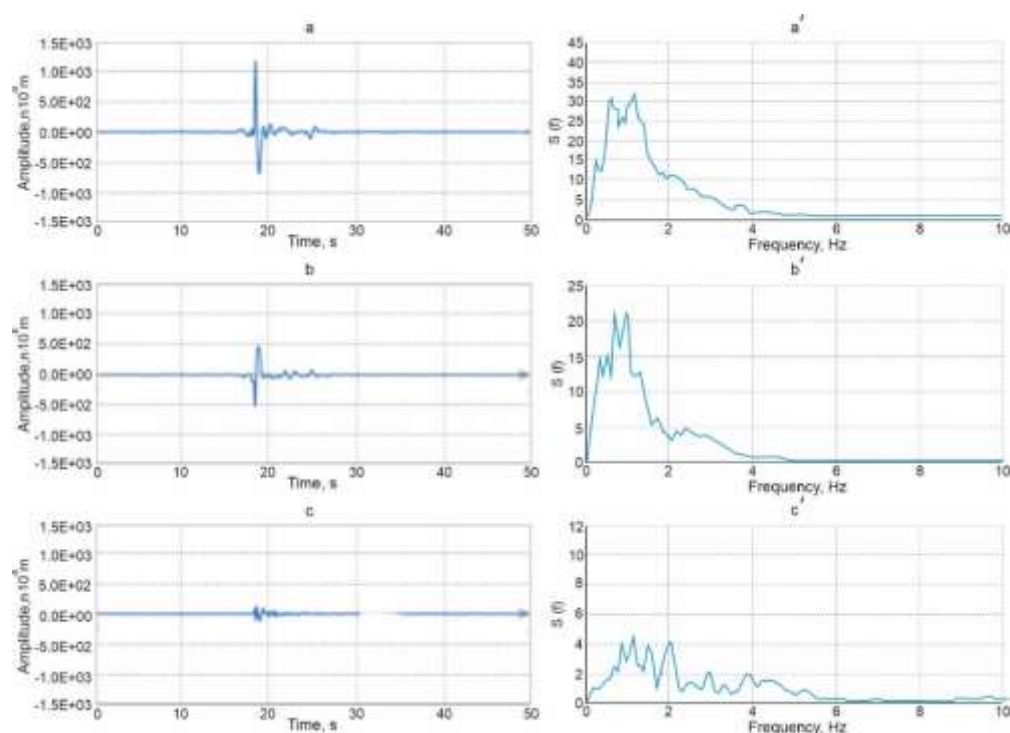
The graphs show well-pronounced self-oscillations occurring in all three directions (N-S, W-E, Z) with a frequency of 0.1 Hz.

At the moment of icequakes, the discharge of stresses in the ice cover leads to the occurrence of several large-amplitude oscillations with frequencies of 0.6÷1.2 Hz. The duration of oscillations is about 10 seconds. The examples of seismograms and their corresponding spectra for a single ice impact are shown in Figure 10.



**Fig. 9.** An example of self-oscillations and their daytime spectra before icequakes. The graphs show pronounced self-oscillations in all three directions (N-S, W-E, Z) with a frequency of 0.1 Hz.

**Рис. 9.** Пример самоколебаний и их дневных спектров до ледяных толчков. Графики показывают выраженные самоколебания во всех трёх направлениях (N-S, W-E, Z) с частотой 0.1 Гц.



**Fig. 10.** An example of seismograms and their icequake-related spectra.

**Рис. 10.** Пример сейсмограмм и их спектров, связанных с ледяными землетрясениями.

## 4. Discussion

4.1. Basic concept to interpreting the icequake and earthquake preparation processes.

Studies of tectonic earthquake sources are mostly based on the concept of avalanche-unstable fracturing (AUF) (Myachkin, 1978) and the stick-slip model (Brace and Byerlee, 1966). The AUF model describes how numerous small ruptures occur and grow, then rapidly merge and form a long fault, and this process results in a seismogenic displacement along the fault. In contrast, the stick-slip model describes the process of periodic seismogenic activation of an existing fault. A similar process occurs during the icequake preparation.

In the investigations of large active continental lithospheric faults, the stick-slip mechanism is observed to occur more often than the unstable fracturing and thus given more attention in studies aimed at earthquake prediction. In the 1960–1990s, researchers performed numerous laboratory experiments using the stick-slip model to investigate and assess the recurrence of seismogenic displacements on faults. Physical phenomena preceding the displacements were recorded and analyzed in order to identify possible precursors of earthquakes. In combination with the findings from theoretical studies and field observations, the results of these experiments have significantly improved the understanding of the earthquake source physics and made it possible to propose and justify a wide range of short-term precursors (Cicerone et al., 2009), among which there was the anomalous behavior of geophysical parameters before an earthquake. However, many of these studies were based on outdated concepts and thus failed to solve the problem of earthquake prediction and forecasting. Furthermore, their results raised doubts on whether seismic forecasting was possible at all (Geller et al., 1997). Some progress has been achieved by using the concept of synergetics (Haken, 1978; Kondepudi and Prigogine, 1998), in terms of which a seismically active fault is an open nonequilibrium dynamic system; an earthquake is a self-organized criticality (SOC) (Bak and Tang, 1989); and a cooperative behavior is typical of the deformation process right before an earthquake (Crampin and Gao, 2013; Feder and

Feder, 1991; Ciliberto and Laroche, 1994; Olami et al., 1992).

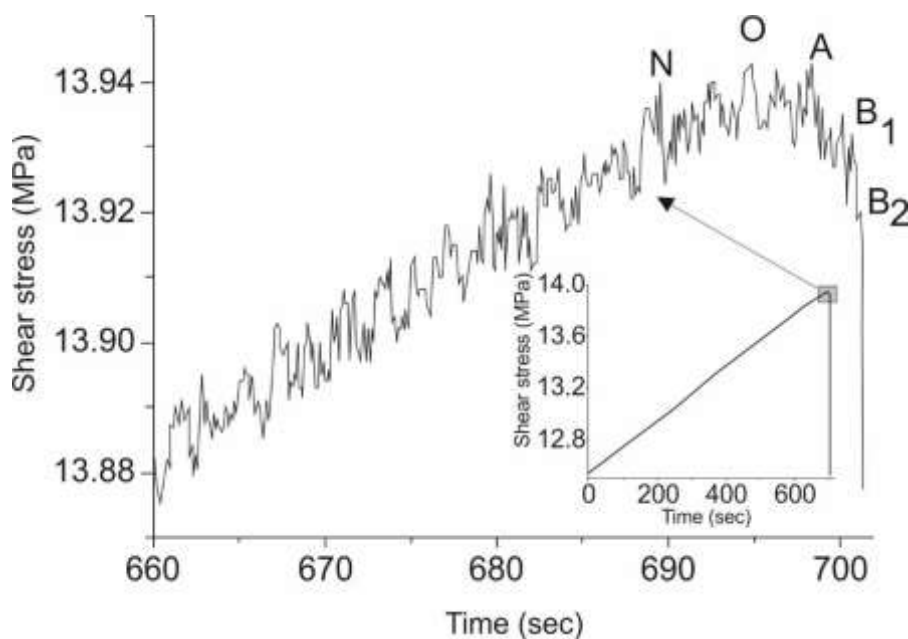
The SOC model has been confirmed in experiments using a precision servo-controlled press to simulate seismic activation of faults due to the stick-slip mechanism (Ma et al., 2012, 2014). According to their results, a loaded system of two blocks contacting along a rupture undergoes a multi-stage deformation process preceding the occurrence of a slip impulse.

These stages are marked by changes in the average shear stress over time (Fig. 1). The graph shows shear stress variations and illustrates the deformation dynamics of the entire boundary between the interacting blocks before the occurrence of the slip impulse (marked by a grey box at an interval of 660–700 sec, see the inset in Fig. 1). In segment N–O, the graph shows a deviation from linearity. At point O, the shear stress reaches its maximum value, and the system develops into the metastable state. In segment OAB<sub>2</sub>, there occurs the achievement of a meta-instable state. It includes the early (AB<sub>1</sub>) and late (AB<sub>2</sub>) meta-instability substages. After point B<sub>2</sub>, dynamic instability manifests itself as a slip impulse. In the first metastable stage, relative displacements of the blocks start and develop along with slow relaxation of the stresses accumulated at the interblock contact. This process takes place in the quasi-creep stationary mode, which is due to the occurrence of small micro-sources of destruction (i.e. small activated segments of the rupture). During the early meta-instability substage, the process of stress decrease continues slowly, and the isolated segments of the rupture continue gradually to increase. The late meta-instability substage is characterized by accelerated synergism – by deformation increase and acceleration. The synergism manifests itself immediately before the transformation of the quasi-static state into a dynamic one due to the cooperative behavior of all activated segments, which means their self-organization. It is reasonable to expect that in a natural setting, the meta-instable stage of activation of a fault can be detected by the self-organization of its segments.

Thus, the stick-slip model in its synergistic interpretation (Ma et al., 2012, 2014) demonstrates that the critical dynamic state of a fault (which is achieved at the late meta-instability substage) should be investigated in detail as a potential

earthquake precursor rather than any anomalous variations of one or another geophysical parameter of the fault. A direct and inevitable indicator of the critical dynamic state (i.e. the meta-instability substage) is self-organization of activated fault segments at the fault plane immediately before seismogenic rupturing of a certain fault. Considering natural faults, we suggest that the

self-organization process can be diagnosed by processing the time series of rock deformation signals. We have tested this research approach by spectral analysis (Scargle, 1982, 1989; Savransky, 2023; Bornyakov et al., 2017, 2022) and the structural functions curvature analysis method (SFCAM) (Vstovsky, 2006; Vstovsky and Bornyakov, 2010; Bornyakov et al., 2022).



**Fig. 11.** Shear stress vs time before the slip impulse (after (Ma et al., 2014)). Inset (right corner) – linear graph of the shear stress increase; the slip impulse is marked by a grey box.

**Рис. 11.** Сдвиговое напряжение против времени до импульса скольжения (после (Ма и др., 2014)). Вставка (правый угол) — линейный график увеличения сдвигового напряжения; Импульс скольжения отмечен серой рамкой.

#### 4.2. Autowave dynamics as an indicator of the process of self-organization of deformation process in the ice cover

The autowave dynamics of deformations of the ice cover is due to its ability for self-organization, as well as that of any other open, non-equilibrium, and structurally inhomogeneous system (Haken, 1978; Kondepudi and Prigogine, 1998). The modeling results known so far (Sobolev and Ponomarev, 2003) and the results of instrumental observations of deglaciation in mountainous areas (Pralong, 2006), demonstrating the autowave dynamics of deformations of such structurally inhomogeneous systems, subjected to stresses close to the ultimate strength, allow us to consider a similar phenomenon we have recorded to be natural, unrelated to the peculiarities

of the deformation of the lake ice cover but linked to the ability of these systems for self-organization in such a critical state (Haken, 1978; Kondepudi and Prigogine, 1998).

The self-organization of the deformation process in the ice cover is confirmed by the results of processing time series of deformations by SFCAM and SPA methods (Fig. 6, 7). As noted above, both methods allow these deformation series to yield the time intervals of their-correlated behavior of the parameter under analysis, that is, the intervals in which there occurred self-organization of the deformation process.

In the first case, such intervals correspond to a sharp increase in the parameter of "correlation time" (CT) (Fig. 6). As can be seen from the graph, most of the strongest icequakes are preceded by the manifestation of self-organization

of the deformation process, coinciding with the time of occurrence of self-oscillations.

In the case of spectral analysis, the time intervals of self-organization occurrence correspond to an ordered form of a spectrogram reflecting the correlated nature of oscillations of different periods in the deformation process (Fig. 7 d, e, f). Beyond these intervals, spectrograms are chaotic in nature (Fig. 7 a, b, c).

The results of deformation and seismic monitoring of the ice cover of Lake Baikal as a whole show that the peculiarities of icequake preparation correspond to the above-described "stick-slip" model in its synergistic interpretation. An important and inevitable element of this preparation is self-organization of the deformation process at the meta-unstable stage. Thus, self-organization of the deformation process can be considered as its inevitable precursor.

#### *4.3. Similarity of deformation processes before icequakes and earthquakes*

The revealed features of the occurrence of deformations and microseismic vibrations of ice before ice strikes are compared with the previously identified features of the occurrence of rock deformations before the last three strong earthquakes in the southern Baikal region (Borinyakov et al., 2022). The comparison was based on the results of spectral analysis of deformation and seismic monitoring data obtained from the geodynamic test site "Talaya" before the Kultuk (27.08.2008,  $M = 6.3$ ) and Bystrinsky (21.09.2020  $M = 5.4$ ) earthquakes and from the geodynamic test site "Buguldeika" before the Kudara earthquake (09.12.2020,  $M_w = 5.5$ ) (Fig. 1).

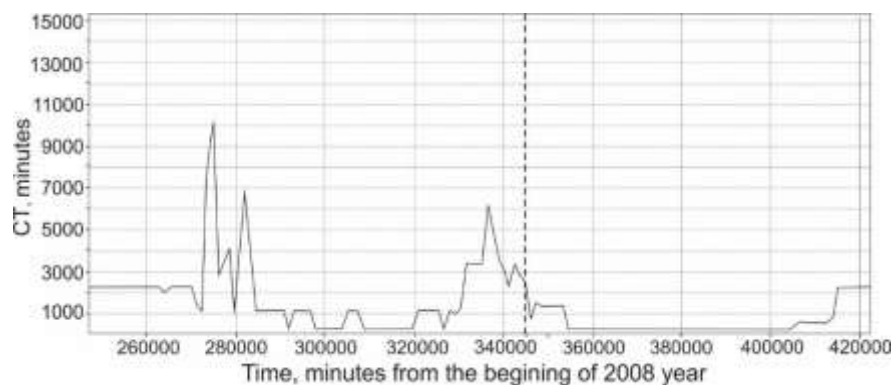
##### **4.3.1. The $M_w$ 6.3 Kultuk earthquake of August 27, 2008**

The rock deformation monitoring data from the Talaya test site for the year of 2008 were processed to characterize the  $M_w$  6.3 Kultuk earthquake that occurred on August 27, 2008 at the southwestern termination of Lake Baikal. The data were processed by SFCAM and SPA methods. The result of data processing by these methods is shown in Figure 12. As noted above, a

sharp increase in the ST parameter indicates the development of self-organization in the analyzed deformation process. As shown in the figure, sharp CT changes are observed approximately 65000–70000 minutes (45–50 days) before the Kultuk earthquake. The range of these changes is wide, from 1000 to 10000 minutes (Fig. 12). Two peak CT values in time interval 273000–285000 minutes (i.e. within 8 days) indicate two episodes of the appearance and failure of temporary interrelations in the deformation process, which most probably resulted from a significant re-arrangement of stress fields in the fault-block structure of the lithosphere, specifically in the focal area, which caused the earthquake. In this case, we can say that a mid-term (45–50 days) precursor of the Kultuk earthquake has been reliably detected from the rock deformation monitoring data.

Approximately one month (40000–45000 minutes) before the earthquake, the focal area is in the metastable state,  $CT = 100$ –200 minutes. A sharp CT increase is observed ten days (14700 minutes) before the earthquake. The CT value is further increased and reaches 6200 minutes six days (336000 minutes) before the earthquake (Fig. 12). This time point can be interpreted as the beginning of the early meta-instability substage, when previously close interrelation in the deformation process begins to fail. This failure develops up to the time point of 340500 minutes. The beginning of a short-term recovery of the interrelation (three days before the earthquake) is the beginning of the late meta-instability substage.

Thus, the above SFCAM results show that CT variations reflect the features of the deformation process that develops in the fault-block medium, wherein a source of an imminent earthquake is developing. In particular, an anomalous growth of CT values is an indicator of the development of temporary interrelations in the time series of the deformation data, which result from the self-organization of the deformation process. In case of the Kultuk earthquake, the self-organization took place twice – a month and a few days before the seismic event. These two episodes of self-organization were, respectively, mid- and short-term earthquake precursors.



**Fig. 12.** Correlation time (CT) variations according to the data of sensor 3 (Talaya point). The time coordinate is given in minutes from the beginning of the year. The earthquake beginning (344732 minutes from the start of the year) is marked by a dashed line.

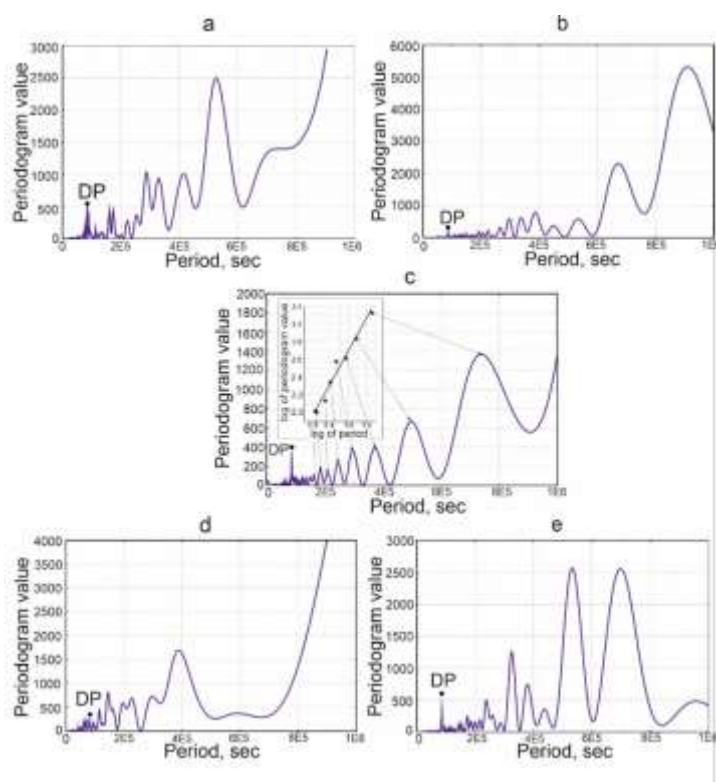
**Рис. 12.** Изменения корреляционного времени (СТ) в зависимости от данных датчика 3 (точка Талайя). Временная координата указывается в минутах с начала года. Начало землетрясения (344732 минут с начала года) отмечено пунктирной линией.

For a spectral analysis, the rock deformation monitoring data collected from June 10 to October 09, 2008 were grouped into five datasets: June 10 – July 09 (A), July 10 – August 09 (B), August 10 – August 26 (pre-seismogenic time) (C), August 28 – September 09 (D), and September 10 – October 09, 2008 (E) (Fig. 13). It should be noted here that signals recorded on August 27, 2008 (earthquake date) were excluded from the analysis. Spectrograms clearly show that both

the structure and the intensity of the oscillations change with time, especially in the range from E5 to 8E5 (Fig. 13), as follows:

June 10 – July 09 (Fig. 13 a): Six main periods of oscillations; the oscillation pattern is chaotic.

July 10 – August 09 (Fig. 13 b): Nine main periods; periodogram parameter 24hP begins to decrease; the oscillation pattern has an element of order.



**Fig. 13** Spectral analysis results for the five rock deformation datasets: (a) June 10 – July 09; (b) July 10 – August 09; (c) August 10 – August 26; (d) August 28 – September 09; (e) September 10 – October 09, 2008. DP – periodogram parameter (24-hours period).

**Рис. 13** Результаты спектрального анализа для пяти наборов данных по деформации горных пород: (а) 10 июня – 9 июля; (б) 10 июля – 9 августа; (в) с 10 по 26 августа; (д) 28 августа – 9 сентября; (е) 10 сентября – 9 октября 2008 года. DP – параметр периодограммы (24-часовой период).

August 10 – August 26 (Fig. 13 c): Pre-seismic state; parameter 24hP continues to decrease; the oscillation pattern is of a high degree of order, as shown by its fractal structure (see the inset). This means that the rock deformation data in this time series are in a close temporary interrelation, and the oscillations are time-coordinated and intensity-adjusted. Here, we reveal a consequence of the self-organization of the deformation process before the earthquake, which is supported by the above-described SFCAM results (Fig. 12).

August 28 – September 09 (Fig. 13 d): After the earthquake, there are significant changes in the rock deformation mode – the deformation process is very chaotic; parameter 24hP is increased; short- and mid-period (0–4E5 sec) oscillations are dominant, and any long-period (4E5 to 1E5 sec) oscillations are lacking (or poorly pronounced).

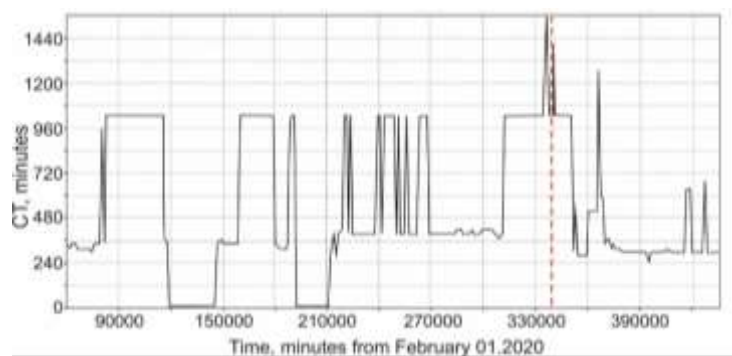
September 10 – October 09 (Fig. 13 e): the deformation process tends to return to the original mode – this spectrogram is qualitatively similar to that for June 10 – July 09 (Fig. 13 a).

The analysis of the spectrograms with the focus on parameter 24hP reveals a specific pattern of its changes. In the spectrogram for June 10 – July 09, it is at the level of 600 minutes (Fig. 13 a). During two time intervals before the earthquake, it decreases to 350–400 minutes (Fig. 13 b, c). It remains at the same level for two weeks after the earthquake (Fig. 13 d), and then increases again (Fig. 13 e).

#### 4.3.2. The Mw 5.4 Bystrinskoe earthquake of September 31, 2020

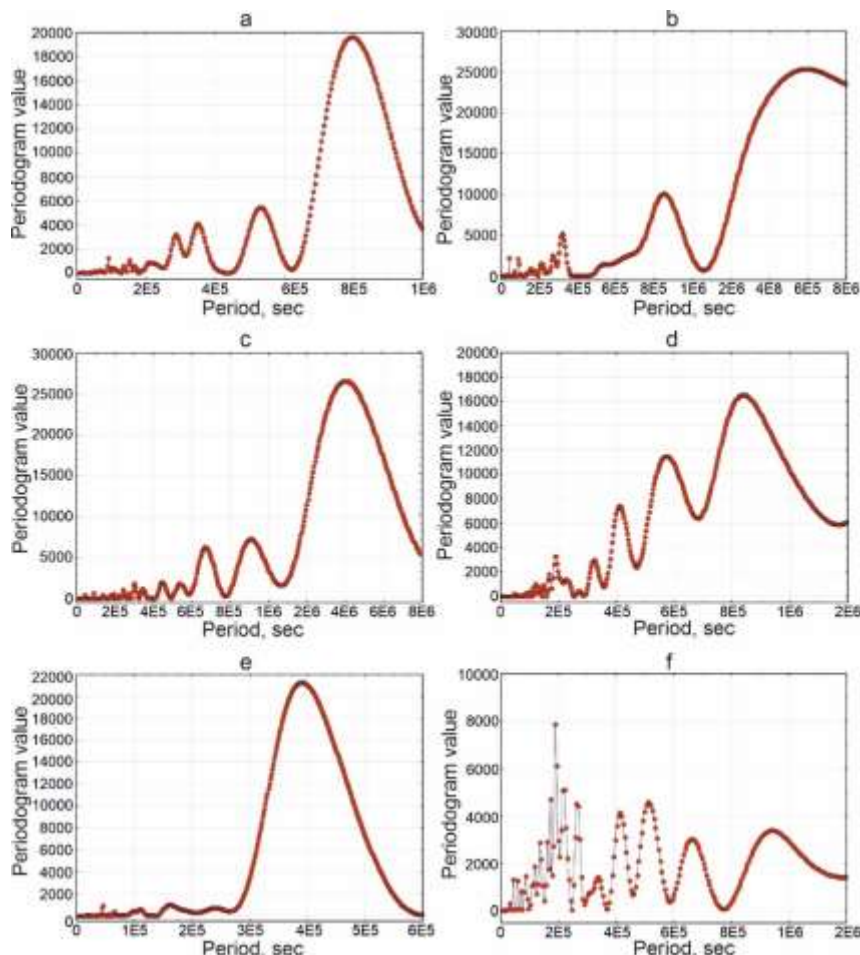
The deformation monitoring data obtained in Talaya point are in the time interval from 01.02.2020 to 30.10.2020. The results of this data processing by the SFCAM method are shown in Figure 14. The graph shows that the process of deformation self-organization took place within 18 days before the Bystrinsky earthquake ( $T = 5200h$ ). During the final stage of its preparation, which began at  $T = 5558h$ , such self-organization was faster-moving in nature, most intensively manifested three days before it (Fig. 14).

The time series dataset (period from June 01 to October 30) was divided into intervals: June 1-30 – July 1-31, July 1-10 – August 1-31, September 1-20 – September 22-30 – October 1-30, with the spectral analysis performed for each sample (Fig. 15). These spectrograms show that the structure and the intensity of the oscillations vary over time, which is most clearly manifested for the periods within the range of their values from E5 to E6. On the first spectrogram in this interval, there are four main periods with the "periodogram" parameter values of more than 1000 (Fig. 15 a). In the next time interval, the number of the main periods increases to five due to the appearance of an additional period of 1.6E6. At the same time, the values of the "periodogram" parameter increase twice against the background of increasing randomization of the spectrogram (Fig. 15 b).



**Fig. 14.** A graph showing the variation of correlation time. A bold vertical dotted line marks the moment of the Bystrinsky earthquake. The time is shown in minutes of February 01, 2020.

**Рис. 14.** График, показывающий изменение времени корреляции. Жирная вертикальная пунктирная линия отмечает момент Быстринского землетрясения. Время показано в минутах на 1 февраля 2020 года.



**Fig. 15.** Spectral analysis results for the six rock deformation datasets for Talaya point: (a) 1-30 June; (b) 1-31 July; (c) 1-31 August; (d) 1-20 September; (e) 22-30 September; (f) 1-30 October 2020.

**Рис. 15.** Результаты спектрального анализа шести наборов данных по деформации пород для точки Талая: (а) 1-30 июня; (б) с 1 по 31 июля; (с) с 1 по 31 августа; (д) 1-20 сентября; (е) с 22 по 30 сентября; (ф) 1-30 октября 2020 года.

In the third interval, the number of the main periods of oscillations with the "periodogram" parameter values of more than 1000 increases to eight, and the structure of the spectrogram shows orderliness (Fig. 15 c), similar to that in Figure 7 d, e. In the subsequent, pre-seismogenic interval, this orderliness remains unchanged against the background of more than two times increase in the "periodogram" parameter (Fig. 15 d). After the earthquake, the spectrum is restructuring. In the last decade of September, only the large-period oscillation of  $4E5$  remains significant (Fig. 15 e). In the subsequent calculation period, there is a large decrease in the "periodogram" parameter, and the spectrogram has a disordered

structure with short-period oscillations of predominant importance (Fig. 15 e).

#### 4.3.3. The *Mw* 5.6 Kudara earthquake of December 10, 2020

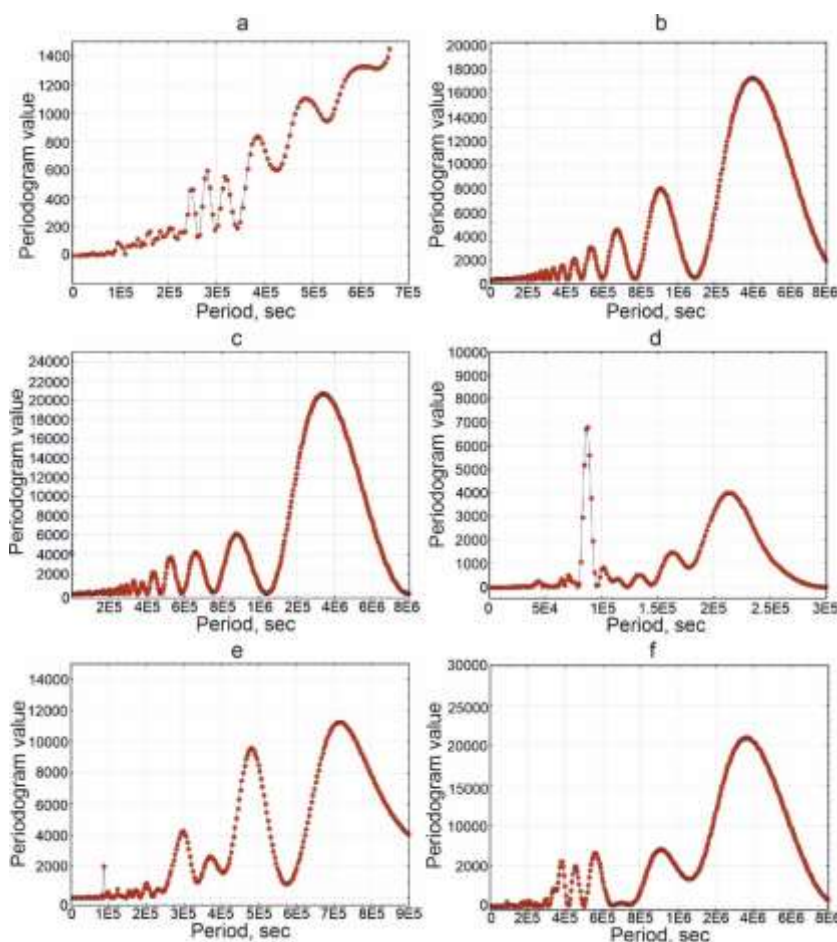
The geodynamic polygon "Buguldeika" began operating at the end of August 2020. The short time series obtained by the time of the Kudara earthquake could not be processed by the SFCAM method.

The spectral analysis was made on the data obtained from September 2020 to January 2021. The entire time series was divided into the following intervals: September 1-30 – October 1-31, November 1-30, December 1-9, December

11-31, and January 1-31 (Fig. 16). These spectrograms show that the structure and the intensity of the oscillations vary over time, especially in the periods from E5 to E6. On the first spectrogram, in the range of values  $2E5 - 7E5$ , there are only two main periods with the "periodogram" parameter values of more than 1000 (Fig. 16 a). In the next time interval, the number of the main periods increases to nine due to the manifestation of seven additional main periods of oscillations in the range of their values from  $3E5$  to  $1.6E6$ .

At the same time, the values of the "periodogram" parameter increase more than twice; the spectrogram itself acquires a generally ordered structure (Fig. 16 b). In the third interval, the structure of the spectrogram as a whole remains unchanged, with a slight decrease in the "periodogram" parameter for certain periods (Fig. 16

b). The structural orderliness, typical of the pre-seismogenic state, is absent on the next spectrogram obtained during a 10-day period preceding the earthquake. There are no periods with values greater than  $2.2E5$ , and the periods in the range of smaller values are three-four times as significant as those in the previous spectrograms (Fig. 16 b, c, d). It is noteworthy that meaningful fluctuations in this time interval are those with a daily period (Fig. 16 d). After the earthquake, the spectrum is restructuring. In the last two decades of December and in January, there is a gradual increase in the number of large-period oscillations and an increase of the "periodogram" parameter (Fig. 16 d, e). At the same time, the structure of spectrograms remains chaotic.



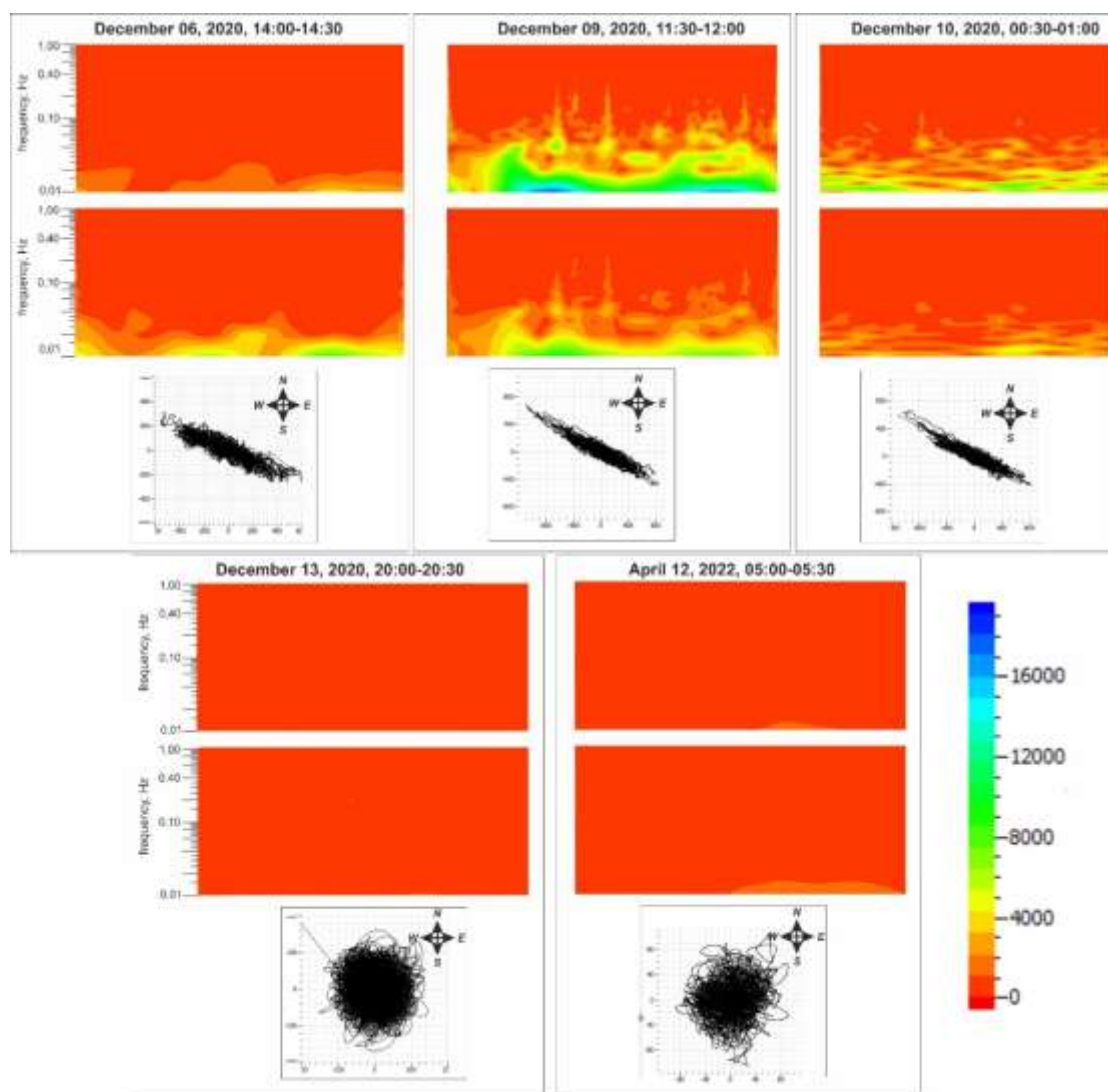
**Fig. 16.** Spectral analysis results for the six rock deformation datasets from Buguldeika point: (a) 1-30 September; (b) 1-31 October; (c) 1-30 November; (d) 1-20 September 09; (e) 22-30 September; (f) 1-30 October 2020.

**Рис. 16.** Результаты спектрального анализа шести наборов данных по деформации горных пород с точки Бугулдейка: (а) 1-30 сентября; (б) с 1 по 31 октября; (с) с 1 по 30 ноября; (д) 1-20 сентября 209 года; (е) с 22 по 30 сентября; (ф) 1-30 октября 2020 года.

#### 4.4. Similarity of seismic processes before icequakes and earthquakes

Spectral analysis of the data from seismic stations showed that before the icequake there are self-oscillations in the ice cover with a frequency of 0.1 Hz (Fig. 17). Taking into account this result, the analysis was carried out on the data recorded by the seismic station at the geodynamic test site "Buguldeika" before and after the Kudara earthquake.

The analysis of microseismic noise in the range from 0.01 to 1 Hz revealed a periodic increase in the amplitudes of oscillations in horizontal components in the frequency range of 0.01–0.1 Hz for the period of 10 to 4 days after the earthquake. 14 hours before and 9 hours after the earthquake, the amplitudes of oscillations increased to a maximum of 19.5 times relative to the quiet background (Fig. 17).



**Fig. 17.** Spectrograms and polarization diagrams of microseismic noise in the frequency range of 0.01–1 Hz recorded at the Kuyada station before and after the Kudara earthquake.

**Рис. 17.** Спектрограммы и диаграммы поляризации микросейсмического шума в диапазоне частот 0.01–1 Гц, записанные на станции Куйада до и после землетрясения Кудара.

Polarization analysis of microseismic noise revealed a clearly defined southeastward orientation of oscillations (mean azimuth – 121°),

which is in good agreement with the azimuth to the epicenter of the main shock – 124.6°. Analysis of seismograms for the previous period (from

December 1) and 10 hours after the Kudara earthquake did not reveal such effects in the field of microseismic noise.

Thus, the above results suggest that low-frequency self-oscillations recorded before the icequake also took place before the Kudara earthquake. This allows us to consider them as a stable process that precedes the dynamic displacement along the seismogenerating rupture / fault.

### **Conclusion**

The instrumental deformation and seismic monitoring of the ice cover of Lake Baikal revealed an autowave nature of occurrence of ice deformations before icequakes. Autowave dynamics of deformations of the ice cover is a consequence of its self-organization as a structurally inhomogeneous medium in a critical state. The self-organization of the deformation process is confirmed by the results of the time series dataset processing with the SFCAM and SPA methods. The analysis of the seismic monitoring data for the ice cover showed that self-oscillations are characterized by constant frequencies of 0.1 Hz, and their amplitude increases with the increase in ice cover stresses.

The results of deformation and seismic monitoring of the ice cover are compared with similar results obtained at geodynamic polygons. It is shown that the revealed features of occurrence of deformations in the ice cover before icequakes are also found in the deformations of rocks before strong earthquakes. That is, the self-organization of the deformation process takes place before each earthquake, which is reflected in the variations of the ST parameter (Fig. 6, 12, 14) and the ordered form of spectrograms (Fig. 7, 13, 15, 16), and in the occurrence of low-frequency self-oscillations with increasing amplitude (Fig. 17). The stable manifestation of self-organization of the deformation process and low-frequency self-oscillations before icequakes and earthquakes allows us to consider them as short-term precursors of an approaching seismic event.

### **Author contributions**

SAB, AAD and VAS analysed the results, prepared and revised the manuscript. ANS performed seismic monitoring and processed the results. AAD performed processing of

microseisms before the Kudara earthquake. SDV performed strain monitoring. AIM performed spectral analysis of strain monitoring data. VGV and AES processed deformation monitoring data by SFCAMAS.

### **Competing interests**

The contact author has declared that none of the authors has any competing interests.

### **Highlights**

Before icequake and earthquake there is a self-organization of the deformation process;

low-frequency autowave oscillations are a sign of self-organization of the deformation process;

Self-organization of the deformation process is an inevitable precursor of an earthquake.

### **Acknowledgements and financial support**

The work was conducted using the large-scale research facilities "South-Baikal instrumental complex for monitoring hazardous geodynamic processes" of the Center for Geodynamics and Geochronology at the Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian academy of Sciences.

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant No. 075-15-2020-787 for implementation of major scientific projects on priority areas of scientific and technological development (project «Fundamentals, methods and technologies for digital monitoring and forecasting of the environmental situation on the Baikal natural territory»).

### **References**

- Bak P, Tang C (1989) Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. *Journal of Geophysical Research* 94 (B11):15635–15637
- Borniyakov SA et al. (2017) Diagnostics of metastable state of seismically active fault. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (4):989–998. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0328.
- Borniyakov SA et al. (2022) New approach to strong earthquake prediction in the south Baikal region on the basis of rock deformation monitoring data: methodology and results. *Geodynamics &*

Tectonophysics 13 (2), 0588. doi:10.5800/GT-2022-13-2-0588

Bornyakov SA, Salko DV (2016) Instrumental deformation monitoring system and its trial in open-pit diamond mine. *J of Mining Science* 52(2):388-393.

Борняков С.А., Салко Д.В. Новая инструментальная система для мониторинга деформаций горных пород и опыт её использования для оценки динамического состояния борта кимберлитового карьера // ФТПРПИ, 2016. №2. С. 172-178.

Brace WF, Byerlee JD (1966) Stick-slip as a mechanism for earthquake. *Science* 153: 990-992.

Budd WF, Jacka TH (1989) A review of ice rheology for ice sheet modelling. *Cold Regions Science and Technology* 16:107-144.

Cicerone RD, Ebel JT, James Britton J (2009) A systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics* 476:371-396

Ciliberto S, Laroche C (1994) Experimental evidence of self-organization in the stick-slip dynamics of two rough elastic surface. *J. Phys. I France* 4:223-235. <https://doi.org/10.1051/jp1:1994134>

Crampin S, Gao Y (2013) The new geophysics. *Terra Nova* 25 (3):173-180. doi: 10.1111/ter.12030

Dobretsov NL et al. (2007) Ice cover of lake Baikal as a model for studying tectonic processes in the Earth's crust. *Doklady Earth Science* 413 (2):155-159.

Добрецов Н.Л., Псахье С.Г., Ружич В.В., Попов В.Л., Шилько Е.В., Гранин Н.Г., Тимофеев В.Ю., Астафуров С.В., Димаки А.В., Старчевич Я. Ледовый покров озера Байкал как модельная среда для изучения тектонических процессов в земной коре // Доклады РАН. 2007. Т. 412, № 5. С. 656-660.

Dobretsov NL et al. (2013) Advance in earthquake prediction by physical simulation on Baikal ice cover. *Physical Mezomechanics* 16 (1):52-61.

Durham WB et al. (2010) Rheological and thermal properties of icy materials. *Space Science Reviews* 153:273-298.

Feder JS, Feder J (1991) Self-organized criticality in stick-slip process. *Physical Review Letters* 66 (20):2669-2672.

Geller RG et al. (1997) Earthquake cannot be predicted. *Science* 275:1616-1617.

Haken H (1978) *Synergetics. An introduction. Nonequilibrium phase transitions in physics, chemistry and biology*, Berlin; New York: Springer-Verlag, 355 p.

[urn:lcp:synergeticsintro0000hake:epub:ae913d9b-8018-4229-af98-327e116d163c](https://doi.org/10.1007/BF00648343)

Helmstetter A (2022) Repeating low-frequency earthquakes in Mount-Blanc massif triggered by snowfalls. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 127, e2022JF006837. <https://doi.org/10.1029/2022JF006837>

Kondepudi D, Prigogine I (1998) *Modern thermodynamics: from heat engines to dissipative structures*. John Wiley: Chichester, UK. 486 p.

Lomb NR (1976) Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysics and Space Science* 39:447-462. <https://doi.org/10.1007/BF00648343>.

Ma J, Guo Y, Sherman SI (2014) Accelerated synergism along a fault: a possible indicator for an impending major earthquake. *Geodynamics and Tectonophysics* 2:87-99.

Ma J, Sherman SI, Guo YS (2012) Identification of meta-instable stress state based on experimental study of evolution of the temperature field during stick-slip instability on a bending fault. *Science China Earth Sciences* 55:869-881.

Myachkin VN (1978) *Earthquake Preparation Processes*. Moscow: Nauka, 232 p.

Мячкин В.И. Процессы подготовки землетрясений. М.: Наука. 1978. 232 с.

Olami Z, Feder HJS, Christensen K (1992) Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automaton modeling earthquakes. *Physical Review Letters* 68(8):1244-1247.

Petrovic JJ (2003) Review mechanical properties of ice and snow. *Journal of Materials Science* 38(1):1-6. doi: 10.1023/a:1021134128038

Podolskiy EA, Walter F (2016) Cryoseismology. *Reviews of Geophysics* 54:708-758. <https://doi.org/10.1002/2016RG000526>

Pralong A (2006) Oscillations in critical shearing: applications to fractures in glaciers. *Nonlin. Processes Geophys* 13:681-683

Ruzhich VV et al. (2009) Deformations and seismic phenomena in the ice cover of Lake Baikal. *Russian Geology and Geophysics* 50(3):207-214.

Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Борняков С.А., Гранин Н.Г. Деформации и сейсмические явления в ледяном покрове озера Байкал // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 3. С. 289-299.

Savransky D. (2023). Lomb (Lomb-Scargle) Periodogram

(<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/20004-lomb-lomb-scargle-periodogram>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved November 3, 2023.

Scargle JD (1982) Studies in astronomical time series analysis. 2. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. The Astrophysical Journal 263:835–853.

Scargle JD (1989) Studies in astronomical time series analysis. 3. Fourier transforms. Autocorrelation function and cross-correlation functions of unevenly spaced data. The Astrophysical Journal 343:874–887. <https://doi.org/10.1086/167757>.

**Борняков Сергей Александрович,**

кандидат геолого-минералогических наук,  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,  
Институт земной коры СО РАН,  
ведущий научный сотрудник,  
тел.: (3952)42-63-81,  
email: bornyak@crust.irk.ru

**Bornyakov Sergey Alexandrovich,**

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,  
664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
Leading Researcher,  
tel.: (3952)42-63-81,  
email: bornyak@crust.irk.ru

**Добрынина Анна Александровна**

кандидат геолого-минералогических наук,  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,  
Институт земной коры СО РАН,  
ведущий научный сотрудник,  
тел.: (3952)42-69-00,  
email: dobrynina@crust.irk.ru

**Dobrynina Anna Alexandrovna,**

Ph. Doctor in Geology,  
664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
Leading Researcher,  
tel.: (3952)42-60-00,  
email: dobrynina@crust.irk.ru

**Чжуо Яньцунь,**

Ph. Doctor,  
КНР, 100029, Пекин, Чаоянг р-н,  
ул. Хуан Ян Ли, 1,  
Институт геологии Администрации,  
по землетрясениям Китая,  
младший научный сотрудник,  
тел.: +86(10)62009112,

**Zhuo Yancun,**

Sobolev GA, Ponomarev AV (2003) Physics of earthquakes and precursors. Moscow: Nauka, 270 pp.

Vstovsky GV (2006) Factual revelation of correlation lengths hierarchy in micro- and nanostructures by scanning probe microscopy data. Mater. Sci. 12 (3):262–270.

Vstovsky GV, Bornyakov SA (2010) First experiences of seismodeformation monitoring of Baikal rift zone (by the example of South-Baikal earthquake of August 27, 2008). Natural hazards and Earth System Sciences 10:667–672.

Ph. Doctor,

China, 100029, Beijing, Chaoyang District,  
Hua Yan Li, Yard No. 1,  
Institute of Geology, China Earthquake,  
Administration,  
Associate Researcher,  
tel.: +86(10)62009112

**Яо Лю,**

профессор,  
КНР, 100029, Пекин, Чаоянг р-н,  
ул. Хуан Ян Ли, 1,  
Институт геологии Администрации,  
по землетрясениям Китая,  
научный сотрудник,  
тел.: +86(10)62009112,  
email: guoysh@ies.ac.cn

**Yao Lu,**

Ph. Doctor,  
China, 100029, Beijing, Chaoyang District,  
Hua Yan Li, Yard No. 1,  
Institute of Geology, China Earthquake,  
Administration  
Researcher,  
tel.: +86(10)62009112,  
email: guoysh@ies.ac.cn

**Шагун Артем Николаевич,**

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,  
Институт земной коры СО РАН,  
ведущий инженер,  
тел.: (3952)42-58-23,  
email: shagun@crust.irk.ru

**Shagun Artem Nikolaevich,**

664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
Leading Engineer,  
tel.: (3952)42-58-23,  
email: shagun@crust.irk.ru

**Чжуо Яньцунь,**

Ph. Doctor,  
КНР, 100029, Пекин, Чаоянг р-н,  
ул. Хуан Ян Ли, 1,  
Институт геологии Администрации,  
по землетрясениям Китая,  
младший научный сотрудник,  
тел.: +86(10)62009112,  
email: zhuoyq@ies.ac.cn

**Zhuo Yanqun,**  
Ph. Doctor,  
China, 100029, Beijing, Chaoyang District,  
Hua Yan Li, Yard No. 1,  
Institute of Geology, China Earthquake,  
Administration,  
Associate Researcher,  
tel.: +86(10)62009112,  
email: zhuoyq@ies.ac.cn

**Саньков Владимир Анатольевич,**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,  
Институт земной коры СО РАН,  
Зав. лабораторией современной геодинамики,  
tel.: (3952)42-79-03,  
email: sankov@crust.irk.ru

**Sankov Vladimir Anatolyevich,**  
Ph. Doctor in Geology  
664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
Head of the Laboratory of Modern Geodynamics,  
tel.: (3952)42-79-03,  
email: sankov@crust.irk.ru

**Салко Денис Владимирович,**  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,  
Институт земной коры СО РАН,  
ведущий инженер,  
тел.: (3952)42-58-23,  
email: denis@salko.net

**Salko Denis Vladimirovich,**  
664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,

Leading Engineer,  
tel.: (3952)42-58-23,  
email: denis@salko.net

**Мирошниченко Андрей Иванович,**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,  
Институт земной коры СО РАН,  
старший научный сотрудник,  
тел.: (3952)36-95-62,  
email: mai@crust.irk.ru

**Miroshnichenko Andrei Ivanovich,**  
Candidate of Geological and Mineralogical,  
Sciences,  
664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
Senior Researcher,  
tel.: (3952)36-95-62,  
email: mai@crust.irk.ru

**Каримова Анастасия Алексеевна,**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,  
Институт земной коры СО РАН,  
младший научный сотрудник,  
664003, Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,  
Иркутский государственный университет,  
доцент,  
тел.: (3952)42-63-81,  
email: geowomen\_nasty@mail.ru

**Karimova Anastasia Alekseevna,**  
Candidate of Geological and Mineralogical Sci-  
ences,  
664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
Junior Researcher,  
664003, Irkutsk, Karl Marx st., 1,  
Irkutsk State University,  
Associate Professor,  
tel.: (3952)42-63-81,  
email: geowomen\_nasty@mail.ru

**Физическое моделирование сейсмогенной активизации разлома**С.А. Борняков<sup>1</sup>, И.А. Пантелеев<sup>2</sup>, А.Н. Шагун<sup>1</sup>, А.А. Каримова<sup>1,3</sup>, Д.В. Салко<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия<sup>2</sup>Институт механики сплошных сред УРО РАН, г. Пермь, Россия<sup>3</sup>Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

**Аннотация.** Выполнено физическое моделирование сейсмогенной активизации разлома по механизму “stick-slip” в упруго-пластичной модели литосферы с комплексной инструментальной регистрацией деформационного процесса в модели. Компьютерная обработка полученных с моделей фотографий методом корреляции цифровых изображений и результаты обработки данных с лазерных датчиков и акселерометров позволили установить что:

- деформации в крыльях модельного разлома реализуются в низкочастотном колебательном режиме, при постоянной скорости нагружения модели, с отличающимися частотами и амплитудами колебаний в активном и пассивном крыльях;
- рост напряжений в модели сопровождается уменьшением частоты колебаний и увеличением их амплитуды;
- импульсная активизация модельного разлома предваряется автоволновым деформационным процессом в высокочастотной области (4–14 Гц) с последующим уменьшением преобладающих частот в 2 раза и ростом амплитуды в 1.5 раза.

**Ключевые слова:** физическое моделирование, разлом, деформация, очаг землетрясения, сейсмогенная активизация, спектр колебаний.

**Physical Modeling of Seismogenic Fault Activation**S.A. Borneyakov<sup>1</sup>, I.A. Panteleev<sup>2</sup>, A.N. Shagun<sup>1</sup>, A.A. Karimova<sup>1,3</sup>, D.V. Salko<sup>1</sup><sup>1</sup>Institute of the Earth's Crust, Irkutsk, Russia<sup>2</sup>Institute of Continuum Mechanics, Perm, Russia<sup>3</sup>Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** Physical modeling of seismogenic fault activation using the stick-slip mechanism was performed in an elastic-plastic lithosphere model with comprehensive instrumental recording of the deformation process in the model. Computer processing of photographs obtained from the models using digital image correlation and the results of processing data from laser sensors and accelerometers revealed that:

- deformations in the model fault wings occur in a low-frequency oscillatory mode, at a constant model loading rate, with different oscillation frequencies and amplitudes in the active and passive wings;

---

Статья получена: 14.12.2025; исправлена: 18.12.2025; принята: 19.12.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Борняков С.А., Пантелеев И.А., Шагун А.Н., Каримова А.А., Салко Д.В. Физическое моделирование сейсмогенной активизации разлома // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 4. С. 193–202. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.193. EDN: OVMGYU

Article received: 14.12.2025; corrected: 18.12.2025; accepted: 19.12.2025.

FOR CITATION: Borneyakov S.A., Panteleev I.A., Shagun A.N., Karimova A.A., Salko D.V. Physical modeling of seismogenic fault activation // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 4. P. 193–202. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.193. EDN: OVMGYU

— an increase in stress in the model is accompanied by a decrease in oscillation frequency and an increase in their amplitude;

— pulsed activation of the model fault is preceded by an autowave deformation process in the high-frequency range (4–14 Hz), followed by a halving of the predominant frequencies and a 1.5-fold increase in amplitude.

**Keywords:** *physical modeling, fault, deformation, earthquake source, seismogenic activation, oscillation spectrum.*

## Введение

Сильные тектонические землетрясения в пределах урбанизированных территорий приводят к многочисленным человеческим жертвам и разрушениям социальной и промышленной инфраструктуры. Продолжительные исследования широкого круга специалистов разного профиля, направленные на создание способа превентивного краткосрочного прогноза сейсмических катастроф, пока не дали желаемого результата. Тем не менее, поиски путей решения этой прогнозной проблемы продолжаются и с учетом активного развития геофизических и компьютерных технологий возможность её решения, не так давно ставившаяся под сомнение (Geller et al., 1997) уже не кажется недостижимой.

В основе прогноза любого малоизученного природного процесса, в том числе и землетрясения, должна лежать его теоретическая модель, адекватно объясняющая разные явления, наблюдавшиеся перед ним и классифицируемые как их предвестники (Cicerone et al., 2009). Существуют более десяти моделей землетрясений, из которых наиболее востребованной является модель прерывистого скольжения “stick-slip”, согласно которой сейсмические события обязаны своим происхождением периодической сейсмогенной активизации разломов, составляющих внутреннюю структуру крупных сейсмических зон (Brace, Byerlee, 1965). Известны многочисленные примеры экспериментального воспроизведения этой модели в лабораторных условиях. В более ранних экспериментах в основном использовались модели из горных пород или близких к ним по механическим свойствам искусственных материалов. Позже, по мере развития производства полимерных материалов, реологический спектр

используемых моделей существенно расширился. Результаты этих многочисленных экспериментов, ставивших акцент на инструментальную регистрацию физических процессов, предшествующих импульсной активизации модельного разлома, позволили лучше понять процесс подготовки землетрясения в природе и расширить перечень предвестников, проявляющихся в предсейсмогенном его состоянии.

Из всего многообразия полученных экспериментальных работ отметим одну (Ma et al., 2012), в которой дано синергетическая трактовка деформационной эволюции межблокового контакта в критическом состоянии, созвучная с ранее предложенной П. Баком и К. Тангом моделью очага землетрясения как самоорганизованной критичности (Bak, Tang, 1989) и способствующая переходу прогнозных исследований на качественно новый уровень. Представленные в цитируемой работе результаты показали, что при придельном уровне накопленных напряжений на контакте двух блоков процесс их импульсного смещения относительно друг друга предваряется двумя стадиями деформации, — мета-стабильной и мета-нестабильной, с проявлением в рамках последней самоорганизации первичных микроочагов разрушения, накопленных на меж-блоковом контакте. Наличие кооперативных явлений на таком микроуровне перед импульсной активизацией межблокового контакта подтверждается и последними результатами математического моделирования (Zang et al., 2026).

На основе результатов физического моделирования процессов формирования зон разломов в упруговязкопластичных моделях литосферы, а также результатов мониторинга деформаций горных пород и сейсмичности на геодинамических полигонах и с учетом выше отмеченных результатов китайских

ученых, авторами предложена тектонофизическая модель очага тектонического землетрясения с вытекающим из неё краткосрочным предвестником (Борняков и др., 2024). В качестве такого предвестника выступает низкочастотный автоволновой процесс, порождаемый деформационной самоорганизацией активизированных сегментов в очаге землетрясения в его критическом предсейсмогенном состоянии. С целью подтверждения наличия такого автоволнового эффекта авторами выполнено физическое моделирование процесса сейсмогенной активизации разлома по механизму “stick-slip” в упруговязкопластичной модели.

### **Методика физического моделирования и методы обработки**

На рисунке 1 представлены схема экспериментальной установки (А) и её фото (Б). Установка состоит из двух штампов 1 и 2 с вертикальными торцевыми стенками для закладки модельного материала, перемещающихся без трения по подстилающим их роликам по направлению действующей нагрузки. Размеры штампов составляют (длина, ширина и высота) составляют 1.1 м х 0.2 м х 0.07 м и 0.8 м х 0.2 м х 0.07 м соответственно.

Заложение модельного разлома до начала эксперимента осуществлялось путем установки между активным и пассивным штампами перегородки из тонкого листового металла и ее выемки после размещения на штампах модельного материала. Для улучшения межблокового контакта после удаления перегородки проводилось поджатие пассивного блока на величину  $u_2$ , равную 10 мм (рис. 1 Б). На рисунке 2 показан общий вид экспериментальной установки до начала эксперимента. Активный штамп через пружину заданной жесткости  $k_1$  соединялся металлическим тросом с электроприводом, обеспечивающими заданную скорость перемещения троса  $u_1(t)$ . Для измерения усилия использовался тензодатчик (модель CZL 302), с диапазоном измерения 0–30 кг с погрешностью 0.01 кг, размещенный между штампом и

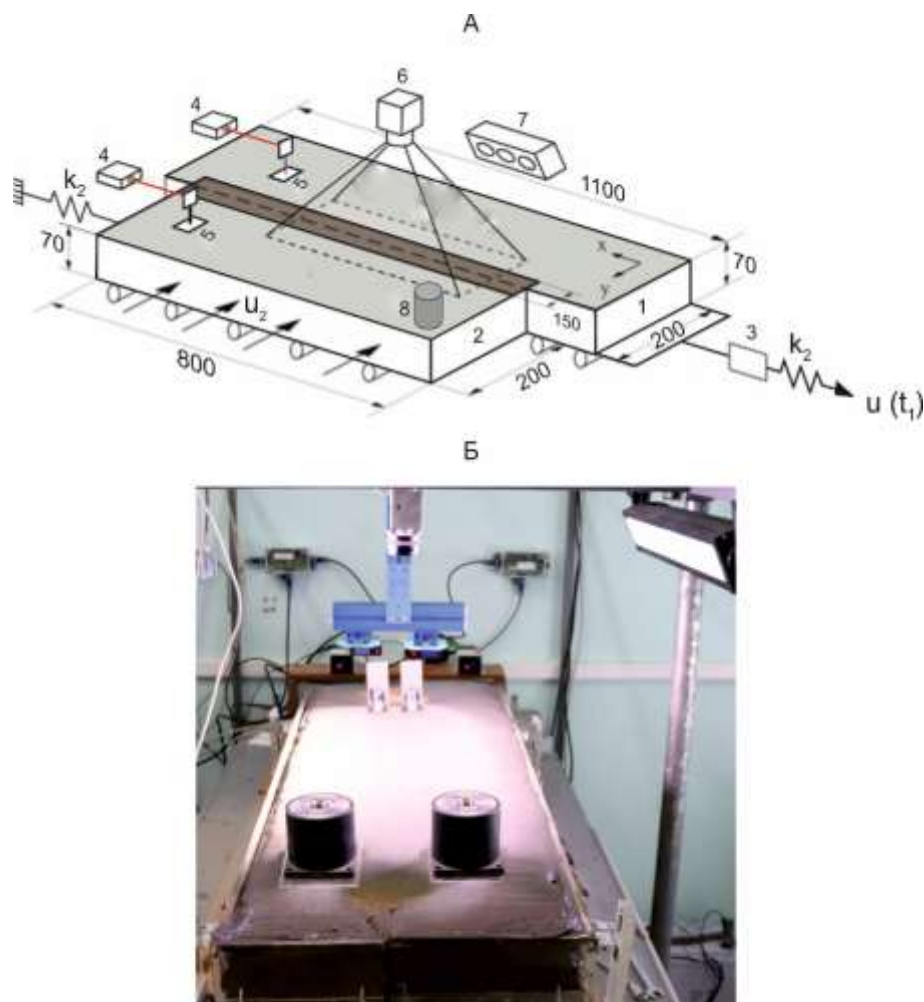
пружиной  $k_1$ . Второй штамп (пассивный) также через пружину заданной жесткости  $k_2$ , крепился к неподвижной опоре. Таким образом, заданная конфигурация креплений штампов обеспечивала возможность поступательного смещения обоих штампов по подстилающим их фторопластовым роликам модельного разлома до некоторой критической величины, определяемой жесткостью второй пружины и свойствами модельного материала, после чего происходила динамическое смещением крыльев модельного разлома.

В качестве модельного материала была использована водная паста монтмориллонитовой глины, правомерность использования которой для тектонического моделирования обоснована в (Семинский, 1986).

Выбор граничных условий эксперимента осуществлялся в соответствии с критерием подобия (Гзовский, 1975; Шерман, 1984):

$$C_\eta = C_\rho C_g C_L C_T, \quad (1)$$

где  $\eta$  – вязкость среды,  $\rho$  – плотность среды,  $g$  – ускорение свободного падения,  $L$  – линейные размеры,  $T$  – время,  $C_\eta$  – коэффициент подобия вязкости,  $C_\rho$  – коэффициент подобия плотности,  $C_g$  – коэффициент подобия ускорения свободного падения,  $C_L$  – коэффициент подобия линейных размеров,  $C_T$  – коэффициент подобия времени. Коэффициенты подобия представляют собой отношения параметров модели и натурального объекта. В данном исследовании коэффициенты подобия составляли: для вязкости –  $C_\eta \sim 10^{15}$ , для плотности –  $C_\rho \sim 1.8$ , для ускорения свободного падения  $C_g \sim 1$ , для линейных размеров –  $C_L \sim 10^5$  и для времени  $C_T \sim 5 \cdot 10^9$ . При таких значениях коэффициентов подобия 1 миллиметр в модели соответствует 100 метрам в ее природном аналоге, а 1 секунда эксперимента эквивалента 16–17 годам природного процесса. Заметим, что эти условия подобия пригодны для тектонической составляющей моделируемого процесса, но не применимы для интерпретации его динамической составляющей.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки для моделирования процесса периодической импульсной активизации межблокового контакта в упруговязкопластической модели (А) и фото модели до начала эксперимента (Б). 1 – активный блок, 2 – пассивный блок, 3 – динамометр, 4 – лазерные дальнометры, 5 – отражатели, 6 – цифровая камера, 7 – светодиодная лампа, 8 – акселерометр,  $K_2$  – пружины.

**Fig. 1.** Schematic diagram of the experimental setup for simulating the process of periodic pulsed activation of interblock contact in the elastic-viscoplastic model (A) and a photo of the model before the experiment (Б). 1 – active block, 2 – passive block, 3 – dynamometer, 4 – laser rangefinders, 5 – reflectors, 6 – digital camera, 7 – LED lamp, 8 – accelerometer,  $K_2$  – springs.

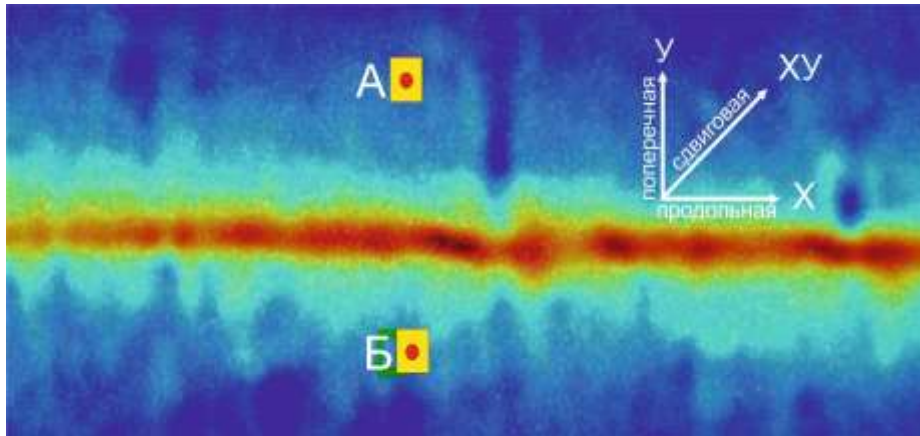
Для мониторинга процесса подготовки и реализации подвижки по модельному разлому были использованы три метода инструментальной регистрации. Для оценки интегрального смещения каждого штампа использованы лазерные дальнометры Dimetics DPE-10 (рис. 1 А, 4). Фотофиксация свободной поверхности модели в процессе ее деформирования осуществлялась цифровой камерой Basler acA2440-75uc с объективом SV-2514H, имеющая максимальную частоту съемки 70 Гц и разрешение 5 Мпикс (рис. 1

А, 6). Съемка выполнялась со скоростью 30 кадров в секунду. Для получения высококонтрастного изображения свободной поверхности модельной среды на ее свободную поверхность насыпался тонкий слой речного песка мелкой фракции, который непрерывно освещался светодиодной лампой (рис. 1 А, 7).

Анализ локальных полей перемещений на свободной поверхности модельной среды в процессе ее деформирования проводился методом корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation - DIC) (Chao, Sutton,

1988; Choi, Shah, 1997; Lyons et al., 1996). Этот метод позволяет с высокой точностью восстанавливать эволюцию перемещений и деформаций на поверхности образцов из различных материалов при различных видах нагружения. Математический аппарат метода DIC изложен, например, в (Sutton et al., 2009).

Предварительная обработка и последующий анализ оптических изображений осуществлялись в специализированном программном обеспечении StrainMaster LaVision. На рисунке 2 показано распределение интегральной деформации сдвига в модели, рассчитанной по двум разнесенным по времени фотографиям.



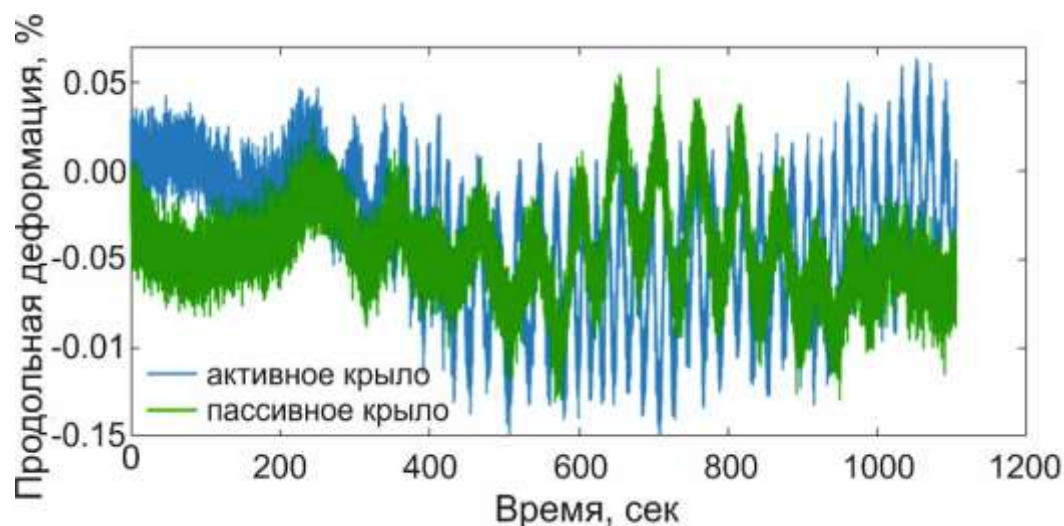
**Рис. 2.** Распределение интегральной деформации сдвига (XY) в модели при активизации модельного разлома. Красные точки в белых квадратах – реперные точки в активном (точка А) и пассивном (точка Б) крыльях модельного разлома, для которых рассчитывались продольная (X) и поперечная (Y) деформации. Для регистрации микросейсмических колебаний модели при реализации импульсного смещения по модельному разлому использовалась сейсмостанция «Байкал-8Л» с пьезоэлектрическим акселерометром А1638. Данный комплект позволяет регистрировать ускорение смещения исследуемого объекта в полосе частот 0.1–400 Гц и в диапазоне амплитуд от  $2 \cdot 10^{-5}$  м/с<sup>2</sup> до 2 м/с<sup>2</sup>.

**Fig. 2.** Distribution of the integral shear strain (XY) in the model during activation of the model fault. Red dots in white squares are reference points in the active (point A) and passive (point B) wings of the model fault, for which the longitudinal (X) and transverse (Y) strains were calculated. To record microseismic vibrations of the model during the implementation of pulsed displacement along the model fault, a Baikal-8L seismic station with an A1638 piezoelectric accelerometer was used. This kit allows recording the acceleration of displacement of the studied object in the frequency band of 0.1–400 Hz and in the amplitude range from  $2 \cdot 10^{-5}$  m/s<sup>2</sup> to 2 m/s<sup>2</sup>.

## Результаты

Результаты обработки серий фотографий методом корреляции цифровых изображений, показали, что деформационный процесс в модели реализуется в колебательном режиме, несмотря на нагружение активного

штампа экспериментальной установки с постоянной скоростью. Для примера на рисунке 3 приведен график вариаций продольной деформации в активном и пассивном крыльях, рассчитанной для точек А и Б соответственно (рис. 2).



**Рис. 3.** Пример реализации продольной деформации в активном и пассивном крыльях модельного разлома в ходе эксперимента.

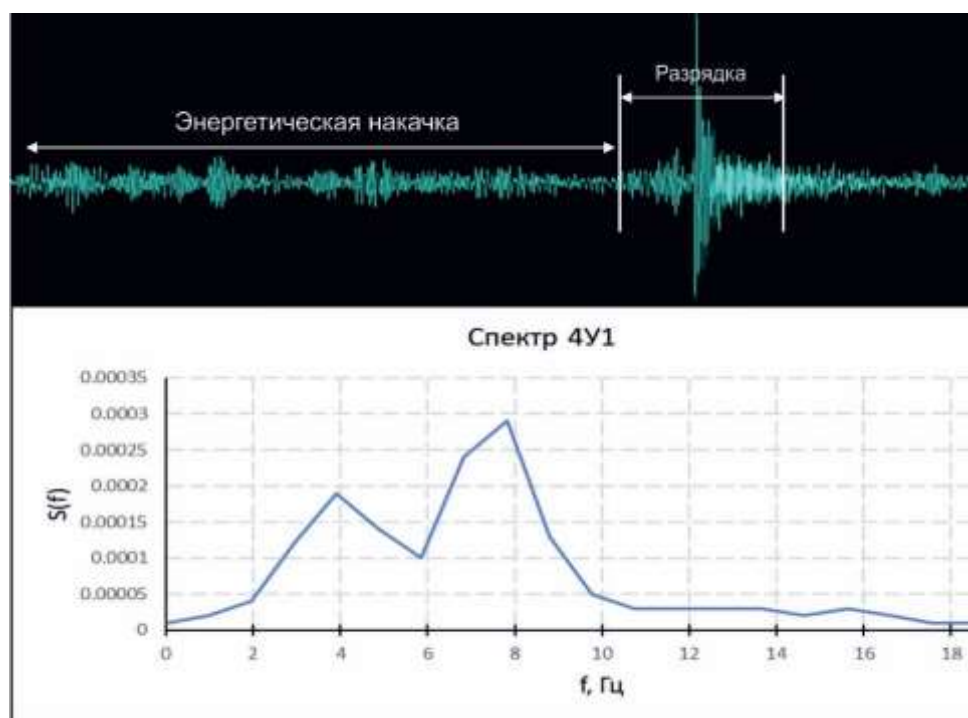
**Fig. 3.** An example of the implementation of longitudinal deformation in the active and passive wings of a model fault during an experiment.

Из графика следует, что частоты колебаний в активном и пассивном крыльях после 250 секунды эксперимента начинают существенно отличаться. Частота колебаний в первом из них (0.01 Гц) была меньше в два раза, чем во втором (0.02 Гц) между 250 и 350 секундами, а в дальнейшем это их соотношение увеличилось до трех (0.02 Гц и 0.06 Гц соответственно), на фоне примерно равного роста амплитуды колебаний в обоих крыльях. Увеличение амплитуды колебаний, обусловленное ростом напряжений в модели, фиксировалось до 850 секунд эксперимента, после чего она начала уменьшаться. Последнее связано со снижением их уровня за счет начала активизации модельного разлома. Его активизация начинается в дистальных окончаниях в краевых частях модели и постепенно распространяется в его центральные части. Во временных рядах данных с лазеров и с датчика грузки отсутствуют резкие изменения фиксируемых ими параметров, что указывает на равномерный, крипповый характер смещений по активизирующемуся модельному разлому. В тоже время, данные с сейсмодатчика, показывают наличие эпизодических импульсных смещений на его плоскости. Эти локальные очаги разрушения и разгрузки напряжений находятся в глубине модели и не выходят на её поверхность. Каждому

импульсному смещению как акту разгрузки накопленных напряжений предшествует временной интервал «энергетической накачки», в пределах которой имеет место автоколебательный процесс, проявляющийся в виде биений с периодом 30–55 секунд с его понижением до 6–11 сек перед разгрузкой (рис. 4 А). Максимальные амплитуды автоколебательного процесса в период предваряющий разгрузку составляют для компоненты X:  $A_x = 2.461 \cdot 10^{-3}$  мм, для Y:  $A_y = 2.828 \cdot 10^{-3}$  мм, для Z:  $A_z = 1.596 \cdot 10^{-3}$  мм, векторная амплитуда  $A_{xyz} = 0.004$  мм. Характеризующий его спектр колебаний, без учета «разгрузки» показан на рисунке 4 Б. Видно, что он имеет структуру с двумя максимумами, равными 3.9 Гц и 7.8 Гц (рис. 4 Б).

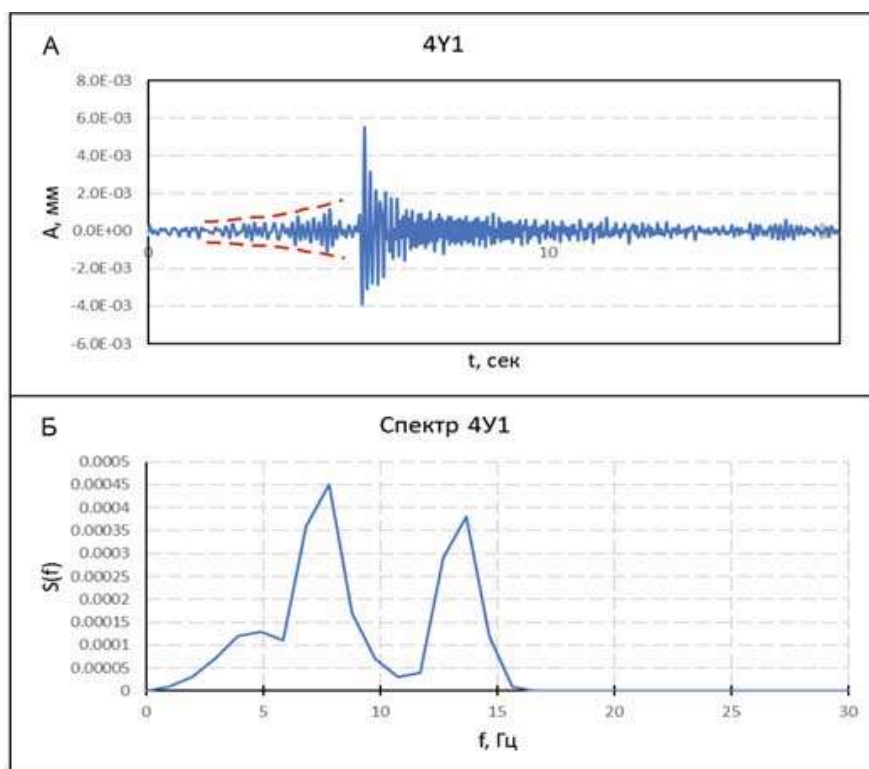
На рисунке 5 приведён пример непосредственно импульсного смещения по модельному разлому (А) и его спектр (Б). Основная часть колебаний находится в полосах частот 6.8–9.8 Гц и 12.7–14.6 Гц. При этом амплитуды колебаний равны для компоненты X:  $A_x = 3.138 \cdot 10^{-3}$  мм, для Y:  $A_y = 9.46 \cdot 10^{-3}$  мм, для Z:  $A_z = 2.686 \cdot 10^{-3}$  мм, векторная амплитуда  $A_{xyz} = 0.01$  мм. Из первого графика видно, что непосредственно перед смещением происходит увеличение амплитуды колебаний в 1.5 раза, что подчеркивается

красными штрих-пунктирными кривыми  
(рис. 5 А).



**Рис. 4.** Характерный пример процесса «энергетической накачки» с последующей разрядкой.

**Fig. 4.** A typical example of the process of “energy pumping” followed by discharge.



**Рис. 5.** Процесс энергетической разрядки (А) и его спектр (Б).

**Fig. 5.** The process of energy discharge (А) and its spectrum (Б).

## Выводы

Выполненное физическое моделирование сейсмогенной активизации разлома по механизму “stick-slip” в упруго-пластичной модели литосферы с комплексной инструментальной регистрацией деформационного процесса в модели позволило установить что:

— деформации в крыльях модельного разлома реализуются в низкочастотном колебательном режиме, при постоянной скорости нагружения модели, с отличающимися частотами и амплитудами колебаний в активном и пассивном крыльях;

— рост напряжений в модели сопровождается уменьшением частоты колебаний и увеличением их амплитуды;

— импульсная активизация модельного разлома предваряется автоволновым деформационным процессом в высокочастотной области (4–14 Гц) с последующим уменьшением преобладающих частот в 2 раза и ростом амплитуды в 1.5 раза.

## Литература

Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.

Семинский К.Ж. Структурно-механические свойства глинистых паст как модельного материала в тектонических экспериментах. Иркутск: ИЗК СО АН СССР, 1986. 130 с.

Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.

Шерман С.И. Физический эксперимент в тектонике и теория подобия // Геология и геофизика. 1984. № 3. С. 8–18.

Bak P., Tang C., Earthquakes as a self-organized critical phenomenon // Journ. Geoph. Res. 1989. 94 (B11), 15635–15637. <https://doi.org/10.1029/JB094iB11p15635>

Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as a mechanism for earthquake // Science. 1966. V. 153. P. 990–992.

Chao Y.J., Sutton M.A., 1988. Measurement of strains in a paper tensile specimen using computer vision and digital image correlation—part 1: data acquisition and image analysis system. Tappi J. 70 (3). 173–175

Choi S., Shah S.P., 1997. Measurement of deformations on concrete subjected to compression using image correlation. ExpMech. 37 (3). 307–313.

Cicerone R.D., Ebel J.E., Britton J. A systematic compilation of earthquake precursors // Tectonophysics. 2009. Vol. 476. P. 371–396.

Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y.Y, Mulargia F. 1997. Earthquakes cannot be predicted. Science, 275(5306): 1616–1616. <https://doi.org/10.1126/science.275.5306.1616>

Lyons J.S., Liu J., Sutton M.A., 1996. High-temperature deformation measurements using digital-image correlation. ExpMech. 36 (1). 64–70.

Ma J, Sherman S.I, Guo Y.S., 2012. Identification of meta-instable stress state based on experimental study of evolution of the temperature field during stick-slip instability on a 5° bending fault. Sci China Earth Sci, 55: 869–881.

Sutton M.A., Ortu J.J., Schreier H.W., 2009. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications. Springer. 316 p.

Zhang Y., Li Z., Gao K., Tang H., Li C., Wan Z. Solid-like to liquid-like transition of stick-slips in sheared fault gouge // Computers and Geotechnics. 2026. V.190. 107697.

## References

Bak P., Tang C., Earthquakes as a self-organized critical phenomenon // Journ. Geoph. Res. 1989. 94 (B11), 15635–15637. <https://doi.org/10.1029/JB094iB11p15635>

Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as a mechanism for earthquake // Science. 1966. Vol. 153. P. 990–992.

Chao Y.J., Sutton M.A., 1988. Measurement of strains in a paper tensile specimen using computer vision and digital image correlation—part 1: data acquisition and image analysis system. Tappi J. 70 (3). 173–175.

Choi S., Shah S.P., 1997. Measurement of deformations on concrete subjected to compression using image correlation. ExpMech. 37 (3). 307–313.

Cicerone R.D., Ebel J.E., Britton J. A systematic compilation of earthquake precursors // Tectonophysics. 2009. Vol. 476. P. 371–396.

Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y.Y, Mulargia F. 1997. Earthquakes cannot be predicted. Science, 275(5306): 1616–1616. <https://doi.org/10.1126/science.275.5306.1616>

Gzovsky M.V. Fundamentals of Tectonophysics. Moscow, Nauka Publ., 1975. 536 p. (In Russian)

Lyons J.S., Liu J., Sutton M.A., 1996. High-temperature deformation measurements using digital-image correlation. ExpMech. 36 (1). 64–70.

Ma J, Sherman S.I, Guo Y.S., 2012. Identification of meta-instable stress state based on experimental study of evolution of the temperature field during stick-slip instability on a 5° bending fault. Sci China Earth Sci, 55: 869–881.

Seminsky K.Zh. Structural and mechanical properties of clay pastes as a model material in tectonic experiments. Irkutsk: IZK SB AN SSSR, 1986. 130 p. (In Russian)

Sherman S.I. Fizicheskie eksperiment' v tektonike i teoriiya podobiya [Physical experiment in tectonics and the theory of similarity]. 1984. No. 3. P. 8–18.

Sobolev G.A., Ponomarev A.V. Physics of earthquakes and harbingers. Moscow, Nauka Publ., 2003. 270 p. (In Russian)

Sutton M.A., Ortu J.J., Schreier H.W., 2009. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications. Springer. 316 p.

Zhang Y., Li Z., Gao K., Tang H., Li C., Wan Z. Solid-like to liquid-like transition of stick-slips in sheared fault gouge // Computers and Geotechnics. 2026. Vol. 190. 107697.

**Борняков Сергей Александрович,**

кандидат геолого-минералогических наук,  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,  
Институт земной коры СО РАН,  
ведущий научный сотрудник,  
тел.: (3952)42-63-81,  
email: bornyak@crust.irk.ru

**Bornyakov Sergey Alexandrovich,**

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,  
664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
Leading Researcher,  
tel.: (3952)42-63-81,  
email: bornyak@crust.irk.ru

**Пантелеев Иван Алексеевич,**

доктор ф-м. наук,  
664033, Пермь, ул. Ленина, 13а,  
ПФИЦ УРО РАН,  
Зав. лаб. цифровизации горнотехнических процессов,  
тел.: +7(3422) 378317,  
email: pia@icmm.ru

**Panteleev Ivan Alekseevich,**

Doctor f-m. Sci.,  
664033, Perm, Lenin st., 13a,  
PFRC URAL BRANCH OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES,  
Head. lab. Digitalization of Mining Engineering  
processes,  
tel.: +7(3422) 378317,  
email: pia@icmm.ru

**Шагун Артем Николаевич,**

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,  
Институт земной коры СО РАН,  
ведущий инженер,  
тел.: (3952)42-58-23,  
email: bornyak@crust.irk.ru

**Shagun Artem Nikolaevich,**

664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,

Leading Engineer,  
tel.: (3952)42-58-23,  
email: bornyak@crust.irk.ru

**Салко Денис Владимирович,**  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,  
Институт земной коры СО РАН,  
ведущий инженер,  
тел.: (3952)42-58-23,  
email: denis@salko.net

**Salko Denis Vladimirovich,**  
664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
Leading Engineer,  
tel.: (3952)42-58-23,  
email: denis@salko.net

**Каримова Анастасия Алексеевна,**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,  
Институт земной коры СО РАН,  
младший научный сотрудник,  
664003, Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,  
Иркутский государственный университет,  
доцент,  
тел.: (3952)42-63-81,  
email: geowomen\_nasty@mail.ru

**Karimova Anastasia Alekseevna,**  
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,  
664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
Junior Researcher,  
664003, Irkutsk, Karl Marx st., 1,  
Irkutsk State University,  
Associate Professor,  
tel.: (3952)42-63-81,  
email: geowomen\_nasty@mail.ru

---

# ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ

УДК 551.582(235.223)

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2025.4.203>

EDN: PGPLJS

## Погодные условия формирования современных нивально-гляциально-мерзлотных и наледных образований высокогорного района Мунку-Сардык в 2025 году (Восточный Саян)

С.Н. Коваленко

*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*

**Аннотация.** Анализ погодных условий высокогорного района Мунку-Сардык по метеорологическим данным метеостанций Орлик и Монды с целью выявления их влияние на современную динамику поведения гляциально-нивальных, мерзлотных и наледных образований за период отдельно взятого 2025 года. Данный анализ рекомендуется в качестве неотъемлемой части ежегодных полевых геолого-географических режимных исследований. На основе анализа раскрываются причины поведения вышеуказанных образований, в большей степени обусловленные изменениями погодных условий в течении года.

**Ключевые слова:** погода, анализ метеорологических данных, минимальные ночные температуры, максимальные дневные температуры, атмосферные осадки, нивально-гляциально-мерзлотные образования, наледи, г. Мунку-Сардык

## Weather Conditions of the Formation of Modern Nival-glacial-permafrost and Aufeis Formations of the High-mountain Region of Munku-Sardyk in 2025 (Eastern Sayan)

S.N. Kovalenko

*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

**Abstract.** Analysis of weather conditions in the highland region of Munku-Sardyk based on meteorological data from the Orlik and Mondy meteorological stations in order to identify their impact on the current dynamics of the behavior of glacial-nival, permafrost and glacial formations for the period of 2025 due to changes in weather conditions during the year.

**Keywords:** weather, analysis of meteorological data, minimum night temperatures, maximum daytime temperatures, precipitation, nival-glacial-permafrost formations, aufeis, Munku-Sardyk

\* Статья получена: 11.11.2025; исправлена: 16.11.2025; принята: 19.12.2025.

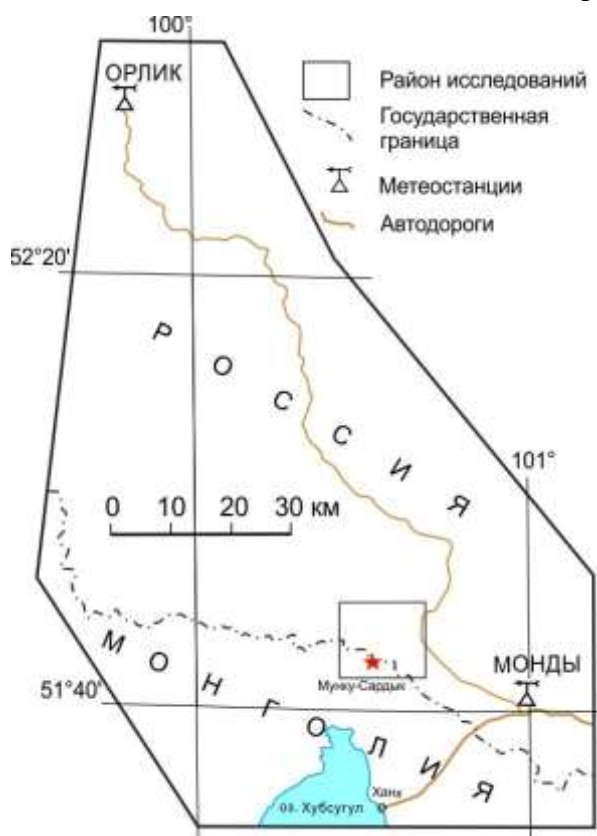
ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Коваленко С.Н. Погодные условия формирования современных нивально-гляциально-мерзлотных и наледных образований высокогорного района Мунку-Сардык в 2025 году (Восточный Саян) // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 4. С. 203–217. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.203. EDN: PGPLJS  
Article received: 11.11.2025; corrected: 16.11.2025; accepted: 19.12.2025.

FOR CITATION: Kovalenko S.N. Weather conditions of the formation of modern nival-glacial-permafrost and aufeis formations of the high-mountain region of Munku-Sardyk in 2025 (Eastern Sayan) // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 4. P. 203–217. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.203. EDN: PGPLJS

### Постановка проблемы

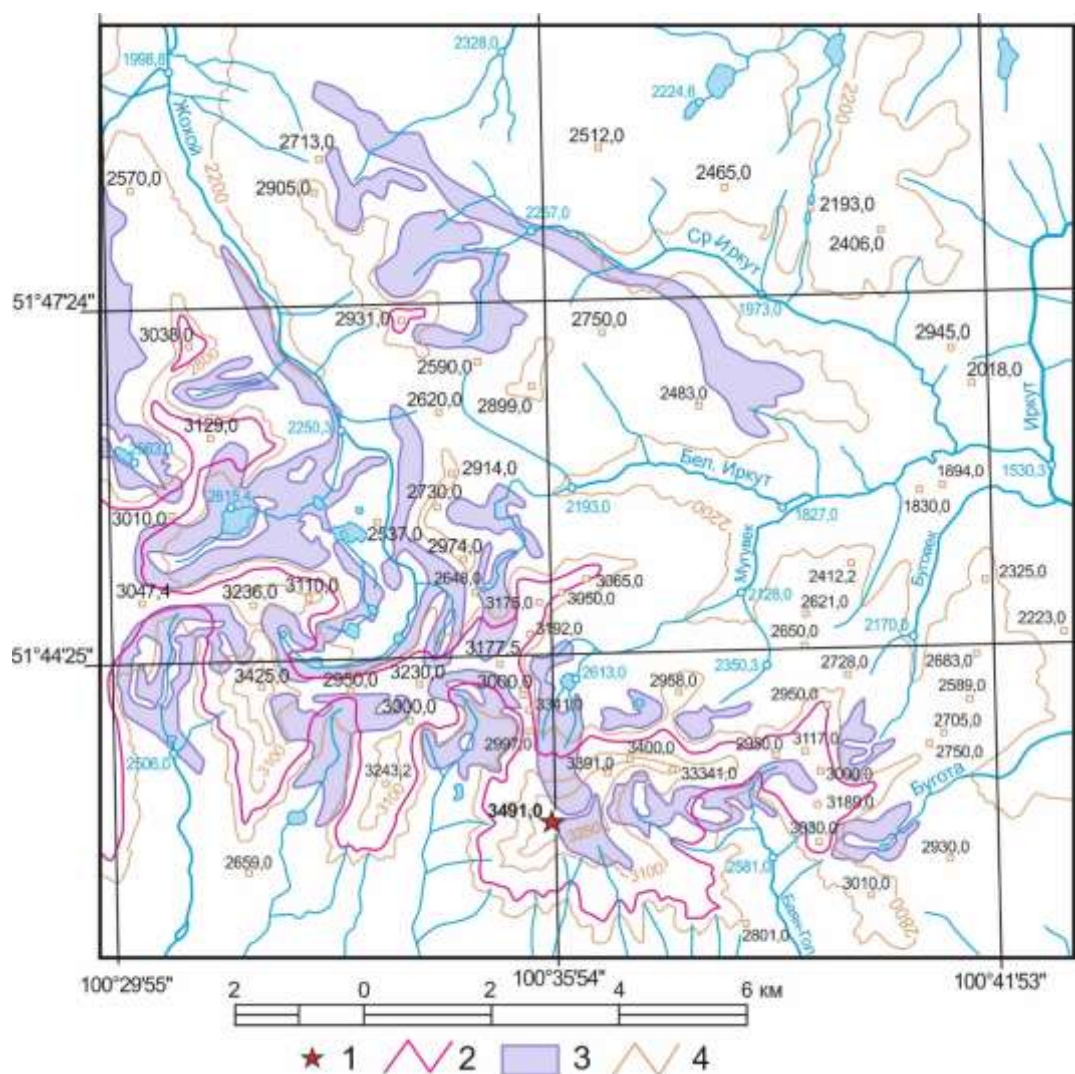
В изучаемом районе (рис. 1) имеются ледники или их остатки и многочисленные каменные глетчеры или забронированные осыпными моренами бывшие ледники (рис. 2), способные при изменении климата вновь возродиться. Они также развиты в районе пика Топографов в Восточном Саяне (Китов и др., 2014; Китов, Бадминов, 2025), на Байкальском (Ivanov et al., 2015), Баргузинском (Коваленко, Китов, 2011; Коваленко и др., 2012; Китов, 2013; Китов и др., 2013; Китов и др., 2014; Ivanov et al., 2015) и Кодарском (Иванов, 2009) хребтах Прибайкалья. Эти остатки ледников до сих пор определяют

своеобразную вертикальную зональность всех без исключения геодинамических процессов и вертикальный порядок развития их современных нивально-гляциально-мерзлотных и наледных образований (объектов). Данная зональность процессов получила у нас название Вертикальная высотная гео-криологическая зональность экзогенных процессов (Коваленко, Мункоева, 2013), а геоморфологических объектов — Вертикально-возрастная лестница развития основных форм рельефа Мунку-Сардыкского горного массива (Коваленко, Гергенов, 2022). Кроме того, в изучаемом районе имеется специфический вид высокогорных наледей (Коваленко, Лихтарович, 2021), развитых только в высокогорьях.



**Рис. 1.** Местоположение района исследований относительно ближайших государственных метеостанций, по данным которых был проведен анализ погоды 2025 года.

**Fig. 1.** Location of the study area relative to the nearest state weather stations, according to which the 2025 weather analysis was carried out.



**Рис. 2.** Области распространения гляциальных образований, в основном каменных глетчеров, на исследованной территории (Коваленко, 2014).

1 – Мунку-Сардык; 2 – региональная снежная граница; 3 – участки распространения современных ледников и каменных глетчеров; 4 – горизонталы рельефа: 2200, 2800, 3100 и 3250 м.

**Fig. 2.** Areas of distribution of glacial formations, mainly stone glaciers, in the studied area (Kovalenko, 2014).

1 – Munku-Sardyk; 2 – regional snow boundary; 3 – areas of distribution of modern glaciers and stone glaciers; 4 – relief horizontals: 2200, 2800, 3100 and 3250 m.

Современная динамика поведения этих гляциально-нивальных, мерзлотных и наледных образований зависит от погодных условий в течение каждого года, которые часто отличаются между собой от года к году и изучение которых должно являться неотъемлемой частью ежегодных полевых геолого-географических исследований. Нашу методику проведения исследований погодных условий и их развития отдельно взятого года мы приведем на примере анализа погоды только что прошедшего 2025 года.

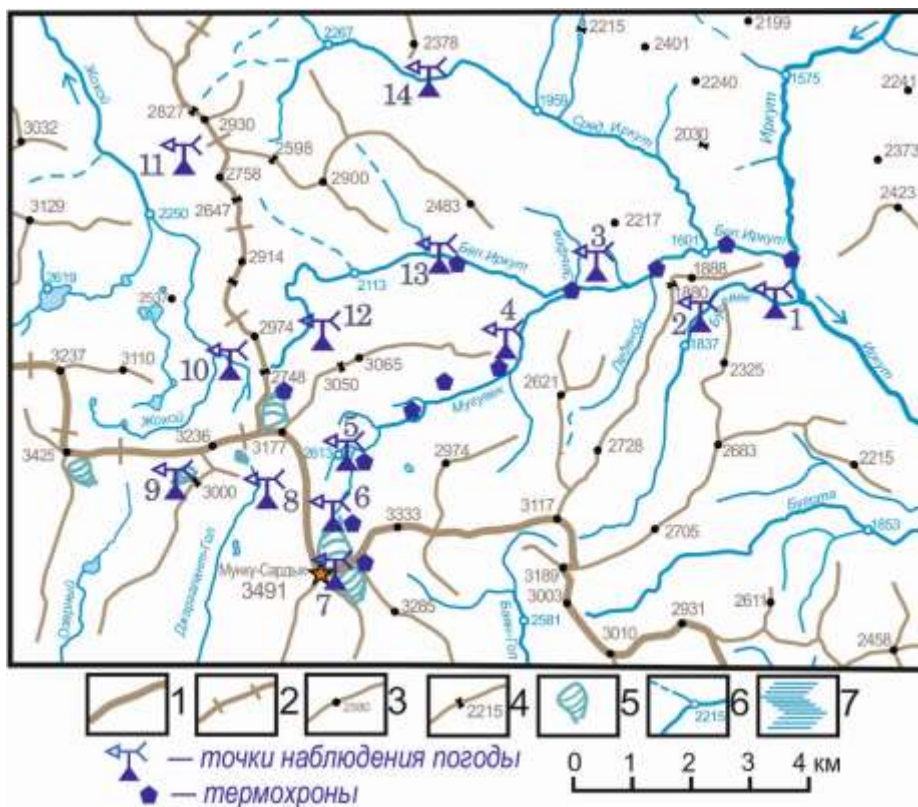
Подробные сведения о погоде в интересующем нас районе в настоящее время можно получить воспользовавшись метеорологическими данными ближайших к району исследований метеостанций Орлик и Монды (см. рис. 1), которые имеются в свободном доступе на сайте [gr5.ru](http://gr5.ru) (Архив погоды в Мондах, 2025; Архив погоды в Орлике, 2025). Метеостанция (м/с) Монды № 30802 расположена в пос. Монды на высоте 1304 м, а м/с Орлик № 29998 находится в пос. Орлик в 122 км от нее на высоте 1376 м. На вышеуказанных сетевых ресурсах можно узнать все

параметры погоды за каждый день от текущего срока до 1 февраля 2005 года для большинства месяцев с интервалом три часа в сроки 02, 05, 08, 11, 14, 17, 20 и 23 часа, а для некоторых месяцев в некоторые годы с интервалом шесть часов в сроки 02, 08, 14 и 20 часа.

Для анализа погоды в целях наших исследований мы выбрали следующие параметры погоды с 15 февраля по 1 ноября с интервалом шесть часов в течение 1, 5, 10, 15, 20, 25 чисел каждого месяца. При анализе из 28 параметров описываемых на сайте значений мы использовали максимальную температуру за сутки ( $t^{\circ}_{\max}$ ) замеряемую на м/с и во время наших экспедиционных исследований по месту стоянок (рис. 3) в 20 часов; минимальную суточную температуру ( $t^{\circ}_{\min}$ ), замеряемую в 8

часов; суточные данные о количестве атмосферных осадков (R), замеряемых на метеостанциях в 8 и 20 часов.

Кроме того, при любом интервале времени из архива данных сайта gr5.ru по любой м/с России можно узнать статистику погоды по следующим параметрам: 1) установить любой временной интервал выборки, от одних суток до года и более, при этом в выбранном диапазоне можно выбрать один день, все дни, месяц или любой срок наблюдений; 2) выбрать любой параметр погоды: температуру, влажность, давление, осадки и т. п. В результате автоматического анализа вы получите: сумму осадков за выбранный промежуток времени, максимальные значения с датой, число дней с осадками, количество наблюдений параметра.



**Рис. 3.** Расположение точек эпизодических наблюдений за погодой и термохронов (Коваленко и др., 2022).

1 – хребты, 2 – главный водораздельный хребет рр. Оки и Иркута, 3 – второстепенные хребты с абсолютными отметками главных вершин, 4 – перевалы и их абсолютные отметки, 5 – ледники, 6 – реки со значениями урезов вод, 7 – заболоченность. **Числа** — номера точек наблюдения: 1 – 1631 м, р. Буговек; 2 – 1719 м, р. Буговек; 3 – 1800 м, р. Бел. Иркут; 4 – 2 090 м, в долине р. Муговек; 5 – 2 613 м, оз. Эхой; 6 – 2900 м, минимальный термометр Перетолчина; 7 – 3491 м, г. Мунку-Сардык; 8 – 2722 м, вблизи глетчера Бабочка р. Джаргалант-Гол (Монголия); 9 – 2 975 м, глетчер Энтузиастов (Монголия); 10 – 2629 м, верховья р. Жохой; 11 – 2400 м, р. Жохой; 12 – 2500 м, в каре Уютный в верховьях р. Бел. Иркут; 13 – 2100 м, р. Бел. Иркут, 14 – 2120 м, р. Средний Иркут.

**Fig. 3.** Location of points of episodic weather observations and thermochrons (Kovalenko et al., 2022).

1 – ridges, 2 – main watershed ridge rr. Oka and Irkuta, 3 – secondary ridges with absolute elevations of the main peaks, 4 – passes and their absolute elevations, 5 – glaciers, 6 – rivers with values of water cuts, 7 – swampiness. **Numbers** — numbers of observation points: 1 – 1 631 m, Bugovek River; 2 – 1 719 m, Bugovek River; 3 – 1 800 m, Bel. Irkut; 4 – 2 090 m, in the valley of the Mugovek River; 5 – 2 613 m, lake Echo; 6 – 2 900 m, minimum thermometer Peretolchina; 7 – 3 491 m, Munku-Sardyk; 8 – 2 722 m, near the Butterfly Glacier of the Jargalant Gol River (Mongolia); 9 – 2 975 m, Glacier Enthusiasts (Mongolia); 10 – 2 629 m, upper reaches of the Zhokhoy River; 11 – 2 400 m, Zhokhoy river; 12 – 2 500 m, in the Uyutny Carriage in the upper reaches of the Bel. Irkut River; 13 – 2 100 m, Bel. Irkut, 14 – 2 120 m, Sredny Irkut River.

## Обсуждение результатов

### Монды 2025

Анализ погоды в 2025 году по исследованному району проведен по метеорологическим данным, которые имеются в свободном доступе на сайте [gr5.ru](http://gr5.ru) (Архив погоды в Мондах, 2025). Метеостанция (м/с) Монды № 30802 расположена в пос. Монды на высоте 1304 м.

По диаграмме погоды, построенной по данным м/с Монды 2025 года (рис. 4) можно выделить четыре заметных периода в развитии погоды: 1) зимний дивергентный, когда на диаграммах погоды разница в максимальных дневных и минимальных ночных достигает наибольших значений, — наиболее сухой сезон года до начала первого таяния высокогорных наледей; 2) весенний с конвергенцией графиков, когда на диаграммах погоды происходит сближение (схождение) линий максимальных дневных и минимальных ночных температур, — период весеннего таяния и развития термальных наледей; 3) летний или дивергентный — влажный сезон года и интенсивного таяния ледников и наледей; 4) осенний с конвергенцией (схождением) графиков максимальных дневных и минимальных ночных температур достигает наименьших значений, — период перехода всех экзогенных гляциально-нивальных, мерзлотных и наледных процессов к зимнему режиму.

1. В зимний период с первого января последний снег (2 мм) выпадал только 24 числа и отмечался в наблюдениях 10 января (0.3 мм) при относительно теплой для января и сухой погоде без единого снегопада с предельными значениями температуры минус 0.2–18°, с наиболее частыми значениями минус 5–11° и минимальными ночными

температурами –25.5 до – 33.5° (26 января) только во второй половине третьей декады и с текущими температурами в пределах минус 15–20° в остальные дни. Минимальная температура 26 января стала минимальной температурой за зиму 2024–25 гг. на метеостанции на высоте 1304 м, а на термометре Перетолчина на высоте 2900 м она была –37.5 °С (Китов, Иванов, 2025).

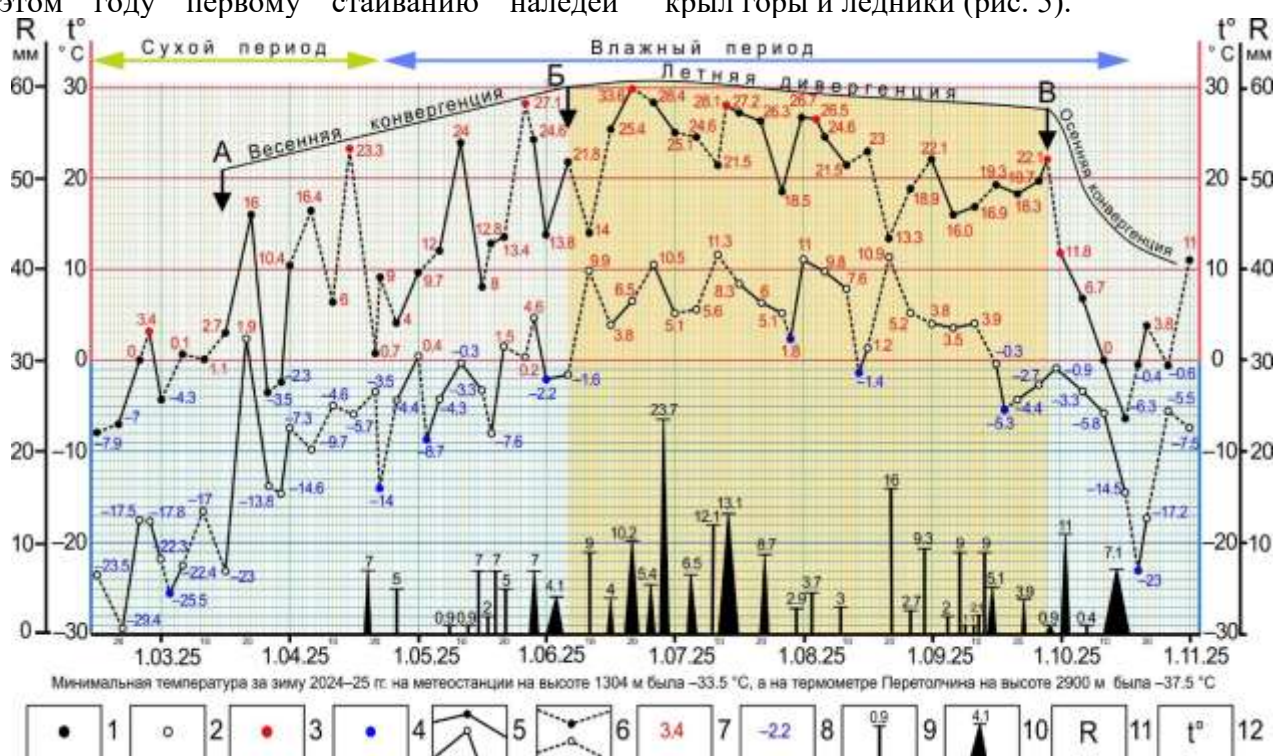
Зимний период в районе исследований является сухим, аридным сезоном, когда испарение превышает количество выпадающих осадков и с малым снеговым покровом или полным его отсутствием в отдельные годы. Это не приводит ранней весной к обычной для этого времени года весенней инверсии температуры, когда при снежном покрове (как на Хамар-Дабане) происходит выхолаживание приземного воздушного слоя на границе со снегом, что задерживает темпы весеннего таяния высокогорных наледей. Зимой же наоборот приводит к возникновению этой температурной инверсии, когда наблюдается повышение температуры с высотой, вместо обычного ее понижения.

2. Период до начала таяния наледей и их весеннего дополнительного пополнения за счет талой воды от снега (с зимы до 17 марта) — до возникновения так называемого весеннего явления конвергенции (сближения) максимальных дневных температур с минимальными ночными (рубеж А на диаграмме рис. 4), когда начинает таять снег, часто выпадающий только ранней весной, а наледи пополняться не за счет грунтовых вод, как зимой, а за счет таяния снега на наледях и на окружающих склонах — это время начала интенсивного формирования термальных наледей (Коваленко, Лихтарович, 2021). С 20 марта по 15 апреля стояла теплая погода. Максимальные дневные температуры достигали 13.8, 10.4, 16.4 и 21.1 °С, что позволило

кривой ночных минимальных температур 1 апреля перейти рубеж в  $-10^{\circ}\text{C}$ . Вероятно именно в этот период и произошло первое ранневесеннее частичное небольшое стаивание наледей, отмеченное нами в статье второго номера этого журнала за 2025 год (Весенняя экспедиция..., 2025). Такое стаивание в ранневесенний период происходит уже второй год подряд. Сведения о первом стаивании в 2024 г. можно посмотреть в статье (Коваленко, Китов, 2024). Кроме того, в этом году первому стаиванию наледей

предшествовал довольно теплый совершенно сухой (без каких-либо осадков) переход погоды с зимнего характера на весенний как минимум с 25 февраля, когда максимальные дневные температуры стали положительными.

После весеннего первого потепления 17–19 и 25 апреля, выпадают атмосферные осадки в пределах 7 и 5 мм соответственно, которые отсутствовали с начала третьей декады января, и снег впервые в этом году покрыл горы и ледники (рис. 5).



**Рис. 4.** Диаграмма погодных данных 2025 года по метеостанции Монды (Республика Бурятия) (Архив погоды в Мондах, 2025).

1 – точки дневных максимальных значений температуры, замеренные на метеостанции в  $20^{\text{h}}$ ; 2 – точки ночных минимальных значений температуры, замеренные на метеостанции в  $8^{\text{h}}$ ; 3 – точки максимальных дневных температур за месяц; 4 – точки минимальных ночных температур за месяц; 5–6 – тип согласованности градиента температур: 5 – согласный, 6 – несогласный; 7 – положительные значения максимальных и минимальных температур; 8 – отрицательные значения максимальных и минимальных температур; 9 – количество осадков в мм кратковременных дождей; 10 – суммарное количество осадков в течении ближайших 2–3 дней; 11 – шкала осадков в мм; 12 – температурная шкала в  $^{\circ}\text{C}$ .

**Fig. 4.** 2025 weather data diagram for the Mondy weather station (Republic of Buryatia) (Mondy Weather Archive, 2025).

1 – points of daily maximum temperature values measured at the weather station in  $20^{\text{h}}$ ; 2 – points of night minimum temperature values measured at the weather station at  $8^{\text{h}}$ ; 3 – points of maximum daytime temperatures for the month; 4 – points of minimum night temperatures for the month; 5–6 – temperature gradient consistency type: 5 – consonant, 6 – dissonant; 7 – positive values of maximum and minimum temperatures; 8 – negative values of maximum and minimum temperatures; 9 – amount of precipitation in mm of short-term rains; 10 – total precipitation over the next 2–3 days; 11 – precipitation scale in mm; 12 – temperature scale in  $^{\circ}\text{C}$ .

При весеннем сближении все дневные максимальные температуры имели положительные значения и достигали в конце периода 20–25 °С. В весеннее сближение 2025 года переход на устойчивые положительные максимальные дневные температуры произошел 1 апреля, а минимальных ночных — 20 мая. Последнее стало возможным после начала выпадения регулярных осадков в виде дождей в районе станции и снега в горах. Общее количество осадков за этот период по станции составило 45.9 мм (23 % от годового объема 220 мм осадков на 1 октября), что видно и обусловило прогрев воздуха и почвы в районе. Это весеннее сближение в 2025 году продолжалось до 5 июня, и его окончание отмечено на диаграмме рубежом Б.

3. Летнее дивергентное расхождение максимально-минимальных температур начинается с наступления жаркой (с максимальной дневной температурой в пределах 21.5–26.4°, с теплыми осадками, общее количество которых за этот период составило 102.3 мм, с пиковым ливневым дождем 23.7 мм в конце июня. Такое бурное, в смысле осадков, летнее начало сезона и обусловило все нестандартные (необычные или пиковые) последующие явления летнего сезона 2025 года, описанные в статье А.Д. Китова, Е.Н. Иванова (Китов, Иванов, 2025). Минимальные ночные температуры в этот период были в пределах 5.1° (1 июля) до 11.3° (10 июля) перед июльской заключительной затухающей серией дождей с общим количеством 40.0 мм (20.1 % от годового объема 220 мм на 1 октября) осадков с пиком 8–12 июля в 12.1 и 13.1 мм и 8.7 (20 июля). Эта серия теплых дождей значительно сократила объем льда наледей в нашем районе исследования и усилила приток воды в нижние участки рек и повысила с некоторой временной задержкой уровень Байкала.

Во время летней дивергенции максимально-минимальных температур при повышении максимальных дневных температур происходит понижение минимальных ночных температур и наоборот. Этот период характеризуется обильными осадками,

постепенно затухающими к осеннему этапу конвергенции.



**Рис. 5.** Весенний снег в долине р. Жохой, выпавший 17-19 и 25 апреля 2025 г. На первом плане ледник Радде. Фото В. Семенова от 3.05.2025 (по Семенов, 2025).

**Fig. 5.** Spring snow in the valley of the Zhokhoi River, which fell on April 17-19 and 25, 2025. Photo by V. Semenov from 05/03/2025 (after Semenov, 2025).

4. В осенний, переходный к зимнему, этап конвергенции начался 15 сентября, после довольно по летнему обильного выпадения осадков с 6 по 15 сентября (27.6 мм), в результате которого ночные минимальные температуры резко стали отрицательными, а затем и максимальные дневные температуры, которые до этого периода были по-настоящему летние в пределах 22.1–16.9 °С, стали тоже резко снижаться. Осадки второй и третьей декады сентября в количестве 23.3 мм лишь на немного задержали этот переход на осенний режим. Правда первые признаки перехода на осенний режим наметились еще с 20 августа в виде одноразовых, полудневных дождей в районе метеостанции и выпадением снега в горах в количестве 10–12 мм, как и в каждом предыдущем периоде, кроме зимнего, где наблюдается полное отсутствие атмосферных осадков в этом году, по характеру похожему на летний дивергентный период, но в меньшем количестве 51 мм (25.6 % от годового количества осадков) с пиком 16.0 мм (20 августа). Эти довольно обильные дожди

понижили максимальные температуры воздуха с 21.5–26.5 °С до 13.3° (20 августа), 16.9° (10 сентября) и 3.0° (1 октября), а минимальные ночные температуры до 7.6° (15 августа), 3.8° (1 сентября), 3.9° (10 сентября) и до –4.4 (20 сентября) и 0.9 (1 октября), что позволило минимальным ночным температурам 15 сентября преодолеть нулевой рубеж и принять отрицательные значения. А 10 октября и максимальные дневные температуры тоже стали отрицательными, чему видимо способствовало выпадение снега 1–2 октября (11 мм) и 10–16 октября (23.3 мм) и погодный режим окончательно перешел на осенний конвергентный согласный характер. Осадки первой декады октября не повлияли на удлинение осеннего режима до первой декады ноября, что хорошо видно по несогласному (зимнему) характеру кривых температур в конце ноября.

Таким образом, сентябрьский период дождей, с почти летними максимальными температурами до 22.1 и 18.3 °С и их падением до 3.0° мог привести к прорыву плотины конуса выноса живой осыпи Белоиркутской на р. Бел. Иркут (Китов, Иванов, 2025, рис. 26–27, 32) и окончательному переходу ледников на зимний сухой режим в результате выпадения на открытых участках льда дополнительного снега.

Во время весенней конвергенции сближение максимальных и минимальных значений температур происходило в 2025 году по инерции доставшейся от заключительных стадий зимней дивергенции, когда направленность изменения значений начинает происходить синхронно и ярко проявляется во время весенней конвергенции. Осеннее же сближение вероятно испытало в этом году наследование характера направленности от дивергентного асинхронного летнего характера погоды.

Если сравнить синхронность температурных кривых зимнего периода перед весенней конвергенцией с асинхронным характером осеннего периода, то мы видим их противоположный характер, значит где-то в течении

зимнего периода 2026 года должна произойти их смена. Первые признаки уже наметились на графике с 16 октября, когда прекратились атмосферные осадки и погода перешла на сухой зимний характер.

Активный период развития гляциально-мерзлотных объектов района в 2025 году в общем характеризовался засушливым сухим характером с общим количеством выпавших в этот период осадков всего 199.2 мм, что привело к значительным изменениям на этих объектах, т. к. известно что гляциальные объекты перекрываются осыпными моренами в сухие годы летней погоды, а освобождаются от них и наращивают ледниковый объем во время влажных, когда наблюдаются обильные осадки при затяжных ненастьях. Ледники и МКГП накапливают запасы грунтовых вод и пополняют объемы гляциального инфильтрационного льда во влажные прохладные летние сезоны при обильных атмосферных осадках и теряют его в сухие годы, в то время как в наледях все наоборот. Наледи из-за высокого своего альбедо полностью стаивают только во время затяжных ненастий или обильных теплых ливней в жаркую погоду, а в сухую погоду при относительно сухой (недождливой) солнечной погоде пусть даже с высокой инсоляцией, небольшие их остатки всегда уходят в качестве перелетков на следующий год.

Поэтому, учитывая большие изменения на гляциально-мерзлотных объектах района (ледники Радде, Южный, Перетолчина, МКГП «Активный», живой осыпи Белоиркутской) это могло произойти в период активного таяния наледей во время летней дивергенции максимально-минимальных температур (см. рис. 4), когда на ближайших метеостанциях в Мондах и Орлике были зафиксированы обильные теплые осадки на фоне жаркой погоды. При этом количества и длительности осадков не хватило до конца уничтожить большие речные наледи (Бол. Белоиркутская, Бол. Мугувекская) и смыть поверхностные осыпные морены, как это произошло

в 2005–2006 гг. (Коваленко и др., 2009, с. 68–70; Дроздова, 2007; Дроздова, Коваленко, 2006, с. 42–45), но хватило чтобы открытые части льда ледников значительно покрылись снегом (Китов, Иванов, 2025, рис. 9, 10, 16, 20). Эти осадки отразились и на повышении в конце августа – начале сентября текущего года уровня оз. Байкал.

### Орлик 2025

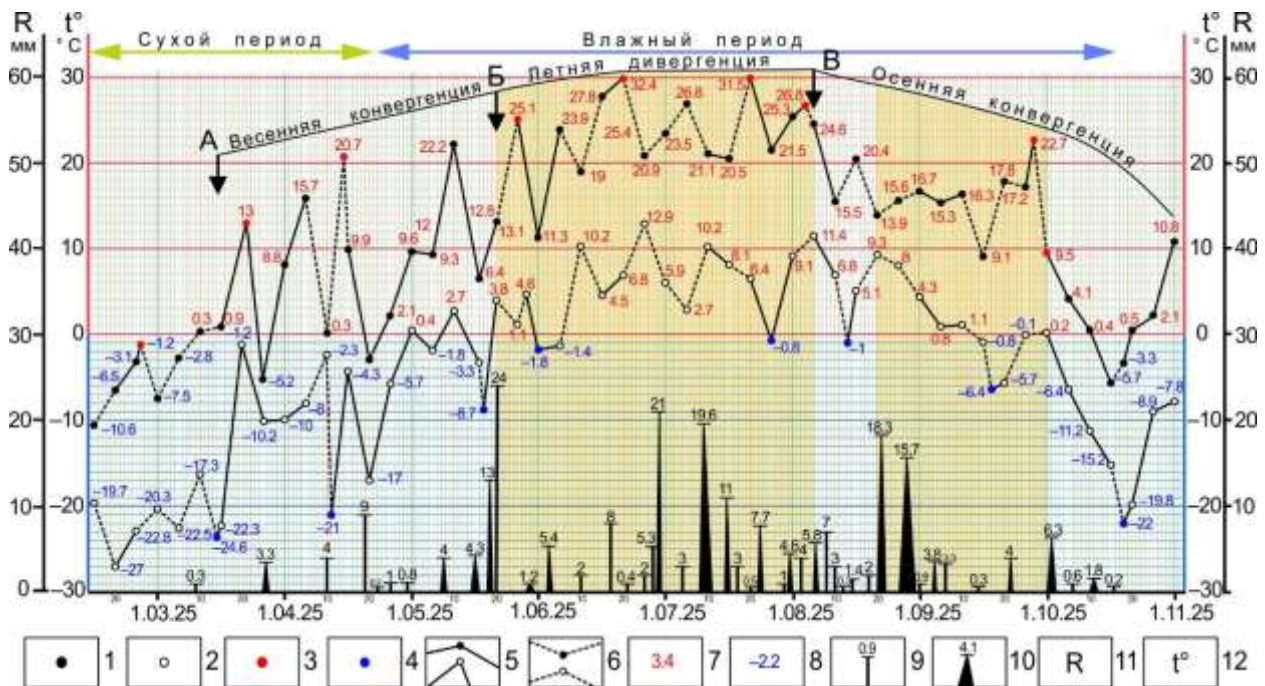
Анализ погоды в 2025 году по исследованному району дополнен анализом метеорологических данных, которые имеются в свободном доступе на сайте [gr5.ru](http://gr5.ru) (Архив погоды в Орлике, 2025) метеостанции Орлик № 29998 (см. рис. 1). Последняя находится в пос. Орлик в 122 км от м/с пос. Монды на высоте 1376 м. Как показал сравнительный анализ, метеорологические данные по этим метеостанциям довольно близки.

По диаграмме погоды, построенной по данным м/с Орлик 2025 года (рис. 6), как и на диаграмме м/с Монды можно выделить четыре заметных периода в развитии погоды: 1) зимний — наиболее сухой период года до начала первого таяния высокогорных наледей; 2) весенней конвергенции (сближения) максимально-минимальных температур — период весеннего таяния и развития термальных наледей; 3) летний или дивергентный, когда разница в максимальных дневных и минимальных ночных достигает наибольших значений, влажный период года и интенсивного таяния ледников и наледей; 4) осенней конвергенции, период перехода всех экзогенных гляциально-нивальных, мерзлотных и наледных процессов к зимнему режиму.

1. В зимний период с первого ноября 2025 снег выпадал только 16 ноября (0.5 мм), 16–18 декабря (4 мм) и отмечался в наблюдениях 3 и 10 января (0.2 и 0.5 мм соответственно), 14 февраля (0.7 мм) при относительно теплой и сухой для зимы погоде со значениями

температуры минус 0.2–18°, с наиболее частыми значениями минус 5–11° и минимальными ночными температурами 1 декабря и 11 декабря (–38.4 и 40.7° соответственно), 4 февраля (–35,5°). Минимальная температура 11 декабря стала минимальной температурой за 2025 г. на метеостанции на высоте 1376 м, а на термометре Перетолчина на высоте 2900 м она была –37.5 °С (Китов, Иванов, 2025).

2. Период до начала таяния наледей и их весеннего дополнительного пополнения за счет талой воды от снега (с зимы до 14 марта, в Мондах до 17 марта) — до возникновения так называемого весеннего явления конвергенции (сближения) максимальных дневных температур с минимальными ночными (рубеж А на диаграмме рис. 6), когда начинает таять снег, а наледи пополняться не за счет грунтовых вод, как зимой, а за счет таяния снега на прогреваемых солнцем окружающих склонах южной экспозиции — это время начала интенсивного формирования термальных наледей (Коваленко, Лихтарович, 2021). С 21 марта по 14 апреля стояла теплая погода. Максимальные дневные температуры достигали 13.0, 8.8, 15.7 и 20.7 °С, что позволило кривой ночных минимальных температур 1 апреля перейти рубеж в –10 °С. Вероятно именно в этот период и произошло первое ранневесеннее частичное небольшое стаивание наледей, отмеченное нами в статье второго номера этого журнала за 2025 год (Весенняя экспедиция..., 2025). Такое стаивание в ранневесенний период происходит уже второй год подряд. Сведения о первом стаивании в 2024 г. можно посмотреть в статье (Коваленко, Китов, 2024). Кроме того, в этом году первому стаиванию наледей предшествовал довольно теплый совершенно сухой (без каких-либо осадков) переход погоды с зимнего периода на весенний как минимум с 25 февраля, когда максимальные дневные температуры стали положительными.



**Рис. 6.** Диаграмма погодных данных 2025 года по метеостанции Орлик (Республика Бурятия) (Архив погоды в Орлике, 2025).

1 – точки дневных максимальных значений температуры, замеренные на метеостанции в 20<sup>00</sup>; 2 – точки ночных минимальных значений температуры, замеренные на метеостанции в 8<sup>00</sup>; 3 – точки максимальных дневных температур за месяц; 4 – точки минимальных ночных температур за месяц; 5-6 – тип согласованности градиента температур: 5 – согласный, 6 – несогласный; 7 – положительные значения максимальных и минимальных температур; 8 – отрицательные значения максимальных и минимальных температур; 9 – количество осадков в мм кратковременных дождей; 10 – суммарное количество осадков в течении ближайших 2-3 дней; 11 – шкала осадков в мм; 12 – температурная шкала в °C.

**Fig. 6.** 2025 weather data chart for the Orlik weather station (Republic of Buryatia) (Weather archive in Orlik, 2025).

1 – points of daily maximum temperature values measured at the weather station in 2000; 2 – points of night minimum temperature values measured at the weather station at 800; 3 – points of maximum daytime temperatures for the month; 4 – points of minimum night temperatures for the month; 5-6 – temperature gradient consistency type: 5 – consonant, 6 – dissonant; 7 – positive values of maximum and minimum temperatures; 8 – negative values of maximum and minimum temperatures; 9 – amount of precipitation in mm of short-term rains; 10 – total precipitation over the next 2-3 days; 11 – precipitation scale in mm; 12 – temperature scale in °C.

Летняя дивергенция началась с непогоды с хорошими дождями 18-20 мая, когда в районе м/с выпало 37 мм осадков в виде дождя, и первые признаки которой уже наметились в первой декаде мая с достижением уже 10 мая положительных значений минимальных ночных температур, а максимальных дневных по своей величине весьма похожих на летние (22.2°).

После весеннего первого потепления 17-19 и 25 апреля, выпадают атмосферные осадки в пределах 7 и 5 мм соответственно, которые отсутствовали с начала третьей

декады января. При весеннем сближении все дневные максимальные температуры имели положительные значения и достигали в конце периода 20-25 °C. В весеннее сближение 2025 года переход на устойчивые положительные максимальные дневные температуры произошел 1 апреля, а минимальных ночных — 20 мая. Последнее стало возможным после начала выпадения регулярных осадков в виде дождей в районе станции и снега в горах. Общее количество осадков за этот период по станции составило 63.6 мм (27.2 % от годового объема 234 мм осадков на

1 октября), что видимо и обусловило прогрев воздуха и почвы в районе. Это весеннее сближение в 2025 году продолжалось до 20 мая, и его окончание отмечено на диаграмме рубежом Б. Такое раннее окончание весеннего периода в районе Орлика (в Мондах это произошло 5 июня), видимо было обусловлено обильными дождями в течении периода и пиковым значением в 24 мм в конце периода.

3. Летнее дивергентное расхождение максимально-минимальных температур начинается 20 мая с наступления жаркой (с максимальной дневной температурой в пределах  $25.1\text{--}32.4^\circ$ , с небольшими теплыми осадками, общее количество которых за этот период составило 40.6 мм (в районе Монд 102.3 мм), с пиковым ливневым дождем 24 мм в начале периода. Минимальные ночные температуры в этот период были в пределах  $-1.8^\circ$  (1 июля) до  $32.4^\circ$  (20 июня) перед июльской максимальной серией дождей с общим количеством 85.9 мм (36.9 % от годового объема 234 мм на 1 октября) осадков с пиком 28–29 июня в 21 мм и 19.6 (8–11 июля). Летний период в районе Орлика в 2025 г. был не столь длительным как в районе Монд и закончился 5 августа. В районе Монд он, после краткого похолодания 20 августа продолжался до 27 сентября (см. рис. 4). В Орлике кратковременный период похолодания растянулся на период с 5 по 10 августа или даже 20 августа (см. рис. 6). Зато тепло лета было компенсировано довольно длительным «бабьим летом» с 20 августа по 1 октября, когда максимальные дневные температуры были хоть и не летние, но комфортные в пределах  $9.1\text{--}17.8^\circ$  с пиком в  $22.7^\circ$  27 сентября.

4. В осенний, переходный к зимнему, этап конвергенции начался 5 августа, на фоне затухающей серии по осеннему малообильных, но частых, осадков с 5 по 18 сентября (19.5 мм), в результате которого ночные минимальные температуры резко стали отрицательными, а затем и максимальные дневные температуры, которые до этого периода были по-настоящему летние в пределах  $25.3.1\text{--}26.8^\circ\text{C}$ , стали тоже резко снижаться (до  $15.5^\circ$ ).

«Золотая осень или бабье лето» наступило с выпадения довольно обильных дождей 20–22 и 25–29 августа (18.3 и 15.7 мм соответственно) и установления по летнему сухой и теплой погоды с ночными заморозками, которое закончилось резким похолоданием и выпадение снега 1–2 октября (6.3 мм). Период осенней конвергенции резко (если судить по характеру кривых максимальных и минимальных температур погодной диаграммы на

рис. 6) вступил в свои права. Дневные максимальные температуры стали ниже  $10^\circ$  ( $t^{\circ}\text{min} = -5.7^\circ$ ), а минимальные ночные понизились до минус 5–15 и даже  $-22^\circ$  (18.10).

Из всего вышеописанного можно сделать вывод, что иногда в первой декаде августа происходит как бы начало осенней конвергенции, но потом может почти на месяц или на две – три декады вновь воцариться почти летняя погода с присущей ей дивергенцией температур и обильными осадками, как это произошло в текущем 2025 году. Главные отличия этого «бабьего лета» в том, что в горах выше границы снега в это время вместо «теплых» дождей выпадает относительно (по сравнению с обычными годами) большое количество снега, который значительно пополняет фирновые запасы ледников и снежников.

Количество и время выпадения атмосферных осадков по м/с Орлик в общем совпадают с таковыми в районе м/с Монды. В январе было всего пять дней с осадками, в течении которых выпало всего 1.3 мм с максимумом 0.5 мм за 12 часов 10 января. С 30.01 по 1.01 было всего два дня с осадками суммой 0.7 мм. За декабрь выпало 4.2 мм. Таким образом за сухой период года или зиму 2024–25 гг. выпало всего 5.2 мм осадков.

Влажный сезон, который начался в 2025 г. 19 апреля с выпадения 9 мм осадков, а закончился как по м/с Орлик, так и по м/с Монды, 16 октября. За этот период выпало 234 мм осадков с пиковым значением 24 мм за 12 часов 20 мая.

## Выводы

Как показал анализ погоды 2025 года в районе горного массива Мунку-Сардык на территории произошли большие изменения на гляциально-мерзлотных объектах района в 2025 году (ледники Радде, Южный, Перетолчина, МКГП «Активный», сход ледникового озера на леднике Радде, живой осыпи Белоиркутной). Эти изменения были обусловлены характером погоды этого года.

Так сход ледникового озера, наблюдения за которым производились А.Д. Китовым и др. в 2021–2024 гг. (Китов и др., 2024, с. 234–235; Коваленко, Китов, 2023, с. 193–194; Коваленко и др., 2023, с. 246) никак не отразился в изменениях гляциально-нивалльных и наледных объектов ни в рельефе моренных отложений, ни в каких-либо других явлениях и признаках большой воды в долине Бел. Иркут. В первом приближении выявить причины обусловившие столь аномальное

поведение гляциальных и наледных образований в текущем году, можно, если проанализировать погоду 2025 года (см. рис. 5 и 6). На приведенных диаграммах видно, что первые положительные дневные максимальные температуры были уже в конце февраля, а окончательно ежедневная дневная положительная температура установилась с 1 апреля по м/с Монды и с 25 апреля по м/с Орлик, с этого же времени они стали достигать 10–13 °С, а в мае в Мондах даже 24 (10.05) и 18 (30.04), а в Орлике 22.2 (10.05) и 25.1 °С (25.05). С 18 мая уже и ночные минимальные температуры ежесуточно стали положительными, что привело к прекращению накопления льда наледей уже в это раннее время. В районе м/с Орлик это произошло 10 июня. При этом ощутимых осадков в весенний период не было с 5 февраля (Архив погоды в Мондах..., 2025), а по м/с Орлик 14 февраля. Первые хорошие осадки по м/с Монды были 7.05, 15–16.05 и 19.05, а по м/с Орлик были 25–26.03, 9.04, 19.04, и в мае, т. е. с периода установки положительных максимальных и минимальных температур. Эти температуры к концу мая и началу июня по м/с Монды достигли довольно высоких (летних) температур 24.6° (27.05), а во второй декаде июня по первую декаду июля (3.06 и 8.06) они вообще держались в пределах 19.5 до 32,8° (22.06), то есть самым жарким периодом был отрезок времени с 16 июня до 29 июня. В этот период выпало в виде ливней 37.6 мм осадков, что скорее всего и привело к массовому таянию наледей и обрушению выдвигающегося блока-карниза МКГП Активного, полумерзлый материал которого перегородил русло Бел. Иркут (Китов, Иванов, 2025, рис. 26–27, 32), формированию термосуффозионных воронок, линейных продольных западин (Китов, Иванов, 2025, рис. 28–29) и поперечных трещин отрыва (Китов, Иванов, 2025, рис. 30). Первые формировались над пустотами вымывания льда потоками теплых грунтовых вод образовавшимися от теплых ливневых осадков этого периода, а последние — в зонах максимального растяжения сползающего по конгеляционному льду полумерзлого грунта.

На примере анализа погоды 2025 года в районе г. Мунку-Сардык описанного в данной статье в ближайшее время будет проведен анализ наиболее засушливых и наиболее влажных (с паводками) годов, погода которых значительно отразилась на динамике гляциально-нивальных, мерзлотных и наледных

объектах, начиная с 2005 года. В результате могут быть выявлены или намечены причины изменения их динамики, а также причины изменения самой погоды от года к году, предположительно зависящие от солнечной активности или ее цикличности. При этом близкий характер погоды на м/с Орлик и Монды позволяет проводить этот анализ только по м/с Монды, как наиболее близко расположенной метеостанции.

Как показал предварительный анализ диаграмм ежегодной погоды нескольких лет, подготовка к полевым экспедициям должна начинаться задолго до выезда в поле, где-то 1 апреля или даже раньше с 1 марта, т. е. со времени начала таяния наледей и первых признаков оживления абляционной деятельности на ледниках.

Анализ графиков погоды в виде, в котором мы предлагаем проводить в этой статье, — это новый камеральный аналитический инструмент анализа погоды перед выездом на полевые экспедиционные работы, дающий представление о предстоящей и прошедшей погоде в районе исследований, которые могли повлиять на динамику и состояние гляциально-нивальных-криогенных процессов и на характеристики создаваемых ими объектов — наледей, открытых частей ледников и снежников; состояние и количество снега на маршрутах; величину ежегодно замеряемой минимальной температуры на термометре Перетолчина, установленного на высоте 2900 м, а также на значения других многочисленных термохронов, установленных в районе. Теперь кажется невероятным, как мы могли выезжать в поле без анализа погоды при помощи этого инструмента. Поэтому рекомендуем его использовать и другим исследователям-полевым, изучающим снежно-ледовые и мерзлотные процессы и объекты ими изменяемые или порождаемые — ледники, каменные глетчеры, снежники, снежные лавины, наледи, мерзлотно-каменные горные потоки и т. п.

Кроме того, по характеру наших кривых максимально-минимальных температур уже сейчас можно дополнительно уточнять сроки смены времен года, т. е. рубежей наступления весны, лета, осени и зимы, что важно в режимных наблюдениях гляциальных, нивальных, мерзлотных и наледных процессов или влияния магнитных солнечных бурь. А последние, как известно, влияют на характер сейсмических процессов (Рассказов и др., 2025).

## Литература

- Архив погоды в Мондах // Расписание погоды : сайт. URL: [https://rp5.ru/архив\\_погоды\\_в\\_мондах](https://rp5.ru/архив_погоды_в_мондах) (дата обращения: 16.11.2025).
- Архив погоды в Орлике // Расписание погоды : сайт. URL: [https://rp5.ru/архив\\_погоды\\_в\\_орлике](https://rp5.ru/архив_погоды_в_орлике) (дата обращения: 16.11.2025).
- Весенняя экспедиция клуба Портулан в район г. Мунку-Сардык в 2025 году (Республика Бурятия) / С.Н. Коваленко, А.Д. Китов, А.Д. Стом, Д.А. Максимова, И.В. Белкин, Н.В. Хамина, И.С. Даутов, О.А. Бархатова, С.В. Липкина // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 2. С. 223–253. DOI 10.26516/2541-9641.2025.2.223. EDN: UVLCIO
- Дроздова О.В. Динамика ледников массива Мунку-Сардык (Восточный Саян) // Записки кафедры географии естественно-географического факультета Иркутского государственного педагогического университета: Сб. ст. Вып. 3. Иркутск : Изд-во ГОУ ВПО «Иркут. гос. пед. ун-т», 2007. С. 43–52.
- Дроздова О.В., Коваленко С.Н. Геоморфологическое строение и современное оледенение района г. Мунку-Сардык (Восточный Саян, Бурятия) // Записки кафедры географии естественно-географического факультета Иркутского государственного педагогического университета: Сб. ст. Вып. 2. Иркутск : Изд-во ГОУ ВПО «Иркут. гос. пед. ун-т», 2006. С. 33–46.
- Иванов Е.Н. Выявление климато-экологических изменений через определение принадлежности морен ледника Азаровой (хр. Кодар) к стадиям гляциации малого ледникового периода // Восьмое Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу: материалы российской конференции. Томск : ТГУ. 2009. С. 61–63.
- Китов А.Д. Компьютерный анализ нивально-гляциальных образований Баргузинского хребта // Вестник кафедры географии Восточно-Сибирской государственной академии образования. 2013. № 1–2 (7). С. 24–28.
- Китов А.Д., Иванов Е.Н., Балязин И.В., Филатов Н.И. Третья гляциально-экологическая экспедиция на север Баргузинского хребта (Верховья рек Правая Фролиха и Тала Светлинская) // Вестник кафедры географии Восточно-Сибирской государственной академии образования. 2013. № 3–4 (6). С. 64–72.
- Китов А.Д., Коваленко С.Н., Плюснин В.М. Нивально-гляциальные образования Баргузинского хребта // Лед и снег. 2014. № 1. С. 48–60.
- Китов А.Д., Вишняков К.А., Иванов Е.Н., Филатов Н.И. Экспедиция 2014 года к ледникам пика Топографов // Вестник кафедры географии Восточно-Сибирской государственной академии образования. 2014. № 2–3 (10). С. 79–83, 88.
- Китов А.Д., Гергенов И.И., Иванов Е.Н. Двадцать третья летняя научно-исследовательская экспедиция клуба Портулан в район г. Мунку-Сардык // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 3. С. 224–242. DOI 10.26516/2541-9641.2024.3.224
- 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: FWOPEZ
- Китов А.Д., Иванов Е.Н. XXIV летняя экспедиция клуба Портулан и ИГ СО РАН в район г. Мунку-Сардык в 2025 году (Республика Бурятия) // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 3. С. 243–265. DOI 10.26516/2541-9641.2025.3.243. EDN: TVAGXG
- Коваленко С.Н. О границах и объемах современного оледенения района г. Мунку-Сардык (Восточный Саян) // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. гос. академии образования. 2014. № 1 (9). С. 19–31, последняя страница обложки.
- Коваленко С.Н., Китов А.Д., Дроздова О.В. Научные экспедиции клуба «Портулан» в район Мунку-Сардык (Восточный Саян) // Записки кафедры географии естественно-географического факультета Иркутского государственного педагогического университета: Сб. ст. Вып. 5. Иркутск : Изд-во ГОУ ВПО «Иркут. гос. пед. ун-т», 2009. С. 66–75.
- Коваленко С.Н., Китов А.Д. Современные ледники верховий р. Томпуда (Баргузинский хребет // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. гос. академии образования. 2011. № 2. С. 71–72, последняя страница обложки.
- Коваленко С.Н., Китов А.Д., Мункоева Э.В., Зацепина Н.А. «Каменный глетчер» Белого Иркутка // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. гос. академии образования. 2013. № 1–2 (7). С. 29–34, 1, 4 цветной вкладки.
- Коваленко С.Н., Китов А.Д., Софронов А.П. Вторая гляциально-ботаническая экспедиция на север Баргузинского хребта (Верховья рек Верхняя Акули и Светлая) // Вестник кафедры географии Восточно-Сибирской государственной академии образования. 2012. № 1–4 (6). С. 91–94, вторая и последняя страницы обложки.
- Коваленко С.Н., Мункоева Э.В. Типы горного рельефа и происхождение наледей в районе горы Мунку-Сардык // Вестник кафедры географии Восточно-Сибирской государственной академии образования. 2013. № 3–4. С. 1, 24–37, 96.
- Коваленко С.Н., Лихтарович Э.В. Геологическая деятельность наледей в районе горы Мунку-Сардык (Восточный Саян) // Геология и окружающая среда. 2021. Т. 1, № 1. С. 80–93. DOI 10.26516/2541-9641.2021.1.80
- Коваленко С.Н., Китов А.Д., Иванов Е.Н. Полевая учебная практика по геологии и физической географии в окрестностях г. Мунку-Сардык (Восточный Саян) // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 2. С. 158–173. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.158
- 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., Китов А.Д. Исследование ледников Мунку-Сардык С.П. Перетолчиним, начатое в начале XX века, и его современное продолжение // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 3. С. 77–86. DOI 10.26516/2541-9641.2023.3.77

Коваленко С.Н., Китов А.Д., Акулова Ю.В. Экспедиции клуба Портулан в район г. Мунку-Сардык в 2021 году // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 4. С. 233–251. DOI 10.26516/2541-9641.2023.4.233

Коваленко С.Н., Китов А.Д. Экспедиции клуба Портулан в район г. Мунку-Сардык в 2023 году // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 2. С. 179–212. DOI 10.26516/2541-9641.2024.2.179

Коваленко С.Н., Китов А.Д. Двадцать вторая весенняя экспедиция клуба Портулан в район г. Мунку-Сардык // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 3. С. 212–223. DOI 10.26516/2541-9641.2024.3.212

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Снопков С.В., Асламов И.А., Архипенко В.И., Ильясова А.М. Оперативный анализ растяжения и сжатия земной коры в Байкальской рифтовой системе по вариациям ОБП подземных вод в режиме реального времени: оценка соотношений силовых и сейсмических импульсов // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 3. С. 126–170. DOI 10.26516/2541-9641.2025.3.126. EDN: VTCVBH

Семенов В. Фотоотчет «Эскадрилья-2025» // Природа Байкала. Сайт. URL: <https://nature.baikal.ru/phtext.shtml?id=1738> (дата публикации: 19.05.2025).

Ivanov E.N., Plyusnin V.M., Kitov A.D., Kovalenko S.N., Balyazin I.V., Sofronov A.P. Inventory of nival-glacial geosystems in Lake Baikal area (East Siberia, Russia) // Environmental Earth Sciences. 2015. S. 1–14. DOI 10.1007/s12665-015-4446-z

## References

Drozdova O.V. Dynamics of glaciers of the Munku-Sardyk massif (Eastern Sayan) // Notes of the Department of Geography of the Natural and Geographical Faculty of the Irkutsk State Pedagogical University. st. Vyp. 3. Irkutsk: Izd-vo GOU VPO "Irkut. Gos. ped. University", 2007. P. 43–52.

Drozdova O.V., Kovalenko S.N. Geomorphological structure and modern glaciation of the district of Munku-Sardyk (Eastern Sayan, Buryatia) // Notes of the Department of Geography of the Natural and Geographical Faculty of the Irkutsk State Pedagogical University. st. Vyp. 2. Irkutsk: Izd-vo GOU VPO "Irkut. Gos. ped. University", 2006. P. 33–46.

Ivanov E.N. Identification of climatic and ecological changes through the determination of the belonging of the moraines of the Azarova glacier (Kodar Ridge) to the stages of glaciation of the Little Ice Age. Tomsk: TSU. 2009. P. 61–63.

Kitov A.D. Computer Analysis of Nival-Glacial Formations of the Barguzin Ridge // Bulletin of the

Department of Geography of the East Siberian State Academy of Education. 2013. No. 1–2 (7). P. 24–28.

Kitov A.D., Ivanov E.N., Balyazin I.V., Filatov N.I. Third glacial-ecological expedition to the north of the Barguzinsky ridge (Upper reaches of the rivers Pravaya Frolikha and Tala Svetlinskaya) // Bulletin of the Department of Geography of the East Siberian State Academy of Education. 2013. No. 3–4 (6). P. 64–72.

Kitov A.D., Kovalenko S.N., Plyusnin V.M. Nivalno-glacial'nye obrazovaniye Barguzinsky khrepta [Nival-glacial formations of the Barguzinsky Ridge]. 2014. No. P. 48–60.

Kitov A.D., Vishnyakov K.A., Ivanov E.N., Filatov N.I. Expedition of 2014 to the glaciers of Topografov Peak. 2014. No. 2–3 (10). P. 79–83, 88.

Ivanov E.N., Plyusnin V.M., Kitov A.D., Kovalenko S.N., Balyazin I.V., Sofronov A.P. Inventory of nival-glacial geosystems in Lake Baikal area (East Siberia, Russia) // Environmental Earth Sciences. 2015. S. 1–14. DOI 10.1007/s12665-015-4446-z

Kitov A.D., Gergenov I.I., Ivanov E.N. Twenty-third summer research expedition of the Portulan club to the area of Munku-Sardyk // Geology and environment. 2024. Vol. 4, No. 3. P. 224–242. DOI 10.26516/2541-9641.2024.3.224

Kitov A.D., Gergenov I.I., Ivanov E.N. Twenty-third summer research expedition of the Portulan Club to the Munku-Sardyk area // Geology and Environment. 2024. Vol. 4, No. 3. P. 224–242. DOI 10.26516/2541-9641.2024.3.224

Kinov A.D., Ivanov E.N. XXIV summer expedition of the club Portulan and IG SB RAS to the Munku-Sardyk area in 2025 (Republic of Buryatia) // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 3. P. 243–265. DOI 10.26516/2541-9641.2025.3.243. EDN: TVAGXG

Kitov A.D., Badminov P.S. Summer Research Expedition of the Portulan Club to the Peak of Topographers Area. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 217–241. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.217. EDN: FWOPEZ

Kovalenko S.N. On the borders and volumes of modern glaciation of the area of the city of Munku-Sardyk (Eastern Sayan) // Bulletin of the Department of Geography of Vost.-Sib. State Academy of Education. 2014. No. 1 (9). P. 19–31, last page of the cover.

Kovalenko S.N., Kitov A.D., Drozdova O.V. Scientific expeditions of the club "Portulan" to the area of Munku-Sardyk (Eastern Sayan) // Notes of the Department of Geography of the Natural and Geographical Faculty of the Irkutsk State Pedagogical University. st. Vyp. 5. Irkutsk: Izd-vo GOU VPO "Irkut. Gos. ped. University", 2009. P. 66–75.

Kovalenko S.N., Kitov A.D. Modern glaciers of the upper reaches of the Tompuda River (Barguzin Ridge) // Bulletin of the Department of Geography of the Eastern Siberian State Academy of Education. 2011. No. 2. P. 71–72, last page of the cover.

Kovalenko S.N., Kitov A.D., Sofronov A.P. The Second Glacial-Botanical Expedition to the North of the Barguzinsky Ridge (Upper Rivers Verkhnyaya Akuli and Svetlaya) // Bulletin of the Department of Geography of the East Siberian State Academy of Education. 2012. No. 1–4 (6). P. 91–94, second and last pages of the cover.

Kovalenko S.N., Kitov A.D., Munkoeva E.V., Zatssepina N.A. "Stone glacier" of Bely Irkut // Bulletin of the Department of Geography of Vost.-Sib. State Academy of Education. 2013. No. 1–2 (7). P. 29–34, 1, 4 color tabs.

Kovalenko S.N., Munkoeva E.V. Types of mountain relief and the origin of aufeis in the area of Mount Munku-Sardyk // Bulletin of the Department of Geography of the East Siberian State Academy of Education. 2013. No. 3–4. P. 1, 24–37, 96.

Kovalenko S.N. Likhtarovich E.V. Geological effects of aufeis in the vicinity of Munku-Sardyk mountain // Geology and Environment. 2021. Vol. 1, No. 1. P. 80–93. DOI 10.26516/2541-9641.2021.1.80

Kovalenko S.N., Kitov A.D., Ivanov E.N. Polevaya uchebnaya praktika po geologii i fizicheskoy geografii v okruzhnosti g. Munku-Sardyk (Vostochny Sayan) [Field training practice in geology and physical geography in the vicinity of the city of Munku-Sardyk (Eastern Sayan)]. 2022. Vol. 2, No. 2. P. 158–173. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.158

Kovalenko S.N., Gergenov I.I. On the question of the sources of loose material, the causes and places of origin of catastrophic mudflows in the area of the Munku-Sardyk mountain range // Geology and Environment. 2022. Vol. 2, No. 3. P. 120–132. DOI 10.26516/2541-9641.2022.3.120

Kovalenko S.N., Kitov A.D. Issledovanie lednikov Munku-Sardyk S.P. Peretolchinym, nachaloe v nachale XX veka, i ego sovremennoe prodolzhenie [Study of the glaciers of Munku-Sardyk by S.P. Peretolchin, begun at the beginning of the XX century, and its modern continuation]. 2023. Vol. 3, No. 3. P. 77–86. DOI 10.26516/2541-9641.2023.3.77

Kovalenko S.N., Kitov A.D., Akulova Yu.V. Portulan Club expedition to the Munku-Sardyk region in 2021 //

Geology and Environment. 2023. Vol. 3, No. 4. P. 233–251. DOI 10.26516/2541-9641.2023.4.233

Kovalenko S.N., Kitov A.D. Twenty-second spring expedition of the Portulan club to the area of Munku-Sardyk // Geology and environment. 2024. Vol. 4, No. 3. P. 212–223. DOI 10.26516/2541-9641.2024.3.212

Kovalenko S.N., Kitov A.D. Portulan Club expedition to the Munku-Sardyk region in 2023 // Geology and Environment. 2024. Vol. 4, No. 2. P. 179–212. DOI 10.26516/2541-9641.2024.2.179

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Snopkov S.V., Aslamov I.A., Arkhipenko V.I., Ilyasova A.M. Operational analysis of extension and compression of the Earth's crust in the Baikal rift system by variations of groundwater ORP in real time: assessment of the relationship between force and seismic impulses. 2025. Vol. 5, No. 3. P. 126–170. DOI 10.26516/2541-9641.2025.3.126. EDN: VTCVBH

Semenov V. Photo report "Eskadrilla-2025" // Nature of Baikal. Website. URL: <https://nature.baikal.ru/phtext.shtml?id=1738> (date of publication: 16.11.2025).

Spring expedition of the Portulan club to the area of the city of Munku-Sardyk in 2025 (Republic of Buryatia) / S.N. Kovalenko, A.D. Kitov, A.D. Stom, D.A. Maksimova, I.V. Belkin, N.V. Hamina, I.S. Dautov, O.A. Barkhatova, S.V. Lipkina // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 2. P. 223–253. DOI 10.26516/2541-9641.2025.2.223. EDN: UVLCIO

Weather archive for Mondy // Weather schedule : website. URL: [https://rp5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Мондах](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Мондах) (date of access: 16.11.2025).

Weather archive for Orlik // Weather schedule : website. URL: [https://rp5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Орлик](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Орлик) (date of access: 16.11.2025).

### **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,

электронный адрес: [igpug@mail.ru](mailto:igpug@mail.ru)

### **Kovalenko Sergey Nikolaevich,**

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,

Lenin st., 3, Irkutsk, 664025, Russia,

Irkutsk State University, Faculty of Geology,

Associate Professor of the Department of Dynamic Geology,

tel.: (3952)20-16-39,

email: [igpug@mail.ru](mailto:igpug@mail.ru)

## КОНФЕРЕНЦИИ

УДК 371.31; 551.1

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2025.4.218>

EDN: PRFYOV

### Геологические исследования школьников (по результатам региональной конференции «Байкальское кольцо – 2025»)

С.В. Снопков<sup>1,2</sup>, Л. Шубин<sup>3</sup>, В. Вострикова<sup>3</sup>, В. Чупрова<sup>3</sup>, Т. Жилкина<sup>4</sup>, Н.Г. Репина<sup>3</sup>,  
Г.Г. Веретенина<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

<sup>3</sup>«РЖД лицей № 11», г. Слюдянка, Россия

<sup>4</sup>Средняя общеобразовательная школа № 1, п. Михайловка, Россия

**Аннотация.** Одной из инноваций современного школьного образования является вовлечение учащихся в исследовательскую работу, в том числе в области геологии. В статье приведены краткие сведения о детских геологических исследованиях, представленных на региональной конференции «Байкальское кольцо».

**Ключевые слова:** геологические исследования учащихся, детские исследовательские экспедиции, конференции детских исследовательских работ

### Geological Research by Schoolchildren (Based on the Results of the Regional Conference "Baikal Ring – 2025")

S.V. Snopkov<sup>1,2</sup>, L. Shubin<sup>3</sup>, V. Vostrikova<sup>3</sup>, V. Chuprova<sup>3</sup>, T. Zhilkina<sup>4</sup>, N.G. Repina<sup>3</sup>,  
G.G. Veretenina<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Russia

<sup>3</sup>RIR Lyceum № 11, Slyudyanka city, Irkutsk Region, Russia

<sup>4</sup>Secondary school № 1, Mikhaylovka village, Irkutsk region, Russia

**Abstract.** One of the innovations in modern school education is engaging students in research, including in the field of geology. This article provides a summary of children's geological research presented at the regional conference "Baikal Ring".

**Keywords:** students' geological research, children's research expeditions, children's research conferences

\* Статья получена: 18.12.2025; исправлена: 21.12.2025; принята: 26.12.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Снопков С.В., Шубин Л., Вострикова В., Чупрова В., Жилкина Т., Репина Н.Г., Веретенина Г.Г. Геологические исследования школьников (по результатам региональной конференции «Байкальское кольцо – 2025») // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 4. С. 218–250. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.218. EDN: PRFYOV

Article received: 18.12.2025; corrected: 21.12.2025; accepted: 26.12.2025.

FOR CITATION: Snopkov S.V., Shubin L., Vostrikova V., Chuprova V., Zhilkina T., Repina N.G., Veretenina G.G. Geological research by schoolchildren (based on the results of the regional conference "Baikal Ring – 2025") // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 4. P. 218–250. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.218. EDN: PRFYOV

## Введение

10-12 декабря 2025 года в Иркутске прошла региональная конференция краеведческих исследовательских работ обучающихся «Байкальское кольцо». Конференция была организована Министерством образования Иркутской области и Центром дополнительного образования детей, при поддержке Молодежного центра Иркутского областного отделения Русского географического общества. На конференции были представлены результаты краеведческих исследований, выполненные учащимися образовательных учреждений Иркутской области. В рамках конференции работало 6 секций, в том числе, «География Прибайкалья». Экспертная комиссия секции рассмотрела 15 детских работ, связанных с исследованиями в области наук о Земле. Из всех работ 10 включали в себя изучение геологии Прибайкалья. Наиболее интересные работы приводятся в данной статье.

## История берегоукрепления Кругобайкальской железной дороги

Учащийся 9 класса «РЖД лицея № 11» (г. Слюдянка) Лев Шубин, занимаясь историей строительства Кругобайкальской железной дороги (КБЖД), обратил внимание на большое количество инженерных сооружений, которые защищают берег от волноприбойной деятельности Байкала. По объему эти защитные сооружения не уступают инженерным сооружениям, созданным при строительстве КБЖД. Кругобайкальский участок являлся завершающим звеном строительства Сибирской железнодорожной магистрали и стал самым сложным при строительстве Транссиба (рис. 1). КБЖД является уникальной в техническом отношении, так как на протяжении около 300 километров было построено более тысячи инженерных сооружений (Хобта, 2004).



**Рис. 1.** Карта южной части Байкала с указанием линии КБЖД. 1906 г. (Альбом, 1907).

**Fig. 1.** Map of the southern part of Lake Baikal with the Circum-Baikal Railway line indicated. 1906 (Album, 1907).

Целью исследования было изучение роли берегозащитных сооружений и истории их создания на КБЖД. Для того чтобы достичь цели автору необходимо было выяснить: роль берегозащитных инженерных сооружений, хронологию создания комплекса берегозащитных сооружений, типы применяемых инженерных сооружений. Для решения задач был проведен поиск информации по краеведческой и научной литературе и интернет-источникам, изучение технических документов службы пути ВСЖД, обследование берегозащитных инженерных сооружений.

Сооружение КБЖД происходило в сложных геоморфологических (сильно пересеченный рельеф со скальными участками) и горнотехнических (сложное геологическое строение) условиях, но с началом эксплуатации дороги проявились и другие осложняющие геологические факторы.

Ещё до начала строительства дороги ряд изыскателей указывали на возможные опасные факторы, которые впоследствии могут проявиться. Один из изыскателей варианта железной дороги по южной оконечности Байкала инженер путей сообщения Ф. Докс писал, что «постройка железной дороги по береговой линии Байкала вызовет неодолимые затруднения» и потребует огромных затрат (Хобта, 2004).

Основными из таких «неодолимых затруднений» КБЖД стали обвалы на крутых склонах; наводнения и сели; эрозионная деятельность волн Байкала.

Исследователь истории строительства и эксплуатации КБЖД А.В. Хобта указывает, что: «На КБЖД только за период 1930–1990 гг. произошло свыше 1200 обвалов. Сильнейший обвал был зафиксирован в сентябре 1948 г. на 104 км: обрушилось около 20 тыс. куб. м породы и грунта, а в порядке восстановления был сделан постоянный обход железнодорожного пути. Тогда движение поездов было прервано на четверо суток. ... В последние десятилетия наибольший перерыв в движении поездов из-за обвалов был в 1982 г. В тот год здесь произошел обвал скалы объемом 900 куб. м. ... На этой трассе (западный участок КЖД) общая площадь скальных обнажений превышает 4.2 млн кв. м.

Протяженность обвальных мест составляет 51 км, из которых 33 км являются угрожаемыми, а 7,5 км считаются особо угрожаемыми. В ежегодных технических отчетах отмечалось, что скальные обвалы — основная и трудноустраняемая угроза безопасности движения поездов. ... Когда участок Байкал — Култук был магистральным, в борьбе со скальными обвалами участвовало 8-9 бригад скалолазов по 20-25 человек в каждой, которые входили в состав путевой строительной конторы (ныне ПМС-224). Кроме того, имелось 25 обходчиков скально-обвальных мест, а при неблагоприятных метеорологических условиях выставлялось до 70 обходчиков. Скалолазы производили профилактическую срезку откосов со средним ежегодным объемом по 100 тыс. куб. м.» (Хобта, 2005).

Серьезный ущерб при эксплуатации кругобайкальского участка наносили паводки и сели. Они в разные годы могли останавливать движение поездов на всей Транссибирской магистрали на несколько суток. «Уже в период строительства этого участка насчитывалось 104 селеактивные зоны. При эксплуатации КБЖД катастрофические селевые потоки произошли в 1915, 1927, 1932, 1934, 1938, 1959, 1960, 1962, 1965, 1971 гг. ... Наиболее сильные разрушения произошли в 1971 г. ... тогда было зафиксировано около 300 селей ... было смыто 40 тыс. куб. м насыпи в 29 местах, разрушены шесть малых мостов и порталы двух тоннелей, полностью забиты отверстия у 21 водопропускного сооружения. Общий объем грунта, вынесенного на путь в 117 местах, составил 69 тыс. куб. м. Движение поездов было прервано на 28 суток» — пишет А.В. Хобта (Хобта, 2005).

Из-за значительной пересеченности местности и обилия водотоков на КБЖД было построено 485 различных искусственных сооружений: труб, лотков, виадуков и мостов. Общая сумма водопропускных пролетов всех сооружений составляет 1698.7 саж., что на 1 версту дороги дает 6.97 саж. отверстий для пропуска воды (Хобта, 2005).

Если первые два фактора исследованы и описаны достаточно подробно, то третий —

волноприбойная деятельность – указывается лишь тезисно: *«Следует иметь в виду и разрушительное воздействие на КБЖД самого Байкала. Уровень воды в озере постоянно меняется, в зависимости от сезона перепады составляют 2 м. Осенью бывают волны высотой до 3 м. Зимой образуются ледяные нагромождения и торосы, весной — надвиги льда. В результате происходит разрушение берегового участка железнодорожного полотна, создается огромная опасность для движения поездов»* (Хобта, 2005).

Причем воздействие этих факторов на разных участках КБЖД оказалось неодинаковым. По воздействию опасных факторов всю линию КБЖД можно разделить на три участка: западный участок (ст. Байкал – ст. Култук), больше всего страдающий от обвалов и в меньшей степени от водно-селевых потоков и волн Байкала; юго-восточный участок (ст. Слюдянка – ст. Мурино), где периодически происходят разрушительные сели и реже обвалы, а волны достигают 3-х метров; юго-восточный участок (ст. Выдрина – ст. Мысовая), где обвалы и селевые потоки явления редкие, а вот волновая эрозия создавала большие проблемы для сохранности полотна дороги, так как наибольшая высота волн в период максимальных штормов достигает 4-5 м (Байкал, 1993, с. 75).

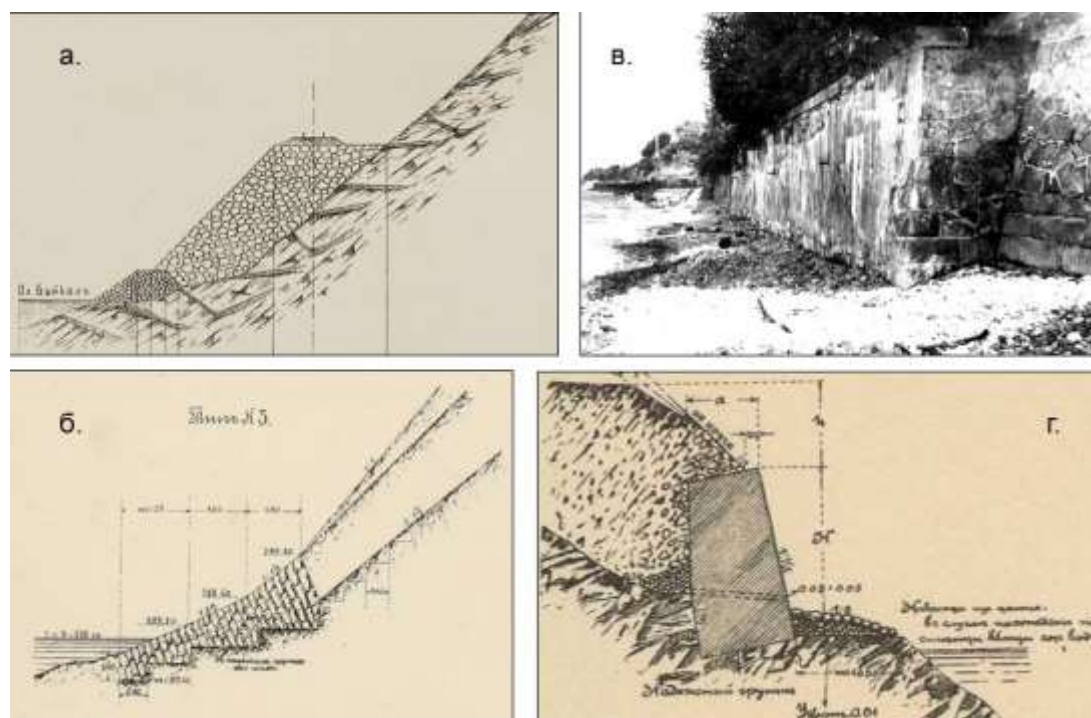
При проектировании строительства дороги инженеры путей сообщения, несомненно, учитывали угрозы разрушения насыпи волнами Байкала. Для предохранения пути от всплесков волн полотно дороги было спроектировано на высоте не менее 2.5 саженей (5.3 м) над уровнем озера (Отчет..., 1908). Но в первые же годы эксплуатации дороги оказалось, что если на западном участке КБЖД максимальная высота волн не превышала 2 метров, то на восточном могла достигать 5 м, то есть практически до полотна дороги! Особенно эта ситуация осложнилась при подъеме уровня воды (более чем на метр) в озере после строительства ГЭС и заполнения Иркутского водохранилища.

Берегоукрепительные сооружения на КБЖД возводились со времени её строительства и до настоящего времени! На уровень 2004 г. инженерными сооружениями укреплено почти 80 п. км берега, в том числе на участке Байкал – Култук — 20.6 п. км и на участке Слюдянка II – Посольская – 56.9 п. км (История..., 2003). Учитывая то, что протяженность дороги от ст. Байкал до ст. Култук составляет 84 км, а от ст. Слюдянка II до ст. Посольская – 218 км, то получается, что на западном участке 25 % дороги пришлось защищать от волновой эрозии, а на восточном – 26 %! Эти сооружения представлены волноотбойными стенами, бермами, волноломами и бунами (волнорезами).

История создания берегозащитных сооружений на КБЖД делится на несколько этапов.

1. Строительство КБЖД. Уже во время строительства дороги откосы полотна, где того требовали местные условия, укреплялись «дерновкою, обсевкою, мощением камнем в один или в два слоя» (История..., 2003). По разливам рек и по берегу Байкала применялись укрепления слоем камня в плетневых клетках, каменными отсыпками и призмами. В местах, где вследствие значительной крутизны склона местности или близости Байкала нельзя было устроить откосы насыпей на естественном грунте, они заменялись каменными призмами, отсыпками и подпорными стенками. Такими же подпорными стенками укреплялись крутые откосы выемок в слабых и разрушенных грунтах. В основном эти волнозащитные сооружения создавались во время строительства второго пути КБЖД (1911–1915 гг.). На рис. 2 и 3 показаны примеры таких берегозащитных укреплений.

Со времён постройки КБЖД до 30-х годов XX века железнодорожный путь и инженерные сооружения, рассчитанные на гидрологический режим озера начала века, позволяли безопасно эксплуатировать дорогу.



**Рис. 2.** Примеры берегозащитных сооружений, построенных в период 1902–1915 гг. (а, б – бермы из камня в основании склона; в. – каменные и г. – бетонные волноотбойные стенки) (Альбом, 1907).

**Fig. 2.** Examples of coastal protection structures built in the period 1902–1915 (а., б. – stone berms at the base of the slope; в. – stone and г. – concrete sea walls) (Album, 1907).

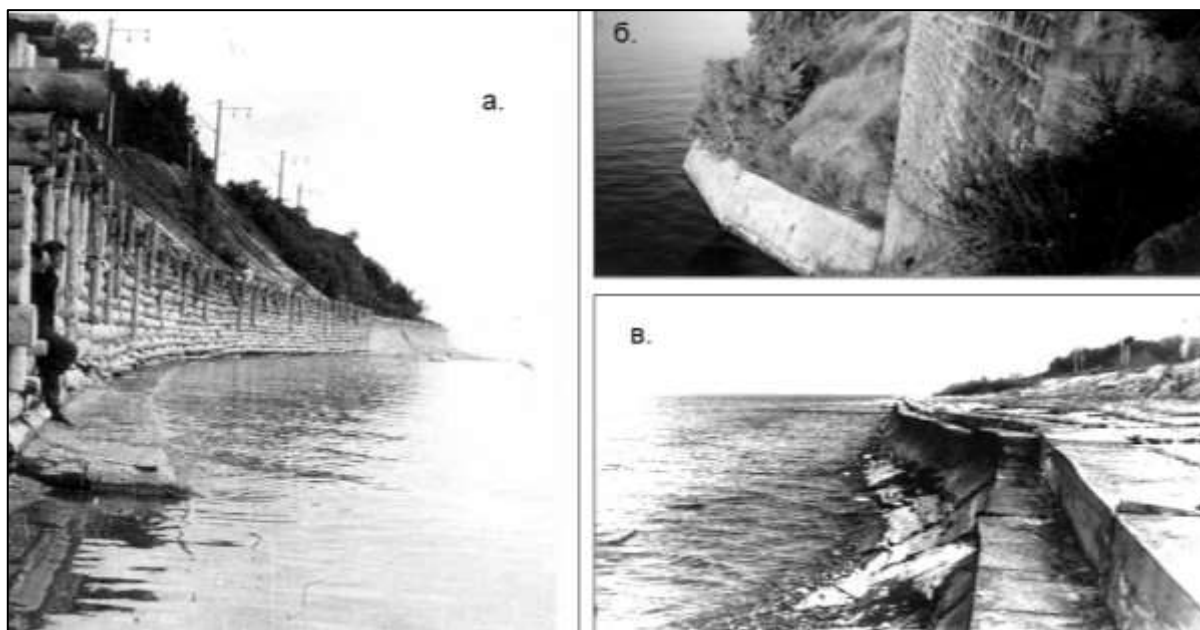


**Рис. 3.** Панорамный вид строительных работ вблизи ст. Мысовая (19 июня 1903 г.). Для предохранения дороги от волн Байкала берег укреплен камнями в плетневых клетках и каменными отсыпками в виде волнорезов (История..., 2003).

**Fig. 3.** A panoramic view of construction work near Mysovaya Station (June 19, 1903). To protect the road from Lake Baikal's waves, the shore was reinforced with stones in wattle cages and rock fill in the form of breakwaters (History..., 2003).

2. Второй этап — 1930-е — начало 1950-х годов. В 1932 г. уровень озера Байкал поднялся до отметки почти 456.0 м (по Балтийской системе высот). Размывы берега волнами озера стали достигать основания

насыпи, что приводило к деформации земляного полотна. Восточно-Сибирская железная дорога была вынуждена начать строить берегозащитные сооружения (рис. 4).



**Рис. 4.** Примеры ряжевых (а), каменных (б) и бетонных (в) сооружений, построенных в 1930–1950-е годы (История..., 2003).

**Fig. 4.** Examples of crib (а), stone (б) and concrete (в) structures built in the 1930s–1950s (History..., 2003).

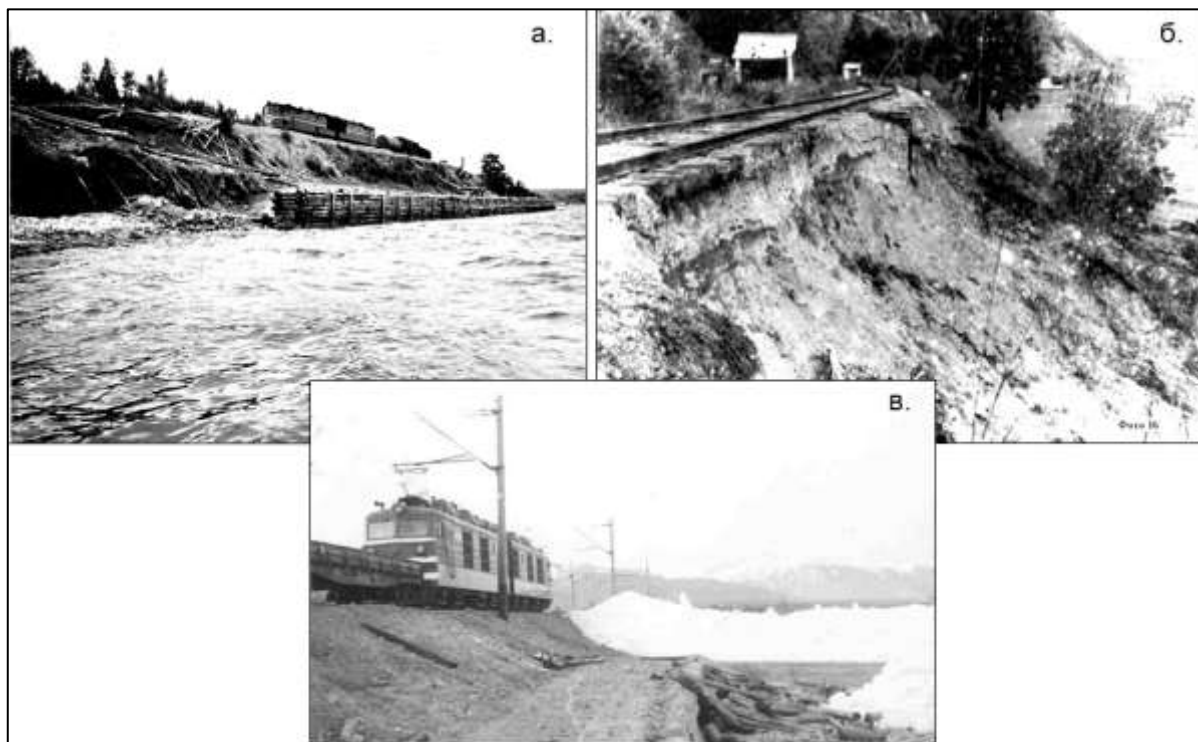
Только в 1932 г. на берегу озера было построено 5.2 км каменных стен на бетонном растворе и 8.7 км из камня с кладкой насухо. К 1940 году было построено берегоукрепительных сооружений общей протяженностью 17.7 км, из них 12.8 км – волноотбойные стены на деревянных ряжах. К 1951 году было ещё построено 42.2 км берегоукрепительных сооружений, из них 22.7 км – на участке Байкал-Култук, и 19,5 км – Слюдянка-Посольск (14.5 км – с деревянными ряжами; 23.6 км — каменных и 2.1 км бетонных сооружений) (История..., 2003).

3. Третий этап приходится на вторую половину 50-70-х годов XX века. Поднятие уровня Байкала в связи со строительством Иркутской ГЭС (1957 г.) сделала проблему защиты берега от волновой эрозии намного острее.

В 1962 году уровень Байкала превысил отметку нормального подпорного уровня на 32 см. В результате в осенний штормовой

период в 10 местах на участке ст. Снежная – ст. Мысовая размыло основание и часть насыпи; смыло 6 столбов связи, в одном месте обрушился в озеро откос высотой 12 м. ВСЖД вынуждена была ограничивать скорость движения до 10-25 км/час, и на участке 5485 – 5486 км в аварийном порядке сооружать новую насыпь, дальше отстоящую от Байкала. В следующем году (1963 г.) ситуация повторилась – уровень озера превысил нормальный на 29 см, из-за чего вновь пострадала насыпь дороги. Движение поездов на ряде участков было ограничено до 5-25 км/час, и даже останавливалось на 6 часов. В 1964 году уровень превысил нормальный подпорный уровень на 37 см. В 6 местах произошли размывы насыпи и была разрушена волноотбойная стенка. Кроме размыва насыпи дороги происходили интенсивные разрушения берегозащитных сооружений (в первую очередь, деревянных ряжей, заполненных камнем), появлялись новые

неспрогнозированные места размывов, весенний надвиг льда на озере стал достигать полотна (История..., 2003) (рис. 5).



**Рис. 5.** Примеры разрушения части насыпи в осенние шторма 1962 года (а, б) и надвиг льда весной 1963 г. (в) (История..., 2003).

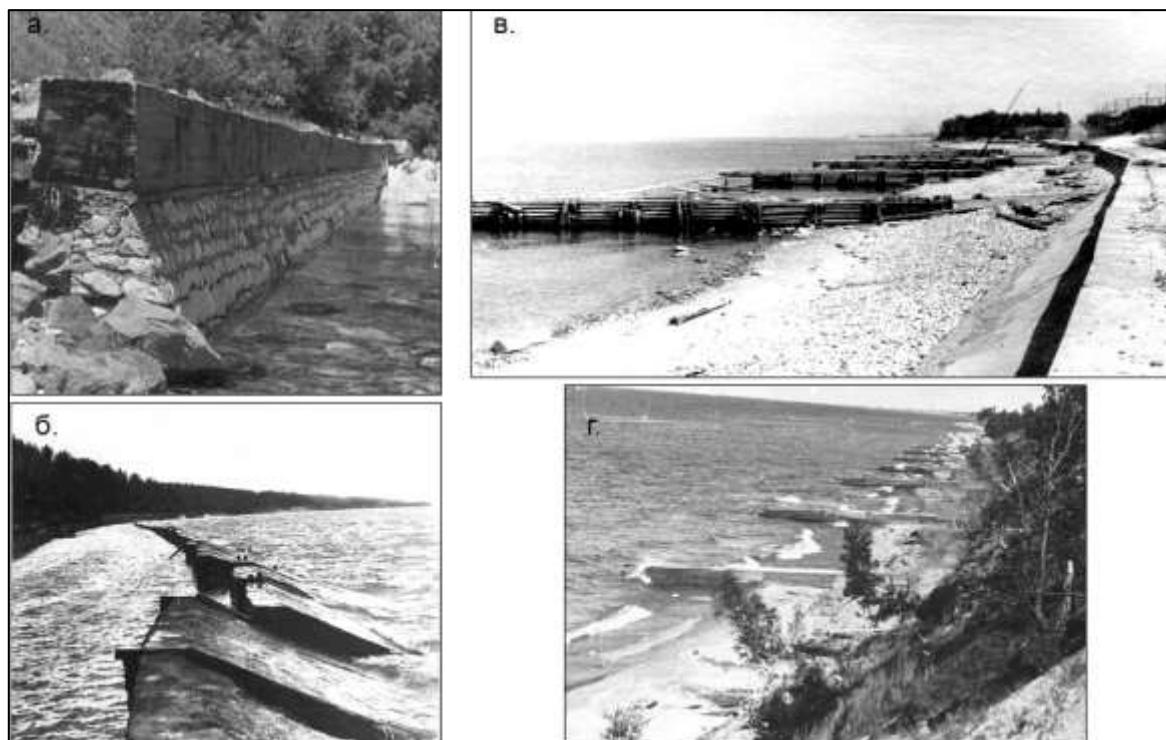
**Fig. 5.** Examples of destruction of part of the embankment during the autumn storms of 1962 (a, б) and the ice advance in the spring of 1963 (в) (History..., 2003).

Все это потребовало принятия срочных мер по защите дороги. В эти годы шел ремонт и усовершенствование существующих сооружений, разработка и строительство новых волногасящих сооружений из железобетонных блоков.

В 1964 году специалистами «Ленгипротранс» был разработан проект берегоукрепления на участках Байкал-Слюдянка и Танхой-Посольская КБЖД. Проект учитывал ожидаемое повышение уровня озера на 0.5 м, а также аварийное состояние ряда защитных сооружений от абразии волн Байкала. Особенностью этого периода стало

строительство новых инженерных сооружений: составных волноотбойных стен, волноломов и волнорезов (бун) (рис. 13).

Всего за период 1953–1972 гг. было построено волноотбойных бетонных стен — 56.1 км, облицовочных бетонных стен — 3.9 км; ряжевых берм — 2.7 км; ряжевых бун (волнорезов) — 10.3 км; железобетонных шатровых волноломов — 0.7 км; железобетонных бун — 70 шт. В том числе, только в 1964 году было построено волноотбойных стен — 30.8 км; облицовочных стен — 3.9 км; ряжевых берм — 1.327 км; ряжевых волнорезов — 2.9 км (История..., 2003).



**Рис. 6** Примеры волноотбойной стенки из камня, наращенная железобетонными блоками (а), бетонных водоломов (б), ряжевых (в) и бетонных бун, построенных в 1960-1970-е годы (История..., 2003).

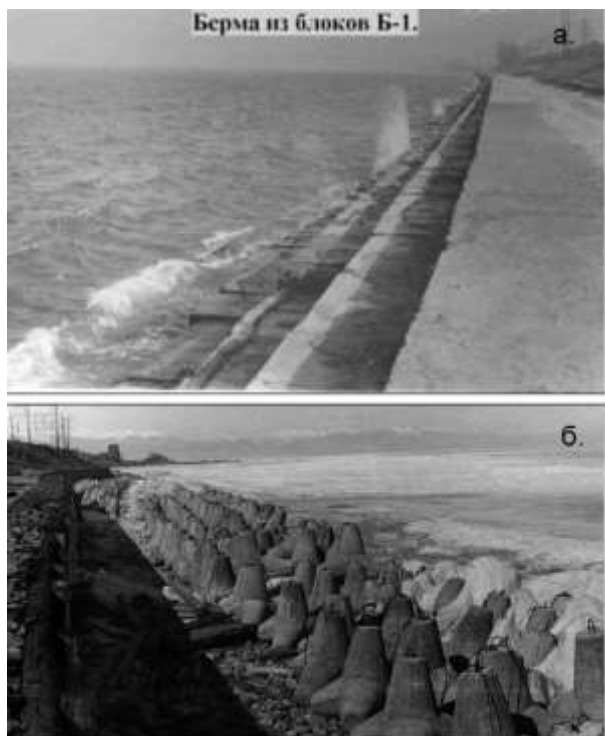
**Fig. 6.** Examples of a seawall made of stone reinforced with concrete blocks (a), concrete breakwaters (б), cribs (в) and concrete groynes, built in the 1960s and 1970s (History..., 2003).

После катастрофического паводка 1971 года Постановлением ГосСтроя СССР № 167 от 6.10.71 г. была создана межведомственная комиссия с целью выявления возможностей защиты от разрушительных явлений. В 1974 г. было предложено осуществлять комплексную берегозащиту, включающую волноотбойные стенки, волноломы, бермы из тетраподов и волногасящие пляжи.

В этом же году институтом «Ленгипротранс» была разработана генеральная схема комплекса укрепляющих мероприятий по охране дорожного полотна железных и шоссейных дорог на Кругобайкальском участке Восточно-Сибирской железной дороги. Проект предусматривал использование таких конструкций, как затопленные волнорезы, бетонные стены, стояки различных конструкций (затопленные волнорезы разбивают и гасят большие волны, бетонные стены защищают побережье и склоны земляного полотна от эрозии, откосы позволяют накапливать пляжные отложения непосредственно в

межконтинентальном пространстве) (Генеральная..., 1974).

В 1975 году техническим советом ВСЖД схема комплексной защиты была одобрена, но Министерство путей сообщения её не утвердило. Поэтому комплексная берегозащита осталась только в планах, а ВСЖД продолжало «латать дыры» в инженерных сооружениях. С 1972 по 1984 год было построено бетонных волноотбойных стен — 2.8 км (из 12 необходимых); берм из бетонных блоков перед изношенными стенами — 9.5 км, в том числе 1.5 км из тетраподов (из 29.3 км необходимых) (История..., 2003) (рис. 7).



**Рис. 7** Примеры волногасящих берм из бетонных блоков (а) и тетраподов (б), построенных в 1970-е годы (История..., 2003)

**Fig. 7.** Examples of wave-damming berms made of concrete blocks (a) and tetrapods (b), built in the 1970s (History..., 2003)

4) Следующий этап — 1980-е — начало 2000-х годов — связан с ужесточением экологических требований к строительству сооружений на берегах Байкала. Ещё в конце 1970-х годов ВСЖД начала применять волногасящие бермы из горной массы определенного гранулометрического состава, распределенного по профилю. Первый опыт устройства берм из сортированной горной массы был получен во время строительства Байкальского участка БАМа (История..., 2003).

На основании Указания начальника ВСЖД №280400/6 от 05.02.90 г. «О неотложных мерах экологического оздоровления дороги» был разработан «Экологический паспорт берегозащиты Кругобайкальского участка ВСЖД». Согласно этому документу ВСЖД отказывалась от строительства бетонных сооружений из-за отрицательного влияния бетона на биологические процессы в прибрежной зоне Байкала и переходила на создание каменной отсыпки.

Протяженность всего комплекса волногасящих берм на КБЖД из сортированной горной массы составила 78 км. Стоимость 1 п. м. нового берегоукрепления оказалась на 30-40 % дешевле всех предыдущих вариантов. Однако опыт эксплуатации каменных берм показал, что требуется ежегодная досыпка горной массой в объеме 4 %, то есть для всего комплекса — 300–400 тыс. куб. м в год (История..., 2003).

Для эксплуатационного содержания волногасящих берм требовалось 200 думпкаров (грузовых вагонов-самосвалов, предназначенных для перевозки сыпучих грузов), 20 автосамосвалов, 8 бульдозеров, 4 экскаватора, 4 автокрана и 2 трейлера. При этом планировалось использовать существующие карьеры строительного камня в Ангасолке и Слюдянке, плюс открыть новый карьер в Мишихе. Кроме того, предполагалась прокладка технологического железнодорожного пути по верхней части берм для подъезда думпкарных вертушек. К сожалению, и этот проект был не реализован. К 2004 году из 784 км волногасящих берм было сделано всего 12.9 км, отсыпано 1.2 млн м<sup>3</sup> скальной массы из 7.9 млн м<sup>3</sup> необходимых (История..., 2003).

Современный берегозащитный комплекс КБЖД включает:

- волноотбойные стены (1956–1986 гг.) — 28.984 п. км;
- облицовочные стены (1958 г.) — 300 п. м;
- буны (1963–1977 гг.) — 73 шт.;
- волноломы перед волноотбойными стенами (1964–1974 гг.) — 7854 п. м;
- бермы из тетраподов перед волноотбойными стенами (1967–1979 гг.) — 1697 п. м;
- бермы из бетонных блоков (1967–1992 гг.) — 12 745 п. м;
- бермы из горной массы (1986–2003 гг.) — 14900 п. м.

Большинство из берегозащитных сооружений за время своей эксплуатации сильно обветшали. На участке Байкал–Култук из построенных 20.6 км волноотбойных стен у 15.5 км вышел срок службы (75 %). На участке Слюдянка II – Посольская, из 56.932 п. км берегоукрепительных сооружений, у 38.177 — истёк срок службы (67 %). (История..., 2003)

В настоящее время ситуация продолжает ухудшаться, так как в период с 2012 по 2018 год на Байкале наблюдалось маловодие, и эрозийная деятельность волн заметно снизилась. Соответственно уменьшилась вероятность аварийных ситуаций. Однако, начиная с 2019 года, уровень воды в озере резко поднялся и достиг отметок, на 25-30 см превышающих уровень Байкала в 1995-2010 гг., что вновь обострило проблемы защиты железной дороги от волновой эрозии.

### **Влияние геологии юго-западного берега Байкала на сооружение и эксплуатацию КБЖД**

Учащаяся 6 класса «РЖД лица № 11» (г. Слюдянка) Виктория Вострикова в июле 2025 г. приняла участие в детской краеведческой экспедиции, организованной музеем истории ВСЖД ОАО РЖД, в которой участвовали специалисты «Заповедного Прибайкалья», Байкальского музея и геологического факультета ИГУ. В рамках этой экспедиции были проведены исследования, в том числе геологические, участка Кругобайкальской железной дороги в районе станции Маритуй. Автор исследования задалась вопросом, почему горные породы полосы КБЖД, с одной стороны, стали главным материалом для её сооружения, а с другой — главной проблемой при эксплуатации дороги.

Для поиска ответа на вопрос автор решила выяснить, какими горными породами представлен геологический разрез зоны КБЖД; определить, какие горные породы применяли для строительства инженерных сооружений; в чем заключаются причины образования многочисленных обвалов. Для решения задач был проведен поиск информации по краеведческой и научной литературе и интернет-источникам, изучение архивных документов строительства КБЖД, обследование скал и инженерных сооружений КБЖД во время краеведческой экспедиции в июле 2025 г. Во время работы автор обращалась за консультациями к кандидату исторических наук, исследователю истории строительства КБЖД А.В. Хобте и кандидату геолого-минералогических наук, доценту геологического факультета ИГУ С.В. Снопкову.

Кругобайкальский участок сооружался на последнем этапе строительства Великой Сибирской железнодорожной магистрали, когда рельсы подошли к берегу Байкала и с востока, и с запада. В течение нескольких лет проводились изыскания вариантов дороги вокруг озера. В 1901 году на основании исследований горных инженеров, экономических и технических изысканий было выбрано направление строительства Сибирской железной дороги по берегу Байкала от истока Ангары до села Култук (Хобта, 2004, с. 30).

К весне 1902 г. Министерство путей сообщения представило в Комитет Сибирской железной дороги смету на строительство КБЖД от станции Байкал до станции Мысовая, которая составила почти 52,524 млн руб. Высокая стоимость участка дороги была вызвана особыми условиями рельефа и сложностью строительства. Смета была утверждена к исполнению императором Николаем II 13 июня 1902 г. Непосредственно строительство дороги по разрешению императора было начато на несколько месяцев раньше (Хобта, 2004, с. 35).

Строительство первого пути КБЖД шло с 1902 по 1904 г. В постоянную эксплуатацию восточный участок Танхой – Слюдянка был сдан 15 марта 1905 года, а западный участок Слюдянка – Байкал – 16 октября того же года (Хобта, 2004, с. 48). Сооружение второго пути проводилось в 1911–1915 гг. При строительстве второго пути поменялся строительный материал, из которого создавали инженерные сооружения. Камень и металл во многих случаях заменили железобетоном (Хобта, 2004, с. 56).

По мнению А.В. Хобты, сооружение КБЖД является самым грандиозным строительством в России в начале XX века (Хобта, 2004, с. 57). С 1902 по 1915 гг. только на западном участке КБЖД было построено 750 искусственных сооружений: 40 тоннелей общей длиной более 9 километров (38 тоннелей во время строительства первого пути и два тоннеля во время прокладки второго пути; один тоннель не сохранился); 19 галерей; каменных труб – 6 шт.; каменных лотков – 3 шт.; каменных виадуков – 19 шт.; мостов с железным пролетным строением – 226 шт.; мостов и труб железобетонных – 208 шт.;

подпорных стенок – 229 шт. (Хобта, 2005). Из них 540 инженерных сооружений построены

с применением каменных глыб и тесаных блоков из местных горных пород (рис. 8).



**Рис. 8.** Портал галереи, сложенный из тесаных каменных блоков и нетесаных глыб (циклопическая кладка). Фото автора, 2025 г.

**Fig. 8.** The gallery portal, constructed of hewn and unhewn stone blocks (Cyclopean masonry). Photo by the author, 2025.

В геологическом отношении западный участок КБЖД от станции Байкал до Култука представляет собой поднятый край Сибирской платформы – Шарыжалгайский выступ. Здесь на участке протяженностью более 80 км на поверхность выходят древнейшие (архейские) горные породы фундамента платформы. По современным научным представлениям возраст этих пород составляет 2.9-3.6 млрд лет (Байкаловедение, 2012, с. 306).

Шарыжалгайский комплекс сложен метаморфическими породами, образовавшимися в недрах земной коры при очень высоком давлении и температуре. Основными породами комплекса являются мигматиты и гранитогнейсы. В меньшей объеме встречаются пироксениты, амфиболиты, кристаллические сланцы, кальцифиры и мраморы (Грудинин, 2011, с. 22). При строительстве инженерных сооружений использовались далеко не все горные породы, представленные на КБЖД, а только наиболее прочные разновидности.

Одной из важных характеристик горной породы при использовании её при строительстве является прочность. Прочность горной

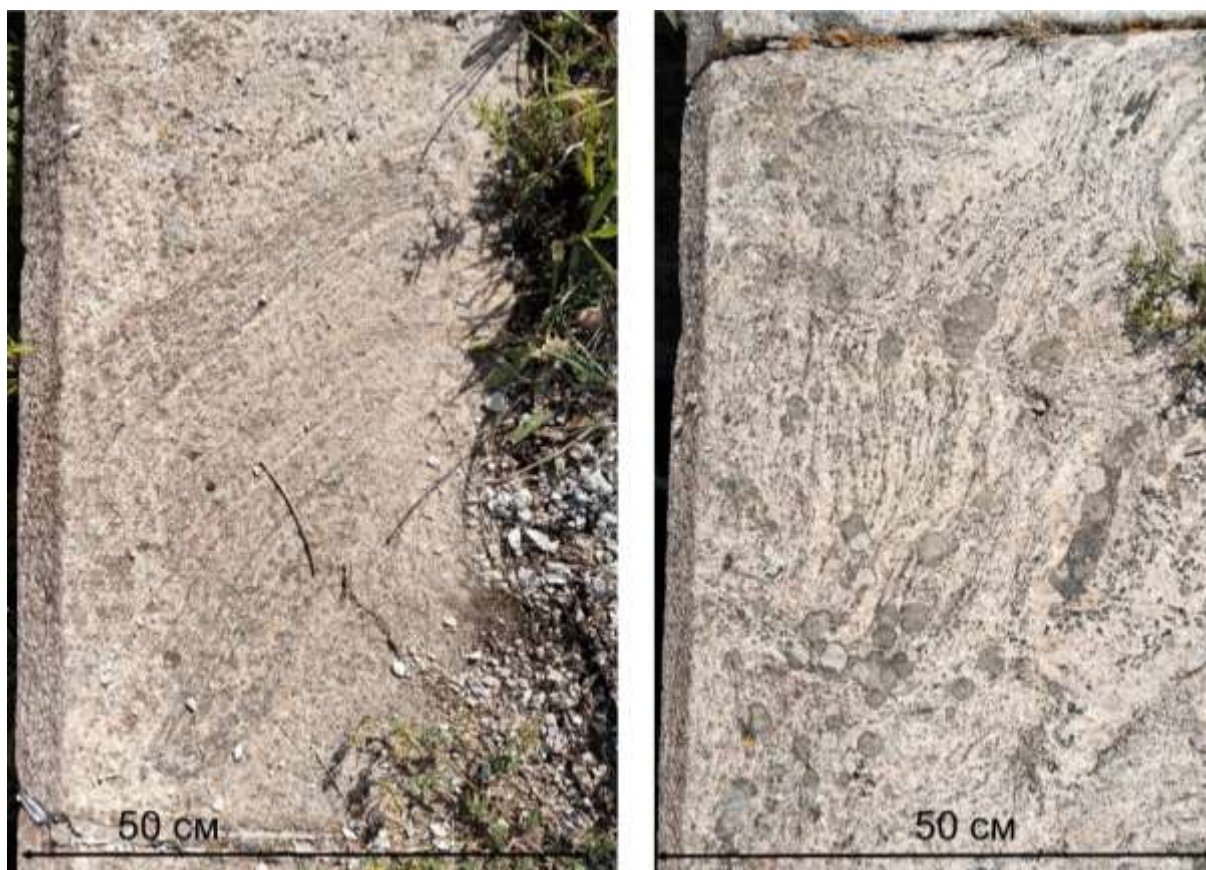
породы зависит от следующих факторов: твердости породообразующих минералов; плотности кристаллической структуры (чем меньше зерна минералов и плотнее их сцепление в породе, тем она прочнее); наличия трещин и пустот (чем меньше в породе трещин и пор, тем она прочнее); устойчивости к химическим и физическим воздействиям. К породам высокой прочности относятся ряд магматических (мелкозернистые гранит и диорит) и метаморфических (кварцит, мигматит) горных пород (Ананьев, 2005, с. 33–45).

Наиболее прочными породами из шарыжалгайского комплекса являются мигматиты и гранитогнейсы. Мигматитами называется горная порода, образующаяся при высокотемпературном метаморфизме, когда происходит частичное выплавление некоторых минералов. В результате такого частичного переплавления в породе образуются переслаивающиеся прослои. Первые из них — это более древний и сохранившийся субстрат метаморфической породы, второй — новообразованный жильный материал породы, представленный кварцем, гранитом или

пегматитом. Гранитогнейс – это метаморфическая порода, имеющая гнейсовый облик и гранитный минеральный состав.

При обследовании трех тоннелей, одного моста и двух подпорных стенок на участке

Киркидай – Маритуй автор обнаружила, что каменные блоки, из которых построены инженерные сооружения, представлены только гранитогнейсами и мигматитами (рис. 9, 10).



**Рис. 9.** Блоки из гранитогнейса. Мост через реку Маритуйка. Фото автора, 2025 г.

**Fig. 9.** Granite gneiss blocks. Bridge over the Marituyka River. Photo by the author, 2025.

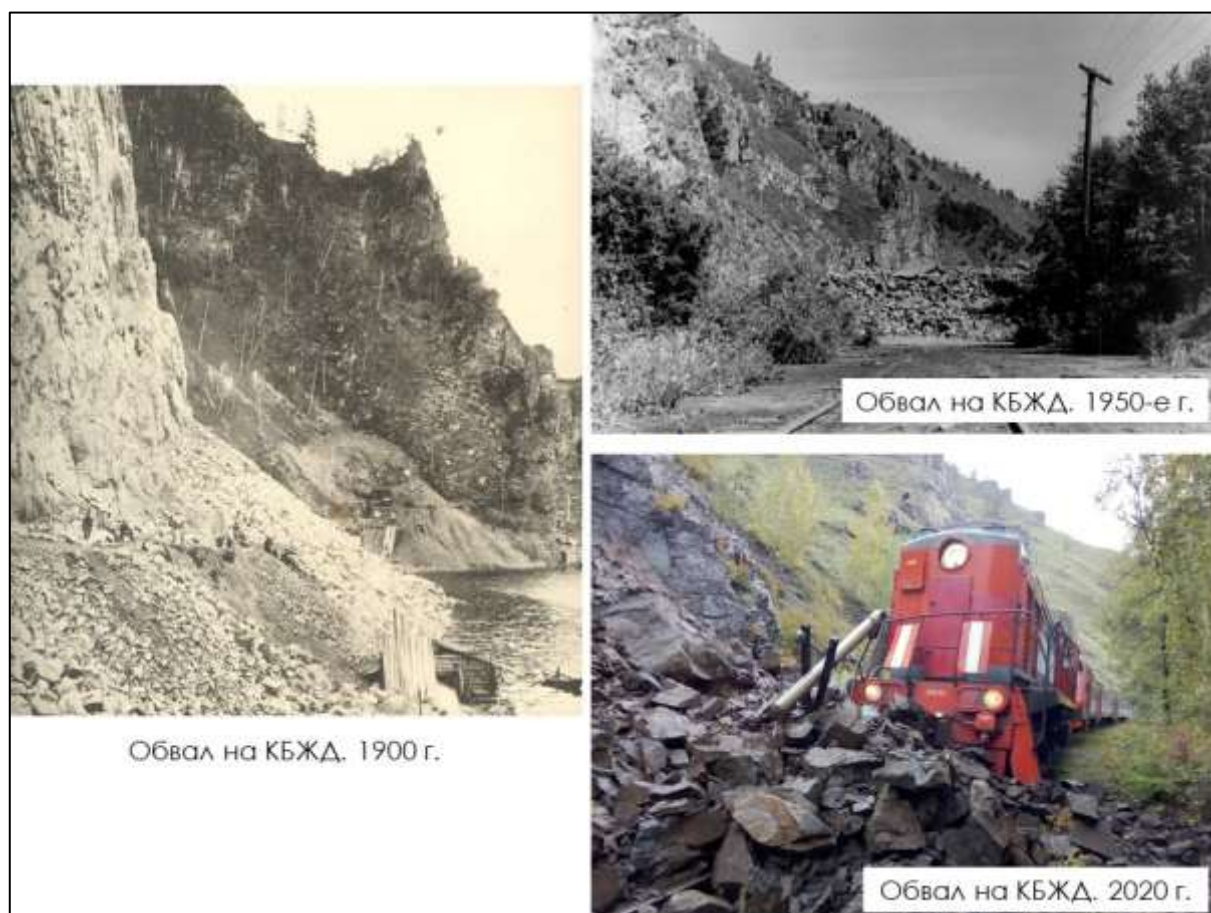




**Рис. 10.** Подпорная стенка на станции Маритуй (сверху), сложенная из тесанных блоков мигматита (снизу). Фото автора, 2025 г.

**Fig. 10.** Retaining wall at the Maritui station (top), made of hewn migmatite blocks (bottom). Photo by the author, 2025.

Обвалы склонов на КБЖД начались еще во время её строительства и продолжаются до настоящего времени (рис. 11).



**Рис. 11.** Обвалы на КБЖД.

**Fig. 11.** Landslides on the Circum-Baikal Railway.

Наибольшее количество обвалов происходило при сооружении тоннелей и выработке железнодорожных выемок. По сообщению А.В. Хобта, практически не было ни одного тоннеля, где бы ни происходили обвалы. Объем обрушившейся при обвале породы мог достигать 3–4 тыс. м<sup>3</sup>. Уже в период временной эксплуатации дороги частые обвалы периодически загромождали путь и вызывали перерывы в движении до семи дней (Хобта, 2005, с. 146). По данным А.В. Хобта, во второй половине XX века на западном участке КБЖД объем скального грунта, который пришлось убирать после обвалов и осыпей, оказался равным объему скальных работ при сооружении дороги!

Исследователи истории сооружения КБЖД приходят к выводу, что горные инженеры – изыскатели КБЖД – переоценили прочность скал на этом участке. Руководитель геологического изучения района знаменитый геолог И.В. Мушкетов считал, что *«на байкальском направлении развиты только прочные породы архейского возраста, значит склоны будут устойчивыми. Лишь отдельные места (3–4, длиной не более 1 км) могут вызвать опасения, но их легко сделать безопасными»*. Мушкетов писал, что несмотря на то, что по первому впечатлению строительство дороги кажется невозможным, но сравнивая её с существующими альпийскими дорогами, можно утверждать, что КБЖД будет «несравненно безопаснее» (Хобта, 2005, с. 28). Но уже через несколько лет начальник строительства КБЖД К.Н. Симберг писал: *«Чрезвычайно неустойчивая Кругобайкальская железная дорога не имеет себе подобных в Европе ...»* (Хобта, 2005, с. 50).

Еще до сдачи в эксплуатацию дороги Управление строительством обратиться за помощью к геологу А.В. Львову с просьбой разобраться в причинах обвалов. В результате многолетних наблюдений за склонами Львов пришел к выводу, что: *«... заключения профессора Мушкетова оказались ошибочными, потому что Мушкетов был введен в заблуждение заведующими измерительными партиями, не пожелавшим считаться с вопросом о происхождении озера Байкал ...»*. Обнаруженные Львовым высокая

трещиноватость, многочисленные сдвиги и сбросы блоков горных пород привели его к диаметрально противоположным выводам (Хобта, 2005, с. 151). Автор попыталась разобраться, почему Львов считал главной причиной обвалов «происхождение озера Байкал».

Известно, что обвалы возникают на крутых склонах (более 45–50°) и обрывах. При крупных обвалах масса обломков устремляется вниз по склону, дробясь на более мелкие и увлекая за собой попутный рыхлый материал. Образуется облако пыли, масса обломков падает в долины, разрушая здания, дороги, запруживая реки. Наиболее часто обвалы бывают связаны с трещиноватостью пород, подмывом или подрезкой склонов, избыточным увлажнением пород, перегрузками обрывов, землетрясениями. Обвалы могут возникать вследствие глубокого растрескивания пород после неправильно выполненных взрывных работ, неудачного заложения выработок относительно напластования и направления трещиноватости (Ананьев, 2005).

На строительстве КБЖД существуют практически все указанные факторы: большинство склонов имеют большую крутизну (до скального); при сооружении выемок происходила подрезка склона и увеличение нагрузки на его основание; периодически во время дождей происходило избыточное увлажнение пород; для выборки ниш в скалах применялись взрывные работы, которые вызывали растрескивание пород и т.д. Но эти факторы действуют всегда если сооружение дороги идет в горной местности.

Главным отличием байкальских склонов от альпийских являлось то, что Байкал — территория активной тектонической деятельности. Байкальская впадина появилась в результате развития гигантской континентальной тектонической структуры растяжения — Байкальского рифта (Байкаловедение, 2012, с. 335). Сама рифтовая зона включает многочисленные разломы. Наиболее крупным разломом юго-западной части Байкала (там, где находится КБЖД) является Южно-Байкальский разлом (который также называют Обручевским сбросом) (Байкаловедение, 2012, с. 387). Именно Обручевский сброс

сформировал обрывистый и скальный берег озера (рис. 12).



**Рис. 12.** Типичный вид юго-западного берега Байкала.

**Fig. 12.** Typical view of the southwestern shore of Lake Baikal.

Западный борт Байкальской впадины образован системой листрических сбросов и сдвига-сбросов (Байкаловедение, 2012, с. 403). Как правило, крутонаклонные у поверхности земли сбросы с глубиной выполаживаются и становятся субгоризонтальными. Такие сбросы называются листрическими (от

греч. listron – лопата). Дальнейшее последовательное распространение разлома в блок лежащего крыла приводит к образованию листрического веера сбросов, который раскалывает массив горных пород на отдельные параллельные блоки (Прокопьев, 2004) (рис. 13).



**Рис. 13.** Веер листрических сбросов на юго-западном берегу Байкала.

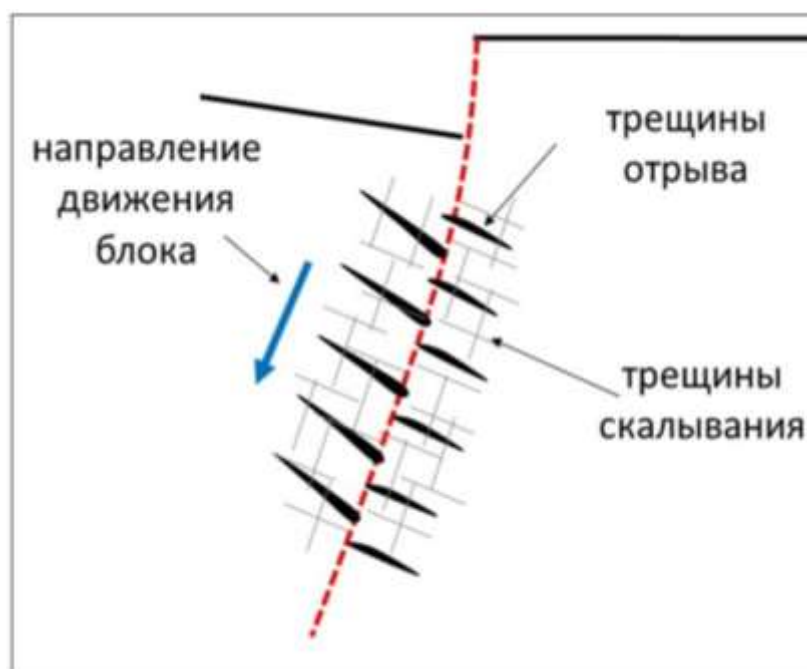
**Fig. 13.** Listric fault fan on the southwestern shore of Lake Baikal.

Кроме того, при формировании сброса возникает система боковых (оперяющих) трещин. Среди которых выделяют трещины

скалывания и отрыва, расположенные под углом друг к другу. Трещины скалывания образуются в приразломной зоне параллельно

поверхности самого разлома; трещины отрыва направлены перпендикулярно оси наибольших растягивающих напряжений, то есть в противоположную сторону

относительно движения блока («против шерсти» движения блока горных пород) (Прокопьев, 2004) (рис. 14).



**Рис. 14.** Схема расположения трещин оперения у сбросов (Рисунок авторов).

**Fig. 14.** Schematic diagram of the location of the feathering cracks near the faults. (Author's drawing).

Во время экспедиции на КБЖД летом 2025 года авторы обнаружили многочисленные

проявления трещин скалывания и отрыва в скальных обнажениях КБЖД (рис. 15, 16).



**Рис. 15.** Трещины отрыва (слева) и скалывания (справа) в массиве горных пород. Фото автора, 2025 г. (Жирной стрелкой указано направление плоскости сброса, тонкими – трещины отрыва и скалывания).

**Fig. 15.** Tension (left) and shear (right) cracks in a rock mass. Photo by the author, 2025. (The thick arrow indicates the direction of the fault plane; the thin arrows indicate the tension and shear cracks).



**Рис. 16.** Трещины отрыва (желтые стрелки) и скалывания (красные стрелки) в массиве горных пород. Фото автора, 2025 г.

**Fig. 16.** Tension cracks (yellow arrows) and shear cracks (red arrows) in a rock mass. Photo by the author, 2025.

Таким образом, в ходе проведенного исследования было выяснено, что на КБЖД для строительства более 70 % инженерных сооружений применялся природный камень. Камень добывался непосредственно в зоне строительства дороги: либо в разрабатываемых выемках, либо небольших карьерах в распадках. Для строительства использовали преимущественно гранитогнейс и мигматит, которые являются наиболее крепкими породами шаражалгайского комплекса, и в тоже время эти породы являются основным материалом обвалов и осыпей.

Неустойчивость байкальских склонов — это результат действия ряда природных и техногенных причин, самой главной из которых является высокая трещиноватость и неустойчивость горных пород. Трещиноватость является следствием развития крупной тектонической структуры — Обручевского сброса, в ходе формирования которого происходило раскалывание массива горных пород на отдельные блоки. Кроме того, эти блоки сами

расколоты на более мелкие за счет образования многочисленных трещин отрыва и скалывания. Таким образом, береговой массив горных пород в районе КБЖД оказался расколот на блоки различных размеров и представляет собой неустойчивую обвалоопасную зону, где периодически происходит обрушение склонов.

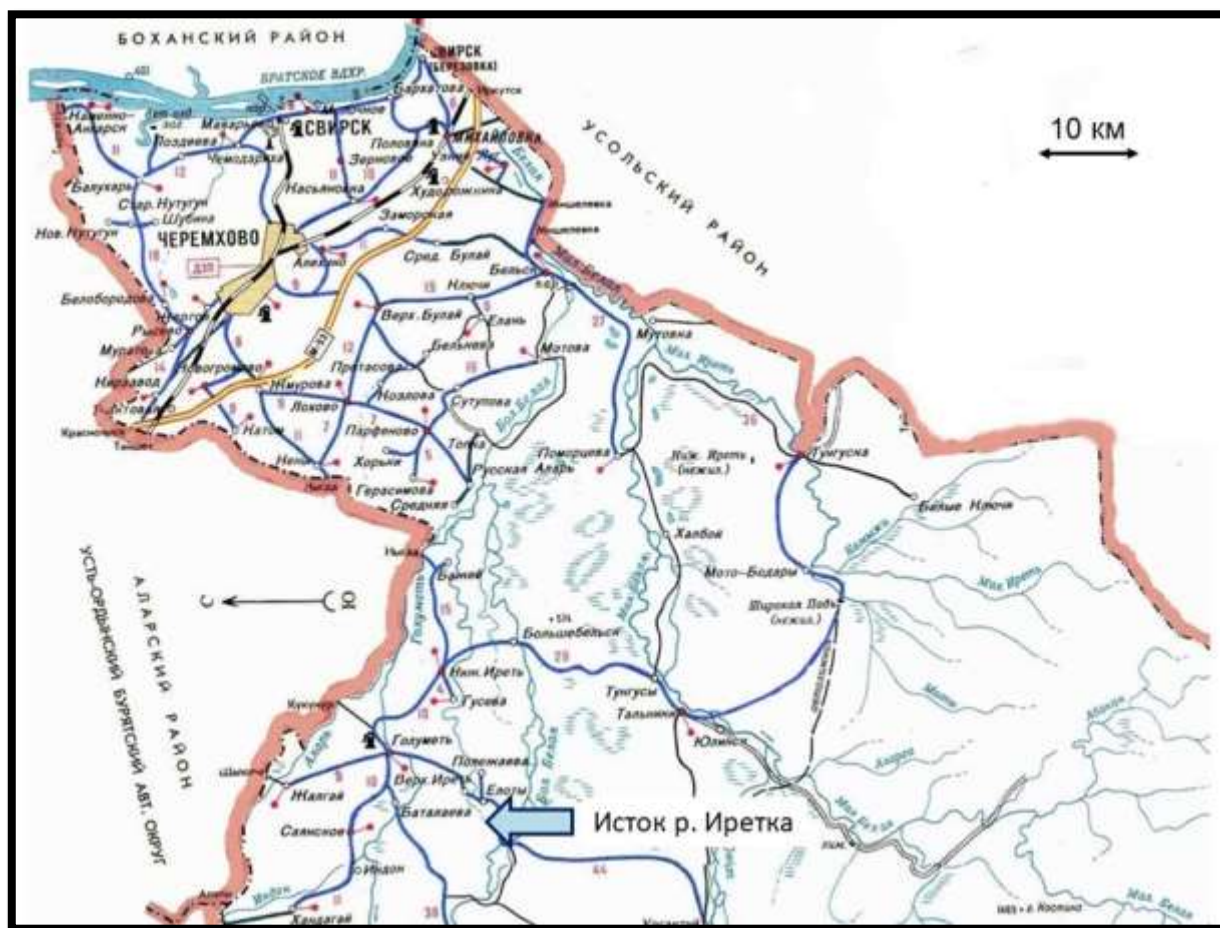
### **Изучение особенностей истока реки Иретка (Черемховский район)**

Учащаяся 7 класса средней общеобразовательной школы № 1 п. Михайловка (Черемховский район) Татьяна Жилкина во время краеведческой экспедиции обратила внимание на необычность истока одной из рек Черемховского района — Иретки.

Реки, протекающие по территории района (Большая Белая, Малая Белая, Иретка, Илотка, Большая Ирень, Малая Ирень, Голуметь, Олот, Урик), относятся к бассейну реки Белая. В верховьях большинство из них — это типичные горные реки, которые, выйдя

на Иркутско–Тулунскую равнину, становятся типичными равнинными реками. Совсем небольшая по протяженности (чуть больше трех километров) река Иретка отличается от

других тем, что её исток находится не в горах, а на равнине, и уже в полукилометре ниже истока она становится полноводной рекой (рис. 17).



**Рис. 17.** Фрагмент карты Черемховского района с указанием истока реки Иретка.

**Fig. 17.** Fragment of the map of the Cheremkhovskiy district indicating the source of the Iretka River.

Для того, чтобы объяснить гидрологические особенности реки, краеведы школы совершили три экспедиции к истоку Иретки (в марте, июле и сентябре 2025 года) (рис. 18).

В ходе экспедиции авторы провели осмотр местности и гидрологические замеры в двух точках наблюдения: у истока и в 500 м ниже по течению (местечко «Засолка») (рис. 19).



**Рис. 18.** Участники экспедиции в сентябре 2025 г.

**Fig. 18.** Expedition participants in September 2025.



**Рис. 19.** Карта реки Иретка с указанием точек наблюдения.

**Fig. 19.** Map of the Iretka River with observation points indicated.

Для поиска информации о реке Иретка и геологическом строении территории авторы воспользовались книгой «Черемховский район» (Суходолов, 2004); встречались с

местными краеведами (А.Н. Распутиной, Г.Н. Кочневой, Л.А. Антипиной); провели консультации со специалистами (доцентом ИГУ, канд. геол.-минерал. наук С.В. Снопковым, гидрогеологом Ангарской экспедиции В.Д. Дергачевым и ведущим инженером Территориального фонда геологической информации по Сибирскому федеральному округу Н.И. Швалевой).

Рельеф территории реки Иретка – это холмистая равнина, высотой около 500 м над уровнем моря, образованная наносами реки Белой, с явно выраженным террасовым рельефом (Суходолов, 2002). Река Иретка течет в междуречии рек Большая Белая и Голуметь в направлении на северо-восток. По сообщениям местных жителей, вода в реке зимой не замерзает даже при очень низких температурах. В 3.5 км от истока Иретка, сливаясь с рекой Илоткой, дает начало реке Большая Иреть. Левый берег Иретки пологий, правый – изрезанный (чередование низин и

возвышенностей). Пойма и берега реки сильно заболочены.

От истока на протяжении полукилометра по берегам и на дне реки фиксируются многочисленные выходы подземных вод, изливающих на поверхность большой объем воды. Некоторые из этих родников представляют собой целые ручьи, вытекающие из-под земли (рис. 20). Кроме истока авторы обнаружили еще 4 крупных родника-ручья, впадающих в Иретку справа. Кроме родников-ручьев по берегам реки многочисленные выходы подземных вод находятся на дне. Они проявляются либо в виде четко выраженных ключей (с бурлящей водой), либо в виде больших участков светлого песка (рис. 21). Местами эти ключи на дне реки создают впечатление кипящего песка. Ключи на дне реки «работают» неравномерно – минут через 15-30 происходит затухание активности ключей, а после паузы бурление начинается вновь.



**Рис. 20.** Исток реки Иретка.

**Fig. 20.** Source of the Iretka River.



**Рис. 21.** Ключи на дне реки Иретка, фиксируемые по участкам светлого песка.

**Fig. 21.** Keys on the bottom of the Iretka River, identified by areas of light sand.

Если вблизи истока ширина реки составляет 2-3 метра, то уже в 100 м ниже – 18 м, а

в 500 м (местечко «Засолка») — она возрастает до 46 метров (рис. 22).



**Рис. 22.** Река Иретка в 100 м (слева) и 500 м (справа) от истока.

**Fig. 22.** The Iretka River 100 m (left) and 500 m (right) from its source.

Исток реки (верхний родник) характеризуется расходом воды  $0.11 \text{ м}^3/\text{с}$ . Вода прозрачная без запаха. Измерения температуры воды в истоке проводились трижды: в марте, июле и сентябре 2025 года — и дали значения 1.5, 1.8 и  $1.7^\circ\text{C}$ , соответственно. По данным лаборатории экологического мониторинга природных и технических сред ИРНИТУ, жесткость воды в истоке реки составляет  $2.8 \text{ мг-экв/л}$ , что позволяет отнести воду к категории «мягкая».

В районе местечка «Засолка» (ТН-2, рис. 19) река приобретает вид озера глубиной до 60 см. Скорость течения составляет всего  $0.1 \text{ м/с}$ . Расход воды в этой точке наблюдения увеличивается до  $1.6 \text{ м}^3/\text{с}$ , то есть на участке протяженностью 500 м увеличивается в 16 раз.

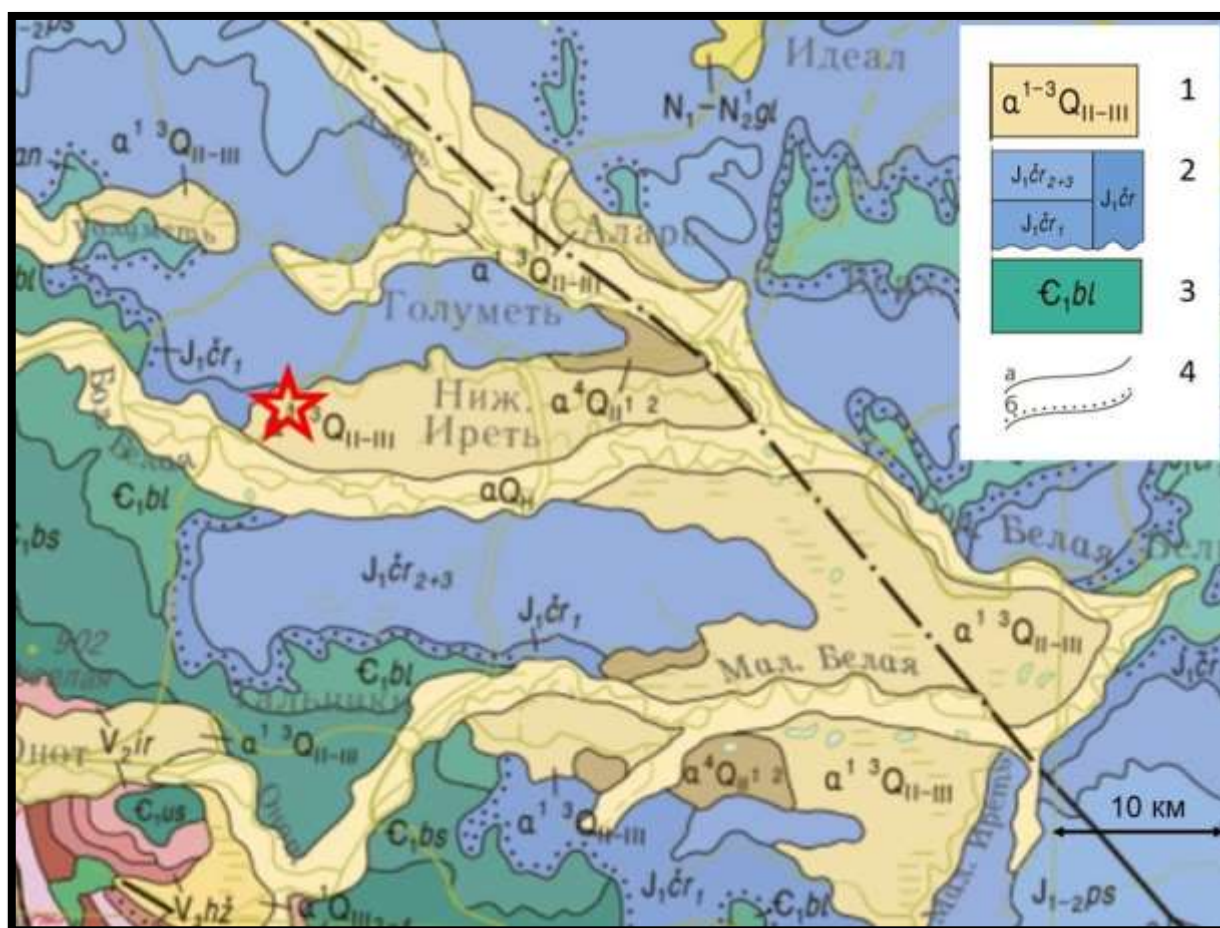
От местных жителей авторы узнали интересные факты о реке. Местность «Засолка» называется так потому, что в этом месте местные жители засаливали огурцы и помидоры. Для этого дно реки углублялось на 1 метр, и в углубление устанавливались бочки с засоленными овощами на хранение. Температура воды  $1-2^\circ\text{C}$  сохраняла соленья лучше, чем в погребе. Зимой и весной эти соленья доставали на домашний стол или для продажи на рынке в г. Черемхово. Так как Иретка является полноводной и незамерзающей в течение всего года, в 50-е годы XX века в районе селения Мандагай была построена Полежаевская ГЭС, снабжавшая электроэнергией окрестные селения. Для увеличения перепада высот до 4 м, на протяжении 700 м было проведено углубление русла.

Проведенные наблюдения показали, что исток реки Иретка представляет собой площадную разгрузку грунтовых восходящих вод. Отличительной особенностью восходящих источников является характер выхода струи воды — поднимаясь под напором снизу, вода бурлит и бьёт ключом. На выходе восходящих источников часто наблюдается процесс суффозии — вынос водой песка из водоносного слоя (Всеволожский, 2007). Как

было показано выше процесс суффозии на дне Иретки проявлен широко (рис. 21, 22).

Питание грунтовых вод в основном осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков — просачивания свободной воды от поверхности земли до уровня водоносного горизонта. Величина инфильтрации зависит от продолжительности и интенсивности выпадения осадков, литологического состава и водопроницаемости горных пород, рельефа поверхности и других факторов. Разгрузка грунтовых вод из водоносных горизонтов осуществляется в виде родников, фильтрации в русла рек или на дно водоемов. Эти процессы происходят при наличии гидравлической связи грунтовых и поверхностных вод. Образование родников определяется главным образом двумя причинами: эрозийной расчлененностью рельефа (вскрывающей водоносный горизонт) и фильтрационной неоднородностью водовмещающих пород (обуславливающей неравномерную обводненность разреза, вследствие высокой проницаемости некоторых участков, присутствия зон интенсивной трещиноватости и закарстованности, наличия слабопроницаемых экранов и др.) (Всеволожский, 2007).

С геологической точки зрения река Иретка находится в зоне краевого прогиба Сибирской платформы, вблизи её границы с Байкальской складчатой областью. Иретка берет свое начало вблизи контакта раннекембрийских отложений Булайской свиты и раннеюрских отложений Черемховской свиты. Причем первые из них преимущественно представлены карбонатными породами (доломитами и известняками), а вторые — осадочными терригенными породами (песчаники, алевролиты, аргиллиты, конгломераты, туфы). Юрские отложения залегают на кембрийских несогласно. Верхняя часть геологического разреза в долине реки перекрыта плейстоценовыми аллювиальными отложениями (галечниками, песками, супесями, суглинками, глинами), мощность которых может достигать 25 м (рис. 23).



**Рис. 23.** Фрагмент геологической карты (Лист N-48 (Иркутск); М. 1:1000000). Звездочкой указан источник реки Иретка.

1 – плейстоценовые аллювиальные отложения (галечники, пески, супеси, суглинки, илы, глины); 2 – раннеюрские отложения черемховской свиты (переслаивание песчаников, алевролитов, аргиллитов, конгломератов, туфов и др.); 3 – раннекембрийские отложения булайской свиты (доломиты, известняки, прослои глинистых доломитов, алевролитов и мергелей); 4 – границы между разновозрастными геологическими образованиями (а – согласного залегания; б – несогласного залегания).

**Fig. 23.** Fragment of the geological map (Sheet N-48 (Irkutsk); Scale 1:1000000). The source of the Iretka River is indicated by an asterisk.

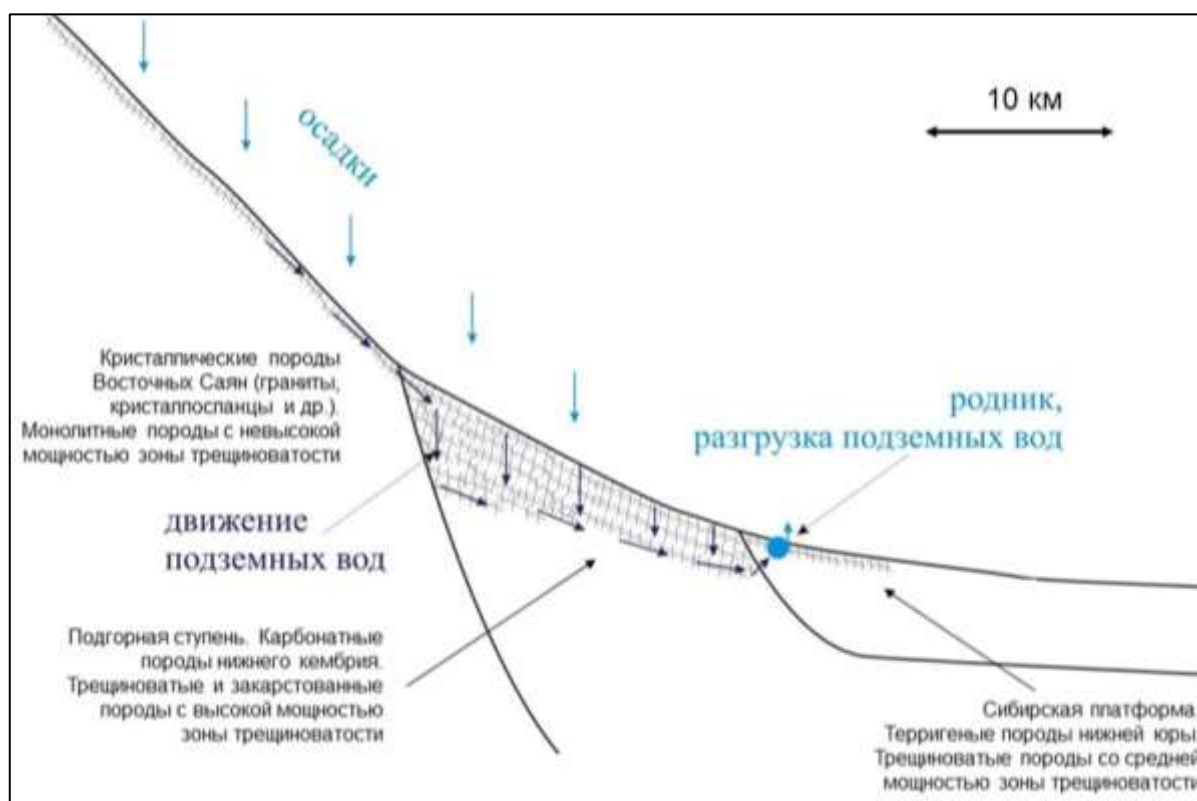
1 – Pleistocene alluvial deposits (pebbles, sands, sandy loams, loams, silts, clays); 2 – Early Jurassic deposits of the Cheremkhovskaya suite (alternating sandstones, siltstones, argillites, conglomerates, tuffs, etc.); 3 – Early Cambrian deposits of the Bulayskaya suite (dolomite, limestone, interlayers of clayey dolomites, siltstones and marls); 4 – boundaries between geological formations of different ages (a – conformable bedding; б – unconformable bedding).

Согласно мнению гидрогеолога Ангарской экспедиции В.Д. Дергачева, атмосферные осадки, выпадая на склонах Восточных Саян, представленных низкопроницаемыми кристаллическими породами, стекают и накапливаются в подгорной ступени, которая состоит из трещиноватых и закарстованных карбонатных пород нижнего кембрия.

Карбонатная толща имеет большую мощность высокопроницаемых пород. Под действием гравитации подземные воды фильтруются по пористым доломитам и известнякам до тех пор, пока не «упираются» в терригенные юрские породы Сибирской платформы. Юрские отложения имеют более низкие характеристики проницаемости и меньшую

мощность трещиноватых пород. Под действием гидростатического давления подземные воды, не имея возможности двигаться по поровому пространству юрских пород,

выходят на поверхность земли в виде ключей и родников на большом участке вдоль контакта кембрийских и юрских пород (рис. 24).



**Рис. 24.** Схема фильтрации и разгрузки грунтовых вод по В.Д. Дергачеву.

**Fig. 24.** Scheme of filtration and discharge of groundwater according to V.D. Dergachev.

Восходящие источники грунтовых вод, возникающие в условиях, когда поток подземных вод достигает границы проницаемых и слабопроницаемых пород (экрана), называется экранированным родником (Всеволожский, 2007).

Таким образом, в результате проведенного исследования было установлено, что исток реки Иретка представляет собой протяженную территорию, на которой происходит разгрузка восходящих грунтовых вод вблизи контакта пористых карбонатных пород нижнего кембрия и слабопроницаемых терригенных пород нижней юры. Исток Иретки представляет собой интересный геологический объект, исследование которого будет продолжено. Возможно, Иретка — это не единственное место, где происходит разгрузка вод из трещиноватых и закарстованных кембрийских толщ, и следует более детально изучить территорию.

### **Причины исчезновения реки Слюдянка (южное Прибайкалье)**

Учащаяся 6 класса «РЖД лицея № 11» (г. Слюдянка) Чупрова Варвара заинтересовалась вопросом, почему полноводная в верховьях река Слюдянка к устью практически исчезает. Автор провела поиск информации в интернете, в научной и краеведческой литературе и анализ найденных сведений.

Река Слюдянка, впадающая в озеро Байкал на юго-западной его оконечности, имеет интересную особенность — в километре от устья реку можно перейти по камням, не замочив ноги, при этом она считается одной из самых опасных рек в южном Прибайкалье. В XX веке она не раз становилась причиной значительных разрушений зданий и сооружений города Слюдянка, порождая катастрофические наводнения и сели. Эта особенность реки со второй половины XX века стала ещё

более заметной. На фотографии реки в полукилометре от устья, сделанной летом в

начале XX века, видно, что в ней ещё много воды (рис. 25).



**Рис. 25.** Река Слюдянка на фото начала XX века.

**Fig. 25.** The Slyudyanka River in a photo from the early 20th century.

В настоящее время в нижней части реки воды практически не бывает. Река начинает течь только в период паводков или половодья. Русло реки на этом участке заросло кустарником и молодыми деревьями. По данным гидрологических наблюдений за период 1961-1999 гг. в верхней части реки речной сток составлял в среднем 2-3 м<sup>3</sup>/с, в 3 км от устья он не превышает 0.8 м<sup>3</sup>/с, а в устье снижается практически до нуля.

Слюдянский краевед В.В. Махно придумал сказку о том, что река обиделась на людей за то, что они её замусорили, и ушла под землю. Что же произошло на самом деле?

Река Слюдянка берет начало с северного склона хребта Хамар-Дабан и впадает в Байкал на южной его оконечности. Склоны хребта Хамар-Дабан отличаются большой крутизной, а долины между отрогами (в т.ч.

долина р. Слюдянка) узки и труднопроходимы. Протяженность реки составляет 18.5 км. Бассейн реки имеет вытянутую форму со средней шириной 2.7 км. Площадь бассейна составляет 74.7 км<sup>2</sup>, в том числе 22 км<sup>2</sup> – площадь конуса выноса валунно-галечных отложений (Пинарелис, 1935).

Исток реки находится на высоте 1700 м, а устье – 455 м. Исток Слюдянки носит название Правой Слюдянки. На расстоянии около 4 км от истока река в виде бурного потока течет в узком и глубоком ущелье. В 10 км от устья долина реки расширяется до 100-120 м, и через 5 км река выходит в широкую долину среди валунных и галечных наносов. В 2-х километрах от устья река покидает горную долину и течет по пологой прибрежной равнине, образованной самой рекой при выносе к берегу Байкала песка, гальки и валунов.

Общее падение реки составляет около 1300 м. Продольный профиль значительно меняется по длине реки. В верховьях уклон долины достигает 150 м/км, в средней части – около 40 м/км, а в конусе выноса – менее 15 м/км (Пинарелис, 1935).

Основной причиной того, что расход воды в реке меняется, являются карстовые процессы — растворение и размыв горных пород природными водами. Карст формируется в местностях, сложенных сравнительно легко растворимыми в воде горными породами: гипсом, известняком, мелом, мрамором, доломитом, каменной солью и др. С карстовыми процессами может быть связано полное или частичное поглощение поверхностного стока рек, нарушение режима подземных и наземных вод.

В геологическом отношении верховья реки Слюдянка расположены в зоне распространения гнейсов и кристаллосланцев. В 10

км от устья гнейсы сменяются мраморами, по которым река течет до самого Байкала. По результатам геологических исследований эти известняки местами сильно трещиноваты и закарстованы (Пинарелис, 1935). Поглощение поверхностного стока реки происходит уже в течение длительного времени. Но почему же этот процесс усилился во второй половине XX века?

Ответ на этот вопрос автор нашла в воспоминаниях старожила Слюдянки, главного геолога Слюдянского рудоуправления Владимира Петровича Быкова (Быков, 2003). В своей книге «Город у речки Слюдянки» он рассказал об истории одного из главных предприятий города — Слюдянского рудоуправления «Сибслюдтреста», которое занималось добычей слюды-флогопита (рис. 26). Предприятие было открыто в 1927 году, остановлена добыча слюды в 1973 г.



**Рис. 26.** Отвалы слюдяных шахт в пади Улунтуй.

**Fig. 26.** Mica mine dumps in the Uluntui valley.

Добыча слюды преимущественно шла подземным способом с помощью шахт и штолен. Система горных выработок на южной окраине города Слюдянка представляла собой целый подземный город. По подсчетам В.П. Быкова протяженность подземных ходов рудника составляла более 100 км. Начав разрабатывать слюдоносные жилы от

поверхности, горняки опускались на все более глубокие горизонты.

В 1939 году на руднике в стволе шахты № 2 на горизонте 42 метра (над уровнем Байкала) в подземных горных выработках впервые появилась вода, которая просачивалась через массивы горных пород. Несмотря на проводимую откачку, уровень воды не

уменьшался, что серьезно осложнило работу горняков.

Основной причиной появления воды в подземных выработках стало просачивание воды из реки по закарстованным карбонатным породам. Прорыв карстовых вод в горные выработки часто приводит к их частичному либо полному затоплению.

Через 17 лет (1956 г.) вода появилась на горизонте 29 метров в шахте № 4. Приток этой «второй» воды, как её называли горняки, составил уже порядка 50-100 м<sup>3</sup>/час. Этот приток воды был соизмерим с речным стоком реки Слюдянка.

Откачка воды из шахты № 4 стала большое проблемой для предприятия. Ежегодная её стоимость определялась в 150 тыс. рублей (без учета увеличения притока воды). Горными инженерами предприятия (В.П. Быков, М.Л. Гомзяков, В.Н. Четвертаков) было предложено для осушения нижних горизонтов рудника пробить водоотводящую штольню от горизонта +4 м шахты № 4 до берега Байкала с восточной стороны станции Слюдянка. Общая длина штольни от рудника до Байкала проектировалась около 3 км (рис. 27).



**Рис. 27.** Схема расположения Байкальской штольни.

**Fig. 27.** Layout of the Baikal adit.

Первоначально проект был отклонен. В сентябре 1957 года начались работы по отводу воды на более низкие горизонты. 18 сентября 1958 года произошел прорыв трещинных вод в горный выработку на горизонте +4 м. В этот момент в забое находилось звено взрывников, которые проводили взрывы для разрушения массива горных пород. В.П. Быков так описал этот момент: *«Первое, что он (взрывник) увидел, — барахтающийся в потоке воды Саша (помощник взрывника), за которым из ствола шахты, сверкая в пучке света фонаря, со страшным шумом била вода. Она, поднимаясь наподобие огромного гриба, стремительно растекалась по*

*рудничному двору. Запасного хода не было, единственный выход — ствол шахты.»* Взрывники кинулись навстречу потоку, и стали пробиваться к лестнице, по которой можно было подняться на более высокий горизонт. Последние метры им пришлось преодолевать почти вплавь. По вертикальному ходу вода еще некоторое время преследовала беглецов по пятам, но потом остановилась и затихла (Быков, 2003).

В результате прорыва большого объема подземных вод в шахту произошло резкое снижение речного стока на участке 7-9 км от устья Слюдянки. При гидрологических

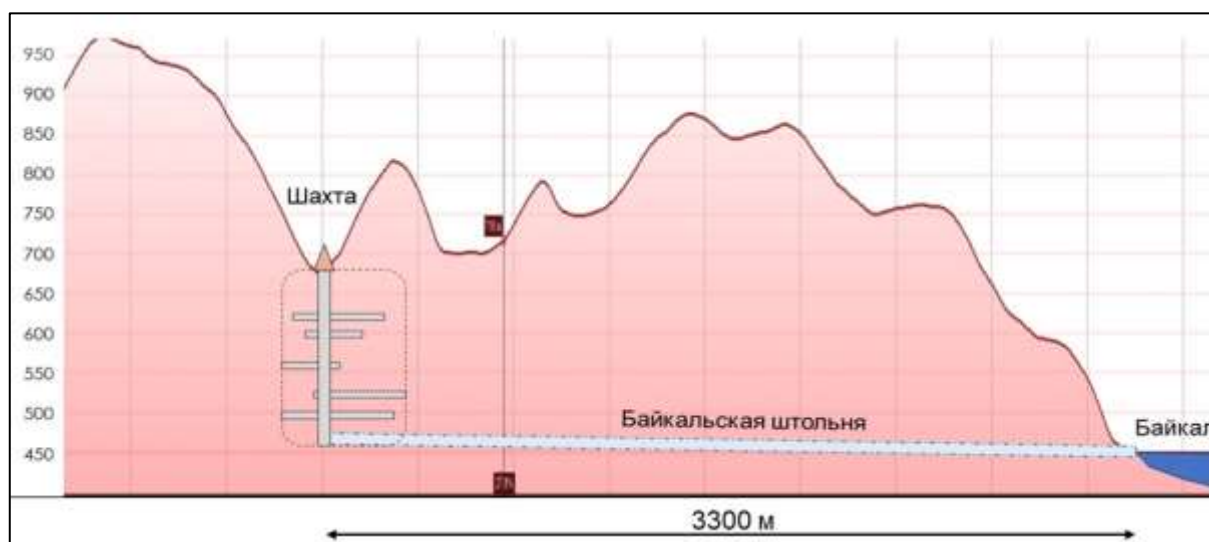
исследованиях в июле 1960 г. в 5 км от устья реки вода отсутствовала полностью.

Авария 1958 г. заставила руководство предприятия вновь вернуться к идее создания водоотводящей штольни «Байкальской». В ноябре 1965 года начались работы по её созданию. Штольню пробивали от берега Байкала. С самого начала продвижение штольни шло довольно быстро — расстояние в 1200 м преодолели за полтора года. Но затем из вскрытой трещины в штольню хлынула вода. Для её отведения забойщики проложили по дну выработки деревянный лоток. Чтобы избежать повторения неожиданного прорыва воды, было принято решение бурить три опережающих скважины, что значительно снизило темп проходки штольни. При достижении 2000 метров приток воды настолько увеличился, что стал перекрывать откаточные рельсы, уложенные на верхнее крепление лотка. Все это создавало значительные трудности для откатываемых составов, груженных горными породами. В.П. Быков писал: *«Глядя на приближающийся электровоз со сверкающими огнями, отражающимися в потоке воды, казалось, что он плывет, а не катится на своих небольших колесах ... Прямолинейно пройденная горная выработка, освещенная исчезающими в далекой перспективе*

*электрическими лампочками, отражающимися в неторопливо движущейся к устью воде, имела нарядный и праздничный вид ...»* (Быков, 2003).

При достижении 2850-метрового расстояния приток воды резко увеличился, при этом в шахте № 4 уровень понизился на 25 метров, освободив горные выработки со всем затопленным оборудованием. Для того, чтобы ускорить создание Байкальской штольни, было принято решение пробить из шахты № 4 встречный тоннель длиной 300 м. Тоннель был пройден за шесть месяцев, и в результате появилась возможность запитать Байкальскую штольню сжатым воздухом, электроэнергией, обеспечить подъем горной массы через ствол шахты № 4. При этом расстояние транспортировки горных пород сократилось в пять с лишним раз. В 1970 году сооружение Байкальской штольни длиной 3300 метра было закончено. Вода, накапливающаяся на нижних горизонтах шахты № 4, пошла в Байкал. Но предприятию это уже сильно не помогло — в 1973 году добыча флогопита на Слюдянском месторождении была остановлена.

При помощи программы «Googl Earth» авторами был построен схематический разрез Байкальской штольни (рис. 28).

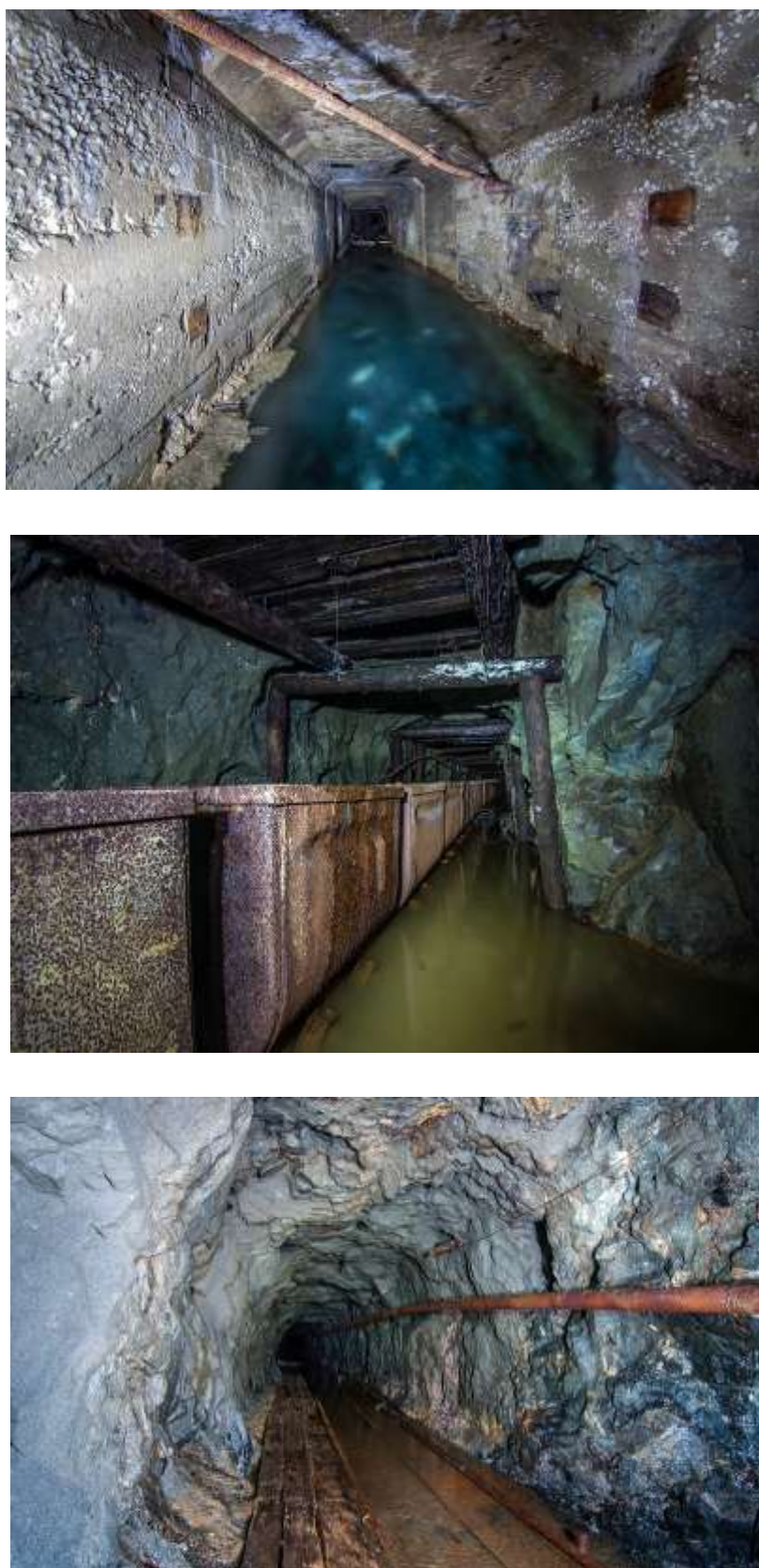


**Рис. 28.** Схематический разрез Байкальской штольни.

**Fig. 28.** Schematic section of the Baikal adit.

В настоящее время, Байкальская штольня продолжает действовать. Несмотря на то, что вход в неё закрыт, отчаянные

путешественники периодически проникают в неё и выставляют в интернете фотографии штольни (рис. 29).

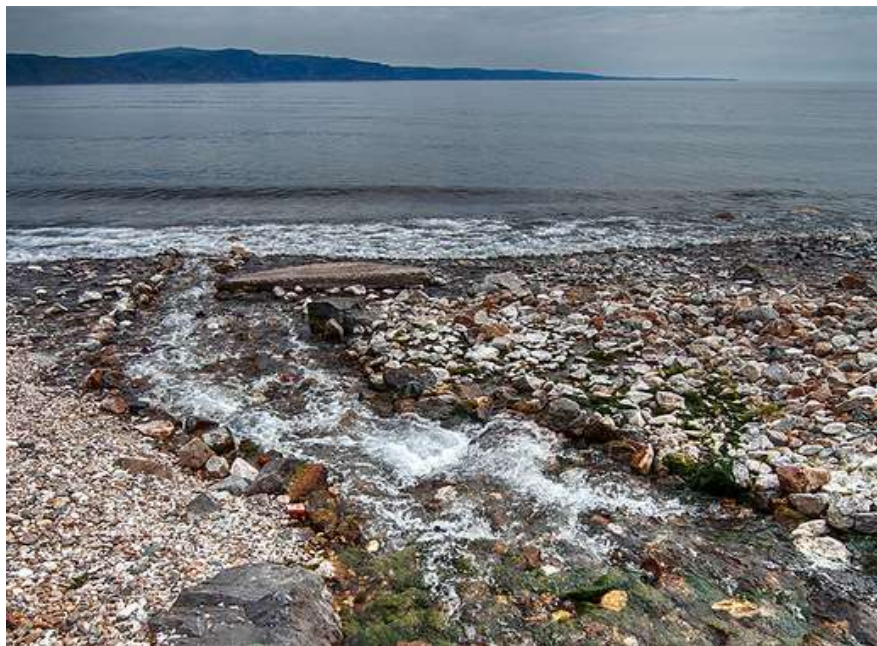


**Рис. 29.** Современный вид Байкальской штольни. Фото из интернета. (<https://anthrax-urbex.livejournal.com/3811.html?ysclid=m6p2e8ce2320774286>).

**Fig. 29.** Modern view of the Baikal adit. Photo from the Internet. (<https://anthrax-urbex.livejournal.com/3811.html?ysclid=m6p2e8ce2320774286>).

Поток воды, который в настоящее время втекает в Байкал (рис. 30), по воспоминаниям старожилов Слюдянки, значительно

уменьшился. По-видимому, вода ещё нашла какие-то пути стока.



**Рис. 30.** Современный вид стока воды из Байкальской штольни. (<https://anthrax-urbex.livejournal.com/3811.html?ysclid=m6p2e8ce2320774286>).

**Fig. 30.** Modern view of water flow from the Baikal adit. (<https://anthrax-urbex.livejournal.com/3811.html?ysclid=m6p2e8ce2320774286>).

Таким образом, в ходе проведенного исследования было выяснено, что причиной исчезновения реки Слюдянка в её нижнем течении стала горнодобывающая деятельность Слюдянского рудоуправления «Сибслюдтреста». Вода из реки по закарстованным известнякам «проложила» путь в нижние горизонты флогопитового рудника. Создание Байкальской штольни для отвода воды из нижних горизонтов рудника привело к тому, что часть воды из реки Слюдянка и в настоящее время уходит по карстовым полостям в горные выработки рудника, а затем в Байкал.

### **Заключение**

В данной обзорной статье приведены примеры детских исследований, связанных с изучением разнообразных геологических процессов. Эти работы показывают, что для развития непрерывного геологического образования, насколько важно налаживать взаимодействие общеобразовательных учреждений

с учреждениями высшего образования, научно-исследовательскими и производственными организациями.

### **Литература**

Альбом типовых и исполнительных чертежей Кругобайкальской железной дороги. 1900-1905 гг. / МПС. Санкт-Петербург 1907. 70 л.

Альбом типовых и исполнительных чертежей по постройке 2-го пути на участке Байкал – Култук – Танхой Забайкальской ж.д. 1911–1915 гг. / МПС, Управление по сооружению железных дорог. Иркутск: 1916. 116 л.

Ананьев, В.П. Инженерная геология: Учеб. для строит, спец. вузов. М. : Высшая школа, 2005. 575 с.

Байкал. Атлас. Под ред. Г.И. Галазия. М.: Федеральная служба геодезии и картографии России. 1993. 160 с.

Байкаловедение: в 2 кн. Новосибирск : Наука, 2012. Кн. 1. 468 с.

Быков В.П. Город у реки Слюдянки. Иркутск : Оттиск, 2003.

Всеволожский В.А. Основы гидрогеологии: Учебник. М. : Изд-во МГУ, 2007. 448 с.

Генеральная схема мероприятий по охране Кругобайкальской железной дороги. 1974 г. // Завершенные проекты АО «Ленгипротранс». URL: <http://lgt.ru/projects/zhd-linii-obshchego-polzovaniya/generalnaya-shema-meropriyatiy-po-zashchite-krugobaykalskoy>. (дата обращения: 17.09.2025).

Геологические памятники Байкала / Составитель Г.В. Рязанов. Новосибирск : ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1993. 160 с.

Грудинин М.И., Чувашова И.С. Байкал. Геология. Человек. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2011. 239 с.

История берегоукрепления и защиты Кругобайкальского участка ВСЖД. Наиболее значительные деформации земляного полотна в период эксплуатации. Фотоальбом. Изготовитель: Служба пути Восточно-Сибирской железной дороги. Ст. Слюдянка. 2003 г.

Отчёт по постройке Кругобайкальской железной дороги. 1900–1905 гг. СПб. : Типография инж. Г.А. Бернштейна, 1908.

Пинарелис П.П. Гидрологическая записка по южным притокам Байкала и главным образом по рекам Слюдянке и Похабихе // Фонды «Иркутск-геология», 1935. 45 с.

Прокопьев А.В., Фридовский В.Ю., Гайдук В.В. Разломы. (Морфология, геометрия и кинематика). Учеб. пособие. Якутск : Якутский филиал Изд-ва СО РАН, 2004. 148 с.

Слюдянские Штольни: «Сквозь Горизонт» URL: <https://anthrax-urbex.livejournal.com/3811.html?ysclid=m6p2e8ce2320774286> (дата обращения: 5.01.2025)

Суходолов А.П., Скворцов А.М. Черемховский район. Иркутск : Издание ОАО «Иркутская областная типография № 1», 2002. 180 с.

Хобта А.В. Дорога длиной в век: Альбом-путеводитель по Кругобайкальской железной дороге. Иркутск : «Оттиск», 2004. 256 с.

Хобта А.В., Третьяков В.Г. История Кругобайкальской железной дороги 1905-2005. Иркутск : Издатель: А.Н. Гаращенко, 2005. 240 с.

## References

Album of standard and as-built drawings of the Circum-Baikal Railway. 1900-1905 / MPS. St. Petersburg, 1907. 70 p.

Album of standard and as-built drawings for the construction of the second track on the Baikal-Kultuk-Tankhoy section of the Trans-Baikal Railway. 1911-1915 / MPS, Railway Construction Directorate. Irkutsk: 1916. 116 p.

Ananyev, V.P. Engineering Geology: Textbook for construction and specialized universities. Moscow: Higher School, 2005. 575 p.

Baikal. Atlas. Ed. by G.I. Galaziya. Moscow: Federal Service of Geodesy and Cartography of Russia. 1993. 160 p.

Baikal Studies: in 2 books. Novosibirsk: Nauka, 2012. Book 1. 468 p.

Bykov, V.P. The City by the Slyudyanka River. Irkutsk: Ottisk, 2003.

Vsevolozhsky, V.A. Fundamentals of Hydrogeology: Textbook. Moscow: Moscow State University Publishing House, 2007. 448 p.

General Plan of Measures for the Protection of the Circum-Baikal Railway. 1974 // Completed Projects of JSC Lengiprotrans. URL: <http://lgt.ru/projects/zhd-linii-obshchego-polzovaniya/generalnaya-shema-meropriyatiy-po-zashchite-krugobaykalskoy>. (Accessed: 17.09.2025).

Geological Monuments of Lake Baikal / Compiled by G.V. Ryazanov. Novosibirsk: VO "Nauka". Siberian Publishing Company, 1993. 160 p.

Grudin, M.I., Chuvashova, I.S. Baikal. Geology. Man. Irkutsk: Irkutsk State University Publishing House, 2011. 239 p.

History of Shore Protection and Protection of the Circum-Baikal Section of the East Siberian Railway. The Most Significant Deformations of the Roadbed during Operation. Photo Album. Producer: Track Service of the East Siberian Railway. Slyudyanka Station. 2003.

Report on the Construction of the Circum-Baikal Railway. 1900–1905. St. Petersburg: Printing House of Engineer G.A. Bernshtein, 1908.

Pinarelis, P.P. Hydrological note on the southern tributaries of Baikal and mainly on the Slyudyanka and Pokhabikha rivers // Funds "Irkutskgeology", 1935. 45 p.

Prokopyev A.V., Fridovsky V.Yu., Gaiduk V.V. Rifts. (Morphology, geometry and kinematics). Textbook allowance. Yakutsk: Yakut branch of the Publishing House of the SB RAS, 2004. 148 p.

Slyudyanskiye Adits: "Through the Horizon" URL: <https://anthrax-urbex.livejournal.com/3811.html?ysclid=m6p2e8ce2320774286> (access date: 01/5/2025)

Sukhodolov A.P., Skvortsov A.M. Chermkhovo district. Irkutsk: Published by JSC "Irkutsk Regional Printing House No. 1", 2002. 180 p.

Khobta A.V., Tretyakov V.G. History of the Circum-Baikal Railway 1905-2005. Irkutsk: Publisher: A.N. Garashchenko, 2005. 240 p.

Khobta A.V. A Century-Long Road: A Guidebook to the Circum-Baikal Railway. Irkutsk: "Otkritsk", 2004. 256 p.

**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,  
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,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Researcher,  
email: snopkov\_serg@mail.ru

**Шубин Лев,**

665904, Россия, Иркутская обл., г. Слюдянка, ул. Советская, 21,  
РЖД лицей № 11,  
учащийся 9 класса,  
email: lev.shubin.11@mail.ru.

**Shubin Lev,**

665904, Russia, Irkutsk region, Slyudyanka, st. Sovetskaya, 21,  
Russian Railways Lyceum No. 11,  
9th grade student,  
email: lev.shubin.11@mail.ru.

**Вострикова Виктория,**

665904, Россия, Иркутская обл., г. Слюдянка, ул. Советская, 21,  
РЖД лицей № 11,  
учащаяся 6 класса,

**Vostrikova Victoria,**

665904, Russia, Irkutsk region, Slyudyanka, st. Sovetskaya, 21,  
Russian Railways Lyceum No. 11,  
6th grade student

**Чупрова Варвара,**

665904, Россия, Иркутская обл., г. Слюдянка, ул. Советская, 21,  
РЖД лицей № 11,  
учащаяся 6 класса,  
email: snopkov\_serg@mail.ru.

**Chuprova Varvara,**

665904, Russia, Irkutsk region, Slyudyanka, st. Sovetskaya, 21,  
Russian Railways Lyceum No. 11,  
6th-grade student,

**Репина Наталья Геннадьевна,**

665904, Россия, Иркутская обл., г. Слюдянка, ул. Советская, 21,  
РЖД лицей № 11,

учитель,

email: natainkultuk@mail.ru

**Repina Natalya Gennadyevna,**

665904, Russia, Irkutsk Region, Slyudyanka, Sovetskaya st., 21,  
Russian Railways Lyceum No. 11,

teacher,

email: natainkultuk@mail.ru

**Жилкина Татьяна,**

665448, Россия, Иркутская обл., Черемховский район, п. Михайловка, ул. Горького, 1,  
средняя общеобразовательная школа № 1,

учащаяся 7 класса,

email: zhilkina\_t313@internet.ru

**Zhilkina Tatyana,**

665448, Russia, Irkutsk Region, Cheremkhovsky District, Mikhaylovka Settlement, Gorky st., 1,  
Secondary Comprehensive School No. 1,

7th-grade student,

email: zhilkina\_t313@internet.ru

**Веретенкина Галина Георгиевна,**

665448, Россия, Иркутская обл., Черемховский район, п. Михайловка, ул. Горького, 1,  
средняя общеобразовательная школа № 1,

учитель,

email: malceva\_30@mail.ru

**Veretenina Galina Georgievna,**

665448, Russia, Irkutsk Region, Cheremkhovsky District, Mikhaylovka Settlement, Gorky Street, 1,  
Secondary Comprehensive School No. 1,

teacher,

email: malceva\_30@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](mailto:kaf-dinamgeol@mail.ru) или [igrug@mail.ru](mailto: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. Заголовки и списки авторов не следует делить на абзацы. Также никогда не отделяйте какие-либо элементы текста (рисунки, заголовки, подзаголовки и т.п.). Всегда делайте это средствами самой программы MS Word. Если не знаете как, спросите у знающих редакторов. Вы сдаете статью к нам в электронный, сетевой журнал, в котором ваш текст проходит многочисленные стадии переработки пока появится в Интернете, и все ваши пустые строки-абзацы выльются в неоправданно большие пустые пропуски, обезображивающие ваш текст. Вы хотели украсить ваш текст, а получилось все наоборот.

Аннотация должна содержать 150–200 слов, количество ключевых слов — не более 8.

Шрифт основного текста — Times New Roman, размер 12, межстрочный интервал 1, красная строка 0.5 см, поля по 2.5 см. Представлять работы необходимо в формате текстового редактора Word или RTF. Цитаты необходимо выделять курсивным шрифтом. 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 должны дублироваться отдельными файлами в графических форматах: .jpg, .crt и .cdr с разрешением не менее 300 dpi. Их ширина при книжном формате вставки должна быть не менее 8 см (945 px) и не более 17 см (2008 px), лучше 15 см (1772 px), а при альбомном их расположении максимальный размер не должен превышать 17x24.5 см (2008x2894 px). Количество рисунков в статье не должно превышать 10. Рисунки должны

иметь все необходимые обозначения, а подрисовочные подписи на русском и английском языке.

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 16.5 см, альбомного — 24.5 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 Exel 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». В аннотациях (русских и английских) в химических формулах верхние и нижние индексы следует делать при помощи вставки символа, а не подчлочками  $x_2$  и  $x^2$  с главной панели: Меню → Вставка → Символ → Набор: Верхние и нижние индексы → Выбираем нужные цифры → Вставить. Например,  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ . Это необходимо строго соблюдать, т. к. наш журнал электронный и ваши верхние и нижние индексы будут показаны в статье не корректно, например, так  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ .

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](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](mailto:kaf-dinamgeol@mail.ru).

Полнотекстовые электронные точные копии журнала и статей в формате .PDF публикуются по адресу: <http://geoenvir.ru>.

*Редколлегия журнала*