

4 (1) 2024

ГЕОЛОГИЯ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА



ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ





Преемник Вестника кафедры географии Восточно-Сибирской государственной академии образования

Nº 1

Научный электронный журнал

Год основания 2010 г.

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

Адрес редакции:	Сетевое издание «Геология и окружающая среда» PDF-номер журнала выходит четыре раза в год. Сроки приема статей в:
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1	№ 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,
Тел.: (3952)243278	№ 4 – 31 декабря
Email: kaf-dinamgeol@mail.ru	Учредитель-издатель: ФГБОУВО «Иркутский государственный университет» Гл. редактор: С.П. Примина Регистрирующий орган: Федеральная служба по надзору в сфере
Сайт: http://geoenvir.ru	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

Ледник Перетолчина. Горный массив Мунку-Сардык. 30.07.2022. Рисунок из ст. Китов А.Д., Коваленко С.Н., Гергенов И.И. Экспедиции клуба Портулан в район г. Мунку-Сардык в 2022 году

СОДЕРЖАНИЕ

От редколлегии журнала
РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ
С.В. Рассказов, И.С. Чувашова Образование глобальной Азиатской изотопной
термальной аномалии (ASITA) в зарождающейся системе Земля–Луна:
Мегаимпакт или фрагментация газопылевого облака?
МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ42
С.В. Рассказов, И.А. Асламов, С.В. Снопков, В.И. Архипенко, А.М. Ильясова, Е.П.
<u>Чебыкин</u> Мониторинг окислительно-восстановительного потенциала подземных
вод в режиме реального времени на Култукском полигоне в конце 2023 – начале
2024 г.: сопоставление электрических эффектов с землетрясениями в
центральной части Байкальской рифтовой системы42
С.В. Снопков, С.В. Рассказов, И.А. Асламов, В.И. Архипенко, А.М. Ильясова, Е.П.
<u>Чебыкин</u> Экспресс-анализ квазипериодических импульсов окислительно-
восстановительного потенциала подземных вод берега Байкала при
мониторинге в режиме реального времени (07–14 февраля 2024 г.)
И.А. Асламов, С.В. Рассказов, С.В. Снопков, В.И. Архипенко, А.М. Ильясова, Е.П.
<u>Чебыкин</u> Генерация ОВП-импульсов в подземных водах побережья Байкала в
феврале-марте 2024 г.: 30-суточный мониторинг в режиме реального времени от
зарождения до угасания77
Е.П. Чебыкин, С.В. Рассказов, И.А. Асламов, С.В. Снопков, В.И. Архипенко, А.М.
<u>Ильясова</u> Серия ОВП-импульсов подземных вод побережья Байкала 20–27
марта 2024 г.: вероятная связь с магнитными бурями
ВУЛКАНИЗМ, НОВЕИШАЯ ГЕОДИНАМИКА
И.С. Чувашова, И-мин Сунь, С.В. Рассказов, Т.А. Ясныгина, Е.В. Саранина
Геологические, минералогические и геохимические признаки смешения
расплавов контрастного состава и контаминации расплавов перидотитовым
материалом под Восточнои группои вулканов Удаляньчи, СВ Китаи
НЕОТЕКТОНИКА, ГЕОМОРФОЛОГИЯ
С.Н. Коваленко Ландшафтоформирующая литогенно-геоморфологическая основа
горного массива Мунку-Сардык (Восточный Саян)
ЭКСПЕДИЦИИ
А.Д. Китов, С.Н. Коваленко, И.И. Гергенов Экспедиции клуоа Портулан в район г.
Мунку-Сардык в 2022 году
УЧЕНЫЕ-ПЕРВОПРОХОДЦЫ
<u>1.Ю. Тверитинова, А.И. Гущин</u> по следам Восточно-Африканской рифтовой экспедиции
(заметки и рисунки глазами очевидцев)
<u>с.р. гассказов</u> с мещодии извановиче грудинине – исследователе оазитов и
типероазитов Сиоири и преподавателе основ геологии
правила для авторов

© ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет» © Геология и окружающая среда, 2024, Т. 4, № 1

CONTENTS

From the editorial board of the journal	5
REGIONAL GEOLOGY	7
S.V. Rasskazov, I.S. Chuvashova Generation of the Global Asian Isotope Thermal Anomaly	
(ASITA) in the incipient Earth-Moon System: Gas-dust Cloud Fragmentation versus	
Mega-impact	7
ENVIRONMENTAL MONITORING	.42
S.V. Rasskazov, I.A. Aslamov, S.V. Snopkov, V.I. Archipenko,	
A.M. Ilyasova, E.P. Chebykin 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	.42
S.V. Snopkov, S.V. Rasskazov, I.A. Aslamov, V.I. Archipenko,	
A.M. Ilyasova, E.P. Chebykin Express-analysis of quasi-periodic oxidation-reduction potential	
pulses in Baikal Coastal Groundwater during real-time monitoring (February 07-14,	
2024)	.61
I.A. Aslamov, S.V. Rasskazov, S.V. Snopkov, V.I. Archipenko,	
A.M. Ilyasova, E.P. Chebykin Generation of ORP Pulses in Baikal Coastal Groundwater in	
February-March 2024: 30-day real-time Monitoring from Initiation to Extinction	,77
E.P. Chebykin, S.V. Rasskazov, I.A. Aslamov, S.V. Snopkov,	
V.I. Archipenko, A.M. Ilyasova Series of ORP pulses in groundwater of the Baikal coast on	~ ~
March 20–27, 2024: probable connection with magnetic storms	.90
VOLCANISM, THE LATEST GEODYNAMICS	.98
I.S. Chuvashova, Y1-min Sun, S.V. Rasskazov, I.A. Yasnygina, E.V. Saranina Geological,	
Mineralogical, and Geochemical Evidence on Mixing of Contrast Melts and	
Velegences in Wedeligenchi NE Chine	00
VOICanoes in Wudalianchi, NE China	.98
NEUTECTONICS, GEOMORPHOLOGY	10
<u>S.N. Kovaleliko</u> Landscape-forming innogenic-geomorphologic basis of the Muliku-Sardyk	16
Inountain massin (Eastern Sayan)	21
A D. Kitov, S.N. Kovalenko, I.I. Gergenov Portulan Club expedition to the Munku-Sardyk	51
region in 2022	31
VYEHLIE-ITEPBOIIPOXOIIIILI	19
TY Typeriting A I Gushchin On the footsteps of the East African Rift Expedition	.т <i>)</i>
(Notes and Drawings through Eyes of Evewitnesses)	49
S.V. Rasskazov About Methodius Ivanovich Grudinin – researcher of basites and hyperbasites	
of Siberia and teacher of fundamentals of geology	82
Rules for authors	98

© Irkutsk State University

© Geology and Environment, 2024, Vol. 4, No. 1

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 научнообразовательного 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 научноисследовательские практики в южной части Сибирской платформы и в сопредельном Хамардабанском террейне, который был аккретирован 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 вендкембрийских пород, служащих в качестве вмещающей среды для газоконденсатных месторождений Сибирской платформы. Организуются наблюдения выходов нефти и газа из позднекайнозойского осадочного наполнения 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 окружающей среды
- Безопасность жизнедеятельности
- Ученые-первопроходцы
- Научная, профессиональная, учебная и педагогическая практика
- Исторические обзоры
- Обзоры
- Экспедиции
- Конференции
- Юбилеи

Региональная геология

УДК 523.3+51 https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.7

Образование глобальной Азиатской изотопной термальной аномалии (ASITA) в зарождающейся системе Земля–Луна: Мегаимпакт или фрагментация газопылевого облака?

С.В. Рассказов^{1,2}, И.С. Чувашова^{1,2}

¹Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия ²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Приводится обзор исследований Луны, свидетельствующих об изотопном кризисе гипотезы мегаимпакта Земли и о снятии возникающих противоречий конкурирующей моделью происхождения двойной системы Земля–Луна из газопылевого облака. Выявляется одновременное отвердевание магматического океана Луны с отвердеванием магматического океана в глобальной неоднородности ASITA Земли 4.54–4.44 млрд лет назад. На основе модели двойной системы Земля–Луна предполагается отвердевание магматического океана ASITA, опережающее отвердевание остальной Земли. Делается вывод о разновременной консолидации коры Земли после отвердевания магматического океана: в ASITA – 4.31 млрд лет назад и в остальной части Земли – с запаздыванием до 3.82 млрд лет назад.

Ключевые слова: ранняя Земля, Луна, мегаимпакт, газопылевое облако, магматический океан, геохимия.

Generation of the Global Asian Isotope Thermal Anomaly (ASITA) in the incipient Earth-Moon System: Gas-dust Cloud Fragmentation versus Mega-impact

S.V. Rasskazov^{1,2}, I.S. Chuvashova^{1,2}

¹Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia ²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Abstract. A review of lunar studies is given that indicate the isotope crisis of the Earth megaimpact hypothesis and the removal of emerging contradictions by a competing model of the origin of the Earth-Moon binary system from a gas-dust cloud. The simultaneous solidification of the magma ocean of the Moon with the solidification of the magma ocean in the global ASITA heterogeneity of the Earth 4.54–4.44 billion years ago is substantiated. From the model of the Earth–Moon binary system, the solidification of the ASITA magma ocean is assumed to precede the solidification of the rest of the Earth. It is concluded that the Earth's crust consolidated at different times after the solidification of the magma ocean: in ASITA – 4.31 billion years ago and in the rest of the Earth – with a delay of up to 3.82 billion years ago.

Keywords: early Earth, Moon, mega impact, gas and dust cloud, magma ocean, geochemistry.

Scientists develop models whose behavior they compare with observations of the real world. If they do not correspond (and assuming observations are accurate), the model is not a useful representation of the real world, and it is abandoned. If the model behavior does correspond with observations, then we can say that it works, and we keep it and call it a theory. This does not preclude the possibility that another model will work as well or better (by corresponding with observations more accurately or in a broader context). In this case, we say that the new model is better, and usually we drop the old one [Ученые разрабатывают модели, поведение которых они сравнивают с наблюдениями реального мира. Если соответствия нет (при условии, что наблюдения точны), модель бесполезна для представления реального мира и отбрасывается. Если поведение модели соответствует наблюдениям, то можно сказать, что она работает, и мы придерживаемся ее, называя это теорией. Не исключается возможность того, что другая модель также будет работать хорошо или лучше (по соответствию с наблюдениями или в более широком контексте). В этом случае, мы говорим, что новая модель лучше, и обычно мы отказываемся от старой модели].

Davies, 1999

Постановка вопроса

На современном этапе развития геологии основные вопросы происхождения и эволюции Земли увязываются с результатами изучения происхождения и эволюции всей Солнечной системы. Важнейшее значение имеет выявление общности и различий процессов, происходивших на Земле и других планетах, а также на спутнике Земли – Луне в момент зарождения Солнечной системы, когда закладывались глобальные неоднородности космических тел.

В мантии Земли различаются 4 глобальные неоднородности: ASITA, SOPITA, AFITA и NAITA. ASITA (Asian Isotopic Thermal Anomaly, Азиатская Изотопная Термальная Аномалия) – глобальная высокоскоростная неоднородность современной нижней мантии Земли, отличающаяся от другой глобальной высокоскоростной неоднородности NAITA (North American Isotopic Thermal Anomaly, Северо-Американская Изотопная Термальная Аномалия) и гло-

бальных низкоскоростных неоднородностей SOPITA (South Pacific Isotopic Thermal Anomaly, Южно-Тихоокеанская Изотопная Термальная Аномалия) и AFITA (African Isotopic Thermal Anomaly, Африканская Изотопная Термальная Аномалия). Отличие заключается в том, что в источниках позднефанерозойских вулканических пород ASITA представлены компоненты LOMU-ELMU (низкое и повышенное $\mu = {}^{238}U/{}^{204}Pb$), тогда как в источниках вулканических пород NAITA, SOPITA и AFITA существенную роль играет компонент HIMU (высокое $\mu = {}^{238}U/{}^{204}Pb$) (рис. 1a). Купные скоростные неоднородности, выделенные в первых глобальных сейсмо-томографических моделях, были подтверждены моделями высокого разрешения, которые свидетельствуют о слабом контрасте скоростей сейсмических волн в средней мантии и об относительном увеличении контраста скоростей сейсмических волн на границе ядро-мантия (рис. 1б).



Рис. 1. Выражение глобальных неоднородностей ASITA, SOPITA, AFITA и NAITA в вариациях средних скоростей продольных сейсмических волн всей нижней мантии (*a*) и контрастных скоростей сейсмических волн на границе ядро-мантия (δ). На панели *a* выделяются: неоднородность ASITA с характеристиками LOMU–ELMU в Азиатской области высоких скоростей, неоднородности SOPITA и AFITA с характеристиками от LOMU до HIMU в Южно-Тихоокеанской и Африканской областях низких скоростей и неоднородность NAITA с характеристиками от LOMU до HIMU в Северо-Американской области высоких скоростей. Изолинии средних по всей нижней мантии скоростей продольных волн (км/с) показаны по работе (Castillo, 1988). На панели *a* использованы данные из обзоров (Lustrino, Wilson, 2007; Jackson et al., 2018; Homrighausen et al., 2018; Rasskazov et al., 2020) с дополнением данными по базальтам архипелага Земля Франца-Иосифа (Левский и др., 2006).

Fig. 1. Expression of global inhomogeneities ASITA, SOPITA, AFITA, and NAITA in variations in the average velocities of P waves in the entire lower mantle (*a*) and contrasting seismic velocities waves at the core–mantle boundary (*b*). Panel *a* highlights: ASITA heterogeneity with LOMU–ELMU signatures in the Asian high-speed region, SOPITA and AFITA heterogeneities – with signatures from LOMU to HIMU in the South Pacific and African low-speed regions, and NAITA heterogeneity – with those from LOMU to HIMU in the North America high-speed region. Isolines of P-wave velocities (km/s) averaged throughout the lower mantle are shown after (Castillo, 1988). Panel *b* shows seismic velocities at the core–mantle boundary after (Ritsema, 2005). Panel *a* uses data from reviews (Lustrino, Wilson, 2007; Jackson et al., 2018; Homrighausen et al., 2018; Rasskazov et al., 2020) with an addition of data on basalts from the Franz Josef Land archipelago (Levsky et al., 2006).

ASITA пространственно соответствует территории Азии. Компоненты LOMU-ELMU в источниках базальтовых расплавов ASITA показывают спектр вторичных Pb-Pb датировок, перекрывающий всю историю Земли – ранней (4.54–3.6 млрд лет), средней (2.9–1.8 млрд лет) и поздней (<0.7 млрд лет) геодинамических эпох. Оценки возраста источников вулканических пород в общем не согласуются с возрастом пород верхней части коры (Rasskazov et al., 2020). Компоненты LOMU-HIMU базальтовых расплавов юга Тихого океана и Африки дают сравнительно древние оценки возраста (2-3 млрд лет) (Zindler, Hart, 1986), которые связываются с секвестром Рb из силикатной мантии в ядро в сульфидах (Hart, Gaetani, 2006). Компоненты LOMU–HIMU базальтовых расплавов Северной Америки соответствуют оценкам возраста протолитов в источниках вулканических пород, не превышающим 2.8 млрд лет при пространственном согласовании Pb-Pb датировок этих протолитов с возрастом пород фундамента, что не предполагает участие в выплавках материала ранней Земли и отражает ведущую роль плавления протолитов средней и поздней геодинамических эпох (Чувашова и др., 2022).

В последней цитированной работе делается вывод о том, что глобальные низкосконижнемантийные ростные структуры SOPITA и AFITA маркированы плюмовым компонентом HIMU, который генерировался в низкоскоростной нижней мантии юга Тихого океана и Африки в среднюю мантийную геодинамическую эпоху, около 2 млрд лет назад. При этом обращается внимание на разное происхождение глобальных высокоскоростных нижнемантийных структур ASITA и NAITA. Источники вулканических пород первой из них характеризуются протомантийными компонентами LOMU-ELMU, производными законсервированного нижнемантийного остова ранней мантийной геодинамической эпохи, связанной с охлаждением первичного планетарного магматического океана, тогда как отсутствие таких компонентов в источниках вулканических пород второй глобальной высокоскоростной нижнемантийной структуры свидетельствует об иной природе высоких скоростей нижней мантии. Из геологических реконструкций следует, что высокоскоростной материал NAITA в основном представляет собой океанические слэбы, погруженные в нижнюю мантию Северной Америки в позднюю геодинамическую эпоху.

Происхождение системы Земля – Луна было и остается предметом дискуссии, в основном с точки зрения физического моделирования (Витязев, Печерникова, 1996; Сергеев, Печерникова, 2020). В сложившихся к настоящему времени гипотетических воззрениях на раннюю Землю в существенной мере учитывается также состав пород Земли и Луны. В геологических интерпретациях преобладает идея об аккреции Земли из планетезималей в условиях высоких температур внутренней части Солнечной системы, которые препятствовали конденсации летучих элементов, и о последующем поступлении летучих веществ, присутствующих на Земле, которые переносились из внешней части Солнечной системы обломками недифференцированных планетезималей позднего шпона с проявлением мегаимпакта, выбившего фрагмент Земли в виде Луны (Albarède, 2009; Halliday, 2008; Connelly, Bizzarro, 2016; Maruyama, Ebizaki, 2019; Nielsen et al., 2021; Halliday, Canup, 2023; Gorkavyi, 2023). Во многих работах эта гипотеза принимается как безальтернативная. Однако ей противоречат изотопные данные по земным и лунным породам. Противоречия снимаются в конкурирующей гипотезе об образовании двойной системы Земля-Луна из фрагментированного газопылевого облака (Галимов, 2005, 2013; Galimov, Krivtsov, 2005; Галимов и др., 2005; Galimov, 2011; Маров, Ипатов, 2021).

Имеются ли на Земле глобальные структурные признаки ее взаимодействия с Луной. Попытка смоделировать такие структуры была недавно предпринята с точки зрения мегаимпактной гипотезы (Yuan et al., 2023). Размеры Луны сопоставимы с размерами глобальной неоднородности Земли ASITA. По среднему радиусу Луны 1737 км получается площадь окружности около 9.47 млн км², несколько уступающая проекции ASITA на земную поверхность, составляющую около 16–20 млн км². Цель настоящей работы – охарактеризовать современное состояние геохимического обоснования гипотезы мегаимпакта основного потока геологии и конкурирующей гипотезы образования двойной системы Земля–Луна из фрагментированного газопылевого облака с объяснением вероятного происхождения глобальной мантийной неоднородности ASITA в ранней Земле при образовании Луны.

Рождение Солнечной системы

Исходный строительным материалом Солнечной системы представлен углистыми хондритами. После Большого взрыва в Солнечной системе конденсировался высокотемпературный протопланетный материал. Первоначально полученная Pb–Pb оценка времени конденсации Ca–Al включений (CAI) в углистом хондрите Альенде 4566 +2/-1 млн лет назад (Allègre et al., 1995) уточнена измерениями времени конденсации подобных включений в разных метеоритах с U/Pb изотопной оценкой времени 4567.3 ±0.3 млн лет назад (Connelly et al., 2012).

Событие временного нагревания с образованием САІ и хондр – фундаментальный процесс в начальной эволюции солнечного протопланетного диска. С использованием U-скорректированного Pb-Pb датирования выполнены определения абсолютного возраста отдельных САІ и хондр из примитивных метеоритов. Возраст САІ соответствует 4567.30 ± 0.16 млн лет, тогда как возраст хондр варьируется в интервале от 4567.32 ± 0.42 до 4564.71± 0.30 млн лет. Кристаллизация хондр началась одновременно с САІ и продолжалась около 3 млн лет (рис. 2). Эта временная оценка подобна продолжительности жизни дисков, установленной на основе астрономических наблюдений.



Рис. 2. Временные масштабы формирования твердого тела и эволюции диска. Короткий интервал формирования события CAI в 160 000 лет аналогичен медиане времени жизни протозвезд класса 0 от ~0.1 до 0.2 млн лет, полученной на основе астрономических наблюдений областей звездообразования. Тепловой режим, необходимый для конденсации CAI, мог существовать

только на самых ранних стадиях эволюции диска, характеризующихся высокими темпами аккреции массы (~10⁻⁵ М⊙ годг⁻¹) к центральной звезде. Из работы (Connelly et al., 2012).

Fig. 2. Time scales of solid formation and disk evolution (Connelly et al., 2012). The brief formation interval of 160.000 years for the CAI-forming event is similar to the median lifetimes of class 0 protostars of ~0.1 to 0.2 My inferred from astronomical observation of star-forming regions. The thermal regime required for CAI condensation may only have existed during the earliest stages of disk evolution typified by high mass accretion rates (~10⁻⁵ M \odot year⁻¹) to the central star. Adopted from (Connelly et al., 2012).

Возрастные оценки образования и эволюции Земли и Луны

В изотопной системе 182 Hf $^{-182}$ W ядромантия двустадийный 182 W/ 184 W модельный возраст Земли (рис. 3) составляет около 30 млн лет (Kleine, Walker, 2017). Эта оценка существенно отличается от подобной оценки возраста Марса, составляющей около 4 млн лет. Марс достиг 90% своей конечной массы около 3.6 ± 2 млн лет. Изотопная систематика вольфрама Марса интерпретируется как показатель быстрого роста небольших тел. Ядро Земли могло формироваться в течение более длительного времени (десятки миллионов лет) (рис. 4). Между тем, работами последних лет с использованием сейсмоприемников, установленных на поверхности Марса, определены более крупные размеры его ядра, чем считалось ранее. Это отражает увеличение роли железа при образовании Марса, по сравнению с образованием Земли и тем более Луны.



Рис. 3. Панель *а*: Литофильный элемент ¹⁸²Нf остается в мантии, в то время как умеренно сидерофильный элемент ¹⁸²W перемещается преимущественно в металлическое ядро. Поскольку ¹⁸²Нf распадается с периодом полураспада 9 млн лет через ¹⁸²Та в ¹⁸²W, эти элементы представляют собой точный таймер аккреции, дифференциации и формирования ядра планет земной группы. Панель *b*: Иллюстрация изотопной Hf–W систематики. Из работы (Halliday, 2000).

Fig. 3. Panel *a*: The lithophile element ¹⁸²Hf remains in the mantle while the moderately siderophile element ¹⁸²W moves preferentially into the metallic core. Because ¹⁸²Hf decays with a half-life time of only 9 Myr via ¹⁸²Ta into ¹⁸²W these elements represent a precision timer of accretion, differentiation, and core formation of terrestrial planets. Panel *b*: Illustration of the Hf–W isotopic systematics. After (Halliday, 2000).



Рис. 4. Предполагаемое время формирования и размеры различных объектов Солнечной системы (пояснения в тексте). Максимальный размер материнских тел хондритов в настоящее время неизвестен. Из работы (Kleine, Walker, 2017).

Fig. 4. Inferred formation timescales and sizes of various objects in Solar system (explanation in the text). The maximum size of chondrite parent bodies is currently uncertain. Adopted from (Kleine, Walker, 2017).

Поиск наиболее древних пород Луны в конце 1980-х годов увенчался интенсивными исследованиями лунного анортозита 60025 с использованием изотопов Sr, Nd и Pb. Полученный прецизионный Рb-изотопный модельный возраст различных фракций породы составил 4.50±0.01 млрд лет (или 70±10 млн лет после образования Солнечной системы) (Hanan, Tilton, 1987), полученная ¹⁴⁷Sm-¹⁴³Nd изохрона – 4.44±0.02 млрд лет (или 130±10 млн лет после образования Солнечной системы) (Carlson, Lugmair, 1988). Предполагалось, что возраст Луны находится в диапазоне 4.51-4.44 млрд лет. Причина различий результатов датирования в U-Pb и Sm-Nd изотопных системах осталась не ясной.

По результатам более поздних исследований, проводившихся в 2000-х годах, предполагалось образование анортозитовой коры Луны приблизительно через 100 млн лет после возникновения Солнечной системы. Самая поздняя оценка времени ее образования – 4.46±0.04 млрд лет назад (Norman et al. 2003). Анортозитовая кора связывалась с образованием магматического океана (Zahnle et al. 2007). Крупномасштабный магматизм мог сохраняться в течение значительного времени после его охлаждения. Осталось не ясным, насколько сильно возраст самой ранней анортозитовой коры ограничивает возраст Луны. Полученные оценки времени образования Луны со времени возникновения Солнечной системы перекрывают интервал 45–150 млн лет (Halliday, 2008) или 70–200 млн лет (Kleine, Walker, 2017). Данные Hfмодельного датирования фрагментов конкордантных цирконов миссии Аполлон 14 указывают на дифференциацию лунной коры 4.51 млрд лет назад (Barboni et al., 2017).

компиляции геохронометрических B данных по породам Луны (Stöffler et al., 2006) сведены датировки в интервале от >4.5 до 3.1 млрд лет, полученные для шести типов лунных пород миссий Аполлона: (1) морские базальты, которыми частично заполнены бассейны ударных кратеров, например в бассейне Lunar Procellarum, (2) метаморфические породы высокой степени метаморфизма (расплавленные и нерасплавленные породы гранулитовой фации), (3) щелочные породы, (4) граниты/фельзиты, (5) базальты KREEP (породы обогащены калием, редкоземельными элементами и фосфором) и (6) плутонические магнезиальные разновидности и железистые анортозиты (породы фундамента). Использованы 40 Ar/ 39 Ar, Rb–Sr, Sm–Nd, U–Pb и Pb–Pb методы датирования. Максимум 4.0–3.8 млрд лет связан с серией датировок, полученных методом 40 Ar/ 39 Ar (рис. 5).



Рис. 5. Сводка радиометрических датировок лунных пород (Stöffler et al., 2006). Учитывая наличие ферроанортозитовых и магнезиальных разновидностей плутонов, состоящих из безводных минералов, предполагается изначально сухой состав Луны после ее образования до 4.37 млрд лет назад. После внедрения летучих веществ на Луне образовались метаморфические породы, а также граниты и щелочные породы. Прямоугольники без символа метода датирования указывают спектр возрастов, определенных по породам одной миссии Аполлона. Из работы (Maruyama, Ebisuzaki, 2017).

Fig. 5. The summary of radiometric ages of Lunar rocks based on data compiled by Stöffler et al. (2006). Considering the occurrence of Ferroan anorthosite and magnesian suite plutons composed of anhydrous minerals, the Moon was initially dry following its formation until 4.37 Ga. After the injection of volatiles, the Moon formed metamorphic rocks, as well as granite and alkali rocks. Rectangles without a symbol of dating method indicate age estimates from a single Apollo mission. Adopted after (Maruyama, Ebisuzaki, 2017).

В интерпретации этих геохронометричепредложенной в работе данных, ских (Maruyama, Ebisuzaki, 2017), кристаллизации магматического океана соответствуют датировки железистых анортозитов и частично пород магнезиальных плутонов в интервале 4.53-4.30 млрд лет назад с последующим переходом к предполагаемой бомбардировке ABEL (4.37-4.20 млрд лет назад). Эти два типа пород указывают на то, что после магматического океана Луна была сухой, а летучие вещества были привнесены спустя некоторое время. Всему датированному временному диапазону соответствует поздний

шпон в начале геологического существования Луны.

Вступление событий позднего шпона обосновывается результатами Ar/Ar и U–Pb (циркон) датирования образцов Аполлона. На рис. 6 представлена сводная информация о результатах датирования. Датировки циркона в основном варьируются от 4.20 до 4.37 млрд лет с небольшими возрастными пиками до 3.9–3.8 млрд лет. Датировки около 4.53 млрд лет проблематичны из-за ультравысоких температур.



Рис. 6. Гистограммы возраста, полученные по образцам Луны (Аполлон) (Borg et al., 2015) в ходе выполнения программы «Аполлон» Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) в различных местах посадки. Из работы (Maruyama, Ebisuzaki, 2017).

Fig. 6. Histograms of ages derived from the Lunar (Apollo) samples (Borg et al., 2015) acquired during the National Aeronautics and Space Administration (NASA) Apollo program at the various landing sites. Из работы (Магиуата, Ebisuzaki, 2017).

Ключевым фактом является проявление КREEP II (породы вулканических извержений в кратерах), гранитов и щелочных пород после 4.35 млрд лет назад. Предполагается, что щелочные породы образовались в результате частичного плавления пород фундамента при участии летучих компонентов в интервале от 4.35 до 4.0 млрд лет назад. К этому времени на Луну были доставлены летучие вещества в результате бомбардировок. Возраст самого молодого базальта KREEP составляет 3.80 млрд лет. По результатам датирования образцов, собранных американскими астронавтами, флудбазальты извергались на ближней к Земле стороне Луны до 3.7 млрд лет назад. Магматический потенциал Луны, однако, в это время не был исчерпан. Хронология подсчета кратеров предполагает продолжительный базальтовый вулканизм от ~4.0 до ~1.2 млрд лет. Возраст самых молодых морских базальтов в Oceanus Procellarum (Океан Бурь) составляет около 2.2–1.2 млрд лет (Fernandes et al., 2003; Hiesinger et al., 2010; Morota et al., 2011). В базальте Chang'E-5 (китайская миссия на Луну 2021 г.) различные минеральные фазы образуют единую изохрону, определяющую прецизионную Pb–Pb датировку 2030 \pm 4 млн лет (рис. 7). Все изученные обломки имеют первичную магматическую структуру без явного наложения ударного метаморфизма. Эта датировка представляет собой самый молодой измеренный радиоизотопным методом возраст кристаллизации лунных базальтовых пород. Другой группой исследователей для базальта Chang'E-5 получена менее точная Pb–Pb оценка возраста 1963 \pm 57 млн лет (Che et al., 2021).



Рис. 7. Рb–Рb изохрона базальта Chang'E-5. *а* – интегральная Pb–Pb изохрона, показывающая линию смешения между упересечением радиогенного 207 Pb/ 206 Pb и исходным составом Pb (204 Pb/ 206 Pb = 0.00228 ± 0.0001; 207 Pb/ 206 Pb = 0.860 ± 0.019). *б* – увеличенная нижняя часть изохроны на панели *а*, показывающая измерения Zr-содержащих минералов. Черная линия соответствует наиболее подходящей изохроне с уравнением у = (323 ± 7) х + (0.12510 ± 0.00 интервалов ошибок, представленных стандартной ошибкой (SE) 1*о*. Pl – плагиоклаз; Рух – пироксен; Mtr – основная масса. Из работы (Li et al., 2021).

Fig. 7. Pb–Pb isochron for the Chang'E-5 basalts. *a* – the integrated Pb-Pb isochron showing the mixing line between the y-intercept as radiogenic 207 Pb/ 206 Pb and the initial Pb compositions (204 Pb/ 206 Pb = 0.00228 ± 0.0001; 207 Pb/ 206 Pb = 0.860 ± 0.019). *b* – the enlarged lowest part of the isochron in panel a highlighting the measurements of Zr-bearing minerals. The black lin the best-fitted isochron with an equation of y = (323 ± 7) x + (0.12510 ± 0.00 Error bars represent 1 σ standard error (SE). Pl, plagioclase; Pyx, pyroxene; Mtr, matrix. Adopted from (Li et al., 2021).

Ключевые геохимические характеристики пород Земли и Луны

Для решения вопроса о происхождении Луны решающую роль играет обеднение Луны железом и летучими элементами. Луна содержит во много раз меньше K, Na и других летучих элементов по сравнению с углистыми хондритами. Луна заметно обеднена летучими компонентами по сравнению с Землей (рис. 8).





Fig. 8. Depletion of the Moon and Earth in volatiles (data from Ringwood 1986; Jones, Palme 2000). Из работы (Galimov, Krivtsov, 2005).

Предполагался механизм истощения посредством испарения летучих элементов. Однако при испарении происходит фракционированием изотопов углерода, кислорода, магния, калия, кремния, хрома и других. При испарении легкий изотоп опережает тяжелый, и остаточное вещество должно обогатиться тяжелым изотопом элемента, который был утрачен. Между тем, следов изотопного фракционирования летучих в лунном веществе не обнаружено. В координатах δ^{18} О и δ^{17} О изотопные составы образцов Луны и Земли лежат на одной линии.

Фигуративные точки образцов других космических тел Солнечной системы смещены от этой линии (рис. 9). Следовательно, Луна образовалась из такого же вещества, как и мантия Земли, т.е. Луна и Земля принадлежали к единому телу без каких-либо дополнений из других тел Солнечной системы (Lugmair, Shukolyukov, 1998; Clayton, Mayeda, 1975; Галимов, 2005).



Рис. 9. Диаграмма отношений изотопов кислорода δ^{17} О и δ^{18} О (δ^{17} О и δ^{18} О – величины, характеризующие сдвиги изотопных отношений кислорода 17 О/ 16 О и 18 О/ 16 О, относительно принятого стандарта SMOW). На этой диаграмме образцы Луны и Земли ложатся на общую линию фракционирования, что свидетельствует о генетическом родстве их состава. Из работы (Галимов, 2005).

Fig. 9. Diagram of oxygen isotope ratios δ^{17} O and δ^{18} O (δ^{17} O and δ^{18} O are values characterizing shifts in oxygen isotope ratios 17 O/ 16 O and 18 O/ 16 O, relative to the accepted SMOW standard). In this diagram, samples from the Moon and Earth fall on a common fractionation line, indicating the genetic relations of their compositions. After (Galimov, 2005).

Морские базальты на Луне являются ключевым источником информации о термохимической эволюции на протяжении большей части лунной истории. Считалось, что молодые морские базальты КREEP из региона Oceanus Procellarum, который называется Procellarum KREEP Terrane (PKT), образовались на глубине из источников, обогащенных калием, ркдкоземельными элементами и фосфором. Однако эта гипотеза не проверялась на молодых базальтах территории PKT. Исследования обломков молодого (2 млрд лет) базальта РКТ Chang'E-5 показывают умеренные концентрации TiO₂, высокие концентрации FeO и KREEP-подобные концентрации редкоземельных элементов (P3Э) и Th. Этот базальт имеет содержание TiO₂ 6–8 мас.% в интервале содержания этого оксида базальтовых обломков A16 60639, но по другим компонентам (низким значения Mg#, низким содержаниям Al₂O₃ и K₂O) отличается от них (рис. 10).



Рис. 10. Валовый химический состав обломков базальта Chang'E-5. Показаны вариации Mg# = Mg/(Mg+Fe, Al₂O₃ и K₂O в зависимости от TiO₂ для двух проанализированных фрагментов Чаньэ-5 (красные квадраты с полосами ошибок 1 сигма). Их сравнивают с различными базальтами с мест посадки Аполлона, как указано в легенде (A11 означает Аполлон-11 и т. д. A16 60639 относится к образцу 60639 Аполлона-16). Из работы (Che et al., 2021).

Fig. 10. Bulk chemical composition of basalt Chang'E-5 fragments. Sown are variations of Mg# = Mg/(Mg+Fe, Al₂O₃, and K₂O vs. TiO₂ for the two analyzed Chang'e-5 fragments (red squares with 1 sigma error bars). These are compared to different basalts from Apollo landing sites as indicated in the legend (A11 stands for Apollo 11 etc. A16 60639 refers to Apollo 16 sample 60639). Adopted from (Che et al., 2021).

Источник базальта Chang'E-5 отличается от источника базальтов KREEP по изотопному составу Sr и Nd. Повышенные концентрации несовместимых микроэлементов и обогащение легкими РЗЭ в обломках базальта Chang'E-5 являются типичными характеристиками для материала, обогащенного KREEP. Однако изотопный состав базальта Chang'E-5 не согласуется с происхождением базальтов КREEP. Даже небольшой вклад (<0.5%) к материалу КREEP приведет к возрастанию отношения 87 Rb/ 86 Sr (>0.19) при низком отношении 147 Sm/ 144 Nd (<0.173) (рис. 11), что значительно сместит изотопные отношения Sr и Nd базальта Chang'E-5. Низкое начальное 87 Sr/ 86 Sr и высокое єNd(t), наблюдаемые в базальте Chang'E-5, подобны значениям в низкотитанистых базальтах Апол-

лона-12. Это сходство указывает на выплавление базальтов Chang'E-5 и низкотитанистых базальтов Аполлона-12 из истощенного источника, не связанного с KREEP. Такой истощенный источник мог кристаллизоваться из кумулатов раннего лунного магматического океана, в которых преобладал оливин и пироксен.



Рис. 11. Изотопная Rb–Sr и Sm–Nd эволюция лунного материала. a – отношение ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr в области источника базальта Chang'E-5 рассчитывается в рамках одностадийной модели, в которой Луна дифференцировалась 4.56 миллиарда лет назад с начальным ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.69903 (Nyquist et al., 1973; Nyquist, 1977). Валовое значение ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr на Луне взято из (Nyquist, 1977; Neal et al., 1990). δ – отношение ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd в области источника рассчитывается в рамках двух-стадийной модели роста по (Borg et al., 2009; Elardo et al., 2014). В этой модели Луна следует по хондритному пути до тех пор до дифференциации 4.42 ± 0.07 миллиарда лет назад, что соответствует модельному возрасту образования urKREEP (Nyquist, Shih, 1992; Nyquist et al., 1995). Изотопные Sr и Nd данные базальта Chang'E-5 получены, соответственно, по плагиоклазу и мерриллиту. Исходные ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr и єNd(t) рассчитаны на 2.03 миллиарда лет назад (Li et al., 2021). Горизонтальные сплошные линии на обеих панелях относятся к первичному резервуару. Данные о базальтах и метеоритах Аполлона взяты из работы (Elardo et al., 2014) и ссылок в ней. Диаграммы из работы (Tian et al., 2021).

Fig. 11. Rb–Sr and Sm–Nd isotopic evolution of lunar materials. $a - {}^{87}$ Rb/ 86 Sr ratios of Chang'E-5 basalt source regions are calculated assuming a single-stage model in which the Moon differentiated at 4.56 billion years ago with an initial 87 Sr/ 86 Sr = 0.69903 (Nyquist et al., 1973; Nyquist, 1977). The bulk Moon 87 Rb/ 86 Sr value is from (Nyquist, 1977; Neal et al., 1990). $b - {}^{147}$ Sm/ 144 Nd ratios of basalt source regions are calculated assuming a two-stage growth model following (Borg et al., 2009; Elardo et al., 2014). In this model, the Moon followed a chondritic path until differentiation occurred at 4.42 \pm 0.07 billion years ago represented by the model age of urKREEP formation (Nyquist, Shih, 1992; Nyquist et al., 1995). The Sr and Nd isotopic data of the Chang'E-5 basalts were acquired on plagio-clase and merrillite, respectively. The initial 87 Sr/ 86 Sr and ϵ Nd(t) are calculated using 2.03 billion years ago (Li et al., 2021). The horizontal solid lines in both panels refer to the primordial reservoir. The Apollo mare basalts and meteorites data are from (Elardo et al., 2014) and references therein. Adopted from (Tian et al., 2021).

Предполагалось, что лунные породы обогащались РЗЭ и несовместимыми микроэлементами, скорее всего, вследствие магматических процессов, таких как частичное плавление и фракционная кристаллизация. Считалось, что аналогичные характеристики, наблюдаемые в лунных базальтовых метеоритах (например, NWA 032, NWA 4734, LAP 02205), возникают в результате частичного плавления слабо истощенного источника с 147 Sm/ 144 Nd = 0.222–0.227 и 87 Rb/ 86 Sr = 0.009-0.022 (рис. 8). До извержения базальтового расплава Chang'E-5 должна была фракционная кристаллизация, произойти способствовавшая повышению содержания несовместимых элементов и легких РЗЭ. Низкое значение Мg# (~32) при высоком содержании FeO (22.2 мас.%) и TiO₂ (5.7 мас.%), а также зональность оливина и пироксена в образцах базальта Chang'E-5 свидетельствуют о том, что он представляет собой продукт магматического очага, эволюционированный под РКТ около 2 млрд лет назал.

Для получения высоких концентраций РЗЭ и Th необходимо частичное плавление низкой степени и/или фракционная кристаллизация. Молодой (2 млрд лет) вулканизм не связан с ассоциацией КREEP. Отсутствие радиоактивных тепловыделяющих элементов в их источнике предполагает продолжительную историю охлаждения недр Луны для генерации самых молодых расплавов Луны без генерации дополнительного радиогенного тепла.

Специфика источника базальта Chang'E-5 подчеркивается исследованием изотопного состава Pb. Определение значения µ зависит от принятой лунной модели изотопной эволюции Pb (Snape et al., 2016, 2019; Merle et al., 2020). На основе модели лунного магматического океана (Lunar Magma Ocean, LMO), который предположительно породил все основные лунные силикатные резервуары, включая источники лунных базальтов, предлагается двухэтапная модель лунной эволюции изотопов Pb. Эволюция изотопов Рb базальтового источника начинается с t₀ (около 4500 млн лет назад) для образования Луны с $\mu_1 = 462 \pm 46$ для LMO, через t₁ (около 4420-4300 млн лет назад) для кристаллизации LMO и образование крупных геохимически-различных резервуаров с различными значениями µ₂, до t₂ для образования морского базальта с исходными изотопами Pb. Хотя время t₁ остается неопределенным, его возрастной диапазон мало влияет на рассчитанные значения µ2. Для расчета двухступенчатого значения μ 684 \pm 40 для источника базальта Chang'E-5 было выбрано время t_1 4376 \pm 18 млн лет. Это значение μ находится в пределах ($\mu \approx 300-1000$) низкотитанистых и высокотитанистых базальтов Аполлона, но значительно ниже, чем значения ($\mu \approx 2600-3700$) базальтов KREEP и высокоглиноземистых базальтов (рис. 12). Такое резкое различие предполагает, что базальт Chang'E-5 из террейна Procellarum КREEP, скорее всего, образовался в результате плавления источника с низким содержанием KREEP. Очевидное увеличение значений µ с интервала 3.4-3.0 млрд лет для низкотитанистых базальтов Аполлона и низко- и очень низкотитанистых базальтовых метеоритов (NWA 4734 и NWA 773) позволяют предположить прогрессирующий вклад КRЕЕР-подобного компонента в такие породы. Однако базальт Chang'E-5 не следует этой тенденции, что указывает на отсутствие **КRЕР-**подобных компонентов в глубинном источнике.



Рис. 12. Исходные отношения ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb в зависимости от возраста кристаллизации лунных базальтов и метеоритов. Линии представляют собой двухэтапную эволюцию изотопов Pb источников лунной мантии при заданных значениях µ. Области градиента связаны с мантийными источниками от базальтов бедных KREEP (желтый) до богатых KREEP (синий) согласно значениям µ (Snape et al., 2016). Данные Аполлона и метеоритов взяты из источников (Snape et al., 2016, 2019; Merle et al., 2020). Столбики ошибок представляют собой стандартные ошибки 2σ. A11 – высокотитанистые базальты Аполлона-11; A12 – низкотитановые базальты Аполлона-12; A15 – низкотитанистые базальты Аполлона; A17 – высокотитанистые базальты Аполлона-17; Высокоглиноземистые базальты Аполлона-14; KREEP, базальты KREEP Аполлона-15; Лунный базальтовый метеорит, низко- и очень низкотитанистые базальтовые метеориты (кланы NWA 4734 и NWA 773). Взято из (Li et al., 2021).

Fig. 12. Initial ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb ratios vs. crystallization ages of the lunar basalts and meteorites. The lines represent the two-stage Pb isotope evolution of lunar mantle sources at given μ values (Snape et al., 2016). The gradient areas are associated with KREEP-poor (yellow) to KREEP-rich (blue) mantle sources according to μ values. The Apollo and meteorite data are from (Snape et al., 2016, 2019; Merle et al., 2020). Error bars are 2σ standard errors. A11 – Apollo 11 high-Ti basalts; A12 – Apollo 12 low-Ti basalts; A15 – Apollo low Ti basalts; A17 – Apollo 17 high-Ti basalts; High-Al, Apollo 14 high-Al basalts; KREEP, Apollo 15 KREEP basalts; Lunar basalt meteorite, low- and very-low-Ti basaltic meteorites (NWA 4734 and NWA 773 clan). Adopted from (Li et al., 2021).

Модели образования системы Земля–Луна

Мегаимпактная модель и противоречащие ей факты

Анализ первых лунных образцов, а также геофизических данных и данных дистанционного зондирования миссий Аполлон привел к гипотезе гигантского ударного происхождения Луны. У.К. Хартманн и Д.Р. Дэвис (Hartmann, Davis, 1975) предположили, что вместо того, чтобы расти за счет скопления планетезималей, Земля завершила аккрецию несколькими катастрофическими слияниями тел одинакового размера. В соответствии с этим предположением А.Г.У. Кэмерон и У. Уорд (Cameron, Ward 1976) показали, что протопланета размером с Марс (получившая название «Тейя» – мать Луны в греческой мифологии (Halliday, 2000)) могла столкнуться с прото-Землей под углом около 45° со скоростью при контакте Vcoll ≈ Vesc. Этим объяснялся высокий угловой момент системы Земля–Луна. Делался вывод о том, что, если Луна рождалась на границе сталкивающихся мантий, она имела преимущественно силикатный состав, объясняющий ее небольшое ядро (Гольдштейн и др., 1976), составляющее самое большее несколько процентов лунной массы. Такие соотношения в теле Солнечной системы уникальны.

В гипотезе образования Луны в результате столкновения с Землей (мегаимпакта) предполагалось, что огромная масса земного материала и частично материала ударника (небесного тела, столкнувшегося с Землей) расплавилась и была выброшена на околоземную орбиту. В 1989 г. было выполнено компьютерное моделирование по алгоритму, потребовавшему использование 31-дневного расчетного ресурса самого совершенного военного компьютера того времени. Была показана возможность осуществления сценария мегаимпакта с динамической точки зрения. В канонической компьютерной модели формирования Луны при столкновении протопланеты «Тейя» с прото-Землей «сцепление и слияние» выбрасывает часть мантии Тейи на орбиту, в то время как Земля аккумулирует большую часть Тейи и ее импульс. Согласно математической модели, создавалась горячая прото-лунная система с высоким угловым моментом и преобладанием силикатов, что в значительной степени согласовывалось с лунной геологией, геохимией и динамикой. В рамках гипотезы объяснялось повышенное значение углового момента системы Земля–Луна и наклон оси Земли. Поскольку столкновение случилось после образования ядра Земли, железо оказалось в основном сконцентрированным в ядре Земли, а Луна образовалась из силикатного вещества земной мантии.

Гипотеза мегаимпакта нашла отражение в общем сценарии роста Земли за 30 млн лет от астероида до планеты современного радиуса, имеющей все оболочки. Гигантский удар произошел около 4.53 млрд лет назад с уничтожением океана на поверхности Земли и вскоре после этого океан вновь образовался (Abe, 1995) (рис. 13).



Рис. 13. Схематическая иллюстрация последовательного роста среднего радиуса Земли (MRE, middle radius of Earth) от астероида до слоистого тела с атмосферой и океаном (Abe, 1995; Maruyama, Ebisuzaki, 2017). Видны ступени дифференциации: 0.3 MRE – сохраняется атмосфера, 0.5 MRE (размер Марса) – зарождается магматический океан на поверхности и 0.7 MRE – образуется ядро. Около 4.53 млрд лет назад происходит гигантский удар и вскоре после этого вновь образуется океан.

Fig. 13. Schematic illustration of the successive formation of the layered Earth, from asteroid to the fully-layered Earth with atmosphere and ocean at 4.53 Ga (Abe, 1995; Maruyama, Ebisuzaki, 2017). Note the step-wise differentiation at 0.3 MRE (mean radius of the Earth) (keeping atmosphere), 0.5 MRE (Mars) (initiation of magma ocean on the surface), and 0.7 MRE (segregation of core), giant impact at 4.53 Ga, and the re-emergence of ocean shortly thereafter.

По сравнению с ¹⁸²Hf-¹⁸⁴W изотопной систематикой мантии Земли U-Pb изотопная систематика дает гораздо более продолжительные временные рамки аккреции Земли с образованием ее ядра (Halliday, 2004; Kleine et al., 2004; Rudge et al., 2010; Kleine, Walker, 2017). Рассчитывается время, необходимое для роста до ~0.63 ее радиуса 56-130 млн лет в равновесной двустадийной модели и 21.5-51 млн лет в модели экспоненциального роста (Rudge et al., 2010). Иными словами, в отличие от Hf-W хронометра, U-Pb хронометр не дает строгого ограничения процессов ранней Земли, поскольку U/Pb соотношение в массе Земли и изотопный состав Рь известны недостаточно хорошо (Jacobsen et al., 2008; Kleine, Walker, 2017). Более того, несоответствие временных шкал аккреции, связанное с U-Pb систематикой, может быть вызвано поздней сегрегацией свинепсодержащих сульфидов в ядре Земли (Wood, Halliday, 2005; Hart, Gaetany, 2006; Halliday, Wood, 2007), неравновесием при формировании ядра (Halliday, 2004; Allègre et al., 2008) и возможным добавлением Pb в позднем шпоне (Albarède, 2009). Затруднения, которые вызывают объяснения близкого изотопного состава Земли и Луны в теории гигантского удара были названы изотопным кризисом (Melosh, 2014).

Основной неопределенностью между систематикой Hf-W и U-Pb для временной шкалы формирования ядра Земли является сильная зависимость этих систем от равновесия металл-силикат (Kleine et al., 2002; Allègre et al., 2008) и неясного изотопного состава свинца и отношения U/Pb в Земле (Yin, Jacobsen, 2006). Дж.Ф. Радж и др. (Rudge et al., 2010) обратили внимание на то, что Hf-W изотопная система ограничивает раннюю фазу аккреции, тогда как U-Pb изотопная система ограничивает позднюю стадию аккреции и мало информативна в отношении раннего роста Земли. Для согласования определений возраста в Hf-W и U-Pb изотопных системах растущей Земли, необходимо полное металл-силикатное равновесие в сочетании с очень быстрой ранней аккрецией, которая впоследствии замедляется и сопровождается длительной фазой гораздо более медленного роста, кульминацией которой становится поздний мегаимпакт, т.е. событие формирования Луны (Rudge et al., 2010; Yu, Jacobsen, 2011).

На рис. 14 представлена одна из последних реконструкций сторонников мегаимпактного происхождения Луны (Halliday, Canup, 2023), в которой Луна образовалась около 100 млн лет после образования Солнечной системы, гораздо позже Марса.



Время после запуска процессов в Солнечной системе, млн лет

Рис. 14. Схема сопоставления этапов формирования и дифференциации Марса и Луны. Предполагается ранняя и быстрая аккреция Земли и других планетарных объектов, кульминацией которой стал гигантский удар, образовавший Луну. Существовал ли поздний шпон, теперь не ясно, поскольку имеются доказательства того, что высокосидерофильные элементы в силикатной Земле могли частично возникать в результате потока из ядра. Из работы (Halliday, Canup, 2023)

Fig. 14. Scheme of comparison of the stages of formation and differentiation of the Mars and Moon (Halliday, Canup, 2023). Early and rapid accretion of the Earth and other planetary objects is hypothe-

sized, culminating in a giant impact that formed the Moon. Whether late veneer existed is now unclear, as there is evidence that highly siderophilic elements in silicate Earth may have arisen in part by flow from the core. Adopted from (Halliday, Canup, 2023).

Модель фрагментации газопылевого облака, объяснения фактов, противоречащих мегаимпактной гипотезе

Конкурирующая модель предложена Э.М. Галимовым в середине 1990-х годов. Согласно этой модели, Луна сформировалась не вследствие удара, а одновременно с Землей в результате фрагментации облака пылевых частиц по принципу формирования двойных звезд (рис. 15).



Рис. 15. Формирование Земли и Луны из общего газопылевого диска как двойной системы (Галимов, 2005).

Fig. 15. Formation of the Earth and Moon from a common gas-dust disk as a binary system (Galimov, 2005).

В рамках этой гипотезы снижение содержания железа объясняется его утратой Луной вместе с другими летучими компонентами в результате испарения. Проблема изофракционирования решается топного переводом кинетического изотопного эффекта в испарение закрытой системы, в которой испарившаяся молекула может вновь вернуться в расплав. В этом случае устанавливается некоторое равновесие между расплавом и паром. Более летучие компоненты накапливаются в паровой фазе. Вследствие того, что существует как прямой, так и обратный переход молекул между паром и расплавом, термодинамический изотопный эффект оказывается небольшим, а при повышенных температурах может быть пренебрежимо мал. Идея закрытой системы неприменима к расплаву, выброшенному на околоземную орбиту и испаряющемуся в космическое пространство, но она вполне соответствует процессу, протекающему в

облаке частиц. Испаряющиеся частицы окружены своим паром, и облако в целом находится в условиях закрытой системы (рис. 16).



Рис. 16. Кинетический и термодинамический изотопные эффекты: а) кинетический изотопный эффект при испарении расплава приводит к обогащению пара легкими изотопами летучих элементов, а расплава – тяжелыми изотопами; б) термодинамический изотопный эффект, возникающий при равновесии между жидкостью и паром. Он может быть пренебрежимо мал при повышенных температурах; в) закрытая система частиц, окруженных своим паром. Испарившиеся частицы могут вновь возвращаться в расплав. Из работы (Галимов, 2005).

Fig. 16. Kinetic and thermodynamic isotope effects: a - a kinetic isotope effect during melt evaporation leads to enrichment of a steam with light isotopes of volatile elements, and a melt with heavy isotopes; b - thermo-dynamic isotope effect that occurs, when there is equilibrium between liquid and vapor. It may be negligible at elevated temperatures; c - a closed system of particles surrounded by their own vapor. Evaporated particles can return to the melt again. Adopted from (Galimov, 2005).

При обосновании гипотезы решалась динамическая задача образования двойной системы Земля–Луна и принимался расчетный вариант модели молекулярной динамики (Galimov, Krivtsov, 2005). Предполагалось, что облако сжимается в результате гравитации. Происходит его коллапс. Перешедшая в пар часть вещества выжимается из облака, а оставшиеся частицы оказываются обедненными летучими компонентами. При этом фракционирование изотопов отсутствует или пренебрежительно мало.

В модели облако частиц движется в соответствии с уравнением второго закона Ньютона, включающего массу, ускорение и силу, вызывающую движение. Сила взаимодействия между каждой частицей и всеми остальными частицами включает несколько слагаемых: гравитационное взаимодействие, упругую силу, действующую при соударении частиц (проявляется на очень малых расстояниях), и неупругую часть взаимодействия, в результате которого энергия столкновения переходит в тепло. Облако частиц имеет массу системы Земля–Луна и обладает угловым моментом, характеризующим систему этих тел.

В компьютерном расчете модели описывается коллапс облака частиц с формированием центрального тела повышенной температуры. Фрагментация облака частиц достигается введением эффекта отталкивания частиц в процессе испарения с появлением ротационной неустойчивости. Выполненные оценки показывают, что поток должен быть небольшим и вписываться в правдоподобные значения массы и времени (10⁵ лет для временной шкалы начальной аккумуляции планетного тела). Компьютерное моделирование с использованием реальных параметров показывает появление ротационной неустойчивости, завершающейся формированием двух нагретых тел, одному из которых предстоит стать Землей, а другому – Луной (рис. 17).



Рис. 17. Компьютерная модель коллапса облака испаряющихся частиц. Показаны последовательные фазы фрагментации облака (a - c) и образования двойной системы $(\partial - e)$. В расчете использовались реальные параметры, характеризующие систему Земля – Луна: кинетический момент K = 3.45×10^{34} кг×м²×c⁻¹; общая масса Земли и Луны M = 6.05×10^{24} кг, радиус твердого тела с общей массой Земли и Луны Rc = 6.41×10^6 м; гравитационная постоянная "гамма" = 6.67×10^{-11} кг⁻¹×м³×c⁻²; начальный радиус облака R0 = 5.51 Rc; число расчетных частиц N = 10^4 ,

значение потока испарения 10⁻¹³ кг×м⁻²×с⁻¹, отвечающее приблизительно 40% испарению массы частиц с размером хондры порядка 1 мм в течение 10⁴–10⁵ лет. Рост температуры условно показан изменением цвета от синего к красному. Таким образом, предложенная динамическая модель объясняет возможность возникновения двойной системы Земля – Луна. При этом испарение приводит к утрате летучих элементов в условиях практически закрытой системы, обеспечивающей отсутствие заметного изотопного эффекта. Из работы (Галимов, 2005).

Fig. 17. Computer model of the collapse of a cloud of evaporating particles. The successive phases of cloud fragmentation (*a*–*d*) and the formation of a binary system (*e*–*f*) are shown. The calculations used real parameters characterizing the Earth–Moon system: kinetic moment $K = 3.45 \times 10^{34} \text{ kg} \times \text{m}^2 \times \text{s}^{-1}$; to-tal mass of the Earth and Moon M = 6.05×10^{24} kg, radius of a solid body with the total mass of the Earth and Moon Rc = 6.41×10^6 m; gravitational constant "gamma" = $6.67 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \times \text{m}^3 \times \text{s}^{-2}$; initial cloud radius R0 = 5.51 Rc; the number of calculated particles is N = 10^4 , the value of the evaporation flux is $10^{-13} \text{ kg} \times \text{m}^{-2} \times \text{s}^{-1}$, corresponding to approximately 40% of the evaporation of the mass of particles with a chondrule size of about 1 mm over 10^4 – 10^5 years. An increase in temperature is conventionally shown by a change in color from blue to red. Thus, the proposed dynamic model explains the possibility of the emergence of the Earth-Moon binary system. In this case, evaporation leads to the loss of volatile elements under conditions of a practically closed system, which ensures the absence of a noticeable isotope effect. Adopted from (Galimov, 2005).

В моделировании Э.М. Галимова и А.М. Кривцова (Galimov, Krivtsov, 2005) газопылевое облако фрагментируется в системе Земля–Луна приблизительно через 50 млн лет после формирования Солнечной системы (т.е. Земля и Луна начинают конденсироваться около 4.52 млрд лет назад). Для формирования Земли требуется 70 млн лет (т.е. Земля образуется около 4.45 млрд лет назад). Несколько позже образуется Луна. Имеющиеся изотопные данные интерпретируются в рамках гипотезы фрагментации газопылевого облака в системе Земля–Луна (Humayun, Clayton, 1995; Jones, Palme, 2000; Галимов, 2005; Galimov, Krivtsov, 2005; Fisher et al., 2021).

Концепция фрагментации газопылевого облака в системе Земля–Луна сошласуется с обеднением Земли и Луны железом, ксеноном, рубидием и свинцом (рис. 18).





Fig. 18. Segregation of metals and hydrodynamic escape of volatiles in the model of the formation of the Earth and Moon from a supraplanetary gas–dust body (Galimov, 2011).

Земной Хе фракционирован по отношению к метеоритному (Podosek, Ozima, 2000). Такое фракционирование возможно благодаря гравитационному разделению при гидродинамическом выходе (Hunten et al., 1987), но невозможно при мгновенной потере атмосферы в результате мегаимпакта. Фракционирование ксенона согласуется с обсуждаемой моделью. Ранний Хе удаляется вместе с другими летучими компонентами в гидродинамическом потоке при сжатии газопылевого тела. Гидродинамический подъем завершается через 120 млн лет после события САІ. Этот рубеж обозначает закрытие системы Хе при завершении процесса аккреции и начале истории Земли как единого тела. Подобным образом Землей и Луной теряется Rb с оценкой возраста около 60 млн лет после события САІ (Galimov, 2011).

Вслед за работами (Галимов, 2005; Galimov, Krivtsov, 2005) в работе (Jacobsen et al., 2008) подчеркивалось, что U-Pb фракционирование в туманности является доминирующим процессом, поэтому фракционирование, связанное с отделением ядра, должно быть точно определено по сравнению с фракционированием, связанным с летучими веществами. Как и в случае с Хе и Rb, ранней системой Земля-Луна теряется около 97% исходного (эфирного) Рb. Первичный (солнечный) Рb имеет µ=0.27 (Anders, Grevesse, 1989), тогда как земной мантийный Pb имеет µ=8–10 (Allègre et al., 1995). К. Аллегре и др. (Allègre et al., 2008) предположили, что потери раннего Xe и Pb были взаимосвязаны и отражали общее крупное событие во время дифференциации Земли примерно 4.45 млрд лет назад (~117 млн лет назад после образования Солнечной системы). Потеря Рb рассматривалась как результат его выноса в ядро в сульфидной форме. Предполагалось, что произошедшая тогда сегрегация ядра сопровождалась огромным энерговыделением, которое привело к образованию океана магмы и потере атмосферы. Поскольку ядро Луны намного меньше ядра Земли, предположение о том, что Рb был удален в ядро, не объясняет более сильное обеднение Рь Луны, чем Земли. Свинец проявляет литофильные свойства при высоком окислительно-восстановительном потенциале и сидерофильные свойства – при низком окислительно-восстановительном потенциале. Его сродства к металлической фазе не достаточно для объяснения 30-кратного обеднения мантии Земли, превышающее таковое некоторых типичных сидерофильных элементов, например, W и Co. В рамках гипотезы фрагментации газопылевого облака в системе Земля–Луна предполагается удаление Pb в гидродинамическом потоке. Свинец – один из самых летучих элементов. Его истощение на Земле и, в большей степени, на Луне происходит на стадии сжатия и гидродинамического выхода летучих элементов. По предполагаемому диапазону µ от 8 до 10, время завершения аккреции из газо-пылевой среды ограничивается интервалом около 110–130 млн лет после образования Солнечной системы (Galimov, 2011).

Модель образования планет в результате фрагментации газопылевого облака фактически обсуждалась в одной из недавних публикаций (Nimmo et al., 2018). Потеря газовой туманности признавалась в ней как одно из наиболее важных событий ранней истории Солнечной системы. Предполагалось, что время этого события относительно временного масштаба роста планет оказало большое влияние на конечную архитектуру Солнечной системы. Важным ограничением сроков потери газа и пыли служат наблюдения за молодыми планетными системами, которые часто демонстрируют избыток инфракрасного излучения, что интерпретируется как признак небулярной пыли. Но вероятность увидеть такой избыток резко снижается с возрастом системы: период полураспада составляет около 3 млн лет. Интерпретация этого наблюдения заключается в том, что любая пыль, не включенная в более крупные тела, удаляется посредством фотоиспарения. Предполагается, что тот же процесс удаляет оставшийся газ.

Земля и Луна имеют одинаковый или близкий изотопный состав вольфрама (Fisher et al., 2021). Это обстоятельство противоречит канонической модели мегаимпакта, образовавшего Луну, в которой предполагается, что Луна должна состоять в основном из материала ударника Тейи. Вероятность того, что Луна унаследовала изотопы вольфрама от Тейи в сценарии канонического гигантского удара составляет <1.6–4.7 %. Примешивание до 30 % земного материала увеличивает эту вероятность, но она не превышает

10%. Достижение сходства стабильных изотопов также является маловероятным. Составы стабильных изотопов Луны и изотопный состав вольфрама антикоррелируют изза окислительно-восстановительных эффектов, что снижает совместную вероятность до значений менее 0.08-0.4 %. Исходя из этих результатов в работе (Fisher et al., 2021) указывается на необходимость поисков объяснения изотопного состава пород Луны, альтернативного мегаимпактной гипотезе. Тагипотезой кой конкурирующей служит модель образования системы Земля-Луна путем фрагментации газопылевого облака (Галимов, 2005).

Обсуждение

Предварительные замечания

Казалось бы многочисленные компьютерные модели мегаимпакта (Zhou et al., 2022; и ссылки в этой работе) и имеющиеся к настоящему времени геохимические интерпретации (Halliday, Canup, 2023) должны отражать реальные процессы образования Земли и Луны. В корреляции событий этих небесных тел с событиями в мантии ASITA Земли мы также исходили из широко принятой модели мегаимпакта (Rasskazov et al., 2020; Fig. 13). Из приведенного анализа геохимических характеристик вещества Земли и Луны в настоящей работе следует, однако, что мегаимпактная модель не объясняет общий изотопный состав кислорода, хрома, вольфрама и других изотопов в породах Земли и Луны и, в сущности, не удовлетворяет предложенным механизмам обеднения летучими элементами Луны путем испарения конденсированного вещества. При обсуждении формирования неоднородности ASITA Земли в связи с образованием Луны мы вынуждены отойти от распространенной мегаимпактной модели и принять в качестве рабочей гипотезы модель эволюции двойной системы Земля–Луна.

В процессе обсуждения имеющихся данных мы покажем, что ранняя глобальная неоднородность ASITA Земли, сопоставимая по размерам с Луной, имеет датировки, сходные с датировками ранней эволюции системы Земля–Луна, и предложим интерпретацию формирования неоднородности ASITA Земли в рамках модели эволюции двойной системы Земля–Луна из газопылевого облака, объясняющей сходные изотопные характеристики земных и лунных пород.

Сопоставление событий Луны с событиями глобальной неоднородности ASITA Земли

По хондритовым метеоритам как аналога валовой силикатной Земли в короткоживущей системе ¹⁴⁶Sm-¹⁴²Nd и долгоживущей системе ¹⁷⁶Lu-¹⁷⁶Hf на Луне регистрируется глобальная силикатная дифференциация, которая могла произойти уже 4.5-4.4 млрд лет назад (Kemp et al., 2010). По компиляции геохронометрических данных, полученных разными методами (Stöffler et al., 2006; Maruyama, Ebisuzaki, 2017), этот интервал расширяется до 4.53-4.43 млрд лет назад. Диапазон возрастных оценок согласуется с данными о кристаллизации магматического океана Земли в неоднородности ASITA 4.51-4.44 млрд лет назад (Rasskazov et al., 2020) с дополнительными более древними оценками возраста протолитов, свидетельствующими о кристаллизации первых порций магматического океана уже около 4.54-4.53 млрд лет назад (Чувашова и др., 2022). Таким образом, отвердевание магматического океана Луны (временной интервал 4.53-4.43 млрд лет назад) в общем соответствует отвердеванию магматического океана в глобальной неоднородности ASITA Земли (временной интервал 4.54-4.44 млрд лет назад) (рис. 19).



Рис. 19. Сопоставление времени отвердевания магматических океанов Земли и Луны и мантийных геодинамических эпох глобальной неоднородности Земли ASITA с модельной кривой кратеров Луны. Основные рубежи ASITA показаны по работе (Rasskazov et al., 2020), время Т обыкновенного Pb Земли – по работе (Rasskazov et al., 2010). Оценка времени отвердевания магматического океана Луны из работ (Kemp et al., 2010; Maruyama, Ebisuzaki, 2017). Модельная кривая хронологии подсчета кратеров Луны из работы (Li et al., 2021). Синие квадраты – калибровочные точки, установленные по образцам 25–28 Аполлона и Луны. Критическая точка хронологии подсчета лунных кратеров с радиоизотопным возрастом базальта Chang'E-5 2.03 млрд лет выделена красным квадратом. Возрастная кривая кратеров Луны из работы (Li et al., 2021).

Fig. 19. Comparison of the solidification time of the magma oceans of the Earth and the Moon and the mantle geodynamic epochs of the global heterogeneity of the Earth's ASITA with the model curve of craters in the Moon. The main ASITA milestones are shown after (Rasskazov et al., 2020), time T of ordinary Pb of the Earth – after (Rasskazov et al., 2010). Estimates of the solidification time in the magma ocean of the Moon are from (Kemp et al., 2010; Maruyama, Ebisuzaki, 2017). Model chronology curve for lunar crater counts is from (Li et al., 2021). Blue squares are calibration points established from samples 25–28 from Apollo and the Moon. The critical point in the chronology of counting lunar craters with a radioisotope age of the Chang'E-5 basalt of 2.03 billion years is highlighted with a red square. Age curve of lunar craters from (Li et al., 2021).

Сходство оценок времени существования магматических океанов Луны и неоднородности ASITA Земли согласуется с выводом, основанным на общности изотопных характеристик пород этих небесных тел, т. е. с утверждением об их фактической принадлежности к единому целому (Галимов, 2005). Изотопы не фракционировали на стадии отвердевания магматических океанов Земли и Луны, а, следовательно, расплавленное вещество магматических океанов было окружено единым газопылевым облаком, не способствующим фракционированию изотопов. При коллапсе газопылевого облака образовались две расплавленные массы.

В компьютерной модели предполагается (Галимов, 2005), что «первоначально оба фрагмента, как тот, которому предстояло стать Луной, так и тот, которому предстояло стать Землей, были обеднены летучими и железом практически в одинаковой степени. ...если один из фрагментов оказался (случайно) несколько большей массы, чем другой, то дальнейшая аккумуляция вещества протекает крайне асимметрично. Зародыш большего размера растет гораздо быстрее. С увеличением разницы в размерах лавинообразно возрастает различие скоростей аккумуляции вещества из оставшейся части облака. В результате зародыш меньшего размера лишь немного изменяет свой состав, в то время как зародыш большего размера (будущая Земля), аккумулирует практически все первичное вещество облака и в конечном счете приобретает состав, весьма близкий к составу первичного хондритового вещества, за исключением наиболее летучих компонентов, безвозвратно покидающих коллапсирующее облако.» (рис. 20).



Рис. 20. Компьютерное моделирование показывает, что больший из образовавшихся зародышей (красный цвет) развивается гораздо быстрее и аккумулирует большую часть оставшегося исходного облака частиц (синий цвет). Из работы (Галимов, 2005).

Fig. 20. Computer simulations show that the larger of the resulting nuclei (red) develops much faster and accumulates most of the remaining initial cloud of particles (blue). From (Galimov, 2005).

Твердеющий магматический океан Луны был отделен от твердеющего океана ASITA Земли. В настоящее время обращение Луны вокруг Земли и врашение вокруг собственной оси синхронизировано, поэтому, хотя Луна и вращается вокруг своей оси, она всегда обращена к Земле одной стороной. Если такая же синхронизация соблюдалась при зарождении двойной системы, то во вращающейся паре расплавленных тел будущей Земли и будущей Луны существовало взаимное концентрированное влияние. Опережающее отвердевание магматического океана мантии ASITA прото-Земли со стороны прото-Луны сопровождалось подобным опережающим отвердеванием магматического океана мантии прото-Луны со стороны прото-Земли (рис. 21). В дальнейшем лунное и продолжали земное тела существовать обособленно, по мере того как газопылевое облако деградировало.



Рис. 21. Схема соотношений неоднородности ASITA и ее лунного аналога в ранней двойной системе Земля–Луна. Модифицирован рис. 20.

Fig. 21. Scheme of relationship between the heterogeneity of ASITA and its lunar counterpart in the early binary Earth–Moon system. Fig. 20 is modified.

Земля и Луна фрагментировались в газопылевом облаке в виде расплавленных массивов, существенно различающихся по изотопной эволюции Рb. Свинец лунных пород имеет ультравысокое µ, тогда как свинец земных пород имеет сравнительно низкое µ. Отвердевание магматического океане Земли ASITA реализовалось в генерации резервуаpa вязкой протомантии с низким μ (LOMUVIPMAR) во временном интервале 4.54-4.50 млрд лет назад и в генерации резервуара вязкой протомантии с повышенным µ (ELMUVIPMAR) во временном интервале 4.47-4.44 млрд лет назад. Существование магматического океана Земли после 4.44 млрд лет назад (до 4.0–3.9 млрд лет назад) реконструируется по косвенным признакам, хотя нуждается в дополнительном обосновании. На Луне также имели место суще-

ственные изменения около 4.4–4.3 млрд лет назад, которые могли отразиться в смене резервуаров протомантии Луны с ультравысоким µ (рис. 22).



Рис. 22. Эпизоды становления протомантии (протолитосферы) глобальной неоднородности ASITA Земли 4.54–4.44 млрд лет назад с возрастанием вязкости нижней мезосферы (*a*) и основные события Луны (δ). Резервуары ASITA Земли: LOMUVIPMAR – резервуар вязкой протомантии с низким µ; ELMUVIPMAR – резервуар вязкой протомантии с повышенным µ. Резервуары Луны: UHIMUVIPMAR-I – резервуар вязкой протомантии Луны с ультравысоким µ на стадии отвердевания магматического океана, UHIMUVIPMAR-II – резервуар вязкой протомантии Луны с ультравысоким µ после отвердевания магматического океана. Схема (*a*) составлена с использованием работ (Rasskazov et al., 2020; Чувашова и др., 2022), схема (δ) – с использованием работ (Albarède et al., 2009; Sprung et al., 2013; Gaffney and Borg, 2014; Snape et al., 2016; Maruyama, Ebisuzaki, 2017; Галимов, 2005; Galimov, Krivtsov, 2005 и настоящей работы).

Fig. 22. Episodes of the protomantle (protolithosphere) formation in the global heterogeneity ASITA of the Earth 4.54–4.44 billion years ago with the increase in viscosity of the lower mesosphere (*a*) and the main events of the Moon (*b*). ASITA reservoirs of the Earth: LOMUVIPMAR – reservoir of viscous protomantle with low μ ; ELMUVIPMAR is a reservoir of viscous protomantle with elevated μ . Reservoirs of the Moon: UHIMUVIPMAR-I is a reservoir of viscous protomantle of the Moon with ultra-high μ at the stage of solidification of the magma ocean, UHIMUVIPMAR-II is a reservoir of viscous protomantle of the Moon with ultra-high μ after solidification of the magma ocean. Scheme (*a*) was compiled using data from (Rasskazov et al., 2020; Chuvashova et al., 2022), scheme (*b*) – using data from (Albarède et al., 2009; Sprung et al., 2013; Gaffney and Borg, 2014; Snape et al., 2016; Maruyama, Ebisuzaki, 2017; Galimov, 2005; Galimov, Krivtsov, 2005, and this work).

Уточненная линия возрастной последовательности лунных кратеров с новой точкой калибровки около 2 млрд лет назад (Li et al., 2021) вписывается в эпохи развития глобальной неоднородности ASITA Земли. Линия начинается с события последней тяжелой бомбардировки Луны около 3.9 млрд лет. Отрезок круто падающей линии ослабевающей бомбардировки в возрастной последовательности лунных кратеров соответствует ранней мантийной геодинамической эпохе ASITA Земли. Ранняя геодинамическая эпоха ASITA заканчивается около 3.6 млрд лет назад. Линия кратеров Луны становится пологой около 3.3 млрд лет назад. Пологий отрезок линии кратеров Луны сопоставляется со средней геодинамической эпохой ASITA 2.9–1.8 млн лет назад, тогда как более поздний крутой отрезок линии кратеров Луны – с поздней геодинамической эпохой ASITA последних 0.7 млрд лет.

Значение изотопного состава обыкновенного свинца рудных месторождений для определения позднего шпона в древних блоках Земли

Для понимания истории системы Земля– Луна во временном интервале накопления позднего шпона с 4.3 до 3.8 млрд лет назад показателен изотопный состав обыкновенного Рb из рудных месторождений древних блоков коры Земли. В модели Холмса-Хаутерманса Рb эволюционирует вдоль конкордии, сбрасывание и сегрегация свинца определяется диффузией вдоль дискордии. Расплавленная мантия означает существование временного интервала эволюции вдоль конкордии.

В модели фрагментации магматического океана из газопылевого облака изотопная эволюция Рb начинается от первородного состава метеорита Canyon Diablo. Составы линии расплава, в котором накапливается радиогенный свинец, имеют более пологий наклон, чем метеоритная геохрона. После отвердевания магматического океана изотопная эволюция Рb происходит в закрытой U-Рb изотопной системе. Задача двухступенчатой эволюции решается объединением диаграммы Холмса-Хаутерманса с диаграммой «конкордия-дискордия». В последней используется математическое выражение дискордии Вассербурга. Сопряженные расчеты с начальной эволюцией Рb вдоль конкордии Холмса-Хаутерманса и последующей эволюцией вдоль диффузионной дис-Вассербурга кордии подгоняются с варьирующими значениями μ под линию, аппроксимирующую распределение точек рудного Pb из древнего блока в изотопных координатах свинца. Эта модель дает возможность определения времени замыкания

U–Pb изотопной системы T в крупной области коры раннего этапа Земли с разновременной расплавной динамикой и интервала отторжения рудных свинцов t. Методом итерации подбирается единое значение μ изотопной системы для согласования линейного распределения экспериментальных точек с кривой накопления радиогенных свинцов, обозначающей время замыкания (T) (кристаллизации породы из расплава) и время отторжения рудных свинцов от U–Pb изотопной системы (t) (Rasskazov et al., 2010).

В рудных месторождениях древних блоков Земли присутствует свинец типа месторождения Barberton (тип В) и типа месторождения Joplin (тип J). Изотопные составы свинца типа В названы нормальными, поскольку в изотопных координатах фигуративные точки Рb находятся левее геохроны. Отторжение свинца от урана может интерпретироваться моделью Холмса-Хаутерманса. Изотопные составы свинца типа J названы аномальными, поскольку в свинцовых изотопных координатах фигуративные точки Рb находятся правее геохроны. Отторжение свинца от урана не может интерпретироваться моделью Холмса-Хаутерманса (Doe, 1970). На юге Сибири свинец типа В характеризует рудные месторождения Гарганского архейского блока, тогда как свинец типа J характеризует рудные месторождения южной части Сибирского кратона (рис. 23, 24).



Рис. 23. Схема локализации нормального свинца типа В в рудных месторождениях Гарганского блока рифейского Тувино-Монгольского массива и аномального свинца типа Ј в рудных месторождениях южного края Сибирского кратона. Основные геологические структуры показаны по работам (Ильин, 1971; Беличенко и др., 1994, 2006; Диденко и др., 1994).

Fig. 23. Scheme of localization of normal leads (type B) in ore deposits from the oldest Gargan block of the Riphean Tuva-Mongolian massif and anomalous leads (type J) in ore deposits from the southern edge of the Siberian craton. The main geological structures are shown after (Ilyin, 1971; Belichenko et al., 1994, 2006; Didenko et al., 1994).



Рис. 24. Интерпретация отторженного Pb из галенитов рудных месторождений Гарганского блока (а) и из галенитов рудных месторождений южного края Сибирского кратона (северозападное побережье оз. Байкал) (Rasskazov et al., 2010). На панели *a* точки галенитов разных месторождений (черные треугольники) аппроксимируются дискордией сопряженной модели Холмса–Хаутерманса – кокордии–дискордии с параметрами T = 4.31 млрд. лет и $\mu = 11$. Точки галенитов Водораздельного месторождения (косые крестики) распределяются вдоль изохроны (штриховая линия). На панели *б* точки галенитов разных месторождений (черные ромбы) аппроксимируются дискордией сопряженной модели Холмса–Хаутерманса – кокордией сопряженной модели Холмса–Хаутерманса – конкордией сопряженной модели Холмса–Хаутерманса – конкордии–дискордией сопряженной модели Холмса–Хаутерманса – конкордией сопряженной модели Холмса–Хаутерманса – конкордии–дискордией сопряженной модели Холмса–Хаутерманса – конкордии–дискордией сопряженной модели Холмса–Хаутерманса – конкордии–дискордии с параметрами T = 3.82 млрд лет и $\mu = 20.1$. Для сравнения показана дискордия с параметрами T = 3.5 млрд лет и $\mu = 30$ (штриховая линия). Ее пересечение тренда точек галенитов соответствует наиболее ранним отторженным свинцам. Подобным образом можно рассчитать линию с параметрами T > 3.82 млрд. лет и $\mu < 30$, которая будет пересекать тренд галенитов в той же точке, но будет располагаться ниже его. Компиляция данных из работы (Тверитинов и др., 2006).

Fig. 24. Interpretation of rejected Pb from galenas in ore deposits of the Gargan block (*a*) and from those in ore deposits of the southern edge of the Siberian craton (northwestern coast of Lake Baikal) (Rasskazov et al., 2010). In panel *a*, data points of galenas from different deposits (black triangles) are approximated by the discordia of the conjugated Holmes–Houtermans model – cocordia–discordia with parameters T = 4.31 Ga and $\mu = 11$. The points of galenas in the Vodorazdelnoye deposit (oblique crosses) are distributed along the isochron (dashed line). In panel *b*, data points of galenas from different deposits (black diamonds) are approximated by the discordia of the conjugated Holmes–Houtermans model – concordia–discordia with parameters T = 3.82 Ga and $\mu = 20.1$. For comparison, discordia is shown with parameters T = 3.5 Ga and $\mu = 30$ (dashed line). Its intersection with the trend of galena points corresponds to the earliest rejected lead. Similarly, it is possible to calculate a line

with parameters T > 3.82 Ga and μ < 30, which will intersect the galena trend at the same point, but will be located below it. Data compilation from (Tveritinov et al., 2006).

В рамках сопряженной модели конкордии–дискордии и диффузионной дискордии (Rasskazov et al., 2010) установлено одностадийное отделение свинца В-типа Гарганского блока во временном интервале 2.3–1.4 млрд. лет назад из протолита ($\mu = 11.0$), консолидированного 4.31 млрд. лет назад, а свинца Ј-типа южного края Сибирского кратона 1.80–0.25 млрд. лет назад из протолита ($\mu = 20.1$), консолидированного 3.82 млрд. лет назад (рис. 19). Провинции свинцов Втипа и Ј-типа разделены между собой и имеют переходы к сопредельным провинциям многостадийных преобразований рудного материала. Свинец разного типа имеет глобальное распределение в рудных месторождениях древних блоков Земли. Отторженный Pb Втипа маркирует кору ранней Земли, образовавшуюся после импактных событий, обозначивших поздний шпон планетарной аккреции, оставивший следы в верхнем (коровом) слое Земли в виде детритовых цирконов с преобладающими датировками около 4.31 млрд лет. Отторженный Pb J-типа маркирует кору более поздней эволюции Земли, сопровождавшейся импактными событиями, обозначившими поздний шпон около 3.82 млрд лет (рис. 25).



Рис. 25. Интерпретация главных импактных эпизодов ранней Земли с параметрами Т, рассчитанными для отторженного свинца на древнем Гарганском блоке и южном краю Сибирского кратона. Коэффициент импактности обозначает уровень метеоритных бомбардировок Земли по отношению к современному. Оценки временных вариаций метеоритных событий, геологические и геохронологические данные, свидетельствующие о холодной ранней Земле. Вариации коэффициента импактности приведены по работе (Valley et al., 2000). Из работы (Rasskazov et al., 2010).

Fig. 25. Interpreting the main impact episodes of the early Earth with the T parameters calculated for rejected leads in the oldyst Gargan block and southern edge of the Siberian craton. The impact coefficient indicates the level of meteorite bombardment of the Earth in relation to the modern one. Estimates of temporal variations in meteorite events, geological and geochronological data indicate a cold early Earth. Variations in the impact coefficient are given according to (Valley et al., 2000). From (Raskazov et al., 2010).

Импактные структуры уничтожаются эрозионными процессами на поверхности Земли, но сохраняются на поверхности Луны. В двухэтапной модели формирования Земли ABEL (модель пришествия биоэлементов) (Maruyama, Ebisuzaki, 2017) сначала в ней аккретируется восстановительный энстатитоподобный хондритовый материал, который около 4.56 млрд лет назад образует полностью сухую Землю. В то время на Земле отсутствует атмосфера и компоненты океана. Затем Землю бомбардируют ледяные астероиды, состоящие из углеродистых хондритов. Они поступают из внешней части пояса астероидов 4.4 млрд лет назад из-за гравитационного рассеяния материала Юпитером, Сатурном и исчезнувшим газовым гигантом «Черная овца» с добавкой атмосферы и океана на сухую Землю.

Если принять во внимание отсутствие в земных и лунных породах чуждых следов фракционирования изотопов (см. рис. 9), существенная добавка шпона из удаленной части Солнечной системы маловероятна. Материал позднего шпона должен принадлежать к единому газопылевому диску с общим изотопным фракционированием. Возможно, на ранней стадии эволюции Солнечной системы на земной орбите существовали астероиды – трояны, подобные телам, обнаруженным на орбите Юпитера. К этим астероидам в настоящее время отправлена миссия Lucy (https://lucy.swri.edu/2023/04/13/ANewPerspective. html). Трояны образуют две группы космических пород, которые попали в гравитационную ловушку на орбите Юпитера и вращаются вокруг Солнца. Одна группа троянов находится впереди Юпитера; другая следует за этим газовым гигантом. Подобные трояны могли попасть на раннюю Землю и Луну. Изотопная эволюция материала троянов, попавших в гравитационную ловушку на орбите прото-Земли, могла быть общей с ее ранней изотопной эволюцией.

Различные варианты ранних бомбардировок Луны представлены в работе (Hopkins, Mojzsis, 2015). Из синхронного существования магматических океанов неоднородности ASITA Земли и Луны от 4.53 до 4.4 млрд лет назад, а также эволюции рудного Pb в древних коровых блоках Земли с датировками 4.31 и 3.82 млрд лет удовлетворительную интерпретацию получает только кривая вариаций коэффициента импактности из работы (Valley et al., 2000) (см. на рис. 25). Между тем, во вращающейся паре расплавленных тел будущей Земли и будущей Луны взаимное влияние могло привести к опережающему отвердеванию магматического океана мантии ASITA со стороны будущей Луны (см. рис. 21). Соответственно, на отвердевшей части магматического океана ASITA кора могла консолидироваться уже 4.31 млрд лет назад, тогда как на остальной части Земли, в которой магматический океан отвердевал позже, кора могла консолидироваться с некоторым запозданием. Датировка аномального рудного Pb 3.82 млрд лет может служить в качестве верхнего ограничения существования магматического океана Земли вне ASITA. Под этими территориями Земли магматический мантийный океан мог просуществовать до 4.0-3.9 млрд лет назад. Если это так, то в рамках модели генерации системы Земля-Луна из газопылевого облака изотопная эволюция рудного Рb определяется не только материалом позднего шпона, но в значительной мере опережающим и запаздывающим отвердеванием расплавленной массы магматического океана. Кора могла образоваться на отвердевшем магматическом океане ASITA и оставаться расплавленной продолжительное время на поверхности остальной Земли, контактирующей конденсирующейся газопылевой с средой.

Глобальные нижнемантийные неоднородности в истории Земли

Происхождение глобальных нижнемантийных неоднородностей имеет разное толкование в связи с гипотезами о сборке и распаде суперконтинентов. Так, при интерпретации глобального распределения скоростей сейсмических волн в глобальную Южно-Тихоокеанскую низкоскоростную аномалию помещается кладбище слэбов суперконтинента Родиния (Maruyama et al., 2007), а глобальная конфигурация аномалий скоростей сейсмических волн объясняется движениями в нижней мантии, сопровождавшими исключительно распад Пангеи в последние 240 млн лет (Le Pichon et al., 2019).

Рb-изотопные возрастные характеристики и вариации µ протолитов глобальных аномалий, однако, противоречат таким интерпретациям. Из сопоставления Pb-изотопных характеристик глобальных неоднородностей ASITA, SOPITA, AFITA и NAITA в эволюции Земли вырисовывается последовательная смена ранней, средней и поздней геодинамических эпох (Чувашова и др., 2022).

В раннюю геодинамическую эпоху (4.54– 3.6 млрд лет) кристаллизовался планетарный магматический океан Земли, в процессе отвердевания которого под влиянием Луны образовалась неоднородность ASITA. В середине и ближе к концу этого временного интервала Луна испытывала многочисленные импактные события с относительным снижением интенсивности тяжелых бомбардировок.

Между изотопно-геохимическими П0строениями с оценками возраста образования SOPITA и AFITA около 2 млрд лет и интерпретациями моделей глобальной сейсмической томографии, которых В предполагается позднедокембрийское или позднефанерозойское оформление нижнемантийной структуры, существует противоречие. SOPITA и AFITA оформились в среднюю геодинамическую эпоху эволюции Земли, когда генерировалась мощная (200 км и больше) кратонная литосфера Земли со сборкой палеоконтинентов. Кроме того, мантийные протолиты, сгенерированные в это время, характеризуют современную океаническую литосферу, занимающую 2/3 всей поверхности Земли. Возрастная характеристика NHRL около 1.77 млрд лет (Basu et al., 1991) соответствует окончанию средней геодинамической эпохи, кульминация которой проявилась не только на Земле, но и на Луне, где в результате китайской миссии 2021 г. определены вулканические породы возрастом около 2 млрд лет, извергавшиеся из особого источника. Интересно, что в среднюю геодинамическую эпоху Земли бомбардировки Луны космическими телами менялись слабо, что отражает относительную стабилизацию процессов в Солнечной системе.

В позднюю геодинамическую эпоху (<0.7 млрд лет) Земля характеризовалась развитием геологических процессов, существенно отличающимся от процессов ранней и средней геодинамических эпох. Это развитие продолжалось в условиях быстрого спада импактных событий на Луне.

Заключение

Потери ряда летучих элементов Луной объяснялись процессами испарения при мегаимпакте Земли с удалением ее первичной атмосферы (в случае Xe), миграцией Pb в ядро и другими геохимическими характеристиками. В настоящее время пришло понимание того, что эти объяснения противоречат сходному изотопному составу лунных и земных пород. Затруднения в обосновании мегаимпактной модели получили название «изотопного кризиса». Противоречия снимаются в конкурирующей модели происхождения двойной системы Земля-Луна из газопылевого облака (Галимов, 2005), которая предполагает длительную эволюцию этой системы в облаке, состоящем из пылевых частиц и газа. В этой конкурирующей модели решается проблема потери ряда летучих элементов Луны и Земли, в том числе Fe, Rb, Xe и Pb, в течение первых 100-130 млн лет после образования Солнечной системы.

Принимая гипотезу эволюционирующей газопылевой среды, мы предполагаем, что в опережающего результате отвердевания планетарного магматического океана с 4.54 до 4.44 млрд лет назад в мантии ранней геодинамической эпохи Земли, под влиянием Луны и одновременно с отвердеванием ее магматического океана, образовалась глобальная неоднородность ASITA. В мантии остальной части Земли магматический океан мог отвердевать позже. Соответственно, на отвердевшей части палеоокеана ASITA кора консолидировалась уже 4.31 млрд лет назад, тогда как на остальной части Земли - 3.82 млрд лет назад. Принятая схема эволюции двойной системы Земля-Луна с образованием глобальной неоднородности ASITA нуждается в дальнейшем обосновании фактическими материалами с использованием, кроме U-Рb изотопной системы, других изотопных
систем, информативных для ранней Земли и Луны.

Благодарности

Статья подготовлена при разработке дисциплины аспирантского курса ИГУ «История и методология геологических наук» и магистерского курса «Современные проблемы геологии».

Литература

Беличенко В.Г. и др. Геодинамическая карта Палеоазиатского океана. Восточный сегмент // Геология и геофизика. 1994. Т. 35. № 7-8. С. 29-40.

Беличенко В.Г. и др. Баргузинский микроконтинент (Байкальская горная область): к проблеме выделения // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 10. С. 1049–1059.

Витязев А.В., Печерникова Г.В. Ранняя дифференциация Земли и проблема лунного состава // Физика Земли. 1996. № 6. С. 3–16.

Галимов Э.М. Происхождение Луны // Земля и Вселенная. 2005. № 6. Обзорная статья: http://ziv.telescopes.ru/rubric/astronomy/index.html ?pub=9

Галимов Э.М. Анализ изотопных систем (Hf-W, Rb-Sr, J-Pu-Xe, U-Pb) применительно к проблеме формирования планет на примере системы Земля-Луна. Проблемы зарождения и эволюции биосферы (Под ред. Галимова Э.М.) М.: КРАСАНД, 2013. С. 47–59.

Галимов Э.М., Кривцов А.М., Забродин А.В., Легкоступов М.С., Энеев Т.М., Сидоров Ю.И. Динамическая модель образования системы Земля–Луна// Геохимия. (2005) № 11. С. 1139– 1150.

Диденко А.Н. и др. Геодинамика палеозойских океанов Центральной Азии // Геология и геофизика. 1994. № 7-8. С. 59-75.

Ильин А.В. О Тувино-Монгольском массиве // Материалы по региональной геологии Африки и зарубежной Азии. М.: Недра, 1971. С. 67–73. (Тр. НИИ "Зарубежгеология"; вып. 22).

Левский Л.К., Столбов Н.М., Богомолов Е.С. и др. Sr–Nd–Рb изотопные системы базальтов архипелага Земля Франца-Иосифа // Геохимия. 2006. №4. С. 365–376.

Маров М.Я., Ипатов С.И. Формирование Земли и Луны: влияние малых тел // Геохимия. 2021. T. 66, № 11. C. 964–971. DOI: 10.31857/S0016752521110078

Сергеев В.Н., Печерникова Г.В. Современные модели происхождения Луны // Динамические процессы в геосферах. 2020. № 12. С. 130–137. DOI: 10.26006/IDG.2020.67.47.014

Тверитинов Ю.И. и др. Прогнозирование золотого оруденения на юге Восточной Сибири и Дальнего Востока: геологический и изотопногеохимический аспекты. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2006. 224 с.

Чувашова И.С., Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Саранина Е.В. Радиоизотопные исследования позднекайнозойских вулканических пород Азии и Северной Америки: источники вулканизма глобального, регионального и локального значения // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 3. С. 64–102. DOI 10.26516/2541-9641.2022.3.64

Albarède F. Volatile accretion history of the terrestrial planets and dynamic implications // Nature. 2009. Vol. 461. P. 1227–1233.

Albarède F., Ballhaus C., Blichert-Toft J., Lee C-T., Marty B., Moynier F., Yin, Q-Z. Asteroidal impacts and the origin of terrestrial and lunar volatiles // Icarus. 2013. Vol. 222. P. 44–52. doi:10.1016/J.ICARUS.2012.10.026

Allègre C.J., Manhes G., Göpel C. The Age of the Earth // Geochim. Cosmochim. Acta. 1995. Vol. 59. P. 1445–1456.

Allègre C.J., Manhes G., Göpel C. The major differentiation of the Earth at 4.45 Ga // Earth Planet. Sci. Lett. 2008. Vol. 267. P. 368–398.

Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: meteoritic and Solar // Geochim. Cosmochim. Acta. 1989. Vol. 53. P. 197–214.

Barboni M., Boehnke P., Keller B., Kohl I.E., Schoene B., Young E.D., McKeegan K.D. Early formation of the Moon 4.51 billion years ago // Science Advances. 2017. Vol. 3. P. e1602365.

Basu A.R.; Junwen W.; Wankang H.; Guanghong X.; Tatsumoto M. Major element, REE, and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of eastern China: implications for their origin from suboceanic-type mantle reservoirs // Earth Planet. Sci. Letters. 1991. Vol. 105. P. 149– 169.

Borg L.E. et al. Mechanisms for incompatibleelement enrichment on the Moon deduced from the lunar basaltic meteorite Northwest Africa 032 // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2009. Vol. 73. P. 3963–3980.

Cameron A.G.W., Ward W. The origin of the Moon // Proc. 7th Lunar Sci. Conf., 1976. P. 120–122

Carlson R.W., Lugmair G.W. The age of ferroan anorthosite 60025: oldest crust on a young Moon? // Earth Planet. Sci. Lett. 1988. Vol. 90. P. 119–130. doi:10.1016/0012-821X(88)90095-7

Castillo P. The Dupal anomaly as a trace of the upwelling lower mantle // Nature. 1988. Vol. 336. P. 667–670.

Che X., Nemchin A., Liu D., Long T., Wang C., Norman M.D., Joy K.H., Tartese R., Head J., Jolliff B., Snape J.F., Nea C.R., Whitehouse M.J., Crow C., Benedix G., Jourdan F., Yang Z., Yang C., Liu J., Xie S., Bao Z., Fan R., Li D., Li Z., Webb S.G. Age and composition of young basalts on the Moon, measured from samples returned by Chang'e-5 // Science. 2021. 10.1126/science.abl7957.

Connelly J.N., Bizzarro M. Lead isotope evidence for a young formation age of the Earth–Moon system // Earth and Planetary Science Letters. 2016. Vol. 452. P. 36–43. http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2016.07.010

Connelly J.N., Bizzarro M., Krot A.N., Nordlund Å., Wielandt D., Ivanova M.A. The Absolute chronology and thermal processing of solids in the Solar protoplanetary disk // Science. 2012. Vol. 338. P. 651–655.

Davies G.F. Dynamic Earth: Plates, Plumes and Mantle Convection / G. F. Davies. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 458 p.

Doe B.R. Lead isotopes; Springer-Verlag, Berlin, 1970. 137 p.

Galimov E.M Formation of the Moon and the Earth from a Common Supraplanetary Gas–Dust Cloud (Lecture Presented at the XIX All-Russia Symposium on Isotope Geochemistry on November 16, 2010) // Geochemistry International, 2011. Vol. 49, No. 6. P. 537–554. DOI: 10.1134/S0016702911060048

Galimov E.M., Krivtsov A.M. Origin of the Earth-Moon system // J. Earth Syst. Sci. 2005. Vol. 114, №6. P. 593–600.

Gorkavyi N. Origin of the Moon and lunar water // Earth and Planetary Science. 2023. Vol. 02, Issue 02. P. 86–99. DOI: https://doi.org/10.36956/eps.v2i2.940. Elardo S.M. et al. The origin of young mare basalts inferred from lunar meteorites Northwest Africa 4734, 032, and LaPaz Icefield 02205 // Meteoritics & Planetary Science. 2014. Vol. 49. P. 261–291.

Fernandes V.A., Burgess R., Turner G. ⁴⁰Ar–³⁹Ar chronology of lunar meteorites Northwest Africa 032 and 773 // Meteo. Planet. Sci. 2003. Vol. 38. P. 555–564.

Fischer R.A., Zube N.G., Nimmo F. The origin of the Moon's Earth-like tungsten isotopic composition from dynamical and geochemical modeling // Nature Communications. 2021. Vol. 12. P. 35. https://doi.org/10.1038/s41467-020-20266-1

Jackson M.G.; Becker T.W.; Konter J.G. Evidence for a deep mantle source for EM and HIMU domains from integrated geochemical and geophysical constraints // Earth Planet. Sci. Lett. 2018. Vol. 484. P. 154–167.

Jacobsen S.B., Ranen M.C., Petaev M.I., Remo J.L., O'Connel J.O., Sasselov D.D. Isotopes as clues to the origin and earliest differentiation history of the Earth // Philos. Trans. Royal Soc. 2008. Vol. A 366. P. 4129–4162.

Jones H.J., Palme H. Geochemical constraints on the origin of the Earth and Moon // Origin of the Earth and Moon (eds) Canup R M and Righter K Univ. Arizona Press: Tucson, 2000. P. 197–216.

Halliday A.N. Hf-W chronometry and inner solar system accretion rates // Space Sci. Rev. 2000. Vol. 92. P. 355–370.

Halliday A.N. Mixing, volatile loss and compositional chance during impact-driven accretion of the Earth // Nature. 2004. Vol. 427. P. 505–509.

Halliday A.N. A young Moon-forming giant impact at 70–110 million years accompanied by latestage mixing, core formation and degassing of the Earth // Phil. Trans. R. Soc. A. 2008. Vol. 366. P. 4163–4181. doi:10.1098/rsta.2008.0209

Halliday A.N., Canup R.M. The accretion of planet Earth // Nature Reviews Earth & Environment. 2023. Vol. 4. P. 19–35. https://doi.org/10.1038/s43017-022-00370-0

Halliday A.N., Wood B.J. The composition and major reservoirs of the Earth around the time of the Moon-forming giant impact // Treatise on Geophysics: Evolution of the Earth. 2007. Vol. 9. Ed. D. Stevenson. P. 13–50. Chapter 9.02.

Hanan B.B., Tilton G.R. 60025: relict of primitive lunar crust? // Earth Planet. Sci. Lett. 1987. Vol. 84. P. 15–21. doi:10.1016/0012-821X(87)90171-3 Hart S.R.; Gaetani G.A. Mantle paradoxes: the sulfide solution // Contrib. Mineral. Petrol. 2006. Vol. 152. P. 295–308.

Hartmann W.K., Davis D.R. Satellite-sized planets and lunar origin // Icarus. 1975. Vol. 24. P. 504–515.

Hiesinger H., Head III.J.W., Wolf U., Jaumann R., Neukum G. Ages and stratigraphy of lunar mare basalts in Mare Frigoris and other nearside maria based on crater size-frequency distribution measurements // J. Geophys. Res. Planets. 2010. Vol. 115. P. E03003.

Homrighausen S.; Hoernle K.; Hauff F.; Geldmacher J.; Wartho J.-A.; Van Den Bogaard P.; Garbe-Schönberg D. Global distribution of the HIMU end member: Formation through Archean plume-lid tectonics // Earth-Science Reviews. 2018. Vol. 182. P. 85–101.

Hopkins M.D., Mojzsis S.J. A protracted timeline for lunar bombardment from mineral chemistry, Ti thermometry and U–Pb geochronology of Apollo 14 melt breccia zircons // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2015. Vol. 169. P. 1–18.

Hunten D.M., Pepin R.O., Walker J.C.G. Mass fractionation in hydrodynamic escape // Icarus. 1987. Vol. 69. P. 532–549.

Humayun M., Clayton R.N. Potassium isotope cosmochemistry: genetic implications of volatile element depletion // Geochim. Cosmochim Acta. 1995. V. 59. P. 2131–2148.

Kemp A.I.S., Wilde S.A., Hawkesworth C.J., Coath C.D., Nemchin A., Pidgeon R.T., Vervoort J.D., DuFrane S.A. Hadean crustal evolution revisited: new constraints from Pb–Hf isotope systematics of the Jack Hills zircons // Earth Planet. Sci. Lett. 2010. Vol. 296. P. 45–56.

Kleine T., Walker R.J. Tungsten isotopes in planets // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2017. Vol. 45. P. 389–417. DOI: 10.1146/annurev-earth-063016-020037

Kleine T., Munker C., Mezger K., Palme H. Rapid accretion and early core formation on asteroids and the terrestrial planets from Hf-W chronometry // Nature. 2002. Vol. 418. P. 952–955.

Kleine T., Mezger K., Palme H., Münker C. The W isotope evolution of the bulk silicate Earth: constraints on the timing and mechanisms of core formation and accretion // Earth Planet. Sci. Lett. 2004. V. 228. P. 109–123.

Lammer H., Brasser R., Johansen A., Scherf M., Leitzinger M. Formation of Venus, Earth and Mars: Constrained by isotopes // Space Sci. Rev. 2021. Vol. 217. P. 7. https://doi.org/10.1007/s11214-020-00778-4.

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

Li Q-L., Zhou Q., Liu Y., Xiao Z., Lin Y., Li J-H., Ma H-X., Tang G-Q., Guo S., Tang X., Yuan J-Y., Li J., Wu F-Y., Ouyang Z., Li C., Li X-H. Two billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'E-5 basalts // Nature. 2021. https://doi.org/10.1038/s41586-021-04100-2

Lustrino M.; Wilson M. The circum-Mediterranean anorogenic Cenozoic igneous province // Earth-Science Reviews. 2007. V. 81. P. 1–65.

Maruyama S.; Santosh M.; Zhao D. Superplume, supercontinent, and postperovskite: Mantle dynamics and anti-plate tectonics on the core–mantle boundary // Gondwana Research 2007. Vol. 11. P. 7–37.

Melosh H.J. New approaches to the Moon's isotopic crisis // Phil. Trans. R. Soc. 2014. Vol. A 372. P. 20130168.

Merle R.E. et al. Pb-Pb ages and initial Pb isotopic composition of lunar meteorites: NWA 773 clan, NWA 4734, and Dhofar 287 // Meteo. Planet. Sci. 2020. V. 55. P. 1808–1832.

Morota T. et al. Timing and characteristics of the latest mare eruption on the Moon // Earth Planet. Sci. Lett. 2011. Vol. 302. P. 255–266.

Neal C., Taylor L. Modeling of lunar basalt petrogenesis – Sr isotope evidence from Apollo 14 high-alumina basalts // Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. 1990. Vol. 20. P. 101–108.

Nielsen S.G., Bekaert D.V., Auro M. Isotopic evidence for the formation of the Moon in a canonical giant impact // Nature Communications. 2021. Vol. 12. P. 1817. https://doi.org/10.1038/s41467-021-22155-7

Nimmo F., Kretke K., Ida S., Matsumura S., Kleine T. Transforming dust to planets // Space Sci. Rev. 2018. Vol. 214. P. 101. https://doi.org/10.1007/s11214-018-0533-2

Norman M.D., Borg L.E., Nyquist L.E., Bogard D.D. Chronology, geochemistry, and petrology of a ferroan noritic anorthosite clast from Descartes breccia 67215: clues to the age, origin, structure, and impact history of the lunar crust // Meteorit. Planet. Sci. 2003. Vol. 38. P. 645–661.

Nyquist L. Lunar Rb–Sr chronology // Physics and Chemistry of the Earth. 1977. Vol. 10. P. 103–142.

Nyquist L.E., Shih C.Y. The isotopic record of lunar volcanism // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1992. Vol. 56. P. 2213–2234.

Nyquist L. et al. Rb–Sr systematics for chemically defined Apollo 15 and 16 materials // Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. 1973. Vol. 4. P. 1823.

Nyquist L.E. et al. ¹⁴⁶Sm–¹⁴²Nd formation interval for the lunar mantle // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995. Vol. 59. P. 2817–2837.

Podosek F.A., Ozima M. The Xenon age of the Earth // Origin of the Earth and Moon / Eds R.M. Canap and K. Righter, Univ. Arizona, 2000. P. 63–74.

Rasskazov, S.V.; Brandt, S.B.; Brandt, I.S. Radiogenic isotopes in geologic processes; Springer, 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. P. 739. doi:10.3390/min10090739

Ritsema J. Global seismic maps // Plates, plumes, and paradigms / Eds. G.R. Foulger et al., Geological Society of America, Boulder. 2005. P. 11–18.

Rudge J.F., Kleine T., Bourdon B. Broad bounds on Earth's accretion and core formation constrained by geochemical models // Nat. Geosci. 2010. Vol. 3. P. 439–443.

Snape J.F. et al. Lunar basalt chronology, mantle differentiation and implications for determining the age of the Moon // Earth Planet. Sci. Lett. 2016. Vol. 451. P. 149–158.

Snape J.F. et al. The timing of basaltic volcanism at the Apollo landing sites // Geochim.Cosmochim. Acta. 2019. Vol. 266. P. 29–53.

Stöffler D., Ryder G., Ivanov A.V., Artemieva N.A., Cintala M.J., Grieve R.A. Creating history and lunar chronology // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2006. Vol. 60. P. 519–596.

Tian H-C., Wang H., Chen Y., Yang W., Zhou Q., Zhang C., Lin H-L., Huang C., Wu S-T., Jia L-H., Xu L., Zhang D., Li X-G., Chang R., Yang Y-H., Xie L-W., Zhang D-P., Zhang G-L., Yang S-H., Wu F-Y. Non-KREEP origin for Chang'E-5 basalts in the Procellarum KREEP Terrane // Nature. 2021. https://doi.org/10.1038/s41586-021-04119-5

Valley J.W. et al. A cool early Earth // Geology. 2002. Vol. 30. P. 351–354.

Wood B.J., Halliday A.N. Cooling of the Earth and core formation after the giant impact // Nature. 2005. Vol. 437. P. 1345–1348.

Yin Q., Jacobsen S.B. Does U–Pb date Earth's core formation? // Nature. 2006. Vol. 444. P. E1.

Yu G., Jacobsen S.B. Fast accretion of the Earth with a late Moon-forming giant impact // Proc. Natl. Acad. Sci. 2011. Vol. 108. P. 17604.

Yuan Q., Li M., Desch S.J., Ko B., Deng H., Garnero E.J., Gabriel T.S.J., Kegerreis J.A., Miyazaki Y., Eke V., Asimow P.D. Moon-forming impactor as a source of Earth's basal mantle anomalies // Nature. 2023. Vol. 623. P. 95–99. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06589-1

Zahnle K., Arndt N., Cockell C., Halliday A.N., Nesbit E., Selsis F., Sleep N.H. Emergence of a habitable planet // Space Sci. Rev. 2007. Vol. 129. P. 35–78. doi:10.1007/s11214-007-9225-z

Zhou Y., Liu Y., Reinhardt C., Deng H. The core-merging giant impact in Earth's accretion history and its implications // Acta Geochim. 2022. Vol. 41, No. 4. P. 553–567 https://doi.org/10.1007/s11631-021-00503-0

Zindler A.; Hart S.R. Chemical geodynamics // Annual Reviews of Earth and Planetary Science. 1986. Vol. 14. P. 493–571.

References

Belichenko V.G. et al. Geodynamic map of the Paleoasian Ocean. Eastern segment // Geology and Geophysics. 1994. Vol. 35. No. 7–8. P. 29–40.

Belichenko V.G. et al. Barguzin microcontinent (Baikal mountain region): to the problem of isolation // Geology and Geophysics. 2006. Vol. 47, No. 10. P. 1049–1059.

Chuvashova I.S., Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Saranina E.V. Radiogenic isotope studies of Late Cenozoic volcanic rocks from Asia and North America: Sources of volcanism of global, regional, and local significance // Geology and Environment. 2022. Vol. 2, No. 3. P. 64–102. DOI 10.26516/2541-9641.2022.3.64].

Galimov E.M., Krivtsov A.M., Zabrodin A.V., Legkostupov M.S., Eneev T.M., Sidorov Yu.I. Dynamic model of the formation of the Earth–Moon system // Geochemistry. 2005. No. 11. P. 1139– 1150. Ilyin A.V. About the Tuva-Mongolian massif // Materials on regional geology of Africa and foreign Asia. Moscow: Nedra, 1971. P. 67–73. (Proceedings of the Scientific Research Institute "Zarubezhgeology"; issue 22).

Levsky L.K., Stolbov N.M., Bogomolov E.S. et al. Sr-Nd-Pb isotope systems of basalts of the Franz Josef Land archipelago // Geochemistry. 2006. No. 4. P. 365–376.

Рассказов Сергей Васильевич,

Tveritinov Yu.I. et al. Forecasting gold mineralization in the south of Eastern Siberia and the Far East: geological and isotope-geochemical aspects. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS, 2006. 224 p.

Vityazev A.V., Pechernikova G.V. Early differentiation of the Earth and the problem of lunar composition // Physics of the Earth. 1996. No. 6. P. 3– 16.

доктор геолого-минералогических наук, профессор, 664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3, Иркутский государственный университет, геологический факультет, заведующий кафедрой динамической геологии, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, заведующий лабораторией изотопии и геохронологии, тел.: (3952) 51–16–59, email: rassk@crust.irk.ru. Rasskazov Sergei Vasilievich, doctor of geological and mineralogical sciences, professor, 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 Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies, tel.: (3952) 51-16-59, email: rassk@crust.irk.ru.

Чувашова Ирина Сергеевна,

кандидат геолого-минералогических наук, 664025 Иркутск, ул. Ленина, д. 3, Иркутский государственный университет, геологический факультет, Доценткафедры динамической геологии, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, старший научный сотрудник, тел.: (3952) 51–16–59, email: chuvashova@crust.irk.ru. **Chuvashova Irina Sergeevna**,

candidate of geological and mineralogical sciences, Senior Researcher, 664025 Irkutsk, Lenin st., 3, Irkutsk State University, Faculty of Geology, Associate Professor of the Dynamic Geology chair, 664033 Irkutsk, Lermontov st., 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS, Senior Researcher, tel.: (3952) 51–16–59, email: chuvashova@crust.irk.ru.

Мониторинг окружающей среды

УДК 550.844+546.791.027+632.126 https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.42

Мониторинг окислительно-восстановительного потенциала подземных вод в режиме реального времени на Култукском полигоне в конце 2023 – начале 2024 г.: сопоставление электрических эффектов с землетрясениями в центральной части Байкальской рифтовой системы

С.В. Рассказов^{1,2}, И.А. Асламов³, С.В. Снопков^{2,4}, В.И. Архипенко³, А.М. Ильясова¹, Е.П. Чебыкин^{1,3}

¹Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия ²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия ³Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия ⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет, Сибирская школа геонаук, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Приводятся результаты наблюдений окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) в подземных водах двух скважин Култукского полигона в режиме реального времени с декабря 2023 г. до марта 2024 г. В вариациях этого параметра различаются перестройки, сопровождающиеся короткими эпизодами проявления одиночных землетрясений и более продолжительными интервалами серий землетрясений в центральной части Байкальской рифтовой системы. Смена низких значений ОВП высокими значениями сопровождает общий переход от сильных землетрясений к слабым. Неодинаковые вариации ОВП мониторинговых станций связываются с пьезоэлектрическими эффектами, возникающими при воздействии сейсмических волн на кварц упорядоченной текстуры тектонитов в разных активных структурных элементах Южно-Байкальской впадины: в ее краевом Обручевском разломе и осевой Култукской тектонической ступени.

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

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

S.V. Rasskazov^{1,2}, I.A. Aslamov³, S.V. Snopkov^{2,4}, V.I. Archipenko³, A.M. Ilyasova¹, E.P. Chebykin^{1,3}

¹Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia ²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia ³Limnological Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia ⁴Irkutsk National Research Technical University, Siberian School of Geosciences, Irkutsk, Russia

Abstract. The results of real-time observations of the oxidation-reduction potential (ORP) in groundwater from two wells in the Kultuk area from December 2023 to March 2024 are presented. Variations of this parameter show reorganizations, accompanied by short episodes of single earthquakes and longer intervals of earthquake series in the central part of the Baikal Rift System. A change from low to high ORP values accompanies the general transition from strong to weak earthquakes. The uneven variations in ORP of the monitoring stations are suggested to associate with piezoelectric effects that arise when seismic waves act on quartz of the ordered tectonite structures in different active structures of the South Baikal basin: in its marginal Obruchev fault and in the axial Kultuk tectonic step.

Keywords: groundwater, monitoring, oxidation-reduction potential, earthquakes, Baikal.

Введение

В земной коре широко распространены электрические явления, связанные с пьезоэлектрическими эффектами, которые возникают при повышении горного давления в зернах кварца, имеющих ориентированную текстуру в гнейсах, гранитах и других породах. Фактор упорядоченности пространственной ориентировки минералов имеет определяющее значение, поскольку песчаники – мономинеральные кварцевые породы, сложенные хаотически расположенными зернами, - не обнаруживают пьезоэлектрического эффекта (Воларович, Пархоменко, 1954; Воларович, Соболев, 1965, 1969). Для исследования деформации и разрушения горных пород, наряду с методом электромагнитной эмиссии, широко используются также методы акустической эмиссии и фрактолюминесценции (Веттегрень и др., 2008, 2012).

При сравнении пьезоэлектрических и упругих колебаний был сделан вывод о том, что пьезоэлектрические колебания вызываются в основном поверхностной сейсмической волной. Метод пьезоэлектрического эффекта, разработанный для геофизической разведки кварцевых и пегматитовых жил, основан на преобразовании механической энергии упругой волны в электрическую. Роль преобразователя играет сама жила. При разведке кварцевых тел пьезоэлектрические колебания принимаются разнесенными электродами.

Электромагнитные сигналы рассматриваются в качестве предвестников землетрясений (Соболев и др., 1982; Головков, 1983; Dovbnya et al., 2006, 2014a, 2014б, 2019). В работах (Ohta et al., 2001; Akhoondzadeh et al., 2010; Bleier et al., 2010; Petraki et al., 2015) предполагается, что перед землетрясениями в минералах (кварце, являющемся полупроводником) вследствие нарастающих механических напряжений образуются подвижные носители заряда (положительные дыры), которые могут быстро распространяться и проникать в окружающие породы, вызывая в земной коре импульсы токов в сотни килоампер, а, следовательно, и сопутствующие им электромагнитные пульсации. Электромагнитные волны сверхнизкой частоты распространяются на десятки километров в земной коре и обнаруживаются на поверхности Земли (Bortnik et al., 2010).

Показателен пример наблюдений электромагнитных пульсаций, которые проявлялись в течение двух недель перед землетрясением Alum Rock 2007 года (M=5.4), которое произошло недалеко от Сан-Хосе в Калифорнии, США. Многие пульсации со значительными амплитудами и продолжительностью 1-30 с имели необычную униполярность (отклоняя фоновые значения показателей только в положительную или отрицательную сторону) и отличались от пульсаций, регистрировавшихся в предыдущие 2 года наблюдений. Показательно, что вскоре после землетрясения необычные пульсации прекратились (Bleier et al., 2010).

землетрясениях При Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации 2020-2023 гг. в подземных водах Култукского полигона проводились измерения окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) портативным прибором Hanna, которые выявили особые вариации этого параметра и рН (Снопков, Куроленко, 2023). Во время Быстринского землетрясения было определено резкое снижение ОВП как одного из основных признаков этого события (Семинский и др., 2021). Перед следующим за ним Кударинским землетрясением наблюдалась синхронизация вариаций ОВП с общим снижением этого параметра до минимальных значений в течение месяца. После Кударинского землетрясения ОВП синхронно нарастал на всех станциях в течение месяца и проявилось Хубсугульское землетрясение. Это событие обозначилось переходом от синхронных вариаций ОВП на станциях Култукского полигона к беспорядочным вариациям этого параметра (Рассказов и др., 2023б).

Вариации ОВП подземных вод Култукского полигона воспринимаются как способ регистрации пьезоэлектрических явлений, происходящих в земной коре с течением времени. ОВП представляет собой интегральный электрический показатель среды – потенциал электронного обмена, который относится к активному окислителю или восстановителю. Окислители захватывают электроны у других молекул, а восстановители отдают электроны другим молекулам. Окислители – вещества, обеспечивающие положительные значения ОВП, восстановители – отрицательные значения этого показателя (рис. 1).



Рис. 1. Схема реакций окисления и восстановления в подземных водах. Схема (https://www.kgs.ku.edu/Hydro/GWtutor/Plume_Busters/remediate_refs/redox_chemistry.htm) с изменениями.

Fig. 1. Scheme of oxidation and reduction reactions in groundwater. The scheme is modified after (https://www.kgs.ku.edu/Hydro/GWtutor/Plume_Busters/remediate_refs/redox_chemistry.htm).

Измерения ОВП в режиме реального времени широко применяются в мониторинге различных сред. Отслеживается качество воды в гидропонике, пивоварении, ферментации, нитрификации и в других процессах. ОВП дает сигнал о санитарном состоянии в системе раннего предупреждения загрязнения в районах с обширной нефтегазовой деятельностью (Li et al., 2017, 2019). Случаев применения мониторинга ОВП подземных вод для разработки системы слежения за сейсмическим состоянием территорий, кроме наблюдений землетрясений Байкало-Хубсугульской активизации, пока не известно.

В процессе Байкало-Хубсугульской активизации значения ОВП обычно измерялись портативными приборами во время отбора проб подземных вод на анализ элементов и изотопов U с периодичностью около 2 недель или чаще (иногда ежедневно). В начале декабря 2023 г. на западном берегу Байкала, в скважинах мониторинговых станций 9 (Земляничная, КБЖД) и 184 (Школьная) Култукского сейсмопрогностического полигона, были установлены зонды, считывающие каждые 2 минуты значения ОВП, рН и температуры в режиме реального времени. Условия установки зондов охарактеризованы в статье (Рассказов и др., 2023а). В этой же работе приведены первые результаты наблюдений, полученные за декабрь 2023 г.

Основная цель мониторинга в режиме реального времени – регистрировать именно вариации ОВП. Другие параметры (рН и температура) служат для контроля вариаций ОВП, усложняющихся в результате прокачки скважин. Значения ОВП должны характеризовать электрохимическое состояние воды, поступающей на забой скважины.

В зимнее время для предотвращения замерзания устья скважин в условиях отрицательной температуры воздуха осуществляется подогрев воды, благодаря которому имевозможность оценки фактора ется поступления воды из верхней части скважины к ее забою в результате возникновения реактивной струи, образующейся при выключении насоса. Нагретая вода верхней части скважины частично перемешивается с водой ее нижней части, в которой установлен зонд. Скважина мониторинговой ст. 9 интенсивно прокачивается раз в неделю. Остальные дни недели из нее в дневное время берется умеренное количество воды. Скважина мониторинговой ст. 184 умеренно прокачивается постоянно в дневное время. Прокачка влечет за собой резкое возрастание температуры воды, фиксируемой зондом, но через некоторое время (в течение первых часов) температура снижается и стремится к фоновым значениям температуры воды, поступающей снизу в забой скважины. При резком возрастании температуры воды скважины рН скачкообразно снижается, а ОВП, наоборот, скачкообразно возрастает. При последующем снятии эффекта температуры рН и ОВП нормализуются и приближаются к этим параметрам глубинных подземных вод.

В декабре 2023 г. значения ОВП подземных вод обеих скважин Култукского полигона возрастали на несколько сотен мВ. Относительное возрастание ОВП, полученное в режиме реального времени для воды забоя скважины, в целом совпадало с относительным возрастанием ОВП, определенным портативным прибором Hanna при отборе проб прогретой воды на устье скважин. Близкие значения ОВП, полученные в декабре 2023 г. для воды забоя и нагретого устья скважин, а также значения этого параметра, полученные для устья скважин в ходе предшествующего мониторинга, свидетельствовали о восстановленном характере подземных вод, сопутствующих сейсмическим событиям короткого эпизода 22-25 ноября в центральной части Байкальской рифтовой Байкалосистемы с типичной лля

Хубсугульской активизации перекличкой землетрясений территорий Байкала и Хубсугула. Подобная перекличка состоялась также во время мониторинга в режиме реального времени в коротком сейсмическом эпизоде 16–17 декабря 2023 г.

В настоящей работе приводятся результаты наблюдений ОВП в воде скважин в режиме реального времени с декабря 2023 г. до марта 2024 г., включительно, в сопоставлении с землетрясениями, произошедшими в Байкальской рифтовой системе в этот временной интервал.

Переход от коротких сейсмических эпизодов к более продолжительным сейсмическим интервалам

Во время короткого сейсмического эпизода 16–17 декабря 2023 г. сохраняются признаки Байкало-Хубсугульской активизации. В первый день землетрясение происходит на Южном Байкале, во второй – на Хубсугуле.

Более продолжительная серия землетрясений байкало-хубсугульского типа проявляется с 15 до 28 января 2024 г. Она начинается с сильного землетрясения Северного Байкала, продолжается тремя событиями Прихубсугулья и завершается событием Южного Байкала (рис. 2а). Еще одна продолжительная серия землетрясений происходит в конце февраля – первой половине марта. С 27 февраля до 04 марта регистрируются три слабых сейсмических события на Среднем Байкале, 06 марта – землетрясение в ЮВ части Восточного Саяна, 08 марта снова землетрясение на Среднем Байкале, 9 марта – землетрясение на Хубсугуле и, наконец, 10 марта – в южной части Баргузинской долины. 13 марта два землетрясения происходят за восточной рамкой схемы рис. 2 (не показаны), что может восприниматься как факт распространения сейсмичности в северо-восточную часть Байкальской рифтовой системы. Последнее землетрясение серии происходит 17 марта на Среднем Байкале, в районе п-ова Святой Нос (рис. 2б).



Рис. 2. Схема пространственного распределения землетрясений в декабре 2023 г.– январе 2024 г. (*a*) и в феврале – марте 2024 гг. (*б*). Стрелками показаны последовательности землетрясений, овалами – эпицентральное поля землетрясений, близких по времени. Сохраняется перекличка землетрясений, свойственная Байкало-Хубсугульской активизации, вступление которой обозначено сильными землетрясениями 2020–2021 гг.: Б – Быстринским, Кд – Кударинским, Х – Хубсугульским. Здесь и далее все наблюдения приводятся по местному времени, для землетрясений используется каталог (Карта..., 2023).

Fig. 2. Scheme of the spatial distribution of earthquakes in December 2023–January 2024 (*a*) and in February–March 2024 (*b*). Arrows show sequences of earthquakes, ovals show the epicentral fields of earthquakes close in time. The roll call of earthquakes characteristic of the Baikal-Khubsugul reactivation remains, the entry of which was indicated by strong earthquakes in 2020–2021: B - Bystraya, $K_A - Kudara$, X - Khubsugul. Hereinafter, all data are given in the local time, the catalog (Map..., 2023) is used.

Вариации ОВП в сопоставлении с землетрясениями

По наблюдениям четырех месяцев мониторинговые станции 9 и 184 дают неодинаковый рост ОВП. Короткие Байкало-Хубсугульские переклички землетрясений 22–25 ноября и 16–17 декабря 2023 г. обозначают низкие и быстро возрастающие значения ОВП. На ст. 9 последний из этих интервалов (16–17 декабря) приходится на резкий перегиб от быстрого к медленному подъему ОВП. Последующему временному отрезку соответствуют продолжительные серии с 15 до 28 января и с 27 февраля до 09 марта 2024 г., перекликающиеся на Байкале и Хубсугуле. Декабрьский короткий эпизод землетрясений среднего энергетического класса (К=11.2–11.4) сменяется январским сейсмическим интервалом, начинающимся сильным Северо-Байкальским землетрясением (К=14.3) и февраль-мартовским интервалом слабых землетрясений (К не выше 10.3). Выход с низких значений ОВП на высокие значения сопровождает переход от более сильных землетрясений к слабым (рис. 3).



Рис. 3. Тренды возрастания ОВП подземных вод мониторинговых ст. 9 (*a*) и 184 (б), сопровождающие проявление коротких эпизодов одиночных землетрясений (столбики пастельноголубого цвета) и более продолжительных интервалов их серий (столбики пурпурного цвета). Для землетрясений использованы значки, подобные значкам на рис. 2.

Fig. 3. Trends of increasing groundwater ORP at monitoring stations 9(a) and 184(b) that accompany occurring of short episodes of single earthquakes (pastel blue bars) and longer intervals of their series (purple bars). For earthquakes, marks similar to those in Fig. 2 are used.

Станция 9

Рассмотрим более детальную расшифровку временных вариаций ОВП ст. 9 по месячным интервалам (рис. 4). 02 декабря 2023 г. значения ОВП находятся на минимуме (–213 мВ). В течение декабря ОВП возрастает и 6– 17 января 2024 г. выходит на высокие значения (более 300). По нижней огибающей линии максимум (более 307 мВ) устанавливается на этой станции с 19:00 15 января до 21:00 16 января. Начальный подъем значений ОВП вечером 15 января ст. 9 синхронизируется с пиком температуры, который на следующий день нивелируется. ОВП воды ст. 9 достигает максимума (более 300 мВ) 6– 17 января 2024 г. и к концу января снижается. Минимум ОВП (276 мВ) устанавливается 29 января с 19:50 до 24:00.

16 декабря 2023 г. быстрый подъем ОВП ст. 9 сменяется медленным подъемом этого параметра (2 мВ в день). Перестройка ОВП сопровождается Горячинским землетрясением 16 декабря в 23:06 и Дархатским землетрясением 17 декабря в 13:48 (рис. 4а).

После продолжительного подъема ОВП выходит на максимум 06–17 января. На максимуме ОВП 15 января в 20:52 происходит сильное Северо-Байкальское землетрясение (К=14.3). После этого землетрясения ОВП снижается. На фоне снижения ОВП до конца января следуют еще четыре землетрясения.



Рис. 4. Вариации ОВП подземных вод ст. 9 с 01 до 31 декабря 2023 г. (*a*), с 31 декабря 2023 г. до 30 января 2024 г. (*б*), с 31 января до 05 марта (*в*) и с 26 февраля до 21 марта 2024 г. (*г*). На панелях *а* и *б* генеральная линия огибает варьирующие значения ОВП снизу, при появлении отрицательных импульсов на панели *в* – соответствует минимумам значений фона. Пастельно-

голубым цветом выделены короткие эпизоды проявления землетрясений, пурпурным – временные интервалы более продолжительных серий.

Fig. 4. Groundwater ORP variations at station 9 from December 1 to 31, 2023 (*a*), from December 31, 2023 to January 30, 2024 (*b*), from January 31 to March 5 (*c*), and from February 26 to March 21, 2024 (*d*). In panels *a* and *b*, the general line bends around the varying ORP values from below; when negative pulses appear in panel *c*, it corresponds to the minimal values of the background values. Short episodes of earthquakes are highlighted in pastel-blue; time intervals of longer series are highlighted in purple.

Весь февраль ОВП ст. 9 медленно поднимается (в среднем на 0.4 мВ в день). Землетрясения в это время отсутствуют. С 11:00 24 февраля до 07:00 25 февраля значение ОВП возрастает на 13 мВ (с 299 до 312 мВ). Через 2 дня (27 февраля) в 12:42 на Среднем Байкале регистрируется слабое землетрясение Турка, за которым 02-04 марта на Среднем Байкале следуют еще два сейсмических толчка. 04 марта поддерживается повышенное значение ОВП (317 мВ), которое снижается к 06 марта до 296 мВ. В это время происходит Орликское землетрясение, которое по энергетическому классу (К=10.3) превышает (хотя и незначительно) все другие землетрясения февраль-мартовского интервала. Остальные три землетрясения (08, 09 и 10 марта) регистрируются на фоне заметного возрастания ОВП, достигающего к 11 марта 340 мВ.

За временной отрезок наблюдений мы видим разный характер вариаций ОВП ст. 9 при землетрясениях: 1) короткий декабрьский сейсмический эпизод сопровождается резкой перестройкой тренда ОВП от крутого подъема к пологому, 2) январский сейсмический интервал, начинающийся сильным Северо-Байкальским землетрясением, сопровождается перестройкой тренда ОВП на максимуме с последующим снижением этого параметра, 3) февраль-мартовский сейсмический интервал, начинающийся группой слабых сейсмических событий Среднего Байкала, сопровождается новой перестройкой тренда ОВП на максимуме с последующим волнообразным снижением и возрастанием значений этого параметра.

Станция 184

На рис. 5 приводится детальная расшифровка по месячным интервалам временных вариаций ОВП ст. 184. 01 декабря 2023 г. в 20:40 значение ОВП находится на минимуме (79 мВ). 02 декабря в 17:20 наблюдается максимум ОВП= 245 мВ. Рост ОВП 01–02 декабря составляет 200 мВ в день. В дальнейшем рост замедляется и во временном интервале 02–09 декабря составляет в среднем 7.3 мВ в день. 08 декабря наблюдается заметное снижение ОВП от 284 до 269 мВ. Дальнейший рост ОВП с 09 до 16 декабря происходит медленнее (2.7 мВ в день). С 16 до 29 декабря средний рост составляет около 2 мВ в день. Горячинское и Дархатское землетрясения 16–17 декабря в значениях ОВП не выражены.

По нижней огибающей линии в первой половине января ОВП ст. 184 возрастает по 2.13 мВ в день. После перестройки ОВП 13– 15 января, сопровождающей сильное Северо-Байкальское землетрясение (К=14.3, 15 января в 20:52), темп возрастания ОВП снижается до 0.95 мВ в день. Еще четыре январских землетрясения происходят на фоне сниженного темпа нарастания ОВП. За январь значения ОВП по нижней огибающей линии постепенно возросли от 320 до 359 мВ.

В феврале темп роста значений ОВП ст. 184 по нижней огибающей линии становится крайне малым и составляет 0.11 мВ в день. Низкие значения (около 358–359 мВ) проявляются 06, 15 и 23 февраля. Между этими минимумами значения ОВП повышаются на 3–4 мВ. Землетрясения в это время отсутствуют.

После минимума 23 февраля ОВП заметно увеличивается (до 1.5 мВ в день) и на максимуме 363 мВ 27 февраля в 12:42 сопровождается слабым землетрясением Турка на Среднем Байкале, за которым 02-04 марта на этой же территории следуют еще два сейсмических толчка на фоне снижения ОВП. 05 марта в 11:32 проявляется отрицательный ОВП импульс (значение 357 мВ), подобный импульсам 06, 15 и 23 февраля. Этот импульс, однако, может иметь значение перестройки, поскольку попадает между последним событием из трех начальных февраль-мартовских землетрясений Среднего Байкала и Орликским землетрясением 06 марта. Остальные три землетрясения (08, 09 и 10 марта) регистрируются на фоне слегка возросшего ОВП.

За четырех-месячный временной отрезок наблюдений мы видим разный характер вариаций ОВП ст. 184 при землетрясениях: 1) короткий декабрьский сейсмический эпизод не сопровождается заметными изменениями тренда ОВП, 2) январский сейсмический интервал, начинающийся сильным Северо-Байкальским землетрясением, сопровождается перестройкой тренда ОВП с замедлением темпа его возрастания, 3) февральмартовский сейсмический интервал, начинающийся группой слабых сейсмических событий Среднего Байкала, отчетливо обозначается перестройкой тренда ОВП на максимуме с последующим снижением и возрастанием значений этого параметра. 08–14 марта сохраняется общая тенденция снижения ОВП ст. 184, относительно максимума 359 мВ, установившегося во время землетрясения Турка.



Рис. 5. Вариации ОВП подземных вод ст. 184 с 01 до 31 декабря 2023 г. (*a*), с 31 декабря 2023 г. до 30 января 2024 г. (*б*), с 31 января до 05 марта 2024 г. (*в*) и с 26 февраля до 21 марта 2024 г. (*г*). Условные обозначения см. рис. 3.

Fig. 5. Groundwater ORP variations at station 184 from December 1 to December 31, 2023 (*a*), from December 31, 2023 to January 30, 2024 (*b*), from January 31 to March 5, 2024 (*c*), and from February 26 to March 25, 2024 (*g*). Symbols are as in Fig. 3.

Обсуждение

По изменению ОВП в подземных водах регистрируются косейсмические пьезоэлектрические эффекты верхней части коры. Возникает вопрос, несет ли этот метод регистрации пьезоэлектрических эффектов информацию, сопоставимую с той, которая была уже получена геофизическими методами при изучении электрических эффектов, сопровождавших землетрясения в Байкальской рифтовой системе? Можно ли в работах по оценке угрозы землетрясений сопоставлять геофизические наблюдения электрических сигналов c наблюдениями вариаций ОВП в подземных водах?

Соотношение регистрации электрических явлений в воде и кварцсодержащей породе

После экспериментальных и теоретических работ по пьезоэлектрическим эффектам в кварце и других минералах как результата распространения сейсмических волн (Воларович, Пархоменко, 1954; Воларович, Соболев, 1965, 1969) теоретические предпосылки использования электрохимических параметров подземных вод для регистрации землетрясений обсуждались в работах (Freund, 2002, 2013). В качестве причины их изменения предполагалось проявление пероксидных дефектов, существующих в структурах породообразующих минералов (кварца), с развитием электрохимических процессов при ведущей роли подземных вод в качестве электролита.

В работе (Воларович, Пархоменко, 1954, с. 242) приводится информация об экспериментах «...по воспроизведению сейсмоэлектрического эффекта Е ... в искусственно увлажненных образцах горных пород. При этом было установлено, что до искусственного увлажнения образец доломита при воздействии на него упругих волн электризации не обнаруживал. После увлажнения этого образца при прохождении упругой волны наблюдалось возникновение потенциала на его гранях. Существенно, что знак заряда, подаваемого на электронную трубку, в данном случае не зависел от того, с какой грани образца снимались заряды, а определялся градиентом перепада давления. Таким образом, возникновение потенциала в увлажненных образцах горных пород при прохождении упругой волны и отсутствие полярности, по нашему мнению, являются достаточным подтверждением того, что наблюдавшийся в полевых условиях А.Г. Ивановым эффект действительно обусловлен наличием твердой и жидкой фаз. У горных пород, обнаруживающих пьезоэлектрический эффект (гранит), высушивание их с целью удаления содержащейся в них влаги не понижало пьезоэффекта».

В работе, опубликованной позже (Balk et al., 2009), предполагается, что обычные магматические и высоко метаморфические породы содержат спящие дефекты кристаллической структуры, которые при механическом напряжении высвобождают носители электронного заряда. Таким образом, порода собой электроаккумулятор. представляет Носителями заряда в кварцевых породах являются дефектные электроны, известные как «положительные дыры» - электронные состояния, связанные с О- в матрице О²⁻. Установлено, что дефектные электроны перемещаются по градиентам напряжений на расстояния порядка метров в лабораторных экспериментах и километров в полевых условиях. На границе раздела порода-вода дефектные электроны порождают высокоактивные радикалы кислорода, которые окисляют воду (H₂O) до перекиси водорода (H₂O₂). При этом на каждые два носителя заряда образуется одна молекула H₂O₂. В лабораторных экспериментах электрическая цепь замыкалась путем прокладки медного проводника от нагруженной породы к ненапряженной. В естественных условиях замыкание цепи может быть обеспечено за счет электролитической проводимости подземных вод.

Результаты геофизических наблюдений электромагнитных эффектов при землетрясениях в Байкальской рифтовой системе

На Среднем Байкале в месте высокоградиентного перехода Стволовая–Энхалук от положительной к отрицательной аномалии произошло сейсмическое событие 10 октября 2001 г. В разностной кривой проявилась бухта, предшествующая землетрясению (рис. 6). Это сильное землетрясение связывалось с ростом положительной магнитной

аномалии (Гольдин и др., 2003).



Рис. 6. Изменение разности модуля полного вектора магнитного поля между пунктами Стволовая и Энхалук, сопровождавшее землетрясение 10 октября 2001 года с М = ~5 (Гольдин и др., 2003).

Fig. 6. Variation of the modulus difference of the total magnetic field vector between the Stvolovaya and Enkhaluk sites, accompanying the earthquake on October 10, 2001 with M = -5 (Goldin et al., 2003).

Перед подготовкой сильного Култукского землетрясения 2008 г. (М = 6.3), во время которого уровень подземных вод понижался, одновременно понижалась напряженность электрического поля внутриземных источников (рис. 7). Это связывалось с проявлением пьезоэлектрических эффектов (Мороз, Мороз, 2012).



Рис. 7. Сопоставление графиков напряженности электрического поля внутриземных источников в п. Быстрая и уровня подземных вод в п. Талая (Мороз, Мороз, 2012). На временной оси указан момент Култукского землетрясения с M = 6.3.

Fig. 7. Comparison of changes in the electric field strength of intraterrestrial sources in the Bystraya site and the groundwater level in the Talaya site (Moroz, Moroz, 2012). The moment of the Kultuk earthquake with M = 6.3 is marked on the time axis.

Подобные эффекты отмечались в виде U-образных колебаний вертикальной электрической компоненты Ez (рис. 8) за сутки до сильного Кударинского землетрясения (09.12.2020 г., Мw = 5.5) на полигоне «Куяда», расположенном в 40 км от его эпицентра (Семинский, Поспеев, 2022).



Рис. 8. Скриншот окна программы "ViewField" с визуализацией записи вертикальной электрической компоненты Еz в период 09–10.12.2020 г. (полигон "Куяда"). Розовые полигоны – моменты проявления аномальных U-образных колебаний с периодами 5–30 с (Семинский, Поспеев, 2022).

Fig. 8. Screenshot of the "ViewField" program window with visualization of the recording vertical electrical component Ez at 09–10.12.2020 (Kuyada site). Pink polygons are the periods of occurrence of anomalous U-shaped oscillations with frequencies of 5–30 s (Seminsky, Pospeev, 2022).

В приведенных примерах определения косейсмических электрических эффектов геофизическими методами остается неясным, как эти эффекты должны применяться для оценки сейсмической угрозы в Байкальской рифтовой системе? В работе (Гольдин и др., 2003) рассмотрен исключительный случай проявления землетрясения, локализованного в высокоградиентной зоне непосредственно на территории наблюдений. Вряд ли приближение сильного землетрясения на обширной территории Байкальской рифтовой системы может определяться по методу считывания разности электромагнитных аномалий. Понижение напряженности электрического поля внутриземных источников при Култукском землетрясении в п. Быстрая (Мороз, Мороз, 2012) определено единственный раз. Остается неясным, проявился ли подобный эффект в этой же точке наблюдения, например, при сильных землетрясениях Байкало-Хубсугульской активизации? Наконец, станция «Куяда», на которой определены аномальные U-образные колебания вертикальной электрической компоненты Ez с периодами 5–30 с (Семинский, Поспеев, 2022), находится на Бугульдейском массиве метагабброидов. В породах такого состава пьезоэффекты (свойственные упорядоченным кварцевым текстурам) генерироваться не должны. Возникает вопрос о других вероятных механизмах косейсмических изменений компоненты Ez.

Сравнительный анализ косейсмических вариаций ОВП подземных вод ст. 9 и 184

Исследования косейсмической химической гидрогеодинамики проводятся на Култукском сейсмопрогностическом полигоне в сочленении Главного Саянского и Обручевского разломов. Первый из них является структурным швом фундамента Сибирского палеоконтинента, который характеризовался левосторонними сдвиговыми смещениями, не превышающими в сейсмодислокациях нескольких десятков метров, второй трассирует северный борт Южно-Байкальской впадины как структуры с суммарным позднекайнозойским вертикальным смещением более 4 км. В районе Култукского полигона зона тектонитов (включая милониты) составляет несколько км. Станции наблюдений находятся непосредственно в зоне тектонитов, состоящих из мелких зерен кварца, которые были упорядочены при тектонических движениях, сопровождавшихся образованием псевдотахилитов (Rasskazov et al., 2021). Кварцсодержащие породы зоны милонитов играют роль генераторов электрических сигналов от сейсмических волн. Соответственно, возбуждаемые ими сигналы могут отражаться на вариациях ОВП подземных вод, циркулирующих в зоне тектонитов.

Результаты ОВП мониторинга зависят, прежде всего, от положения станции в том или ином активном разломе. Чувствительность ст. 9 к сильным землетрясениям определяется ее установкой в активном субширотном фрагменте Обручевского разлома. Ст. 184 характеризует осевую часть рифтовой структуры в торцовой Култукской тектонической ступени Южно-Байкальской впадины, наклоненной с запада на восток, в сторону Байкала. За 4-месячный период наблюдений окислительные свойства подземных вод изменились кардинально, что отразилось в возрастании значений ОВП двух станций на несколько сотен милливольт. Декабрьские землетрясения среднего энергетического класса (К=12.2–12.4) были явно связаны с предшествующей сейсмичностью Байкало-Хубсугульской активизации. Об этом свидетельствует их проявление на восходящей линии ОВП с ее перегибом на ст. 9. Судя по низким (отрицательным) значениям ОВП, эта станция более чувствительна к сильным землетрясениям, чем ст. 184, имевшая лишь положительные значения этого показателя (см. рис 3а и 4а).

Сильное Северо-Байкальское землетрясение (К=14.3) 15 января 2024 г. сопровождалось перестройкой ОВП-сигналов 13-15 января на обеих мониторинговых станциях. В то же время понижение ОВП от максимума ст. 9, соответствующего по времени этому землетрясению, опять свидетельствует о ее высокой чувствительности к регистрации сильных землетрясений. На ст. 184 ОВП продолжает возрастать 13 января, но в замедленном темпе. До 11:00 13 января выдерживается сравнительно крутой наклон линии ОВП (2.13 мВ в день). После 11:00 линия становится более пологой (0.95 мВ в день). ОВП подземных вод ст. 184 возрастает в течение всего января от 320 мВ (1 января) до 363 мВ (31 января) (рис. 9).



Рис. 9. Сопоставление вариаций ОВП подземных вод ст. 9 (*a*) и ст. 184 (*б*) с 31 декабря 2023 г. до 30 января 2024 г. Для ОВП на панелях *а* и *б* используются разные шкалы. Генеральная линия ОВП проводится по минимумам значений фона. Единичные землетрясения в середине декабря приходятся на перегиб графика. Оживление сейсмической активности во второй половине января сопровождается снижением ОВП.

Fig. 9. Comparison of groundwater ORP variations at stations 9 (*a*) and 184 (*b*) from December 31, 2023 to January 30, 2024. Different scales are used for ORP in panels a and b. The general ORP line is drawn along the minimal background values. Single earthquakes in mid-December occur at the inflection point of the graph. The rejuvenation of seismic activity in the second half of January is accompanied by decrease in ORP.

Мы видим, что все землетрясения второй половины января соответствуют нисходящей кривой ОВП подземных вод ст. 9. Вслед за последним землетрясением этой серии (порт Байкал, 29 января 6:38) ОВП вод ст. 9 выходит на минимальное значение 276 мВ и 2 февраля повышается до 279 мВ. Это возрастание синхронизируется с длительным общим возрастанием ОВП вод ст. 184 (рис. 10). Такая перестройка в ОВП-сигналах подземных вод обозначает завершение сейсмического интервала.



Рис. 10. Сопоставление вариаций ОВП подземных вод ст. 9 (*a*) и ст. 184 (*б*) в конце серии январских землетрясений с 21 января до 04 февраля 2024 г. Землетрясения прекращаются при синхронизации подъема ОВП на мониторинговых станциях.

Fig. 10. Comparison of groundwater ORP variations at stations 9 (*a*) and 184 (*b*) at the end of the series of January earthquakes from January 21 to February 4, 2024. Earthquakes have ceased when the ORP rise is synchronized at the monitoring stations.

При землетрясениях в конце февраля и первой половине марта характер ОВПвариаций меняется (рис. 11). Три начальных землетрясения Среднего Байкала соответствуют нисходящей линии ОВП ст. 184, тогда как линия ОВП ст. 9 находится на одном уровне и несколько поднимается. Во второй половине этого сейсмического интервала значения ОВП ст. 184 выходят из минимума, а значения ОВП ст. 9 волнообразно снижаются и возрастают. Минимум ст. 184 предшествует минимуму ст. 9. Такое смещение минимумов характеризует начальный отклик снижения ОВП ст. 184 в осевой торцовой Култукской тектонической ступени на землетрясения, рассеянные по сечению впадины

Среднего Байкала. Подобный процесс на ст. 9 в краевом Обручевском разломе Южно-Байкальской впадины включается позже, когда происходит Орликское землетрясение, но уже начинает нивелироваться при землетрясении Святоносском-1.

С 06 марта на ст. 184 и с 07 марта на ст. 9 наблюдаются землетрясения при возрастающем ОВП. Наблюдаемое увеличение ОВП может объясняться возможным повышением концентрации в воде перекиси водорода (являющейся мощным окислителем со значением ОВП порядка 2000 мВ), образующейся в ходе электрохимических реакций на границе нагруженной кварцевой породы с подземными водами. Такое соотношение наблюдаемой динамики ОВП и землетрясений отличается от их соотношений в ходе реализации предшествующих землетрясений, происходивших на фоне снижения ОВП подземных вод. Последнее может быть

вызвано частичной разгрузкой кварцевых пород с сопутствующим снижением пьезоэлектрических эффектов и, как следствие, интенсивности электрохимических процессов на границе порода–вода.



Рис. 11. Сопоставление вариаций ОВП подземных вод ст. 9 (*a*) и ст. 184 (б) с 26 февраля до 14 марта при землетрясениях.

Fig. 11. Comparison of groundwater ORP variations at stations 9 (*a*) and 184 (*b*) from February 26 to March 14 during earthquakes.

Заключение

Наблюдения на Култукском полигоне, выполненные в режиме реального времени с 1 декабря 2023 г. до 21 марта 2024 г., свидетельствуют о последовательном подъеме ОВП подземных вод на несколько сот милливольт. Пространственное распределение землетрясений в Байкальской рифтовой системе в этот временной интервал соответствует Байкало-Хубсугульской перекличке землетрясений. Низкие значения ОВП в начале наблюдений сопровождаются землетрясениями умеренной и большой силы, высокие значения ОВП к концу наблюдений сопутствуют слабым землетрясениям.

Результаты, полученные в режиме реального времени, подтверждают существенные вариации ОВП подземных вод Култукского полигона, установленные эпизодическими измерениями этого параметра портативными приборами в предшествуюцие 3.5 года. На двух станциях, одна из которых (ст. 9) находится в зоне бортового Обручевского разлома Южно-Байкальской впадины, а другая (ст. 184) – на ее торцовой Култукской тектонической ступени, наблюдается разный характер проявления пьезоэлектрических эффектов. В период вступления интервалов землетрясений по вариациям ОВП ст. 9 отчетливо регистрируются сейсмические толчки повышенной силы бортового разлома впадины и по вариациям ОВП ст. 184 – слабые толчки, рассеянные во впадине осевой части рифтовой системы.

Выявленные закономерности в вариациях ОВП будут корректироваться в ходе продолжающегося гидрогеохимического мониторинга и мониторинга ОВП в режиме реального времени. В разработке подходов к оценке сейсмической угрозы в центральной части Байкальской рифтовой системы было бы рациональным найти возможности для сопоставления полученных косейсмических электрических сигналов ОВП в подземных водах из зон активных разломов с электрическими сигналами, регистрируемыми геофизическими методами. Решение вопроса о ходе косейсмических гидрогеохимических изменений подземных вод по механизму генерации перекиси водорода и, возможно, других окислителей требует постановки специальных исследований на станциях мониторинга с привлечением конкретных аналитических данных по подземным водам.

Благодарности

Мониторинг ОВП подземных вод в режиме реального времени проводится в рамках реализации крупного научного проекта «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой экологического платформы 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» (Карта..., 2012).

Литература

Веттегрень В.И., Башкарев А.Я., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П. Фрактолюминесценция кристаллического кварца при ударе // Физика твердого тела. 2008. Т. 50, Вып. 1. С. 29–31.

Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П. Динамика фрактолюминесценции, электромагнитной и акустической эмиссии при ударе по поверхности гранита // Физика Земли. 2012, № 5. С. 58–63.

Воларович М.П., Пархоменко Э.И. Пьезоэлектрический эффект горных пород //Докл. АН СССР. Геофизика. 1954. Том XCIX. № 2. С. 239– 242.

Воларович М.П., Соболев Г.А. Использование пьезоэлектрического эффекта горных пород для подземной разведки тел–пьезоэлектриков // Докл. АН СССР. 1965. Т. 162, № 3. С. 556–558.

Воларович М.П., Соболев Г.А. Пьезоэлектрический метод геофизической разведки кварцевых и пегматитовых жил. М.: Наука, 1969. 132 с. Головков В.П. (ред.) Электрические и магнитные предвестники землетрясений. Ташкент: изд-во ФАН Узбекской ССР, 1983. 135 с.

Гольдин С.В., Дядьков П.Г., Селезнев В.С., Шерман С.И. Некоторые результаты исследований в связи со среднесрочным прогнозом землетрясений на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне // Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия: Материалы междунар. геофиз. конф. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. С. 11–31.

Карта эпицентров землетрясений. Иркутск: Байкальский Филиал Геофизической Службы, 2023. http://www.seis-bykl.ru

Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Аномалии электрического поля и электропроводности земной коры в связи с Култукским землетрясением на оз. Байкал // Физика Земли. 2012. № 5. С. 64–64.

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

Рассказов С.В., Снопков С.В., Борняков С.А. Соотношение времени землетрясений Байкало-Хубсугульской активизации с вариациями окислительно-восстановительного потенциала в подземных водах Култукского полигона // Геология и окружающая среда. 20236. Т. 3, № 1. С. 181– 201. doi.org/10.26516/2541 -9641.2023.1.181

Семинский И.К., Поспеев А.В. Отражение крупных для Байкальского рифта землетрясений 2020-2021 г. в данных режимных наблюдений магнитотеллурического поля Земли // Физика Земли. 2022. № 4. С. 46–55. https://DOI: 10.31857/S0002333722040093

Семинский К.Ж., Борняков С.А., Добрынина А.А., Радзиминович Н.А., Рассказов С.В., Саньков В.А., Миалле П., Бобров А.А., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Семинский А.К., Чебыкин Е.П., Шагун А.Н., Герман В.И., Тубанов Ц.А., Улзибат М., 2020. Быстринское землетрясение в Южном Прибайкалье (21.09.2020г., Мw=5.4): основные параметры, признаки подготовки и сопровождающие эффекты // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 5. С. 727–743. Снопков С.В., Куроленко А.А. Особенности Хубсугульского землетрясения и его влияние на физико-химические свойства подземных вод Южного Прибайкалья // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 172–180. https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.172

Соболев Г.А., Гохберг М.Б. и др. Электромагнитные предвестники землетрясений. М.: Наука. 1982.

Akhoondzadeh M., Parrot M., Saradjian M.R. Investigation of VLF and HF waves showing seismo-ionospheric anomalies induced by the 29 September 2009 Samoa earthquake (Mw=8.1). Natural Hazards and Earth System Science. 2010. Vol. 10, No. 5. P. 1061–1067. https://doi.org/10.5194/nhess-10-1061-2010.

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

Bleier T., Dunson C., Alvarez C., Freund F., Dahlgren R. Correlation of pre-earthquake electromagnetic signals with laboratory and field rock experiments // Natural Hazards and Earth System Science. 2010. Vol. 10, No. 9. P. 1965–1975. https://doi.org/10.5194/nhess-10-1965-2010.

Bortnik J., Bleier T.E., Dunson C., Freund F. Estimating the seismotelluric current required for observable electromagnetic ground signals // Annales Geophys. 2010. Vol. 28, No. 8. P. 1615–1624. https://doi.org/10.5194/angeo-28-1615-2010

Dovbnya B.V., Zotov O.D., Mostryukov A.O., Shchepetnov R.V. Electromagnetic signals close in time to earthquakes // Izv., Phys. Solid Earth. 2006. Vol. 42, No. 8. P. 684–689. DOI: 10.1134/ S1069351306080052

Dovbnya B.V. Electromagnetic precursors of earthquakes and their recurrence // Geophysical J. 2014a. Vol. 36, No. 3. P. 160–165. DOI: 10.24028/gzh.02033100.v36i3.2014.116069.

Dovbnya B.V., Potapov A.S., Guglielmi A.V., Rakhmatulin R.A. On the impact of MHD resonators on the geomagnetic pulsations // Geophysical J. 20146. Vol. 36, No. 6. P. 143–152. DOI: 10.24028/ gzh.0203-3100.v36i6.2014.111053

Dovbnya B.V., Pashinin A.Yu., Rakhmatulin R.A. Short-term electromagnetic precursors of earthquakes // Geodynamics & Tectonophysics.

2019. Vol. 10, No. 3. P. 731–740. DOI: 10.5800/GT-2019-10-3-0438.

Freund F. Charge generation and propagation in rocks // J. Geodynamics. 2002. Vol. 33. P. 545–572.

Freund F. Earthquake forewarning – A multidisciplinary challenge from the ground up to space // Acta Geophysica. 2013. Vol. 61, No. 4. P. 775–807. DOI: 10.2478/s11600-013-0130-4

Li H., Gu J., Hanif A., Dhanasekar A., Carlson K. Quantitative decision making for a groundwater monitoring and subsurface contamination early warning network // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 683. P. 498–507. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.121

Li H.S., Son J.-H., Hanif A., Gu J.L., Dhanasekar A., Carlson K. Colorado Water Watch: Real-Time Groundwater Monitoring for Possible Contamination from Oil and Gas Activities // Journal of Water Resource and Protection. 2017. Vol. 9. P. 1660–1687.

https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.913104

Ohta K., Umeda K., Watanabe N., Hayakawa M. ULF/ELF emissions observed in Japan possibly associated with the Chi-Chi earthquake in Taiwan // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2001. Vol. 1, No. 1. P. 37–42.

Petraki E., Nikolopoulos D., Nomicos C., Stonham J., Cantzos D., Yannakopoulos P., Kottou S. Electromagnetic pre-earthquake precursors: Mechanisms, data and models-A review // Journal of Earth Science & Climatic Change. 2015. Vol. 6, No. 1. P. 250. doi:10.4172/2157-7617.1000250

Rasskazov S., Chuvashova I., Yasnygina T., Saranina E., Gerasimov N., Ailow Y., Sun Y.-M. Tectonic generation of pseudotachylytes and volcanic rocks: Deep-seated magma sources of crust-mantle transition in the Baikal Rift System, Southern Siberia // Minerals. 2021. V. 11, No, 5. P. 487.

References

Goldin S.V., Dyadkov P.G., Seleznev V.S., Sherman S.I. Some research results in connection with the medium-term forecast of earthquakes at the South Baikal geodynamic site // Problems of seismology of the 3rd millennium: Materials of the international. geophysics conf. Novosibirsk: Publishing house SB RAS, 2003. pp. 11–31.

Golovkov V.P. (ed.) Electrical and magnetic precursors of earthquakes. Tashkent: publishing house of the FAN of the Uzbek SSR, 1983. 135 p.

Moroz Yu.F., Moroz T.A. Anomalies of the electric field and electrical conductivity of the earth's crust in connection with the Kultuk earthquake on Lake. Baikal // Physics of the Earth. 2012. No. 5. pp. 64–64.

Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Snopkov S.V., Archipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. The first experience of monitoring coseismic and aseismic variations of ORP, pH, and temperature of groundwater in the Kultuk reservoir in real time (Baikal rift system) // Geology and Environment. 2023a. Vol. 3, No. 4. P. 161–181. https://doi.org/10.26516/2541 -9641.2023.4.161

Rasskazov S.V., Snopkov S.V., Bornyakov S.A. Correlation of the time of earthquakes of the Baikal-Khubsugul reactivation with variations in the redox potential in the groundwater of the Kultuk area // Geology and Environment. 2023b. Vol. 3, No. 1. P. 181–201. doi.org/10.26516/2541 -9641.2023.1.181

Seminsky I.K., Pospeev A.V. Reflection of large earthquakes for the Baikal rift of 2020-2021 in the data of regime observations of the Earth's magnetotelluric field // Physics of the Earth. 2022. No. 4. pp. 46–55. https://DOI: 10.31857/S0002333722040093

Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Radziminovich N.A., Rasskazov S.V., Sankov V.A., Mialle P., Bobrov A.A., Ilyasova A M., Salko D.V., Sankov A.V., Seminsky A.K., Chebykin E.P., Shagun A.N., German V.I., Tubanov Ts.A., Ulzibat M. Earthquake Bystraya in the South Baikal region (09.21.2020, Mw = 5.4): main parameters, signs of preparation, and accompanying effects // Russian Geology and Geophysics. 2021.Vol. 62, No. 5. P. 727–743.

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор, 664025 Иркутск, ул. Ленина, д. 3, Иркутский государственный университет, геологический факультет, заведующий кафедрой динамической геологии, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, заведующий лабораторией изотопии и геохронологии, тел.: (3952) 51–16–59, email: rassk@crust.irk.ru. Rasskazov Sergei Vasilievich, doctor of geological and mineralogical sciences, professor, 664025 Irkutsk, Lenin st., 3, Irkutsk State University, Faculty of Geology, *Head of Dynamic Geology Char,* 664033 Irkutsk, Lermontov st., 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS, Head of Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies, tel.: (3952) 51-16-59, 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.

Snopkov S.V., Kurolenko A.A. Features of the Khubsugul earthquake and its influence on the physical and chemical properties of groundwater in the Southern Baikal region // Geology and Environment. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 172–180. https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.172

Sobolev G.A., Gokhberg M.B. and others. Electromagnetic precursors of earthquakes. M.: Science. 1982.

Vettegren V.I., Bashkarev A.Ya., Mamalimov R.I., Shcherbakov I.P. Fractoluminescence of crystalline quartz upon impact // Solid State Physics. 2008. Vol. 50, Issue. 1. P. 29–31.

Vettegren V.I., Kuksenko V.S., Mamalimov R.I., Shcherbakov I.P. Dynamics of fractoluminescence, electromagnetic and acoustic emission upon impact on a granite surface // Physics of the Earth. 2012. No. 5. P. 58–63.

Volarovich M.P., Parkhomenko E.I. Piezoelectric effect of rocks // Dokl. Academy of Sciences of the USSR. Geophysics. 1954. Vol. XCIX. No. 2. P. 239–242.

Volarovich M.P., Sobolev G.A. Use of the piezoelectric effect of rocks for underground exploration of piezoelectric bodies // Dokl. Academy of Sciences of the USSR. 1965. Vol. 162, No. 3. P. 556–558.

Volarovich M.P., Sobolev G.A. Piezoelectric method for geophysical exploration of quartz and pegmatite veins. M.: Nauka, 1969. 132 p.

Aslamov Ilya Aleksandrovich, Candidate of physical and mathematical sciences, Senior Researcher, 664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskava, 3,

Limnological Institute SB RAS, email: ilya_aslamov@bk.ru.

Снопков Сергей Викторович,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент, 664025 Иркутск, ул. Ленина, д. 3, Иркутский государственный университет, геологический факультет, доцент, 664074, г. Иркутск, ул. Курчатова, 3, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Сибирская школа геонаук, ведущий научный сотрудник, email: snopkov_serg@mail.ru.

Snopkov Sergey Viktorovich, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, assistant professor, 664025 Irkutsk, Lenin st., 3, Irkutsk State University, Faculty of Geology, 664074, Irkutsk, st. Kurchatova, 3, Irkutsk National Research Technical University, Siberian School of Geosciences, Leading Researcher, email: snopkov_serg@mail.ru.

Архипенко Владислав Иванович,

главный специалист по электронике, 664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Лимнологический институт СО РАН, email: vladarxip@gmail.com. **Arkhipenko Vladislav Ivanovich,** main electronics engineer, 664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3, Limnological Institute SB RAS, email: vladarxip@gmail.com.

Ильясова Айгуль Маратовна,

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, email: ila@crust.irk.ru. **Ilyasova Aigul Maratovna**, candidate of geological and mineralogical sciences, leading engineer, 664033 Irkutsk, Lermontov st., 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS, email: ila@crust.irk.ru.

Чебыкин Евгений Павлович,

кандидат химических наук, старший научный сотрудник, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, 664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Лимнологический институт СО РАН, email: epcheb@yandex.ru. **Chebykin Evgeny Pavlovich,** Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, 664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS, 664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3, Limnological Institute SB RAS, email: epcheb@yandex.ru.

УДК 550.844+546.791.027+632.126 https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.61

Экспресс-анализ квазипериодических импульсов окислительновосстановительного потенциала подземных вод берега Байкала при мониторинге в режиме реального времени (07–14 февраля 2024 г.)

С.В. Снопков^{1,2}, С.В. Рассказов^{1,3}, И.А. Асламов⁴, В.И. Архипенко⁴, А.М. Ильясова³, Е.П. Чебыкин^{3,4}

¹Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия ²Иркутский национальный исследовательский технический университет, Сибирская школа геонаук, г. Иркутск, Россия ³Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия ⁴Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. В режиме реального времени подземных вод берега Байкала в течение недели февраля 2024 г. регистрируются своеобразные эффекты в виде квазипериодических отрицательных ОВП-импульсов с варьирующими временными интервалами и снижением ОВП относительно фона. Обращается внимание на их проявление при возрастании температуры воздуха на Байкале. Проводится экспресс-анализ наблюдаемых эффектов. В начале интервала наблюдений определяется режим вступительных ОВП-импульсов, проявляющихся в условиях слабого возрастания температуры воздуха, в середине – условно-оптимальный режим в условиях существенного потепления и в конце – режим ретроградного развития в условиях похолодания. Выявленные закономерности в изменении пауз между импульсами и амплитуды снижения ОВП относительно фона составляют основу для анализа продолжающихся эффектов.

Ключевые слова: подземные воды, мониторинг, окислительно-восстановительный потенциал, pH, температура, Байкал.

Express-analysis of quasi-periodic oxidation-reduction potential pulses in Baikal Coastal Groundwater during real-time monitoring (February 07–14, 2024)

S.V. Snopkov^{1,2}, S.V. Rasskazov^{1,3}, I.A. Aslamov⁴, V.I. Archipenko⁴, A.M. Ilyasova³, E.P. Chebykin^{3,4}

¹Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

²Irkutsk National Research Technical University, Siberian School of Geosciences, Irkutsk, Russia ³Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia ⁴Limnological Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. Real-time groundwater monitoring on a shore of Lake Baikal reveals peculiar effects in the form of quasi-periodic negative ORP pulses with varying time intervals and a decrease in ORP relative to the background during the week of February 2024. We perform an express analysis of the observed effects and pay attention to their occurrence during increasing air temperature. At the beginning of the observation interval, we determine the regime of initial ORP pulses, which occur in conditions of a slightly increasing air temperature, then the middle one in a conventionally-optimal regime in conditions of significant warming, and the final regime of retrograde evolution in cooling conditions. The revealed regularities in changes of pauses between pulses and amplitudes of ORP reductions relative to the background form the basis for the analysis of ongoing effects.

Keywords: groundwater, monitoring, oxidation-redox potential, pH, temperature, Baikal.

Введение

Специально разработанные автономные логгеры с зондами ТМА-11 были установлены на двух станциях побережья западной оконечности Байкала, в пос. Култук в начале декабря 2023 г., для измерения окислительно-восстановительного потенциала (ОВП). водородного потенциала (pH) и температуры воды в режиме реального времени при разработке системы мониторинговых наблюдений с целью оценки угрозы сильных землетрясений на территории Байкальской рифтовой системы. Один зонд был размещен на мониторинговой станции 9 (КБЖД, Земляничная), другой – на мониторинговой станции 184 (Школьная). Подробная характеристика условий установки зондов, их технические характеристики, режим измерений и передачи данных приведены в работе (Рассказов и др., 2023а). Мониторинг ОВП был организован в режиме реального времени в связи с обнаружением вариаций этого параметра в подземных водах, выявленных при землетрясениях Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации 2021–2023 гг. с использованием портативных приборов Наппа и Эксперт (Семинский и др., 2021; Рассказов и др., 20236; Снопков, Куроленко, 2023).

ОВП представляет собой потенциал электронного обмена, который относится к активному окислителю или восстановителю. Окислители захватывают электроны у других молекул, а восстановители их отдают. Положительные значения ОВП свидетельствуют о преобладании в воде окислителей, а отрицательные значения указывают на восстановительные свойства воды (рис. 1).



Рис. 1. Схема реакций окисления и восстановления в подземных водах по работе (https://www.kgs.ku.edu/Hydro/GWtutor/Plume_Busters/remediate_refs/redox_chemistry.htm) с изменениями.

Fig. 1. Scheme of oxidation and reduction reactions in groundwater. Modified after (https://www.kgs.ku.edu/Hydro/GWtutor/Plume_Busters/remediate_refs/redox_chemistry.htm)

Мониторинг ОВП, pH и температуры подземных вод в реальном времени несет информацию о текущих гидрогеохимических изменениях в их резервуаре и проводится с целью обеспечения оперативного вывода данных, которые могут свидетельствовать о приближении сейсмических событий. Если в процессе мониторинга появляются новые эффекты, их роль нужно выяснять для использования в последующем анализе постоянно поступающей новой мониторинговой информации.

В мониторинговых рядах декабря 2023 г. – февраля 2024 г. в подземных водах обеих станций наблюдается существенный рост ОВП. В феврале 2024 г. в воде ст. 9 проявляются новые эффекты в виде регулярных колебаний ОВП (отрицательных импульсов), тогда как на ст. 184 подобные сигналы в это время не регистрируются. В настоящей раэкспрессприводятся результаты боте зарегистрированных ОВПанализа импульсов в подземных водах ст. 9 с целью определения закономерностей их проявления в ходе дальнейших наблюдений.

Подходы к систематике ОВПимпульсов

Регулярные выразительные минимумы наблюдаются в подземной воде ст. 9 с 07 до 14 февраля 2024 г. (табл. 1). До этого временного интервала регистрируется фон ОВП при отсутствии регулярных минимумов, за исключением подобных слабовыраженных эффектов 22–24 декабря 2023 г. (рис. 2). 14 февраля ОВП минимумы резко уменьшаются по амплитуде (А). Импульс 29 (14 февраля, t_n =13:16, t_M =14:02) имеет А = 8мВ, следующий за ним импульс 30 (14 февраля, t_n =22:26, t_M =23:18) – А = 5мВ. По смене характера импульсов 14–15 февраля последующие квазипериодические события отделяются от событий 07–14 февраля, что дает возможность выполнить предварительный анализ ОВП-генерирующих процессов до этого рубежа.

Таблица 1

Параметры ОВП-импульсов подземных вод ст. 9 07-14 февраля 2024 г.

Table 1

№ им- пульса	tп	tмин	t, мин (от б ч)	ОВП(п), мВ	ОВП(м), мВ	ОВП(пм), мВ	t(пм), мин
J	07.02.2024	07.02.2024	()				
1	18:02	18:42	+06	292	281	11	40
	07.02.2024	08.02.2024					
2	23:48	0:48	-12	291	279	12	60
	08.02.2024	08.02.2024					
3	5:48	6:20	-10	287	279	8	32
	08.02.2024	08.02.2024					
4	11:02	12:04	+10	291	286	5	62
	08.02.2024	08.02.2024					
5	17:38	18:16	-20	300	289	11	38
	08.02.2024	08.02.2024					
6	22:44	23:20	-30	297	286	11	36
_	09.02.2024	09.02.2024					
7	4:06	4:44	-34	297	287	10	38
	09.02.2024	09.02.2024		• • •			• •
8	9:16	9:54	-70	297	286	11	38
_	09.02.2024	09.02.2024	= 2	9 0 f			
9	14:10	14:45	-73	296	285	11	35
10	09.02.2024	09.02.2024	24	200	202	7	20
10	18:54	19:32	-24	299	292	/	38
11	10.02.202	10.02.2024	4.4	205	205	10	20
11	4 0:50	1:08	-44	305	293	10	30
10	10.02.2024	10.02.2024	29	206	205	11	44
12	5.40 10.02.2024	0.24	-30	300	293	11	44
13	10.02.2024	10.02.2024	36	304	203	11	16
15	10.02.2024	10.02.2024	-30	304	293	11	40
14	16:54	17.28	_28	304	293	11	34
14	10.02 2024	10.02.2024	-20	504	275	11	54
15	22.2024	23.00	_22	301	292	9	34
15	11 02 2024	11 02 2024	22	501)	54
16	3.58	4.38	-76	300	290	10	40
10	11.02.2024	11.02.2024	70	500	220	10	10
17	8:54	9:24	-66	298	289	9	30
	11.02.2024	11.02.2024				-	
18	13:44	14:20	-56	299	286	13	36
	11.02.2024	11.02.2024					
19	18:44	19:24	-36	295	284	11	40
	12.02.2024	12.02.2024					
20	0:16	0:48	-42	295	284	11	32
	12.02.2024	12.02.2024					
21	5:30	6:06	-10	295	285	10	36
	12.02.2024	12.02.2024					
22	10:40	11:16	-28	294	284	10	36
	12.02.2024	12.02.2024	0.5	201		0	
23	16:12	16:48	+86	291	283	8	36

Parameters of groundwater ORP pulses at station 9 in February 07–14, 2024

24	13.02.2024 0:30 13.02.2024	13.02.2024 1:14 13.02.2024	+28	293	283	10	44
25	7:00	7:42	+48	294	283	11	42
26	13.02.2024 14:02 13.02.2024	14:36 13.02.2024	+132	296	284	12	34
27	22:18	22:48 14.02.2024	-63	294	275	19	30
28	3:26	3:42	+260	293	280	13	16
29	14.02.2024 13:16	14:02 14:02	+298	292	284	8	46



Рис. 2. Выразительное проявление регулярных отрицательных ОВП-импульсов в подземной воде ст. 9 во временном интервале 07–14 февраля 2024 г. и позже. Подобные менее выразительные эффекты проявляются 22–24 декабря 2023 г. (не рассматриваются). В каждом ОВП-импульсе вода получает порцию электронов.

Fig. 2. Expressive occurrence of regular negative ORP pulses in groundwater at station 9 in the time interval of February 7–14, 2024 and later on. Similar less pronounced effects appear on December 22–24, 2023 (not considered). In each ORP pulse, water receives a portion of electrons.

Первый ОВП-минимум регистрируется 07 февраля в 18:42, второй – через 6 ч. 06 мин. (08 февраля в 00:48), третий – еще через 5 ч. 38 мин. (08 февраля в 06:20), четвертый – через 5 ч. 50 мин. (08 февраля в 12:04), пятый – через 6 ч. 10 мин. (08 февраля в 18:16), шестой – через 5 ч. 00 мин. (08 февраля в 23:20) и т. д. (рис. 3а, табл. 1). Регулярные ОВП-импульсы проявляются в воде ст. 9 независимо от изменений рН и температуры (рис. 3б).



Рис. 3. Динамика физико-химических показателей подземных вод ст. 9 от 1 до 29 февраля 2024 г.: *а* – ОВП, *б* – ОВП вместе с температурой и рН. На панели *а* регулярным отрицательным ОВП-импульсам в интервале 07–14 февраля 2024 г. присвоены номера от 1 до 29.

Fig. 3. Dynamics of physicochemical parameters of groundwater at station 9 from 1 to 29 February, 2024: a - ORP, b - ORP along with temperature and pH. In panel *a*, regular negative ORP pulses in the interval February 7–14, 2024 are assigned numbers from 1 to 29.

В ОВП-импульсах находят выражение факторы времени и снижения ОВП относительно фона. Характеристические параметры повторяющихся эффектов включают: 1) исходное фоновое значение ОВП = 295 мВ 07 февраля; 2) точку перегиба, после которой значение ОВП начинает резко снижаться; 3) заостренную линию минимального значения ОВП; 4) отрезок быстрой релаксации (быстрого выхода из минимума) и 5) отрезок медленной релаксации с адаптацией ОВП к уровню фона, который со временем может меняться. Активная фаза ОВП- импульса ограничивается нисходящей линией от точки перегиба до точки со значением ОВП-минимума.

Для импульса определяется амплитуда (А_{мин} – амплитуда минимума) и длительность (t_{пм} – время от точки перегиба до минимума). Для регистрации паузы между активными фазами ОВП-импульсов определяются отрезки времени между соседними перегибами линии значений ОВП (t_{пп}) и заостренными минимумами (t_{мм} – время от минимума до минимума) (рис. 4).



Рис. 4. Характеристические параметры повторяющихся минимумов ОВП. Рисунок выполнен на основе графика, полученного в режиме реального времени в начале появления ряда импульсов (07–08 февраля 2024 г.).

Fig. 4. Characteristic parameters of repeating ORP minima. The figure is based on a graph obtained in real-time monitoring at the beginning of the appearance of a series of pulses (February 07–08, 2024).

На графике рис. 4 отрезки быстрой и медленной релаксации выделяются визуально. На последующих минимумах ряда наблюдений точка перегиба на восходящей кривой часто нивелируется. Релаксация имеет характерное экспоненциальное затухание. Такие затухания образуются во многих физических полях, в том числе электромагнитных, электрических и др. Амплитуда уменьшается пропорционально e^{-at} ., где а – некоторый коэффициент пропорциональности, а t – время от момента начала релаксации. В нашем случае, сигнал подчиняется зависимости ($A_{\phi o H} - A_{min} * e^{-at}$). В настоящей работе анализируется только активная фаза импульсов.

Фактор времени

С вечера 07 февраля до полудня 08 февпроявляются начальные ОВПраля импульсы приблизительно через каждые 6 часов ($t_{MM} = 6-0 \pm 12$ мин.). В течение суток регистрируются 4 события. После полудня 08 февраля временные интервалы между минимумами сокращаются на 20-80 минут. По отношению к эталонному интервалу 6 часов обозначается интервал отрицательных значений t_{мм} = 6 ч.-20 мин. - 6 ч.-80 мин. Количество ОВП-импульсов в течение суток возрастает до пяти. Импульс 23 (12 февраля, 16:48, 283 мВ) характеризуется, наоборот, положительными значениями t_{мм} (до 6 ч.+86 мин.). Последующие события 24-29, проявляющиеся 12-14 февраля, также имеют длинные паузы (t_{мм} от 6 ч.+28 мин. до 6 ч.+260 мин.), за исключением события 27, во время которого пауза между импульсами (t_{мм} = 6 ч.-63 мин.) имеет отрицательное значение относительно эталонного интервала 6 ч. (рис. 5).

Начальные ОВП-импульсы 7-8 февраля отличаются, с одной стороны, от импульсов

промежуточного интервала 8-12 февраля, с другой стороны, - от импульсов переходного интервала 12-14 февраля. Начальные импульсы дают квазипериодичность около 6 час. при широком интервале длительности активных фаз. Промежуточные импульсы имеют ограниченный временной диапазон с сокращением не только пауз между ними, но и длительности активных фаз. Переходные импульсы 12-14 февраля показывают обратную зависимость между длительностью активной фазы ОВП-импульсов и паузами между импульсами. Чем продолжительнее паузы между активными фазами ОВПимпульсов, тем короче становятся активные фазы (рис. 6).

Выявляется направленная смена временных параметров ОВП-импульсов, характеризующая переход от интервала вступления 07–08 февраля через промежуточный интервал их воспроизведения 8–12 февраля к интервалу ослабления импульсов 12–14 февраля.





Рис. 5. Диаграмма отклонения повторяемых ОВП-импульсов ст. 9 от пауз между минимумами начального интервала (около 6 часов). Темно-зеленая штриховая линия соединяет полуночные значения.

Fig. 5. Diagram of deviation of repeatable ORP pulses at station 9 from pauses between minima of the initial interval (about 6 hours). A dark green dashed line connects the midnight values.



Рис. 6. Диаграмма изменения длительности активной фазы ОВП-импульсов относительно пауз между импульсами начального, промежуточного и переходного интервалов ряда наблюдений 07–14 февраля.

Fig. 6. Diagram of changes in the duration of the active phase of ORP pulses relative to pauses between pulses of the initial, intermediate, and transitional intervals of a series of observations on February 07–14, 2024.

Фактор снижения ОВП относительно фона

В начальном интервале амплитуда импульсов 1–4 сокращается от 11–12 мВ до 5 мВ, в промежуточном интервале событий 5– 22 в основном составляет 10–11 мВ, в заключительном интервале событий 24–29 возрастает к событию 27 до 19 мВ и снижается к событию 29 до 8 мВ (рис. 7а). Минимумы 11–12 середины ряда наблюдений дают высокие измеренные значения ОВП (до 305 мВ), тогда как минимумы 1–3 в начале ряда наблюдений и минимумы 27–28 в его конце – сравнительно низкие значения (275– 281 мВ) (рис. 76).



Рис. 7. Диаграммы вариаций амплитуды (*a*) и значений активных фаз ОВП-импульсов от 1 до 29 (*б*).

Fig. 7. Diagrams of variations in amplitude (*a*) and values of active phases of ORP pulses from 1 to 29 (*b*).

Начальный, промежуточный и финальный интервалы ряда наблюдений отчетливо различаются между собой на диаграмме соотношений ОВП-импульсов и точек перегиба. Начальный интервал отличается от финального по пониженным значениям точек перегиба. Для промежуточного интервала выделяется тренд согласованного возрастания значений ОВП-минимумов и точек перегиба. В финале наблюдается относительное

снижение значений обоих параметров (рис. 8).



Рис. 8. Диаграмма сопоставления ОВП-минимумов и точек перегиба начального, промежуточного и финального интервалов ряда наблюдений 07–14 февраля 2024 г.

Fig. 8. Diagram of comparison of ORP minima and inflection points of the initial, intermediate, and final intervals of the observation series on February 7–14, 2024.

Значения ОВП на минимуме возрастают одновременно со значениями точки перегиба от интервала вступления 07–08 февраля к промежуточному интервалу 8–12 февраля при развитии ОВП-генерирующего процесса в условно-оптимальном режиме и резко падают либо находятся на одном уровне при повышении ОВП точки перегиба при переходе к новым трендам импульсов в интервале 12–14 февраля.

Соотношение факторов времени и снижения ОВП относительно фона

Изменения длительности активной фазы ОВП-импульсов и пауз между ними принимаются в качестве ведущего фактора изменения ряда начальных, промежуточных и переходных ОВП-генерирующих событий 07-14 февраля (см. рис. 5, 6). Значения ОВП в мониторинговом ряду также меняются (см. рис. 7, 8). На диаграмме рис. 9а выделяется изометричное фигуративное поле ОВПимпульсов промежуточного интервала 8-12 февраля, относительно которого фигуративные точки начальных импульсов смещаются с возрастанием длительности активной фазы ОВП-импульсов, а фигуративные точки переходных импульсов - смещаются с уменьшением длительности активной фазы ОВПимпульсов при возрастании амплитуды. В то же время, на рис. 96 амплитуда ОВПимпульсов в совокупности фигуративных точек не обнаруживает заметных изменений в зависимости от пауз между импульсами, за исключением высокоамплитудного отскока импульса 27.



Рис. 9. Диаграммы вариаций амплитуды и длительности активной фазы ОВП-импульсов (*a*) и вариаций амплитуды относительно пауз между импульсами (*б*) начального, промежуточного и переходного интервалов ряда наблюдений 07–14 февраля.

Fig. 9. Diagrams of variations in amplitude and duration of active phases of ORP pulses (a) and variations in amplitude relative to pauses between pulses (b) of the initial, intermediate, and final intervals of observation series on February 07–14.

Сопоставление графиков ОВП с графиками температуры воздуха и атмосферного давления на Байкале

В начале февраля в районе пос. Култук регистрируется низкая температура: 01–02 февраля – от –16 °С днем до –20 °С ночью; 03–04 февраля – от –14 °С днем до –21 °С

ночью; 05–06 февраля – от –10 °С днем до – 22 °С ночью. Относительное потепление наступает 07–08 февраля, когда температура меняется от –4 °С днем до –18 °С ночью, хотя 09 февраля вновь снижается до интервала –12–19 °С. Более существенное потепление происходит 10–11 февраля, когда в районе пос. Култук устанавливается плюсовая температура днем, а ночью температура не опускается ниже -6 °С. Регулярные ОВПимпульсы впервые проявляются в подземной воде ст. 9 в условиях начавшегося потепления 07-08 февраля, тогда как оптимальный режим развития ОВПгенерирующих процессов устанавливается в пике плюсовых температур 10-11 февраля.

В ночь с 11 на 12 февраля температура воздуха на Байкале начинает снижаться и к вечеру 12 февраля составляет –15–20 °С. В воде ст. 9 после минимума 23 наблюдаются 3 малых ОВП-минимума, стартующих от уровня 294 мВ: а – в 21:06 (291 мВ), б – в 21:46 (287мВ) и в – в 23:24 (291 мВ). Подобные малые минимумы ОВП, стартующие от уровня 294–295 мВ, наблюдаются также 13 февраля после минимума 26: а – в 16:04 (293 мВ), б – в 18:16 (290 мВ) и в – в 19:30 (290 мВ). Две совокупности малых дополнительных минимумов соответствуют понижению температуры на фоне возрастающего атмосферного давления. 14 февраля тенденция снижения температуры сменяется тенденцией ее возрастания. Начинает снижаться атмосферное давление. Глубокие минимумы ОВП в воде ст. 9 отсутствуют и наблюдаются хаотичные малоамплитудные колебания этого параметра (рис. 10).



Рис. 10. Проявление малых минимумов на графике ОВП (*a*) при похолодании и повышении атмосферного давления на Байкале 12–13 февраля 2024 г. (*б*) На панели *a* цифрами от 15 до 29 обозначены номера ОВП-импульсов, начавшихся в условиях повышенной температуры воздуха, установившейся на Байкале с 07 февраля 2024 г. Температура и атмосферное давление показаны по данным метеостанции Хамар-Дабан, расположенной на хр. Камар, в 16 км южнее Слюдянки (сайт https://meteo7.ru/station/30815). В Култуке температура обычно на 2–5 °С ниже, а атмосферное давление – выше, приблизительно на 90 мм рт. ст.

Fig. 10. Occurrence of small minima on the ORP graph (*a*) during cooling and an increase in atmospheric pressure on Lake Baikal on February 12–13, 2024 (*b*) In panel *a*, numbers from 15 to 29 indicate the numbers of ORP pulses that began under conditions of elevated air temperature, occurred on Baikal from February 7, 2024. Temperature and atmospheric pressure are shown from records of the Khamar-Daban weather station, located on the Khamar ridge, 16 km south of Slyudyanka (https://meteo7.ru/station/30815). In Kultuk, the temperature is usually 2–5 °C lower, and the atmospheric pressure is higher, approximately 90 mmHg.

В условиях похолодания длительность вечернего временного интервала между соизмеримыми между собой глубокими минимумами 23 (283 мВ в 16:48 12 февраля) и 24 (283 мВ в 01:14 13 февраля) увеличивается до 7 ч. 26 мин., а ночной интервал, завершающийся утром (в 07:42) минимумом 25 (283 мВ), продолжается 6 ч. 28 мин. В ночном временном интервале дополнительных малых минимумов не наблюдается. Длительность вечернего интервала 12 февраля (7 ч. 26 мин.) и ночного интервала 13 февраля (6 ч. 28 мин.) явно превышает длительность интервалов между минимумами 07-12 февраля, составляющих от 4 ч. 46 мин. до 6 ч. 06 мин. (см. табл. 1).

Обсуждение

При мониторинге в режиме реального времени подземных вод ст. 9 обнаружены своеобразные эффекты в виде квазипериодических отрицательных ОВП-импульсов с переменным значением факторов времени и снижения значений относительно фона. В настоящей работе представлены результаты экспресс-анализа данных, полученных в ряду 29 импульсов, проявившихся в интервале от 07 до 14 февраля. Выяснилось, что ОВПгенерирующий процесс был инициирован в условиях слабого снижения температуры воздуха, перешел в условно-оптимальный режим при существенном потеплении и сменился ретроградным режимом при похолодании. 14 февраля ОВП-импульсы ослабли на короткое время, но уже 15 февраля возобновились. В последующих наблюдениях ход вариаций ОВП, установленный 07-14 февраля нарушился. Интервал начинающегося импульсного процесса важен как отправная точка запуска явления, которое должно отслеживаться с определением его усиления или, наоборот, ослабления в режиме реального времени.

Для сопоставления с вариациями ОВП в воде ст. 9 приводятся данные об относительных вариациях температуры воздуха и атмосферного давления, проявленные на Байкале. Другие факторы (например, скорость ветра, наличие или отсутствие снежного покрова на льду, подледные течения Байкала, магнитные бури и т. д.) не рассматриваются. Последующие наблюдения не дают строгой зависимости вариаций ОВП подземных вод ст. 9 от вариаций температуры воздуха, что свидетельствует о включении разных факторов, влияющих на проявление регистрируемых эффектов. Возможно, что температура воздуха оказывала доминирующее влияние на импульс-генерирующий процесс только в его запускающем интервале 07-14 февраля.

Скважина ст. 9 находится на расстоянии 242 м от береговой линии оз. Байкал. Зонд располагается в скважине на абсолютной высоте около 452 м, т. е. на 4 м ниже уровня зеркала воды озера. Забой скважины уходит еще на 10 м ниже зонда. Устье второй скважины (ст. 184) занимает более высокое положение в рельефе, на 35 м выше уровня зеркала воды оз. Байкал, а зонд поднят над уровнем Байкала на 18 м. Эта скважина находится на расстоянии 960 м от береговой линии Байкала, а забой этой скважины поднят на 16 м выше уровня зеркала воды озера. Исходя из пространственного положения зонда ст. 9, предполагается, что ОВПимпульсы могут генерироваться в связи с деформациями ледового покрова оз. Байкал. Боковое воздействие на береговые породы создается на уровне замерзшего зеркала Байкала и ограничено его береговой зоной. Поскольку на ст. 184 регулярные ОВПимпульсы отсутствуют, процессы, возникающие в ледовом покрове оз. Байкал, не воздействуют на подземные воды этой станции.

Лед обладает свойствами диэлектрика. При визуальных наблюдениях за торошением льда неоднократно отмечалось свечение (Богородский, Смирнов, 1980), которое получило название триболюминисценции.
Триболюминисценция регистрировалась при кристаллизации воды в ограниченных объемах (Трохан и др., 1983). Механизм возникновения этого явления связывался с пьезоэлектрическими процессами при образовании разломов льда. В экспериментах по выявлению электромагнитных импульсов при деформации морских льдов (Степанюк, Бацких, 1982; Степанюк, Смирнов, 2001) предполагалось, что пьезоэлектрические заряды разделяются по бортам новообразующихся микротрещин в деформирующемся льду. В полостях этих трещин существуют условия для возникновения электрического пробоя и релаксации зарядов в искровом канале. При этом каждый из разрядов сопровождается электромагнитным излучением. При деформациях ледового покрова в микротрещинах создаются сейсмические (акустические) и пьезолектромагнитные эффекты. По возникающим электромагнитным импульсам регистрируются зоны разрушения ледовых массивов.

Не исключается также микробиотическая причина наблюдаемых ОВП импульсов, так как микроорганизмы способны изменять окислительно-восстановительные условия среды в ходе своей жизнедеятельности Скважины могут служить местом обитания микроорганизмов, включая железоредуцирующие и сульфатредуцирующие бактерии. При развитии последних, в среде идет накопление восстановителей, которые понижают ОВП (Завершинский, Вигдорович, 2000). Изменение ОВП, в свою очередь, влияет на направление биохимических реакций, активизируя ту или иную ферментативную систему бактерий. Импульс может создаваться образованием колонии микроорганизмов в виде пленки на поверхности чувствительных элементов датчика, затрудняя диффузию кислорода, являющегося основным окислителем в природных водах. Бактерии в такой биопленке могут проходить периодические фазы развития, чередуя фазы роста (с соответствующим резким понижением ОВП) и фазы его замедления и частичного отмирания (из-за дефицита питания или накопления ингибирующих продуктов), сопровождающиеся постепенным диффундированием кислорода и, соответствующим, повышением ОВП.

Заключение

При мониторинге подземных вод ст. 9 в режиме реального времени с 07 до 14 февраля 2024 г. выявлены квазипериодические импульсные изменения ОВП относительно фона. Намеченные закономерности вариаций этого параметра в самом начале зародившегося процесса составляют основу для его последующего анализа.

Предложены гипотезы генерации импульсов ОВП при возникновении пьезоэлектрических эффектов в ледовом покрове оз. Байкал и образовании бактериальных пленок на поверхности чувствительных элементов датчика. Для подтверждения или опровержения гипотез необходимо проведение дополнительных исследований.

Литература

Богородский В.В., Смирнов В.Н. Релаксационные процессы в ледяных полях Арктики//Докл. АН СССР. 1980. Т.250, № 3. С. 589– 592.

Завершинский А.Н., Вигдорович В.И. Окислительно-восстановительный потенциал среды, содержащей культуру СРБ, как показатель ее активности // Вестник российских университетов. Математика. 2000. №1. С. 29–33.

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

Рассказов С.В., Снопков С.В., Борняков С.А. Соотношение времени землетрясений Байкало-Хубсугульской активизации с вариациями окислительно-восстановительного потенциала в подземных водах Култукского полигона // Геология и окружающая среда. 20236. Т. 3, № 1. С. 181– 201. doi.org/10.26516/2541 -9641.2023.1.181

Семинский К.Ж., Борняков С.А., Добрынина А.А., Радзиминович Н.А., Рассказов С.В., Саньков В.А., Миалле П., Бобров А.А., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Семинский А.К., Чебыкин Е.П., Шагун А.Н., Герман В.И., Тубанов Ц.А., Улзибат М., 2020. Быстринское землетрясение в Южном Прибайкалье (21.09.2020г., Мw=5.4): основные параметры, признаки подготовки и сопровождающие эффекты // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 5. С. 727–743.

Снопков С.В., Куроленко А.А. Особенности Хубсугульского землетрясения и его влияние на физико-химические свойства подземных вод Южного Прибайкалья // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 172–180. https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.172

Степанюк И. А., Бацких Ю.М. Возможность использования электромагнитных полей для целей дистанционной индикации зон деформаций припайного льда // Природа и хозяйство Севера. 1982. Вып. 10. С. 47–50.

Степанюк И.А., Смирнов В.Н. Методы измерений характеристик динамики ледового покрова. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 2001. 135 с.

Трохан А.М., Лапшин А.И., Гудзенко О.И. Криолюминисценция жидкостей // Докл. АН СССР. 1983. Т. 271, № 1. С.83–86.

https://www.kgs.ku.edu/Hydro/GWtutor/Plume_ Busters/remediate_refs/redox_chemistry.htm (электронный ресурс)

https://meteo7.ru/station/30815) (электронный ресурс)

References

Bogorodsky V.V., Smirnov V.N. Relaxation processes in the ice fields of the Arctic // Doklady Academy of Sciences of the USSR. 1980. Vol. 250, No. 3. P. 589–592.

Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Snopkov S.V., Archipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. The first experience of monitoring coseismic and aseismic variations of ORP, pH, and temperature of groundwater in the Kultuk reservoir in real time (Baikal rift system) // Geology and Environment. 2023a. Vol. 3, No. 4. P. 161–181. https://doi.org/10.26516/2541 -9641.2023.4.161

Rasskazov S.V., Snopkov S.V., Bornyakov S.A. Correlation of the time of earthquakes of the Baikal-Khubsugul reactivation with variations in the redox potential in the groundwater of the Kultuk area // Geology and Environment. 2023b. Vol. 3, No. 1. P. 181–201. doi.org/10.26516/2541 -9641.2023.1.181

Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Radziminovich N.A., Rasskazov S.V., Sankov

V.A., Mialle P., Bobrov A.A., Ilyasova A M., Salko D.V., Sankov A.V., Seminsky A.K., Chebykin E.P., Shagun A.N., German V.I., Tubanov Ts.A., Ulzibat M. Earthquake Bystraya in the South Baikal region (09.21.2020, Mw = 5.4): main parameters, signs of preparation, and accompanying effects // Russian Geology and Geophysics. 2021.Vol. 62, No. 5. P. 727–743.

Snopkov S.V., Kurolenko A.A. Features of the Khubsugul earthquake and its influence on the physical and chemical properties of groundwater in the Southern Baikal region // Geology and Environment. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 172–180. https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.172

Stepanyuk I.A., Batskikh Yu.M. Possibility of using electromagnetic fields for the purposes of remote indication of fast ice deformation zones // Nature and Economy of the North. 1982. Issue. 10. P. 47–50.

Stepanyuk I.A., Smirnov V.N. Methods for measuring characteristics of ice cover dynamics. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2001. 135 p.

Trokhan A.M., Lapshin A.I., Gudzenko O.I. Cryoluminescence of liquids // Doklady AS USSR. 1983. Vol. 271, No. 1. P. 83–86.

Zavershinsky A.N., Vigdorovich V.I. Oxidationredox potential of the environment containing the SRB culture as an indicator of its activity // Bulletin of Russian Universities. Mathematics. 2000. No. 1. P. 29–33.

https://www.kgs.ku.edu/Hydro/GWtutor/Plume_ Busters/remediate_refs/redox_chemistry.htm https://meteo7.ru/station/30815

Снопков Сергей Викторович,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент, 664025 Иркутск, ул. Ленина, д. 3, Иркутский государственный университет, геологический факультет, доцент, 664074, г. Иркутск, ул. Курчатова, 3, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Сибирская школа геонаук, ведущий научный compydник, email: snopkov_serg@mail.ru. Snopkov Sergey Viktorovich, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, assistant professor, 664025 Irkutsk, Lenin st., 3, Irkutsk State University, Faculty of Geology, 664074, Irkutsk, st. Kurchatova, 3, Irkutsk National Research Technical University, Siberian School of Geosciences, Leading Researcher,

Рассказов Сергей Васильевич,

email: snopkov serg@mail.ru.

доктор геолого-минералогических наук, профессор, 664025 Иркутск, ул. Ленина, д. 3, Иркутский государственный университет, геологический факультет, заведующий кафедрой динамической геологии. 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН. заведующий лабораторией изотопии и геохронологии, тел.: (3952) 51-16-59, email: rassk@crust.irk.ru. Rasskazov Sergei Vasilievich. doctor of geological and mineralogical sciences, professor, 664025 Irkutsk, Lenin st., 3, Irkutsk State University, Faculty of Geology, Head of Dynamic Geology Char, 664033 Irkutsk, Lermontov st., 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS. Head of Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies, tel.: (3952) 51–16–59, 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, st. Ulan-Batorskaya, 3, Limnological Institute SB RAS, email: ilya_aslamov@bk.ru.

Архипенко Владислав Иванович,

главный специалист по электронике, 664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Лимнологический институт СО РАН, email: vladarxip@gmail.com. **Arkhipenko Vladislav Ivanovich,** main electronics engineer, 664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3, Limnological Institute SB RAS, email: vladarxip@gmail.com.

Ильясова Айгуль Маратовна,

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, email: ila@crust.irk.ru. **Ilyasova Aigul Maratovna**, candidate of geological and mineralogical sciences, leading engineer, 664033 Irkutsk, Lermontov st., 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS, email: ila@crust.irk.ru.

Чебыкин Евгений Павлович,

кандидат химических наук, старший научный сотрудник, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, 664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Лимнологический институт СО РАН, email: epcheb@yandex.ru. **Chebykin Evgeny Pavlovich,** Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, 664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS, 664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3, Limnological Institute SB RAS, email: epcheb@yandex.ru.

УДК 550.844+546.791.027+632.126 https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.77

Генерация ОВП-импульсов в подземных водах побережья Байкала в феврале-марте 2024 г.: 30-суточный мониторинг в режиме реального времени от зарождения до угасания

И.А. Асламов¹, С.В. Рассказов^{2,3}, С.В. Снопков^{3,4}, В.И. Архипенко¹, А.М. Ильясова², Е.П. Чебыкин^{1,2}

¹Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия ²Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия ³Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия ⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет, Сибирская школа геонаук, г. Иркутск, Россия

Аннотация. При мониторинге в режиме реального времени подземных вод берега Байкала в скважине пос. Култук с 07 февраля до 07 марта 2024 г. регистрируются отрицательные ОВП-импульсы. Различаются интервалы: І – 07–13 февраля (импульсы 1–26), IIa – 13–18 февраля (импульсы 27–43), II6 – 18–22 февраля (импульсы 43–54), IIIa – 22–26 февраля (импульсы 55–71), III6 – 26 февраля – 4 марта (импульсы 71–80), VIa – 4–6 марта (импульсы 80–82) и 6–7 марта (импульсы 82–83). Демонстрируются признаки единого развития импульс-генерирующего процесса от его зарождения (интервалы III6 и IV). Предполагается, что 30-суточная активность импульс-генерирующего процесса регулируется квадратурными и сизигийными лунно-солнечными приливами.

Ключевые слова: подземные воды, мониторинг, окислительно-восстановительный потенциал, Байкал.

Generation of ORP Pulses in Baikal Coastal Groundwater in February-March 2024: 30-day real-time Monitoring from Initiation to Extinction

I.A. Aslamov¹, S.V. Rasskazov^{2,3}, S.V. Snopkov^{2,4}, V.I. Archipenko¹, A.M. Ilyasova², E.P. Chebykin^{1,2}

¹Limnological Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia ²Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia ³Irkutsk State University, Irkutsk, Russia ⁴Irkutsk National Research Technical University, Siberian School of Geosciences, Irkutsk, Russia

Abstract. Real-time monitoring of coastal groundwater of Lake Baikal in a well of the Kultuk village from February 7 to March 7, 2024 shows negative ORP pulses. The following intervals are distinguished: I – February 07–13 (pulses 1–26), IIa – February 13–18 (pulses 27–43), IIb – February 18–22 (pulses 43–54), IIIa – February 22–26 (pulses 55–71), IIIb – February 26 – March 4 (pulses 71–80), VIa – March 4–6 (pulses 80–82), and March 6–7 (pulses 82–83). These intervals demonstrate a distinct development of the pulse-generating process from its origin (interval I) through successive intensification (intervals IIa, IIb, and IIIa) to degeneration (intervals IIIb and IV). It is assumed that the 30-day activity of the pulse-generating process is regulated by neap and spring lunar-solar tides.

Keywords: groundwater, monitoring, oxidation-redox potential, Baikal.

Постановка вопроса

Мониторинг подземных вод проводится в режиме реального времени для выделения закономерностей природных процессов и построения их эволюционных моделей от зарождения до угасания. Наблюдения процесса имеют смысл во время его проявления. После окончания процесса мониторинг элементов его эволюции в режиме реального времени становится неактуальным, поскольку нет необходимости отслеживания краткосрочного повторения исчезнувших эффектов. Тем не менее, само явление должно быть охарактеризовано от его начала до окончания для того, чтобы иметь возможность судить о его эволюции и, в случае возрождения, использовать выявленные закономерности в воспроизведении эволюционной модели с элементами прогноза.

В начале декабря 2023 г. в скважинах мониторинговых станций 9 и 184 Култукского полигона были установлены зонды, измеряющие окислительновосстановительный потенциал (ОВП), рН и температуру в режиме реального времени. Условия установки зондов охарактеризованы в работе (Рассказов и др., 2023). В декабре на обеих станциях наблюдалось общее возрастание ОВП. В первой половине февраля 2024 г. на ст. 9 начали проявляться регулярные отрицательные импульсы ОВП. Зарождение этих импульсов в интервале от 07 до 14 февраля охарактеризовано в виде экспресс-анализа новообразованных эффектов (Рассказов и др., 2024). В настоящей работе рассматривается полная последовательность ОВП-импульсов подземных вод ст. 9 от начала до вырождения.

Общая характеристика ряда ОВПимпульсов

На графике рис. 1 приводится полная последовательность импульсов подземных вод ст. 9 с подразделением на 4 интервала. Учитываются основные геометрические характеристики каждого импульса: амплитуда ОВП (А) и паузы между импульсами (t_{пп} и При вступлении импульс t_{MM}). генерирующего процесса 07 февраля А составляет около 10 мВ, в середине февраля меняется от 5 до 20 мВ, в конце февраля – от 2 до 50 мВ. В начале марта амплитуда импульсов сокращается. С изменением амплитуды меняются межимпульсные паузы. При вступлении импульс-генерирующего процесса 07 февраля паузы составляют около 6 ч. С течением времени размах пауз увеличивается; одни сокращаются по времени, другие становятся более продолжительными (рис. 2).



Рис. 1. Полный ряд ОВП-импульсов подземных вод ст. 9 в интервале 07 февраля – 07 марта 2024 г. включительно. Арабскими цифрами 1, 27, 55 и 80 показаны номера начальных импульсов интервалов.

Fig. 1. Complete series of ORP pulses of groundwater at station 9 in the interval February 7 – March 7, 2024. Arabic numerals 1, 27, 55, and 80 indicate the numbers of the initial pulses in the intervals.



Рис. 2. Характеристические параметры повторяющихся минимумов ОВП. Рисунок на панели *а* выполнен на основе графика, полученного в режиме реального времени 07–08 февраля 2024 г. (в начале ряда ОВП-импульсов), на панели *б* – на основе графика 26–27 февраля 2024 г. (при переходе от интервала I к интервалу II).

Fig. 2. Characteristic parameters of repeated ORP minima. The figure in panel *a* is based on the graph obtained in real-time monitoring on 07–08 February 2024 (at the beginning of a series of pulses), in panel b, it is based on the graph on 26–27 February 2024 (during the transition from interval I to interval II).

Однотипные параметры А и t_{пп} (t_{мм}) сохраняются в течение нескольких суток, а затем сменяются параметрами другого типа. По сходным временным вариациям параметра A различаются интервалы: I – 07–13 февраля (импульсы 1-26), Па – 13–18 февраля (импульсы 27-43), Шб – 18-22 февраля (импульсы 43-54), Ша - 22-26 февраля (импульсы 55–71), Шб – 26 февраля – 4 марта (импульсы 71-80), VIa – 4-6 марта (импульсы 80-82) и 6-7 марта (импульсы 82-83) (рис. 3). В интервалах I, Па и Ша значения А слегка увеличиваются в нижнем пределе (в каждом из интервалов) при скачкообразном возрастании значений А в верхнем пределе от интервала I через интервал IIа к интервалу IIIа. Интервалы IVa и IVб в совокупности образуют максимум.

Переход от первого интервала ко второму обозначается соединительными импульсами, один из которых (импульс 26) имеет А в диапазоне интервала I, другой (импульс 27) – существенно превышает этот диапазон и относится к интервалу Па. Подобные соединительные импульсы наблюдаются при переходе от интервала ІІб к интервалу ІІІа. Переходы от интервала Па к интервалу Пб и от интервала IIIа к интервалу IIIб характеризуются общими импульсами, соответственно, 43 и 71. Наблюдается отчетливое различие вариаций ОВП начального интервала I и конечного интервала IV при взаимном сходстве вариаций ОВП промежуточных интервалов IIa–IIб и IIIa–IIIб.

В интервалах IIб и IIIб значения А последовательно снижаются. Эти тренды воспринимаются как тренды ослабления импульсгенерирующего процесса. Он завершается с относительно малыми амплитудами ОВП в интервале IV.

Интервал I продолжается 5 суток 18 ч 00 мин. Интервалы IIa и IIб в совокупности имеют длительность 8 суток 06 ч 30 мин, а интервалы IIIa и IIIб – длительность 11 суток 04 ч 06 мин. Возрастание амплитуды ОВП в промежуточных интервалах сопровождается возрастанием их длительности. Финальный максимум интервалов IVa и IV6 имеет наименьшую продолжительность (3 суток 01 ч 16 мин).



Рис. 3. Диаграммы вариаций амплитуды ОВП с 07 февраля до 09 марта 2024 г. на шкале времени (*a*) и по порядку номеров импульсов (*б*).

Fig. 3. Diagrams of variations in the ORP amplitude from February 7 to March 9, 2024 on a time scale (*a*) and in order of pulse numbers (*b*).

В интервале I длительность активной фазы ОВП-импульсов и длительность пауз между импульсами в целом воспроизводятся в узких диапазонах. Компактность фигуративных точек временных параметров импульсов на диаграмме рис. 4 свидетельствует об устойчивой связи длительности между импульсами с начальным 6часовым вступлением импульсгенерирующего процесса, протекающего достаточно стабильно. В интервалах IIа и Пб фигуративные точки смещаются вправо (возрастает tмм) и вниз (снижается tпм). В интервале IIIа фигуративные точки дают всестороннее расширение соответствующего этому интервалу фигуративного поля относительно фигуративного поля интервала IIa. В интервале IIIб фигуративные точки смещаются вверх (возрастает tпм) и вправо (возрастает tмм) относительно фигуративного поля интервала ІІб. В интервале IV этот тренд смещения сменяется трендом относительного возрастания обоих временных параметров ОВП; tпм и tмм имеют наиболее высокие значения. Этот угасание обозначает тренд импульсгенерирующего процесса. Тенденция смещения в правую-верхнюю часть диаграммы от фигуративного поля Ша к фигуративному полю Шб обозначает начало угасания.



Рис. 4. Диаграмма изменения длительности активной фазы ОВП-импульсов относительно пауз между импульсами четырех интервалов ряда наблюдений 07 февраля – 07 марта 2024 г. Интервалы определяются на рис. 3.

Fig. 4. Diagram of changes in duration of active phases of ORP pulses relative to pauses between those of four intervals in a series of observations February 7 - March 7, 2024. The intervals are defined in Fig. 3.

Различие ОВП-импульсов начального и финального интервалов ряда событий (07–13 февраля и 04–07 марта)

В вариациях ОВП интервала I, предварительно рассмотренных в работе (Снопков и др., 2024), подчеркивается роль первых четырех импульсов с паузами между ними около 6 ч. Относительно этих пауз при проявлении последующих (промежуточных) импульсов интервала I паузы между ними уменьшаются и составляют менее 6 ч, а при проявлении более поздних (переходных к интервалу IIa) импульсов, наоборот, увеличиваются и составляют более 6 ч. В целом, интервал I, начинающий импульсгенерирующий процесс, насчитывает 26 импульсов, сконцентрированных в 5 сутках и 18 ч. В этом временном интервале прослеживаются закономерные изменения амплитуды импульсов; значения А событий 1–4 сокращаются от 11–12 мВ до 5 мВ, событий 5–22 в основном составляет 10–11 мВ, событий 24–26 не превышает 11 мВ, а к событию 27 интервала Па поднимается до 19 мВ (рис. 5а).

Интервал IV, завершающий импульсгенерирующий процесс, насчитывает гораздо меньше событий (4 импульса), произошедших за меньший временной интервал (3 суток 1 ч 16 мин). В отличие от относительно устойчивой амплитуды ОВП интервала I, амплитуда ОВП интервала IV неустойчива. Она возрастает от события 80 к событию 82 и затем сокращается на событии 83 с выходом на возмущения, отличающиеся от типичных ОВП-минимумов (рис. 5б).



Рис. 5. Различие графиков подземных вод ст. 9 начального интервала I ОВП-импульсов от 1 до 26 (от 07 до 13 февраля 2024 г.) с переходом к импульсам 27–29 интервала II (*a*) и финального интервала IV импульсов 80–83 (δ). На панели *a* регулярным отрицательным ОВП-импульсам в интервале 07–14 февраля 2024 г. присвоены номера от 1 до 29, на панели δ – от 77 до 83. На панели *a* между импульсами 23–24 и 26–27 наблюдаются дополнительные малые минимумы (Рассказов и др., 2024). Для наглядности сопоставления начала и финала импульсного ряда на панелях *a* и δ используются временные шкалы одного размера.

Fig. 5. Difference in the dynamics of groundwater ORP at station 9 of the initial interval I, pulses from 1 to 26 (from February 7 to 13, 2024) with the transition to pulses 27-29 of interval II (*a*) and the final interval IV, pulses 80-83 (*b*). In panel *a*, regular negative ORP pulses in the interval February 7–14, 2024 are assigned numbers from 1 to 29, in panel *b* – from 77 to 83. In panel *a*, between pulses 23-24 and 26-27, additional small minima are observed (Rasskazov et al., 2024). For visual comparison of the beginning and end of the impulse series in panels *a* and *b*, the same time scales are used.

Кульминация ОВП-импульсов в промежуточном интервале IIIa (22–26 февраля)

В конце интервала IIб, ночью 21 февраля 2024 г., наблюдается малоамплитудный ОВП-импульс 51 (7 мВ), который входит в активную фазу (точка перегиба графика) от 301 мВ в 02:48, завершает активную фазу (острый минимум) при значении 294 мВ в 03:04). Затем до 6:12 22 февраля устанавливается режим малоамплитудных (5–8 мВ) ОВП-импульсов, разделенных продолжительными паузами (8 ч 20 мин – 10 ч 20 мин или 6 ч +140+300 мин). Последний импульс интервала IIб (импульс 54) наблюдается 22 февраля от 05:44 (310 мВ) до 6:12 (303 мВ) с последующей паузой между импульсами (t_{мм}) 9 ч 28 мин (рис. 6а,б).



Рис. 6. Приблизительно посуточные графики ОВП окончания временного интервала ІІб и полного кульминационного интервала ІІІа: *а*, *б* – малоамплитудные импульсы 51–54 перед большеамплитудным импульсом 55, начинающим интервал IIIa 22 февраля; *в* – между большеампли-

тудными импульсами 55 и 63; e – между большеамплитудными импульсами 63 и 65; ∂ – между большеамплитудными импульсами 65 и 67; e – между большеамплитудными импульсами 67 и 69 и \mathcal{R} – между большеамплитудными импульсами 69 и 71. Панель a охватывает временной интервал от 23:04 21 февраля до 15:04 22 февраля, панель δ – от 18:00 22 февраля до 16:30 23 февраля, панель e – от 18:00 23 февраля до 15:40 24 февраля. Белые стрелки обозначают глубокие минимумы. Горизонтальным пунктиром выделены уровни ОВП 300 и 310 мВ.

Fig. 6. Approximately daily ORP graphs of the end of time interval IIb and the full culmination of interval IIIa: a, δ – low-amplitude pulses 51–54 before high-amplitude pulse 55, starting interval IIIa on February 22; e – between large-amplitude pulses 55 and 63; e – between high-amplitude pulses 63 and 65; ∂ – between high-amplitude pulses 65 and 67; e – between large-amplitude pulses 67 and 69 and $\mathcal{H}c$ – between large-amplitude pulses 69 and 71. Panel a covers the time interval from 23:04 on February 21 to 15:04 on February 22, panel δ – from 18:00 on February 22 to 16:30 on 23 February, panel e – from 18:00 on February 23 to 15:40 on February 24. White arrows indicate deep minima. The horizontal dotted line represents ORP levels of 300 and 310 mV.

На панели 6в, во второй половине 22 февраля, регистрируется весьма глубокий минимум (импульс 55: 259 мВ, 15:40), стартующий от точки перегиба (308 мВ, 14:58). После минимального значения наступает фаза быстрой релаксации, переходящая в медленную релаксацию с адаптацией к фону. Пауза до следующего минимума 56 (297 мВ, 21:40) составляет ровно 6 ч. С этого минимума начинается серия семи малоамплитудных (2-3 и 6 мВ) событий с короткими паузами между ними (от 1 ч 34 мин до 3 ч 22 мин). Серия продолжается 14 ч 42 мин, с 21:40 22 февраля (импульс 56: 297 мВ, 21:40) до 09:04 23 февраля (импульс 62: 297мВ, 12:22). В конце этой серии пауза увеличивается до 5 ч 10 мин с проявлением глубокого минимума (импульс 63: 270 мВ, 17:32), стартующего от точки перегиба (300 мВ, 16:26). Общая продолжительность паузы между глубокими минимумами 55 и 63, заполненной малыми ОВП-эффектами, составляет 25 ч 52 мин.

На панели 6г после глубокого минимума 63 следует весьма продолжительный перерыв (16 ч. 58 мин.) до малого минимума (импульс 64: 289 мВ, 8:30). Через 7 ч 38 мин от него регистрируется глубокий минимум (импульс 65: 259 мВ, 16:08). Таким образом, малый импульс 64 оказывается смещенным от предшествующего импульса 63 к последующему импульсу 65.

На панелях 6*д* и 6*е* в течение суток отображаются сближенные между собой глубокие минимумы импульсов 65–67 (панель *д*) и 67–69 (панель *е*). На панели 6*ж* глубокие минимумы импульсов 69 и 71 опять проявляются приблизительно через сутки. В отличие от сочетания импульсов

63-65 со смещением малого импульса 64 к последующему импульсу 65, в сочетании импульсов 69-71 малый импульс 70 находится ближе к предшествующему импульсу 69.

Обсуждение

ОВП-импульсы, проявившиеся в подземных водах ст. 9 с 07 февраля до 07 марта 2024 г., отражают возникновение процесса, наложенного на общий ход изменений ОВП подземных вод этой станции. Импульсы начального интервала резко нарушают ровный фон графика и характеризуют начальный, относительно стабильный импульсгенерирующий режим с квазипериодичностью 6 ч. Промежуточные интервалы IIa, IIб, Ша и Шб характеризуют развитие импульсгенерирующего процесса. В интервалы Па и Ша процесс усиливается, в интервалы Шб и Шб – ослабевает. После ослабления, произошедшего в интервале IIIa, следуют финальные события в интервале IV, обозначающие угасание импульс-генерирующего процесса.

Обращает на себя внимание соответствие общей продолжительности существования ОВП-импульсов полному месячному циклу лунных (сизигийных и квадратурных) приливов. Сизигийный прилив возникает с периодичностью около 2 недель в дни, когда Земля, Луна и Солнце лежат примерно на одной прямой, а квадратурный прилив – в дни, когда направления на Луну и Солнце образуют прямой угол. При сизигийном приливе влияние Солнца усиливает влияние Луны на Землю, при квадратурном приливе – ослабляет. В результате высота сизигийного прилива примерно втрое больше высоты квадратурного прилива. На оз. Байкал сизигийный прилив достигает высоты 3.2 см, квадратурный – 2 см.

На широте Среднего Байкала (п-ов Святой Нос) находится залив Байкал (север о-ва Сахалин) акватории Мирового океана. 4 марта 2024 г. уровень лунных приливов здесь был минимальным в 4:02

(https://tides4fishing.com/ru/sakhalin-

oblast/baikal-bay). По наблюдениям в заливе в это время существовал квадратурный режим. В этих условиях импульсгенерирующий процесс подземных вод берега оз. Байкал не только зарождался, но и угасал (рис. 7).



Рис. 7. Схема соотношения стадий эволюции интервалов ОВП-импульсов подземных вод берега Байкала (*a*) с квадратурными и сизигийными лунно-солнечными приливами (*б*) (объяснение в тексте).

Fig. 7. Scheme of the relationship between the evolution stages of intervals of ORP pulses of ground-water from the shore of Lake Baikal (*a*) with neap and spring lunar-solar tides (*b*) (explanation in the text).

Влиянием суточных лунных приливов объясняется 6-часовая квазипериодичность вступления импульс-генерирующего процесса 07 февраля. Приливы играют роль спускового механизма, который исправно работает в первом интервале ОВП- импульсов. При усилении импульсгенерирующего процесса непосредственный контроль импульсов суточными лунными приливами сменяется их более сложным временным распределением. Однако сохраняется общий контроль смены характера импульсов сизигийными и квадратурными приливами. ОВП-импульсы начинаются в условиях перехода от квадратурного прилива к сизигийному и при достижении последнего сменяется интервалом IIa, во время которого импульсы усиливаются. Интервал Па соответствует условиям перехода от сизигийного прилива к квадратурному и при его достижении сменяется интервалом IIб. В условиях перехода от квадратурного прилива к сизигийному импульсы сначала ослабевают (интервал IIб), а затем усиливаются до кульминации (интервал IIIа). Кульминация ОВП-импульсов предшествует сизигийному приливу и при его переходе к квадратурному ослаблением сменяется импульсгенерирующего процесса. При достижении квадратурного прилива наблюдаются заключительные ОВП-эффекты.

В более широком контексте в Байкальской впадине предполагалось влияние лунно-солнечных приливов на землетрясения. Это предположение имело характер дискуссии (Ламакин, 1966). В последние несколько вопрос о влиянии луннодесятилетий солнечных приливов на сейсмичность был в фокусе многочисленных мониторинговых и экспериментальных исследований, в том числе связанных с оценками уровня сейсмичности и с изучением временных вариаций электропроводности земной коры (Гордеев и др., 1995; Салтыков, 1995; Жамалетдинов и др., 2000; Боголюбов и др., 2004; Vargal, Grafarend, 2017; Zhamaletdinov et al., 2018; Senapati et al., 2023).

Вопрос происхождении OBII-0 импульсов в подземных водах берега Байкала и непосредственном влиянии на них импульс-генерирующих факторов в настоящее время не имеет однозначного объяснения. Импульсы могут быть производными пьезоэлектрических эффектов, сопровождающих деформации ледового покрова, или могут отражать образование микробиальных пленок на поверхности чувствительных элементов датчика (вследствие способности микроорганизмов изменять окислительновосстановительные условия среды в ходе своей жизнедеятельности). На импульсы могут влиять и другие факторы, определение которых требует дополнительных исследований.

С одной стороны, если проводить аналогию между глубокими ОВП-минимумами и сильными деформационными событиями деструкции ледового покрова, то получаются посуточные интервалы (25 ч 52 мин и 24 ч 36 мин). С другой стороны, во время кульминационного интервала Шб между глубокими минимумами 55-63 в течение суток происходит до семи малых импульсов (см. рис. 6в). Паузы между ними (в основном от 1 ч 34 мин до 3 ч 22 мин) сопоставляются с периодами, характеризовавшими деформационный процесс ледового покрова 3 и 5 марта 2013 г., зарегистрированными с преобладающими периодами в интервале от 2460 сек (41 мин) до 9530 сек (или 2 ч 38 мин 50 с). Эти колебания характеризовались как показательные для вариаций тектонических напряжений льда между главными ледовыми ударами (Борняков и др., 2016).

Заключение

При мониторинге в режиме реального времени подземных вод берега Байкала в скважине пос. Култук с 07 февраля до 07 марта 2024 г. зарегистрированы отрицательные ОВП-импульсы в интервалах: I – 07–13 февраля (импульсы 1-26), Па – 13-18 февраля (импульсы 27-43), ІІб – 18-22 февраля (импульсы 43-54), Ша - 22-26 февраля (импульсы 55-71), Шб – 26 февраля – 4 марта (импульсы 71-80), VIa - 4-6 марта (импульсы 80-82) и 6-7 марта (импульсы 82-83). Импульсы характеризовали единое развитие процесса от его зарождения (интервал I) с последовательным усилением (интервалы IIa, IIб и IIIa) до вырождения (интервалы IIIб и IV). Предполагается, что 30-суточная активность импульс-генерирующего процесса от его зарождения до угасания регулировалась квадратурными и сизигийными приливами, обусловленными суперпозиционированием Земли относительно Луны и Солнца. Происхождение ОВП-импульсов может быть связано как с пьезоэлектрическими эффектами, возникающими при деформациях ледового покрова оз. Байкал, так и с образованием микробиальных пленок на поверхности чувствительных элементов датчика. Выяснение природы обнаруженных ОВП эффектов требует проведения дополнительных междисциплинарных исследований.

Благодарности

Мониторинг ОВП подземных вод в режиме реального времени проводится в рамках реализации крупного научного проекта «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды».

Литература

Боголюбов Б.Н., Лобанов В.Н., Назаров В.Е., Рылов В.И., Стромков А.А., Таланов В.И. Амплитудно-фазовая модуляция сейсмоакустической волны под действием лунно-солнечного прилива // Геология и геофизика. 2004. Т. 45, № 8. С. 1045–1049.

Борняков С.А., Мирошниченко А.И., Салко Д.В. Диагностика предсейсмогенного состояния структурно-неоднородных сред по данным деформационного мониторинга // Докл. Академии наук. 2016. Т. 468, № 1. С. 84–87.

Гордеев Е. И., Салтыков В.А., Синицын В. И., Чебров В. Н. К вопросу о связи высокочастотного сейсмического шума с лунносолнечными приливами // Доклады Академии наук. 1995. Т. 340. № 3. С. 386–388.

Жамалетдинов А.А., Митрофанов Ф.П., Токарев А.Д., Шевцов А.Н. Влияние лунносолнечных приливных деформаций на электропроводность и флюидный режим земной коры // Докл. РАН, 2000. Т. 371, № 2. С. 235–239.

Ламакин В.В. Байкальские землетрясения и лунно-солнечные приливы // Природа. 1966. № 9. С. 23–34.

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., Снопков 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.

Салтыков В.А. Особенности связи высокочастотного сейсмического шума и лунносолнечных приливов. // Докл. РАН. 1995. Т. 341, № 3. С. 406–407.

Senapati B., · Panda D., ·Kundu B. Solid-earth tidal modulations of 2019 Ridgecrest earthquake sequence, California: any link with Coso geothermal feld? // J. Seismol. 2023. Vol. 27. P. 737–751 https://doi.org/10.1007/s10950-023-10166-4.

Vargal P., Grafarend E. Influence of tidal forces on the triggering of seismic events // Pure Appl. Geophys. 2018. Vol. 175. P. 1649–1657

Zhamaletdinov A.A., Shevtsov A.N., Korotkova T.G. Lunisolar tides influence on electrical conductivity of the Earth's crust in the territory of Kola Peninsula // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2018. Vol. 54, No. 3. P. 474–486.

References

Bogolyubov B.N., Lobanov V.N., Nazarov V.E., Rylov V.I., Stromkov A.A., Talanov V.I. Amplitude-phase modulation of a seismoacoustic wave under the influence of the lunar-solar tide // Geology and Geophysics. 2004. T. 45, No. 8. P. 1045–1049.

Bornyakov S.A., Miroshnichenko A.I., Salko D.V. Diagnostics of the pre-seismogenic state of structurally inhomogeneous media based on deformation monitoring data // Dokl. Academy of Sciences. 2016. Vol. 468, No. 1. P. 84–87.

Gordeev E.I., Saltykov V.A., Sinitsyn V.I., Chebrov V.N. On the issue of communication of high-frequency seismic noise with lunar-solar tides // Reports Academy of Sciences. 1995. T. 340. No. 3. P. 386–388.

Zhamaletdinov A.A., Mitrofanov F.P., Tokarev A.D., Shevtsov A.N. The influence of lunar-solar tidal deformations on the electrical conductivity and fluid regime of the earth's crust // Dokl. RAS, 2000. Vol. 371, No. 2. P. 235–239.

Lamakin V.V. Baikal earthquakes and lunisolar tides // Nature. 1966. No. 9. P. 23–34.

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

Rasskazov S.V., Snopkov S.V., Aslamov I.A., Archipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. Express analysis of the manifestation of quasi-periodic pulses of the redox potential of groundwater on the shore of Lake Baikal during real-time monitoring (February 07–14, 2024) // Geology and Environment. 2024. Vol. 4, No. 1.

Saltykov V.A. Features of the connection between high-frequency seismic noise and lunar-solar tides. // Dokl. RAS. 1995. Vol. 341, No. 3. P. 406– 407.

Асламов Илья Александрович,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, 664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Лимнологический институт СО РАН, email: ilya_aslamov@bk.ru. Aslamov Ilya Aleksandrovich, Candidate of physical and mathematical sciences, Senior Researcher, 664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3, Limnological Institute SB RAS, email: ilya_aslamov@bk.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 Vasilievich, 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 Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies, tel.: (3952) 51-16-59, email: rassk@crust.irk.ru.

Снопков Сергей Викторович,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент, 664025 Иркутск, ул. Ленина, д. 3, Иркутский государственный университет, геологический факультет, доцент, 664074, г. Иркутск, ул. Курчатова, 3, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Сибирская школа геонаук, ведущий научный compyдник, email: snopkov_serg@mail.ru. Snopkov Sergey Viktorovich, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, assistant professor, 664025 Irkutsk, Lenin st., 3, Irkutsk State University, Faculty of Geology, 664074, Irkutsk, st. Kurchatova, 3, Irkutsk National Research Technical University, Siberian School of Geosciences, Leading Researcher, email: snopkov_serg@mail.ru.

Архипенко Владислав Иванович,

главный специалист по электронике,

664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Лимнологический институт СО РАН, email: vladarxip@gmail.com. **Arkhipenko Vladislav Ivanovich,** main electronics engineer, 664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3, Limnological Institute SB RAS, email: vladarxip@gmail.com.

Ильясова Айгуль Маратовна,

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, email: ila@crust.irk.ru. **Ilyasova Aigul Maratovna**, candidate of geological and mineralogical sciences, leading engineer, 664033 Irkutsk, Lermontov st., 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS, email: ila@crust.irk.ru.

Чебыкин Евгений Павлович,

кандидат химических наук, старший научный сотрудник, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, 664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Лимнологический институт СО РАН, email: epcheb@yandex.ru. **Chebykin Evgeny Pavlovich,** Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, 664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS, 664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3, Limnological Institute SB RAS, email: epcheb@yandex.ru.

УДК 550.844+546.791.027+632.126 https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.90

Серия ОВП-импульсов подземных вод побережья Байкала 20–27 марта 2024 г.: вероятная связь с магнитными бурями

Е.П. Чебыкин^{1,2}, С.В. Рассказов^{1,3}, И.А. Асламов², С.В. Снопков^{3,4}, В.И. Архипенко², А.М. Ильясова¹

¹Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия ²Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия ³Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия ⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет, Сибирская школа геонаук, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Короткая (8-ми суточная) серия ОВП-импульсов начинается малоамплитудными (около 1 мВ) колебаниями, частично сглаживается и прогрессирует до глубоких минимумов, достигающих 138 мВ. Эта серия отличается от импульсов, охватывающих полный (30суточный) приливной лунно-солнечный цикл в феврале–начале марта 2024 г. Предполагается связь временных вариаций ОВП-импульсов с проявлением магнитных бурь. В качестве благоприятного фактора генерации мощных ОВП-импульсов рассматривается также сизигийный лунно-солнечный прилив. Мартовская серия импульсов сопровождается снижением фоновых значений ОВП. Подобное снижение ОВП, но без характерных импульсов, свойственно январским эпизодам проявления землетрясений в центральной части Байкальской рифтовой системы.

Ключевые слова: подземные воды, мониторинг, окислительно-восстановительный потенциал, pH, температура, лунно-солнечный прилив, магнитная буря, Байкал.

Series of ORP pulses in groundwater of the Baikal coast on March 20– 27, 2024: probable connection with magnetic storms

E.P. Chebykin^{1,2}, S.V. Rasskazov^{2,3}, I.A. Aslamov², S.V. Snopkov^{3,4}, V.I. Archipenko², A.M. Ilyasova¹

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

² Limnological Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia

³ Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

⁴ Irkutsk National Research Technical University, Siberian School of Geosciences, Irkutsk, Russia

Abstract. A short (8-day) series of ORP pulses begins with low-amplitude (about 1 mV) oscillations, partially smoothes out, and progresses to deep minima reaching 138 mV. The series differs from the pulses covering the full (30-day) tidal lunar-solar cycle in February–early March 2024. It is suggested that variations in ORP pulses are temporally related to magnetic storms. Also, for generation of powerful ORP pulses, the spring lunar-solar tide is considered as a favorable factor. The March series of pulses is accompanied by decreasing background ORP values. Similar ORP decrease, but without pulses, characterizes the January episodes of earthquakes in the central Baikal Rift System.

Keywords: groundwater, monitoring, oxidation-redox potential, pH, temperature, lunar-solar tide, magnetic storm, Baikal.

Введение

В скважинах мониторинговых станций 9 и 184 Култукского полигона побережья Байкала с начала декабря 2023 г. измеряется окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), pH и температура в режиме реального времени. Мониторинг дает меняющиеся характеристики ОВП подземных вод. Поступающая информация постоянно анализируется. Результаты мониторинга в режиме реального времени рассматриваются как имеющие смысл только во время прямого отслеживания происходящих изменений в подземных водах. Сразу после перехода вариаций ОВП в новый режим предшествующие данные становятся неактуальными.

Получаемая информация приводится в своевременно подготовленных публикациях. В конце декабря 2023 г. характеризуются условия установки зондов и первые результаты измерений. В декабре 2023 г. и январе 2024 г. происходят землетрясения, отражающиеся в графиках ОВП. В первой половине февраля 2024 г. на ст. 9 проявляются регулярные отрицательные импульсы ОВП, которые систематизируются на стадии вступления 07–14 февраля и в ходе развития полного 30-суточного цикла от его начала с выходом на максимум до угасания 07 марта (Рассказов и др., 2023, 2024; Асламов и др., 2024; Снопков и др., 2024).

В настоящей работе обращается внимание на проявление серии ОВП-импульсов ст. 9 в интервале 20–27 марта 2024 г. во время магнитных бурь и подчеркиваются особенности этой серии в сравнении с косейсмическими вариациями ОВП в декабре 2023 г. и январе 2024 г. и более продолжительными (30-суточными) ОВП-импульсами февраля и начала марта.

Общий график мартовского мониторинга

После завершения цикла вариаций ОВПимпульсов 07 февраля–07 марта 2024 г., сопровождающих полный сизигийноквадратурный цикл лунно-солнечных приливов, наступает время, в течение которого импульсы отсутствуют. Единичный импульс с амплитудой (А) 11 мВ проявляется 15 марта с 08:56 до 09:16. Слабые возмущения в виде сдвоенных минимумов наблюдаются 16 и 18 марта, но систематические изменения на графике ОВП начинаются лишь 20 марта и заканчиваются 27 марта (рис. 1).



Рис. 1. Изменение ОВП в марте 2024 года на ст. 9. Отмечена серия импульсов 20–27 марта 2024 г. и единичный импульс 15 марта (объяснение в тексте).

Fig. 1. Variation of the ORP in March 2024 at st. 9. A series of pulses on 20–27 March 2024 and a single pulse on 15 March are marked (explanation in the text).

Начало серии ОВП-импульсов и магнитные бури

20 марта, в 19:36, вступают малоамплитудные (А=~1мВ) колебания ОВП. Затем, 21 марта, в 01:00 наблюдается перегиб линии графика от 345 мВ, приводящий к минимуму 327 мВ в 02:28 и повторному минимуму 325 мВ в 03:22. На стадии релаксации этих глубоких минимумов (т.е. на восходящей кривой) образуются малые минимумы от 345 мВ в 04:46 до 334мВ в 04:56 и последующие подобные колебания с длительностью от 1 ч до 1 ч 25 мин. Затем, 21 марта выявляется небольшой минимум с 351 мВ в 16:46 до 342 мВ в 17:02. Этому минимуму соответствует

магнитная буря (15:00-21:00, Кр=5) (рис. 2).



Рис. 2. График вступления колебаний ОВП с проявлением первой магнитной бури 21 марта (15:00–21:00, Кр=5), после которой в магнитосфере сохраняется возбуждение (21:00–00:00, Кр=4.9) с его относительным снижением 22 марта (00:00–03:00, Кр=4.3). Здесь и далее используются данные о магнитных бурях (https://xras.ru/magnetic_storms.html).

Fig. 2. A chart of the beginning of ORP oscillations with a first magnetic storm development on March 21 (15:00–21:00, Kp=5), after which the excitation of the magnetosphere persists (21:00–00:00, Kp=4.9) with its relative decrease on March 22 (00:00–03:00, Kp=4.3). Here and further, data on magnetic storms are adopted from (https://xras.ru/magnetic_storms.html).

Малоамплитудные колебания продолжаются 22 и 23 марта и сглаживаются в интервале от 13:02 23 марта до 14:44 24 марта. Перед вхождением в режим сглаживания ОВП начинается магнитная буря (Кр=5). В конце интервала сглаживания происходит

наиболее сильная магнитная буря (Кр=6–8). После сглаживания магнитная буря с высокими значениями Кр продолжается в сопровождении малоамплитудными колебаниями ОВП (рис. 3).



Рис. 3. Сглаживание колебаний ОВП 23–24 марта, во время магнитных бурь. Магнитная нестабильность начинается 21 марта (15:00–21:00, Кр=5) и идет на спад 25 марта (06:00–09:00, Кр=5; 15:00–18:00, Кр=4).

Fig. 3. Smoothing of ORP fluctuations on March 23–24, during magnetic storms. Magnetic instability starts on March 21 (15:00–21:00, Kp=5) and goes to decrease on March 25 (06:00–09:00, Kp=5; 15:00–18:00, Kp=4).

Большеамплитудные ОВПимпульсы после магнитных бурь

Большеамплитудная серия ОВПимпульсов прослеживается после последней магнитной бури, в течение двух суток (от 19:10 25 марта до 23:38 27 марта). В ней насчитывается 7 событий, которые наблюдаются при снижении фоновых значений ОВП от 363 мВ (25 марта) через 312 мВ (27 марта) до 292 мВ (29 марта) (рис. 4).

Импульс 1 сдвоенный. Линия импульса начинается от перелома 363 мВ в 19:10 25 марта, выходит на промежуточный минимум 331 мВ в 19:18, возвращается к значению ОВП 356 мВ в 20:16 и уходит в более глубокий минимум 294 мВ в 20:24. Импульс 2 наблюдается 26 марта от перелома линии 362 мВ в 06:24 до минимума 324 мВ в 06:34.

Импульс 3 по конфигурации подобен импульсу 1 (т.е. сдвоен). Линия импульса начинается от перелома 358 мВ в 17:50 26 марта, выходит на промежуточный минимум 293 мВ в 18:00, возвращается к значению ОВП 337 мВ в 18:48 и уходит в более глубокий минимум 205 мВ в 19:58.

Импульс 4 наблюдается 27 марта ночью. Он имеет 2 минимума. Начальный слабый минимум устанавливается от 328 мВ в 01:00 до 323 мВ в 01:12, более глубокий (точнее, самый глубокий) – от 329 мВ в 02:06 до 191 мВ в 02:32.

Импульс 5 идет следом от перелома 319 мВ в 05:56 до минимума 209 мВ в 06:12. Его вторая (неудавшаяся) часть выражается отрезком, параллельным оси абсцисс, который имеет точку резкого перегиба на повышение при значении ОВП 232 мВ в 11:42.

Импульс 6 небольшой. Он стартует от зубчатого фона с перегибом линии от 297 мВ 27 марта в 16:28. Линия опускается в минимум до 281 мВ в 17:08.

Импульс 7, подобно импульсу 6, стартует от зубчатого фона с перегибом линии от более высокого фона 312 мВ 27 марта в 23:04 и имеет более глубокий минимум 239 мВ в 23:38.

В серии из семи импульсов между тремя начальными событиями 26 марта последовательно устанавливаются паузы 10 ч 10 мин и 7 ч 24 мин, между последующими четырьмя событиями 27 марта – паузы в среднем около 6 часов. Амплитуда нарастает от первого импульса к четвертому с последующим уменьшением относительно нисходящей линии фона (рис. 4).



Рис. 4. Проявление большеамплитудных ОВП-импульсов 25–28 марта, после магнитных бурь. Малоамплитудные импульсы в растянутой шкале ординаты становятся неразличимыми.

Fig. 4. Appearance of large-amplitude ORP pulses on 25-28 March after magnetic storms. Low-amplitude pulses on an expanded ordinate scale become indistinguishable.

Обсуждение

Различие ОВП-импульсов временных интервалов 07 февраля–07 марта и 20–27 марта 2024 г.

ОВП-импульсы интервала 20–27 марта существенно отличаются от импульсов интервала 07 февраля – 07 марта.

Во-первых, в марте сокращается общая продолжительность импульсов с 30-ти суток до 8-ми суток. Сокращение продолжительности импульсов может свидетельствовать о смене механизма их генерации.

Во-вторых, во временном интервале 07 февраля – 07 марта 2024 г. ОВП-импульсы накладываются на ход общих изменений этого параметра подземных вод. Мощный сигнал не подвергается влиянию прокачки скважины. После 07 марта наблюдается подъем линии фона 08-12 марта, а после 15 марта – слабые вариации, связанные с началом ОВП-импульсов интервала 20-27 марта при существенном снижении линии фона во время большеамплитудных импульсов (см. рис. 1, 4). Такой характер вариаций фона свидетельствует о том, что в данном случае импульсы не наложены на независимый ход ОВП изменений подземных вод, а отражают суть генеральной вариационной линии. Иными словами, падение линии ОВП имеет непосредственную связь с проявлением импульсов 1-7 на рис. 4. Более того, подобное падение ОВП, но с меньшей амплитудой, наблюдается на графике начальных событий серии ОВП-импульсов рис. 3 при сглаживании колебаний.

В-третьих, амплитуды февральскомартовского интервала в стадию максимальной активности не превышали 50 мВ, а амплитуды мартовского интервала были в целом существенно больше и достигали 138 мВ.

Вероятная связь ОВП-импульсов с магнитными бурями при сизигийном лунносолнечном приливе как благоприятном факторе

Вариации фона ОВП и импульсы совпадают по времени с магнитной бурей, поэтому можно предположить, что они связаны с процессами в подземных водах, вызванными электрическими явлениями, производными магнитной бури. Импульсы начинаются с малой амплитудой до магнитной бури, сглаживаются и возобновляются с малой амплитудой во время магнитной бури при резком возрастании по амплитуде после окончания магнитной бури. Во время магнитной бури идет подготовка электрического процесса в подземных водах, который реализуется в вариациях ОВП после ее окончания.

30-суточный интервал февраля и начала марта перекрывает полный цикл лунносолнечных приловов, 8–суточный интервал относится к особой суперпозиции Луны и Солнца – противостоянию, при котором достигается сизигийный прилив.

Импульсы интервала 20–27 марта проявляются в результате совмещения во времени нескольких магнитных бурь с сизигийным приливом. Небольшая магнитная буря, произошедшая 3 марта 2024 г., совпадает с квадратурным приливом. В это время импульсы интервала 07 февраля – 07 марта переходят в стадию угасания (рис. 5).



Рис. 5. Соотношение интервалов и стадий эволюции импульсов в марте 2024 г. с лунносолнечными приливами и магнитными бурями. Стадия угасания (IV интервал) 04–07 марта относится к завершению 30-суточного периода ОВП-импульсов. Стадия зарождения (интервал I) и стадия усиления (интервал II) 20–27 марта совпадают с магнитными бурями и сизигийным приливом. Используются данные о вариациях уровня лунных приливов залива Байкал (север ова Сахалин) акватории Мирового океана на широте Среднего Байкала (п-ов Святой Нос) (https://tides4fishing.com/ru/sakhalin-oblast/baikal-bay).

Fig. 5. Correlation of intervals and stages of pulse evolution in March 2024 with lunar-solar tides and magnetic storms. The extinction stage (IV interval) March 04–07 refers to the end of the 30-day period of ORP-pulses. The inception stage (interval I) and the intensification stage (interval II) on March 20–27 coincide with magnetic storms and a spring tide. Data on variations in the level of lunar-solar tides in the Baikal Bay (north of Sakhalin Island) in waters of the World Ocean at the latitude of Middle Baikal (Svyatoy Nos Peninsula) are used (https://tides4fishing.com/ru/sakhalin-oblast/baikal-bay).

Снижение фона ОВП-импульсов временного интервала 07 февраля–07 марта подобно косейсмическому снижению ОВП 15–28 января?

Основная цель мониторинга ОВП в режиме реального времени заключается в поисках критериев оценки угрозы землетрясений в центральной части Байкальской рифтовой системы. В качестве показателя такой угрозы регистрируется сейсмический интервал с 15 до 28 января 2024 г., начинающийся сильным Северо-Байкальским землетрясесопровождающийся перестройкой нием, тренда ОВП на максимуме с последующим снижением этого параметра (Рассказов и др., 2024). Такое же снижение ОВП наблюдается в фоновых значениях ОВП-импульсов временного интервала 07 февраля – 07 марта.

Следовательно, ОВП может снижаться как при магнитных бурях так и при землетрясениях; в первом случае снижение фона ОВП сопровождается переходом от малоамплитудных минимумов к большеамплитудным, во втором случае минимумов не наблюдается.

Заключение

Анализ графика ОВП ст. 9 за март месяц показывает короткую (8-ми суточную) серию импульсов, совпадающую по времени с магнитными бурями. Она начинается малоамплитудными вариациями фона, которые в дальнейшем накладываются на ОВПминимумы. С течением времени амплитуда ОВП-минимумов возрастает до 138 мВ. Особенности вариаций ОВП объясняются влиянием не только магнитных бурь, но и их сочетанием с сизигийным лунно-солнечным приливом.

Мартовская серия импульсов ст. 9 отличается от предшествующей 30-суточной серии февраля и начала марта по 1) короткому (8-суточному) проявлению, 2) характеру временной смены ОВП-импульсов и 3) существенному возрастанию амплитуды минимумов. В то же время, мартовская серия импульсов сопровождается снижением фона ОВП. Подобное снижение, но без минимумов ОВП, наблюдается при землетрясениях в центральной части Байкальской рифтовой системы во второй половине января.

Благодарности

Мониторинг ОВП подземных вод в режиме реального времени проводится в рамках реализации крупного научного проекта «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды».

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.: 30суточный мониторинг в режиме реального времени от зарождения до угасания // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 1.

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 г.: сопоставление электрических эффектов с землетрясениями в центральной части Байкальской рифтовой системы // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 1.

Снопков С.В., Рассказов С.В., Асламов И.А., Архипенко В.И., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П.

Экспресс-анализ проявления квазипериодических импульсов окислительновосстановительного потенциала подземных вод берега Байкала при мониторинге в режиме реального времени (07–14 февраля 2024 г.) // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 1.

https://tides4fishing.com/ru/sakhalinoblast/baikal-bay

https://xras.ru/magnetic_storms.html

References

Aslamov I.A., Rasskazov S.V., Snopkov S.V., Archipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. Generation of ORP pulses in groundwater from the Baikal coast in February-March 2024: 30-day realtime monitoring from initiation to extinction // Geology and Environment. 2024. Vol. 4, No. 1.

Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Snopkov S.V., Archipenko 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

Чебыкин Евгений Павлович,

кандидат химических наук, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, 664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Лимнологический институт СО РАН, стариий научный сотрудник, email: epcheb@yandex.ru. **Chebykin Evgeny Pavlovich,** Candidate of Chemical Sciences, 664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS, 664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3, Limnological Institute SB RAS, Senior Researcher, email: epcheb@yandex.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.

(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., Archipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. Real-time monitoring of oxidation-redox 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.

Snopkov S.V., Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Archipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. Express-analysis of quasi-periodic displaying oxidation-redox potential impulses in groundwater from the Baikal shore in real-time monitoring (February 07–14, 2024) // Geology and Environment. 2024. Vol. 4, No. 1.

https://tides4fishing.com/ru/sakhalinoblast/baikal-bay

https://xras.ru/magnetic_storms.html

Rasskazov Sergei Vasilievich,

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 Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies, tel.: (3952) 51–16–59, email: rassk@crust.irk.ru.

Асламов Илья Александрович,

кандидат физико-математических наук, 664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Лимнологический институт СО РАН, старший научный сотрудник, email: ilya_aslamov@bk.ru. Aslamov Ilya Aleksandrovich, Candidate of physical and mathematical scienc-

es,

664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3, Limnological Institute SB RAS, Senior Researcher, email: ilya_aslamov@bk.ru.

Снопков Сергей Викторович,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,

664025 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет, геологический факультет, доцент,

664074, г. Иркутск, ул. Курчатова, 3, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Сибирская школа геонаук,

ведущий научный сотрудник, email: snopkov_serg@mail.ru. Snopkov Sergey Viktorovich, Candidate of Geological and Mineralogical Sci-

ences, assistant professor, 664025 Irkutsk, Lenin st., 3, Irkutsk State University, Faculty of Geology, 664074, Irkutsk, st. Kurchatova, 3, Irkutsk National Research Technical University, Siberian School of Geosciences, Leading Researcher, email: snopkov_serg@mail.ru.

Архипенко Владислав Иванович,

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.

Вулканизм, новейшая геодинамика

УДК 551.21+550.42(51) https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.98

Геологические, минералогические и геохимические признаки смешения расплавов контрастного состава и контаминации расплавов перидотитовым материалом под Восточной группой вулканов Удаляньчи, СВ Китай

И.С. Чувашова^{1,2}, И-мин Сунь³, С.В. Рассказов^{1,2}, Т.А. Ясныгина¹, Е.В. Саранина^{1,4}

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

²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

³Институт природных ресурсов и экологии Хэйлунцзянской академии наук, Харбин, Китай ⁴Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия

Аннотация. При детальном опробовании получены данные, свидетельствующие об одновременном извержении и смешении расплавов контрастного состава из разных источников под вулканом Дзяодебушан и более поздней контаминации расплавов перидотитовым материалом под вулканом Сяогушан.

Ключевые слова: Калиевые породы, микроэлементы, изотопы Pb, оливин, транстенсия, Удаляньчи, Северо-Восточный Китай.

Geological, Mineralogical, and Geochemical Evidence on Mixing of Contrast Melts and Contamination of Melts by Peridotite Material beneath the Eastern Group of Volcanoes in Wudalianchi, NE China

I.S. Chuvashova^{1,2}, Yi-min Sun³, S.V. Rasskazov^{1,2}, T.A. Yasnygina¹, E.V. Saranina^{1,4}

¹Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia ²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia ³Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin, China ⁴Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. Due detail sampling, we get data indicating simultaneous eruption and mixing of melts of contrasting compositions from different sources under the Jiaodebushan volcano and the later contamination of melts with crystalline peridotite material under the Xiaogushan volcano.

Keywords: Potassic rocks, trace elements, Pb isotopes, olivine, transtension, Wudalianchi, Northeast China.

Постановка вопроса

Бинарное смешение магматических расплавов – распространенная интерпретация описания взаимосвязи между концентрациями несовместимых элементов и изотопными отношениями Sr–Nd–Pb в океанических и континентальных базальтах. Процесс бинарного смешения часто воспринимается как аксиома, не требующая доказательств, в разных наборах данных на локальном, региональном и глобальном уровнях. Между тем, созидающая петрологическая роль процесса смешения нуждается в аргументации. Продукты вулканических извержений могут представлять собой непосредственный результат плавления материала источника, могут контаминироваться материалом кристаллических пород и вовлекаться в кристаллизационную дифференциацию.

При соприкосновении базальтовых и риолитовых расплавов гомогенизация обычно предотвращается быстро формирующейся коркой стекловатого базальта, охлажденного на контакте с кислой магмой. Из экспериментов следует, что между водонасыщенными риолитовым и базальтовым расплавами в течение некоторого времени сохраняется поверхность раздела и может осуществляться перераспределение компонентов (Yoder, 1973). Полная гомогенизация с образованием промежуточных составов происходит в результате перемешивания расплавов до состояния эмульсии (Blake et al., 1965).

В гранитных телах иногда находят овоиды базальтового состава с каемками закалки, свидетельствующие о внедрении и дезинтеграции базальтовых расплавов в гранитном расплавленном теле-хозяине. Такие находки неполного смешения базальтовых и гранитных расплавов характеризуются как явление минглинга (mingling). Продукты минглинга отличаются от смешения базальтовых расплавов основного и среднего состава (или основного состава) по конечным продуктам, запечатленным в породах. В случае минглинга матрица остается гранитной с сохранением контраста с базальтовыми овоидами. В случае одновременного извержения расплавов основного и среднего состава (или основного состава), наряду с контрастными вулканическими породами, могут встречаться однородные серии промежуточного состава, которые воспринимаются как гомогенизированная смесь.

На континентах имеются многочисленные геологические примеры фактов, свидетельствующих о механическом смешении контрастных расплавов основного и среднего состава. При одновременном внедрении базальтовых и трахитовых расплавов в верхнюю часть коры наблюдаются признаки механического и химического взаимодействия между ними, выходящие за рамки простых смесей (Sethna, Battiwala, 1976; Рассказов, 1985). В качестве показателя смешения фонолитовой и базанитовой магм рассматривалась обратная зональность оливиновых зерен (Sundermeyer et al., 2020).

Цель настоящей работы – представить геологические, минералогические и геохимические доказательства смешения расплавов контрастного состава на вулкане Восточный Дзяодебушан Восточной группы вулканов Удаляньчи и контаминации расплавов перидотитовым материалом на вулкане Сяогушан в этой же группе.

Общая характеристика поля Удаляньчи и опробование вулканических пород построек Восточный Дзяодебушан и Сяогушан

Последовательность извержений вулканов Удаляньчи реконструируется по данным K-Ar датирования (Zhang et al., 1995; Wang et al., 1996; Liu et al., 2001; Liu, Taniguchi, 2001; Wang, Chen, 2005; Guide book..., 2010; Zhao et al., 2014). Различается Центральная, Западная и Восточная группы вулканов. В первой из них извержения последовательно мигрируют в течение 2.5 млн лет с югозапада на северо-восток, от лавового потока Лаошантоу до вулканов Лаохейшан и Хуошаошан, в двух других в общем составляют фон хаотичных извержений (Rasskazov et al., 2016). Вулканы Восточный Дзяодебушан и Сяогушан принадлежат Восточной группе вулканов Удаляньчи. Первый извергался в интервале 0.87-0.43 млн лет назад, второй -0.38-0.24 млн лет назад (Liu et al., 2001; Wang, Chen, 2005) (рис. 1).



Рис. 1. Пространственное положение вулканов Восточный Дзяодебушан и Сяогушан Восточной группы относительно Центральной группы вулканов на поле Удаляньчи (Rasskazov et al., 2016 и ссылки в этой работе).

Fig. 1. Spatial position of the East Jiaodebushan and Xiaogushan volcanoes of the Eastern group relative to the Central one in the Wudalianchi field (Rasskazov et al., 2016 and references therein).

На вулкане Восточный Дзяодебушан опробованы лавовые потоки пьедестала конуса (обр. CH-15-37) и внутренней части его кратера (обр. CH-15-24–25). Образцы шлаков и фрагментов массивных пород конуса отобраны на юго-восточном склоне его кратера (обр. CH-15-26–27), вдоль круговой верхней кромки кратерного вала (обр. CH-15-28–34) и на юго-западном склоне кратера (обр. CH-15-35–36) (рис. 2а).

На вулкане Сяогушан опробован южный край конуса, вскрытый карьером (рис. 2б). В пирокластическом материале вулканическо-

го конуса преобладает сыпучий мелкообломочный шлаковый материал без порфировых вкрапленников. На его фоне выделяются крупные (до 1.5 м) бомбы с плотной сердцевиной, сложенной черными породами с крупными (до 0.5 см) порфировыми выделениями оливина (рис. 3). Гипсометрически ниже шлакового конуса находится лавовый поток с видимыми зернами оливина, слагающими основную массу породы (обр. СН-16-280). Этот поток относится к пьедесталу постройки вулкана Саогушан.



Рис. 2. Точки опробования вулканов Восточный Дзяодебушан (*a*) и Сяогушан (*б*). На панели *а* зелеными шестиугольниками обозначено местоположение образцов умеренно-Мg состава, малиновыми ромбами – местоположение образцов низко-Mg состава.

Fig. 2. Sampling sites of the East Jiaodebushan (*a*) and Xiaogushan (δ) volcanoes. In panel *a*, green hexagons indicate the location of samples of moderate-Mg composition, and crimson diamonds indicate the location of samples of low-Mg one.



Рис. 3. Сыпучий мелкообломочный шлаковый материал, включающий вулканические бомбы массивных пород с крупными ксенокристами оливина (карьер в южной части вулканического конуса Сяогушан).

Fig. 3. Loose fine-clastic slag material including volcanic bombs of massive rocks with large olivine xenocrysts (quarry in the southern part of the Xiaogushan volcanic cone).

Методика аналитических исследований

Аналитические исследования микроэлементного состава вулканических пород выметолом **ICP-MS** полнены на массспектрометре Agilent 7500се. Характеристика использованных методик приведена в работе (Ясныгина и др., 2015). Петрогенные оксиды определены классическими методами химического анализа (Сизых, 1985). Изотопный анализ свинца проводился на приборе MC-ICP-MS Neptune Plus по методике, приведенной в статье (Rasskazov et al., 2020). Состав оливина изучался с помощью сканирующего электронного микроскопа с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром (ESM-EDXRF) Quanta 200, FEI Comрапу (аналитик К.Ю. Арсентьев).

Особенности состава оливина в породах вулкана Сяогушан

В лавовом потоке массивных оливинпорфировых пород из пьедестала постройки (обр. СН-16-280) с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) определялся состав фенокристаллов оливина размером 600-700 µm (рис. 4), равномерно рассредоточенных в основной массе. В центре зерна определено 86 % форстерита, на краю зерна – 96 % форстерита. Возрастание магнезиальности оливина от центра к краю зерна подобно случаю, охарактеризованному при извержении с образованием кратера Лаахе Си (Эйфель) (Sundermeyer et al., 2020). Зерна оливина кристаллизовались из расплава при относительно низкой ликвидусной температуре и дорастали в условиях воздействия повышенной температуры вмещающего расплава.



Рис. 4. Фотография СЭМ пришлифовки зерна оливина основной массы породы из лавового потока в основании вулкана Сяогушан (обр. CH-16-280).

Fig. 4. SEM photograph of grinding olivine grains of the ground mass of rock from a lava flow at the base of the Xiaogushan volcano (sample CH-16-280).



Рис. 5. Фотография СЭМ пришлифовки зерна ксеноклисталла оливина в пористой части периферии вулканической бомбы из пирокластического материала вулканического конуса Сяогушан.

Fig. 5. SEM photograph of grinding olivine xenocrystic grain in the porous part of the periphery of a volcanic bomb from pyroclastic material in the Xiaogushan volcanic cone.

В бомбах из пирокластического материала этого вулкана рассеяны одиночные ксенокристаллы оливина. Они встречаются главным образом во внутренней массивной части вулканических бомб и лишь частично попадают в их пористую периферию. Преобладают зерна размером 1–2 мм (рис. 5). Наиболее крупные индивиды достигают 0.5 см.

На профиле через зерно оливина (рис. 6) определяется высокое магнезиальножелезистое отношение (Mg#) при снижении концентрации Fe от края к ядру до ничтожно малого значения. Обозначаются следы Na и Al. Содержание Ca меняется от 1.5 до 3.5 %. В точке с минимальной концентрацией Ca определяется значимое содержание Al (до 1

%). Содержание Si варьируется от 16 до 20 %. В отраженных электронах видно, что зерно состоит в основном из компонентов оливина (Mg и Si), но определяются и другие элементы, обычно не входящие в таких количествах в стехиометрию оливина. Особенно обращает на себя внимание высокая концентрация Са (рис. 7). Этот элемент входит в виде примеси в кристаллическую структуру оливина в условиях низкого давления. В данном случае существенная примесь кальция (от 1 до 3.5 %) в оливиновом ксенокристалле связана с воздействием на него вмещающего расплава. В оливине, кристаллизующемся в основной массе, содержание Са составляет 0.2–0.3 %.



Рис. 6. СЭМ-изображение и распределение элементов, показывающее зональность крупного кристалла оливина из вулканической бомбы в шлаке вулкана Сяогушан (обр. CH-16-279).

Fig. 6. SEM image and element distribution showing zonation of large olivine crystal from a volcanic bomb within slag of the Xiaogushan volcano (ofp. CH-16-279).



Рис. 7. Фрагмент зерна оливинового ксенокристалла из обр. СН-16-279 в отраженных электронах (верхняя панель) и пики концентраций по данным СЭМ (нижняя панель).

Fig. 7. Fragment of an olivine xenocryst from sample CH-16-279 in reflected electrons (top panel) and concentration peaks from SEM data (bottom panel).

Петрогенные оксиды

Вулканические породы поля Удаляньчи образуют серию от умеренно-Мд до низко-Mg составов (Rasskazov et al., 2016, 2020). В Восточной группе этого поля умеренно-Мд породы представлены в шлаковом конусе её наиболее северного вулкана – Молабушан и в шлаковом конусе и лавовых потоках вулкана Восточный Лонгменшан средней части этой группы. Низко-Мд составами характеризуются лавовые потоки в основании вулкана Молабушан, все продукты извержений вулкана Западный Лонгменшан и наиболее южного вулкана Восточной группы – Западный Дзяодебушан. Умеренно-Мд породы этих вулканов имеют сравнительно низкое содержание кремнезема (48-51 мас.%) и попадают на диаграмме TAS в классификационное поле фонотефрита. Низко-Мg породы характеризуются повышенным содержанием кремнезема (53–55 мас.%) и распределяются на диаграмме TAS в 4 классификационных поля: трахиандезибазальта, трахиандезита, тефрифонолита и фонотефрита (рис. 8).

На вулкане Восточный Дзяодебушан состав трех образцов (CH-15-26, CH-15-27 и CH-15-30) соответствует умеренно-Mg породам. На диаграммах рис. 3 фигуративные точки этих образцов попадают на окончание фигуративного поля умеренно-Mg пород конуса вулкана Молабушан и всего вулкана Восточный Лонгменшан. Фигуративные точки пород низко-Mg состава вулкана Восточный Дзяодебушан частично попадают на окончание фигуративного поля низко-Mg пород из лавовых потоков в основании вулкана Молабушан, всего вулкана Западный Лонгменшан и всего вулкан Западный Дзяодебушан. Часть фигуративных точек низко-Мg пород вулкана Восточный Дзяодебушан наложена на фигуративное поле низко-Mg пород вулканов Восточной группы, другая часть смещается в сторону умеренно-Mg пород.

На вулкане Сяогушан породы характеризуются узким диапазоном содержания кремнезема (около 53–54 мас.%). Фигуративные точки пяти пород перекрывают поле пород низко-Мg состава вулканов Восточной группы. Две точки пород из вулканиче-

ских бомб (обр. CH-16-278 и CH-15-05) смещаются в область с повышенным содержанием Mg на диаграмме панели *а* рис. 8, тогда как точка породы лавового потока из основания постройки (обр. CH-16-280) смещается в нижнюю часть этой диаграммы.

В целом, фигуративные точки пород вулкана Восточный Дзяодебушан укладываются в общие тренды пород вулканов Восточной группы, перекрывая пространство между контрастными умеренно- и низко-Мg группами, тогда как фигуративные точки пород вулкана Сяогушан образуют поперечный тренд относительно низко-Mg группы.



Рис. 8. Диаграммы MgO – SiO₂ (*a*) и Na₂O+K₂O – SiO₂ (*б*) пород Восточной группы вулканов Удаляньчи в сравнении с породами из более древних лавовых потоков Лаошантоу и Древний Гелацюшан Центральной и Западной групп. Классификационные поля на диаграмме TAS (total alkalis silica) показаны по работе (Le Bas, Streckeisen, 1991). Химические составы пересчитаны на 100% без учета потерь при прокаливании (ППП). Данные по вулканическим породам Молабушан, Лонгменшан, Лаошантоу и Древний Гелацюшан из работы (Rasskazov et al., 2020).

Fig. 8. Diagrams MgO vs SiO₂ (*a*) and Na₂O + K₂O vs SiO₂ (δ) for rocks from the eastern group of the Wudalianchi volcanoes compared to those from older lava flows. The classification fields of TAS diagram are shown after [Le Bas, Streckeisen, 1991]. Chemical compositions are recalculated to 100% without LOI. Data on the Molabushan, Longmenshan, Laoshantou, and Old Gelaqiushan volcanic rocks are from (Rasskazov et al., 2020).

Соотношение Ni и MgO – показатель петрогенетического различия трендов

Петрогенетическое различие трендов рис. 8 отчетливо обозначается на диаграмме Ni – MgO (рис. 9).

Фигуративные точки пород вулкана Восточный Дзяодебушан образуют непрерывный тренд смешения расплавов из источников типа Гелацю и Молабу. Первый из них преобладает в извергнутом материале поля Удаляньчи и впервые проявляется в потоке Древний Гелацюшан. На низко-Ме окончании тренда находятся точки пород наиболее южного вулкана Западный Дзяодебушан, поэтому крайняя точка обр. CH-15-29 Восточного Дзяодебушана обозначается как компонент источника Западного Дзяодебушана. Второй крайний компонент смешения инливилуализируется после 0.6 млн лет назад в извергнутом материале конуса наиболее северного вулкана Молабушан и проявляется в извержениях Восточного Лонгменшана. Этот компонент обозначается

как компонент источника, подобного источнику Молабу.

Фигуративные точки пород вулкана Сяогушан частично ложатся в среднюю часть тренда пород Восточного Дзяодебушана. С учетом более позднего извержения вулкана Сяогушан, эти составы относятся к смешанным. Иными словами, процессы смешения расплавного материала, подобного материалу, извергнутому на вулкане Восточный Дзяодебушан, привели к образованию магм промежуточного состава под вулканом Сяогушан. Эта часть составов, скорее всего, является производной безоливиновых источников. От совокупности точек результирующих составов смешения протягивается тренд контаминации перидотитовым матетрассированный фигуративными риалом. точками СН-15-05 и СН-16-278 с возрастающими концентрациями MgO и Ni, и противоположный тренд кристаллизационной дифференциации оливина, обозначающийся точкой СН-16-280 с уменьшающимися концентрациями MgO и Ni.



Рис. 9. Диаграмма Ni – MgO пород Восточной группы вулканов Удаляньчи в сравнении с породами из более древних лавовых потоков Лаошантоу и Древний Гелацюшан Центральной и Западной групп. Усл. обозн. см. рис. 8. Дополнительные обозначения: КИЗЛ – компонент источника Западного Лонгменшана, КИМ – компонент источника, подобного источнику Молабу.

Fig. 9. Diagram Ni versus MgO for rocks from the Eastern group of Wudalianchi volcanoes in comparison with those from the older Laoshantou and Old Gelaqiushan lava flows of the Central and Western groups. Symbols are as in Fig. 8. Additional designations: KII3JI – component of the Western Longmenshan source, KIM – component of the Molabu-like source.

Обсуждение

Для изучения природных моделей смешения базальтовых магм перспективны петрогенетические исследования в зонах спрединга. В таких исследованиях на локальных территориях обнаруживается сильная корреляция между микроэлементными и изотопными характеристиками пород (Stracke et al., 2003; Stracke, Bourdon, 2009; Peate et al., 2009; Cordier et al., 2010; Waters et al., 2011). В Исландии выявляется изменение процесса смешения с глубиной; большая степень гомогенизации глубинных расплавов и меньшая степень гомогенизации расплавов малых глубин (Rudge et al., 2013).

Смешение низко- и умеренно-Мд расплавов под вулканом Восточный Дзяодебушан – показатель вулканических извержений во время структурной перестройки

Ha вулканических полях северовосточной части Байкальской рифтовой системы, Витимском и Удоканском, были выявлены структурные перестройки, которые сопровождались смешением расплавов контрастного состава (Рассказов, Чувашова, 2018). Механическое смешение контрастных магм на этих полях рассматривалось как показатель времени структурных перестроек. На Витимском поле, в базанитовых и фонотефритовых потоках Береинского центра, находятся линзы тефрифонолитового состава. Неоднородный состав лав свидетельствует о проявлении смешения магматических расплавов в процессе извержений при структурной перестройке около 0.6 млн лет назад, в результате которой вулканизм Витимского поля угас. На Удоканском поле неполное смешение расплавов контрастного состава маркирует структурные перестройки в Центральной вулканоструктуре около 3.5 млн лет назад, в Северной вулканоструктуре около 2.6 млн лет назад и в Западной вулканоструктуре – около 9.8–8.78 тыс. лет назад. Извержение вулкана Долинный имеет высокую эксплозивность с выбросом мелкообломочной трахитовой пемзы, местами насышенной овальными включениями частично раскристаллизованного базитового материала. Такое извержение вызывается резким выделением летучих компонентов, спрововнедрением цированным щелочнобазальтового расплава в малоглубинную магматическую камеру при трахитовую смене напряженного состояния коры.

Пространственно-временные соотношения умеренно- и низко-Mg вулканических пород поля Удаляньчи контролируется развитием субмеридиональной зоны транстенсии, активность которой начинается с извержений потоков Лаошантоу и Древний Гелацюшан 2.5-2.0 млн лет назад в ее осевой части. По мере продвижения извержений Центральной группы вулканов с югозапада на северо-восток зона вулканизма последовательно расширяется на ее обоих флангах через промежуточные фоновые извержения, начавшиеся 1.3-0.8 млн лет назад, к более обширным извержениям Западной и Восточной групп вулканов в последние 0.6 млн лет (рис. 10).


Рис. 11. Пространственное распределение низко- и умеренно-Мg вулканических пород в ходе развития транстенсии на поле Удаляньчи. *а* – начальная стадия 2.5–2.0 млн лет назад, *б* – промежуточная стадия 1.3–0.8 млн лет назад, *в* – продвинутая стадия последних 0.6 млн лет. КИЗЛ – компонент источника Западного Молабушана, КИМ – компонент источника, подобного источнику Молабу. Из работы (Rasskazov et al., 2020) с дополнениями.

Fig. 11. Spatial distribution of low- and moderate-Mg volcanic rocks in the Wudalianchi field. a – the initial stage of 2.5–2.0 Myr ago, b – the intermediate stage of 1.3–0.8 Myr ago, c – the advanced stage of the last 0.6 Myr. KU3JI – component of the Western Molabushan source, KUM – component of the Molabu-like source. Modified after (Rasskazov et al., 2020).

В интервале 2.5–2.0 млн лет назад на поле Удаляньчи извергаются расплавы трахиандезитов и низко-Мg трахиандезибазальтов, в интервале 1.3–0.8 млн лет назад – низко-Mg расплавы, среди которых проявляются более щелочные фонотефриты, а в последние 0.6 млн лет – низко- и умеренно-Mg трахиандезибазальты и фонотефриты. В мигрировавших к северо-востоку извержениях Центральной группы вулканов состав продуктов вулканических извержений меняется от трахиандезитов Лаошантоу через низко-Mg трахиандезибазальтыфонотефриты вулкана Уохушан и ассоциацию низко- и умеренно-Mg трахиандезибазальтов-фонотефритов, разделенных по фазам активности вулканов Бидзиашан и Лаохейшан, к умеренно-Mg трахиандезибазальтам-фонотефритам конуса Хуошаошан (Rasskazov et al., 2016).

Магнезиальность расплавов возрастает с течением времени в ходе эволюции субме-

ридиональной зоны транстенсии. Продукты начальных и промежуточных извержений имеют низко-Mg состав; в продуктах поздних извержений проявляются расплавы умеренно-Mg состава. По отношению к начальным извержениям, максимальный контраст достигается в мигрировавших извержениях Центральной группы на вулкане Хуошаошан и в фоновых извержениях Восточной группы на вулканах Лонгменшан и Молабушан.

Ранние фоновые вулканы поля Удаляньчи характеризуются в целом преобладающим низко-Мg составом. В Восточной группе к ним относятся вулканы Западный Дзяодебушан и Западный Лонгменшан. Низко- и умеренно-Мg породы поздних вулканов Лонгменшан и Молабушан разделены между собой по фазам активности. Низко-Мg породы находятся не только в западном конусе вулкана Лонгменшан, но и в потоке вулкана Молабушан. Умеренно-Mg породы характеризуют конусы вулканов Молабушан и Восточный Лонгменшан.

По представленным в настоящей работе данным вулканы Восточный Дзяодебушан и Сяогушан Восточной группы отличаются от других вулканов этой группы совместным проявлением в извержениях низко- и умеренно-Мд магматических расплавов. С одной стороны, смешанная ассоциация таких пород вулканов Восточный Дзяодебушан и Сяогушан находится между конусами ранних вулканов низко-Мд пород Западный Дзяодебушан и Западный Лонгменшан. С другой стороны, эти вулканы со смешанной ассоциацией пород сменяются к северу вулканами Восточный Лонгменшан и Молабушан с индивидуализированными извержениями умеренно-Мд магм.

Смещение по времени вулканической активности от Восточного Дзяодебушана к Сяогушану отражается в различном петрогенезисе продуктов извержений. Под Восточным Дзяодебушаном, извергающемся раньше, смешиваются контрастные магматические расплавы, под вулканом Сяогушан – уже смешанные расплавы промежуточного состава контаминируются перидотитовым материалом и фракционируют с отделением оливина. Смещение извержения вулкана Сяогушан на 6 км к востоку-северо-востоку, относительно постройки Восточного в общем, совпалает Дзяодебушана, С направлением смещения извержений в Центральной группе вулканов с юго-запада на северо-восток. Скачок извержений от постройки Дзяодебушан к постройке Сяогушан Восточной группы соответствует скачку извержений от постройки Уохушан к постройке Бидзиашан Центральной группы около 0.4 млн лет назад.

Фактически, в Восточной группе вулканов проявляется процесс пространственновременной смены состава магматических расплавов, ярко выраженный в Центральной группе вулканов. Контрастные расплавы смешиваются при перестройке глубинной магматической системы около 0.6 млн лет назад (до 0.4 млн лет назад), в результате которой к низко-Mg магмам присоединяются магмы умеренно-Mg состава.

Принадлежность расплавов к источникам разновозрастных протолитов

По изотопным отношениям Pb, протолиты источников разных вулканов поля Удаляньчи имеют разный возраст. Во временном интервале 2.5-2.0 млн лет назад в Центральной и Западной группах вулканов активизируются литосферные источники, (соответственно, Лаошантоу и Гелацю) с Рьизотопным возрастом протолита 1.88 млрд лет. Затем, 1.3-0.4 млн лет назад, а на вулкане Уохушан извергается материал из источника Уоху с Рb-изотопным возрастом протолита около 0.15 млрд лет, стартующим около 150 млн лет назад от источника Гелацю. В последние 0.6 млн лет проявляют активность источники Хуо и Молабу с более молодыми протолитами (100 млн лет и четвертичным) (Rasskazov et al., 2016, 2020).

На изохронной диаграмме Pb пять фигуративных точек низко-Mg пород вулкана Восточный Дзяодебушан и все точки низко-Mg пород вулкана Сяогушан концентрируются в компактном фигуративном поле, перекрывающем составы Pb низко-Mg пород Западного Логменшана, близкого по Pbизотопным характеристикам к источнику Гелацю. Протолит этого источника (КИЗЛ), вероятно, формировался на основе протолита источника Гелацю в комплементарном соотношении с протолитом источника низко-Mg пород потока Молабушан. U и Pb могли перераспределяться из протолита Гелацю флюидами с относительным обогащением и обеднением этими элементами.

Часть точек низко-Mg пород вулкана Восточный Дзяодебушан и три точки умеренно-Mg пород этого вулкана смещаются вправо, вдоль линии молодого источника Хуо. Точки умеренно-Mg пород Восточного Дзяодебушана сопоставляются по интервалу отношения ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb с породами из четвертичного источника Молабу. Точки, рассеянные выше линии источнику Хуо, могут принадлежать источнику Уоху.

Мы видим, что породы вулкана Сяогушан являются производными протолита источника, подобного протолиту с наименее радиогенным Pb источника низко-Мg пород Восточного Дзяодебушана. Ограниченный диапазон Рb пород Сяогушана свидетельствует о поступлении расплавов опробованной южной части постройки из ограниченной области протолита КИЗЛ. Точка породы с повышенным содержанием MgO (обр. СН-15-05) вулкана Сяогушан лишь слегка смещается ниже поля низко-Mg пород этого вулкана. Точка дифференцированной породы из потока в основании этого вулкана (обр. СН-16-280) сильно сдвинута вдоль линии источников Лаошантоу и Гелацю. Такой сдвиг свидетельствует о контаминации расплавов вулкана Сяогушан материалом древнего протолита, подобного материалу протолитов этих источников (рис. 12).



Рис. 12. Диаграмма отношений ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb – ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb для пород восточной группы вулканов Удаляньчи в сравнении с породами из более древних лавовых потоков.

Fig. 12. Diagram of ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb versus ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb ratios for rocks from the Eastern group of the Wudalianchi volcanoes compared to those from older lava flows.

Заключение

На вулканическом поле Удаляньчи Северо-Восточного Китая установлены факты механического смешения расплавов контрастного состава в продуктах извержений вулканов Восточный Дзяодебушан и Сяогушан. Эти вулканы принадлежат Восточной группе. Первый извергался в интервале 0.87–0.43 млн лет назад, второй – 0.38–0.24 млн лет назад. Из возрастных соотношений вулканов следует, что процесс смешения контрастных магм сначала имел место под Восточным Дзяодебушаном, затем – под Сяогушаном с контаминацией кристаллическим перидотитовым материалом и кристаллизационным фракционированием. Смещение извержения вулкана Сяогушан на 6 км к

востоку-северо-востоку, относительно вулкана Восточного Дзяодебушана, в общем соответствовало направлению смещения извержений в Центральной группе вулканов с юго-запада на северо-восток. Скачок извержений от постройки Дзяодебушан к постройке Сяогушан соответствовал скачку извержений от постройки Уохушан к постройке Бидзиашан около 0.4 млн лет назад.

На основе полученных Рb-изотопных характеристик предполагается, что расплавы Восточного Дзяодебушана извергались в результате плавления разновозрастных (преимущественно молодых) протолитов и могли взаимно смешиваться под этим вулканом, тогда как расплавы Сяогушана были контаминированы кристаллическим материалом древних перидотитов. На обоих вулканах смешивались расплавы, поступающие из модифицированной части источника Гелацю (КИЗЛ). Под вулканом Восточный Дзяодебушан в плавление дополнительно вовлекались протолиты, подобные протолитам источников Уоху и Хуо. Рb-изотопный состав умеренно-Мд расплавов Восточного Дзяодебушана несколько отличался от состава четвертичного источника Молабу.

Смешение расплавов явилось следствием перестройки глубинной магматической системы, охватившей интервал, судя по имеющимся К–Аг датировкам, от 0.9 до 0.2 млн лет назад. Прецизионные геохронометрические определения активности вулканов могут сократить этот интервал и дать более точную оценку перестройки глубинной магматической системы под вулканами Восточной группы.

Благодарности

Работа Китайсковыполнена в Российском исследовательском центре Удаляньчи-Байкал по вулканизму и окружающей среде. Методические подходы к анализу источников вулканических пород частично разработаны при выполнении госзадания ИЗК СО РАН на 2021-2025 гг. «Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии» (FWEF-2021-0009). Петрогенные оксиды определялись химика-Бондаревой ми-аналитиками Г.В. И М.М. Самойленко в ИЗК СО РАН, массспектрометрические измерения изотопов Pb – H.C. Герасимовым на приборе МС-ІСР-MS Neptune Plus в геохимическом ЦКП Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, состав микроэлементов – методом ИСП-МС на масс-спектрометре Agilent 7500се в ЦКП Лимнологического института «Ультрамикроанализ» А.П. Чебыкиным.

Литература

Рассказов С.В. Базальтоиды Удокана. Новосибирск: Наука, 1985. 142 с.

Рассказов С.В., Чувашова И.С. Вулканизм и транстенсия на северо-востоке Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2018. 384 с.

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

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.

Blake D.H., Biwell R.W., Gibson I.L. et al. Some relationship resulting from the intimate association of acid and basic magmas // Quart. J. Geol. Soc. Lond. 1965. V. 121, pt. 1. P. 31–49.

Cordier C., Benoit M., He'mond C., Dyment J., Le Gall B., Briais A., Kitazawa M. Time scales of melt extraction revealed by distribution of lava composition across a ridge axis // Geochem. Geophys. Geosyst. 2010. Vol. 11. http://dx.doi.org/10.1029/ 2010GC003074.

Guide book for field mission to Wudalianchi National Park, China. Prepared by Wudalianchi National Park and Nature Management Committee Heilongjiang province. 2010. 50 p.

Le Bas M.J., Streckeisen A.L. The IUGS systematics of igneous rocks // J. Geol. Soc. London. 1991. V. 148. P. 825–833.

Liu J., Han J., Fyfe W.S. Cenozoic episodic volcanism and continental rifting in northeast China and possible link to Japan Sea development as revealed from K–Ar geochronology // Tectonophysics. 2001. Vol. 339. P. 385–401. http://dx.doi.org/ 10.1016/J.TECTO.2004.07.029 Liu J., Taniguchi H. Active volcanoes in China // Northeast Asian Studies. 2001. Vol. 6. P. 173–189.

Peate D.W., Baker J.A., Jakobsson S.P., Waight T.E., Kent A. J.R., Grassineau N.V., Skovgaard A.C. Historic magmatism on the Reykjanes Peninsula, Iceland: A snap-shot of melt generation at a ridge segment // Contrib. Miner. Petrol. 2009. Vol. 157. P. 359–382. http://dx.doi.org/10.1007/s00410-008-0339-4

Rasskazov S., Sun Y-M., Chuvashova I., Yasnygina T., Yang C., Xie Z., Saranina E., Gerasimov N., Vladimirova T. Trace-element and Pb isotope evidence on extracting sulfides from potassic melts beneath Longmenshan and Molabushan volcanoes, Wudalianchi, Northeast China. Minerals. 2020. V. 10: 319; doi:10.3390/min10040319

Rasskazov S. V., Chuvashova I. S., Sun Yi-min, Yang Chen, Xie Zhenhua, Yasnygina T. A., Saranina E. V., Zhengxing Fang Sources of Quaternary potassic volcanic rocks from Wudalianchi, China: Control by transtension at the lithosphere– asthenosphere boundary layer // Geodynamics & Tectonophysics. 2016. Vol. 7, No. 4. P. 495–532.

Rudge J.F., Maclennan J., Stracke A. The geochemical consequences of mixing melts from a heterogeneous mantle // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2013. Vol. 114. P. 112–143.

Sethna S.P., Battiwala H.K. Hybridization effects in contemporaneous eruption of trachytic and basaltic magmas in Salsette, Bombey // N. Jb. Mineral. Mh. 1976. № 11. P. 495–507.

Stracke A., Zindler A., Salters V., McKenzie D., Blichert-Toft J., Albarede F., Gronvold K. Theistareykir revisited // Geochem. Geophys. Geosyst. 2003. Vol. 4. P. 8507. http://dx.doi.org/10.1029/ 2001GC000201.

Stracke A., Bourdon B. The importance of melt extraction for tracing mantle heterogeneity // Geochim. Cosmochim. Acta. 2009. Vol. 73. P. 218–238. http://dx.doi.org/10.1016/ j.gca.2008.10.015.

Sundermeyer C., Gätjen J., Weimann L., Wörner G. Timescales from magma mixing to eruption in alkaline volcanism in the Eifel volcanic felds, western Germany // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2020. Vol. 175. P. 77. https://doi.org/10.1007/s00410-020-01715-y Wang Y., Chen H. Tectonic controls on the Pleistocene-Holocene Wudalianchi volcanic field (northeastern China) // Journal of Asian Earth Sciences. 2005. Vol. 24. P. 419–431.

Wang Y., Mu L., Liu W. Regularity and characteristic of volcanic activity at Wudalianchi, Heilongjiang // 30th International Geological Congress. Beijing, China, 1996. 14 p.

Waters C.L., Sims K.W.W., Perfit M.R., Blichert-Toft J., Blusztajn J. Perspective on the genesis of E-MORB from chemical and isotopic heterogeneity at 9–10 N East Pacific rise // J. Petrol. 2011. Vol. 52. P. 565–602. http://dx.doi.org/10.1093/petrology/egq091.

Yoder H.S.J. Contemporaneous basaltic and rhyolitic magmas // Am. Mineral. 1973. V. 58, № 3–4. P. 153–171.

Zhang M., Suddaby P., Thompson R.N. et al. Potassic rocks in NE China: geochemical constraints on mantle source and magma genesis // J. Petrology. 1995. Vol. 36, No. 5. P. 1275–1303.

Zhao Y-W., Li Ni., Fan Q-C., Zou H., Xu Y-G. Two episodes of volcanism in the Wudalianchi volcanic belt, NE China: Evidence for tectonic controls on volcanic activities // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2014. Vol. 285. P. 170–179. dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.016.

References

Rasskazov S.V. Basaltoids of Udokan. Novosibirsk: Nauka, 1985. 142 p.

Rasskazov S.V., Chuvashova I.S. Volcanism and transtension in the northeast of the Baikal rift system. Novosibirsk: Academic Publishing House "Geo", 2018. 384 p.

Sizykh Yu.I. General scheme of chemical analysis of rocks and minerals. Report. Institute of the Earth's Crust Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. Irkutsk, 1985. 50 p.

Yasnygina T.A., Markova M.E., Rasskazov S.V., Pakhomova N.N. Determination of rare earth elements, Y, Zr, Nb, Hf, Ta, Ti in standard samples of the DV series by ICP-MS // Factory Laboratory. Diagnostics of materials. 2015. Vol. 81, No. 2. P. 10– 20.

Чувашова Ирина Сергеевна,

кандидат геолого-минералогических наук, 664025 Иркутск, ул. Ленина, д. 3, Иркутский государственный университет, геологический факультет, Доцент кафедры динамической геологии, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, старший научный сотрудник, тел.: (3952) 51–16–59, email: chuvashova@crust.irk.ru. Chuvashova Irina Sergeevna, candidate of geological and mineralogical sciences, Senior Researcher, 664025 Irkutsk, Lenin st., 3, Irkutsk State University, Faculty of Geology, Associate Professor of the Dynamic Geology chair, 664033 Irkutsk, Lermontov st., 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS, Senior Researcher, tel.: (3952) 51-16-59, email: chuvashova@crust.irk.ru.

Сунь И-мин,

Научный сотрудник, Институт природных ресурсов и экологии Хэйлунцзянской академии наук, Харбин, Китай. Sun Yi-min, Research scientist, Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin, China, e-mail: 894817259@qq.com.

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор, 664025 Иркутск, ул. Ленина, д. 3, Иркутский государственный университет, геологический факультет, заведующий кафедрой динамической геологии, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, заведующий лабораторией изотопии и геохронологии, тел.: (3952) 51–16–59, email: rassk@crust.irk.ru. **Rasskazov Sergei Vasilievich,** doctor of geological and mineralogical sciences, professor, 664025 Irkutsk, Lenin st., 3, Irkutsk State University, Faculty of Geology, Head of Dynamic Geology Char,

664033 Irkutsk, Lermontov st., 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS, Head of Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies, tel.: (3952) 51–16–59, email: rassk@crust.irk.ru.

Ясныгина Татьяна Александровна,

кандидат геолого-минералогических наук, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, старший научный сотрудник, тел.: (3952) 51–16–59, email: ty@crust.irk.ru. **Yasnygina Tatyana Alexandrovna,** candidate of geological and mineralogical sciences, Senior Researcher, 664033 Irkutsk, Lermontov st., 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS, tel.: (3952) 51–16–59, email: ty@crust.irk.ru.

Саранина Елена Владимировна,

кандидат геолого-минералогических наук, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, ведущий инженер, 664033 Иркутск, ул. Фаворского, д. 1 "А", Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, email: e_v_sar@mail.ru. Saranina Elena Vladimirovna, candidate of geological and mineralogical sciences, 664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS, Lead Engineer, 664033 Irkutsk, st. Favorskogo, 1 "A", A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, email: e_v_sar@mail.ru.

Неотектоника, геоморфология

УДК 911.52(079.3) https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.116

Ландшафтоформирующая литогенно-геоморфологическая основа горного массива Мунку-Сардык (Восточный Саян)

С.Н. Коваленко

Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. На основе более 20-летних исследований даются систематически обработанные подробные сведения о геолого-геоморфологических (литолого-геоморфологических) условиях формирования ландшафтов высокогорного массива Мунку-Сардык, а также их рабочая классификация.

Ключевые слова: литолого-геоморфологические основы высокогорных ландшафтов, горный массив Мунку-Сардык, детальные полевые геолого-геоморфологические исследования

Landscape-forming lithogenic-geomorphologic basis of the Munku-Sardyk mountain massif (Eastern Sayan)

S.N. Kovalenko

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Abstract. On the basis of more than 20 years of research, systematically processed detailed information on geological-geomorphological (lithological-geomorphological) conditions of formation of landscapes of the high-mountainous Munku-Sardyk massif is given, as well as their working classification.

Keywords: lithological and geomorphological bases of high-mountain landscapes, Munku-Sardyk mountain massif, detailed field geological and geomorphological studies.

Здесь не будут рассмотрены геохимические ореольные ландшафты, которые зависят от характера полей рассеяния химических компонентов, определяемого составом и строением покрова четвертичных образований, составом коренных пород, гидрогеологическими условиями и поведением химических Элементов в зоне гипергенеза, классификация которых основана на учете трех основных процессов формирования полей рассеяния (литогенном, хемогенном и гидрогенном) и их сочетаний, определяющих соотношения между механическим, солевым и гидравлическим перераспределением компонентов источника полезных веществ. В этих ландшафтах существенное значение имеет и степень стационарности

ления равновесия между различными процессами в зоне гипергенеза. Она зависит от возраста ландшафта (нестационарность в известной мере соответствует молодости ландшафта) и неотектонического режима региона. В качестве основы выделения и описания современных высокогорных ландшафтов горного массива Мунку-Сардык мы взя-ЛИ последние геологические, геоморфологические, палеогляциологические, гидрогеологические, гидрологические погодно-климатические исследования, И проведенных нами в последние десятилетие (Коваленко, 2011, 2011а, 2013, 2014, 2014а, 2016, 2016а, 2019, Коваленко и др., 2013; Коваленко, Акулова, 2021, 2022, 2022а; Ко-

процессов рассеяния, т. е. степени установ-

валенко, Гергенов, 2022, 2022а, 2022б; Коваленко, Кушнер, 2018; Коваленко, Лихтарович, 2021; Коваленко, Мункоева, 2013, 2014, 2014а; Мункоева, Коваленко, 2014; Суворов, Китов, 2013, 2017). Описание многочисленных разновидностей литогенной основы высокогорных ландшафтов будет произведено в соответствии с вертикальной зональностью, начиная с самых высокогорных вариантов. Такой подход сделал возможным поновому подойти к описанию и выделению современных высокогорных ландшафтов района, уточнить и дополнить литогенную их основу, основанную на вышеперечисленных геологических исследованиях.

Как было доказано ранее (Коваленко, Коваленко, Мункоева, 2013a; Акулова, 2022а, Коваленко, Гергенов, 2022) территория горного массива примыкающая к г. Мунку-Сардык имеет вертикальную зональность Экзогенных процессов, начало сформирования которой, очевидно, было заложено после гипертермального периода 6 тыс. лет тому назад и которые определяют до настоящего времени формирование всех современных типов рельефа, гидрологических процессов и ландшафтов (от древнего к современному): **II**) перигляциальная или снежная (нивальная или надледниковая) верхняя ступень развития современных перигляциальных процессов физического выветривания и снежников, развивающихся гипсометрически выше и/или в непосредственной близости у современных ледников и каменных глетчеров; Г) ледниковая или гляциальная современных гляциальных процессов — в пределах гляциальных процессов современных ледников и каменных глетчеров первых стадий деградации; Т) термальная ступень деградации каменных глетчеров; Э) эрозионная ступень развития солифлюкционных, высокогорно-наледных, мерзлотно-каменных горных потоков, селевых потоков и эрозионной деятельности горных рек. Направление перемещения границ Этих зон на современном межледниковом периоде осуществляется по направлению к главному хребту, т. е. вверх.

При разработке настоящей темы возникла необходимость рассмотреть литогенную основу ландшафтов развитых на терри-

ториях с рельефом и отложениями древних лелников окинского времени, которые сформировали свои структуры задолго (более 7 тыс. лет тому назад) до формирования современной вышеуказанной вертикальной зональности. Этот комплекс в верхних своих частях частично распространяется в пределы термальной зоны и полностью перекрывает эрозионную. Кроме того, в пределах него развиты структуры палеоледников 6-8-го СВУК (Коваленко, 2011). В связи с чем пришлось рассматривать ее в качестве реликтовой надзоны (О) с гибридными литогенными и геоморфологическими разновидностями.

В пределах этой зональности и в соответствии с формируемыми на каждой ступени форм рельефа и геологических отложений (литологических комплексов) и следует рассматривать литолого-геохимическую основу систематики современных горных ландшафтов высокогорного района горного массива Мунку-Сардык.

Итак, на территории горного массива Мунку-Сардык самыми высокогорными литогенными или литогенногеоморфологическими образованиями следует считать перигляциальные (П), которые развиваются выше и в непосредственной близости вокруг современных гляциальных образований (ледников с открытыми частями льда и каменных глетчеров, находящихся на первой стадии формирования). Это, прежде всего, самый гипсометрически высокий водораздельный хребтовый комплекс главного хребта с абсолютными высотами выше 3300 м (рис. 1), к которому следует отнести все скальные геологические образования, сложенные близкими по геологогеохимическим характеристикам гранитоидными, ортометаморфическими и динамометаморфическими эндогенными образованиями (гранитогнейсами, гранитами, пегматиразнообразными тектонитами) тами И подвергающимися в настоящее время только физическому выветриванию и никогда экзарационному воздействию современных ледников: гранитами (Пх_у), метаморфическими силикатными (Пх_{Si}) и их динамометаморфическими разновидностями (Пх_{tSi}, Пх_{ty},) (тектонитами). Что интересно, здесь отсутствуют геологические основания представленные осадочными или параметаморфическими породами. Акккумуляционная рыхлая составляющая из-за узости хребтов. представлена коллювиальными (Пх_{ко}) и элювиальными (Пх_е) образованиями, на которых развиваются специфические перевальные ландшафты, любимые туристами, альпинистами и путешественниками.

Склоновые участки представлены теми же разновидностями, но с явлениями более интенсивного денудационного воздействия: гранитами (Π сд_γ), метаморфическими силикатными (Π сд_{Si}) и их динамометаморфическими разновидностями (Π сд_{tSi}, Π сд_{tγ}), (тектонитами). Что интересно, здесь отсутствуют геологические основания представленные осадочными или парамета-

морфическими породами. Эти участки в большинстве своем являются областями сноса при формировании осыпных морен современных ледников. По результатам выветривания и денудации комплекс подразделяется, в основном, на денудационные скальные склоны, описанные чуть выше, и аккумуляционную рыхлую составляющую. Последняя из-за крутизны склонов имеет небольшое значение и представлена коллю- $(\Pi ca_{\kappa o}),$ виальными дерупционнодесперсными (Псадер-дес) и лавинными (Псалав) образованиями. Все эти участки, как водораздельные, так и склоновые, в большинстве своем, являются областями сноса при формировании осыпных морен современных ледников и каменных глетчеров.



Рис. 1. Скалы главного хребта перигляциальной зоны, ф. 2374 от 27.07.2009. **Fig. 1.** Rocks of the main ridge of the periglacial zone, f. 2374 dated 27.07.2009.

К следующему более низкому по абсолютным высотам комплексу мы относим территории занятые современными гляциальными образованиями (Γ) развивающимися, как и в перигляциальном комплексе, на близком по геолого-геоморфологическим характеристикам гранитоидном, ортометаморфическом и динамометаморфическом эндогенном основании (гранитогнейсы, граниты, пегматиты и разнообразные тектониты) подвергающемся в настоящее время нивальному экзарационному экзогенному воздействию ледников и снежников с развитием следующих ландшафтных литогенных разновидностей:

Гол — открытой части льда современных ледников в современных карах (ледники Перетолчина, Южный, Радде, Пограничный);

Гкг — погребенного (гляциального) льда под маломощным чехлом осыпных морен каменных глетчеров в коротких трогах и карах, находящихся, как правило, на первой стадии (по Л.Н. Ивановскому, 1981) деградации (каменные глетчеры Бабочка, Энтузиастов, Рыжий, Жохойский, Сибирской Дивизии). Направление медленного движения погребенного направлено льда вдоль простирания короткого трога, что приводит к формированию сложного западинногрядового рельефа с живыми (неустойчивыми осыпающимися) стенками, преобладающими продольными рвами-промоинами часто вскрывающими погребенный лед, заполненные снежниками, и превращающиеся со временем в своеобразные зандровые поляны и мелководные озера с песчаным дном (озера Песчаное, Провальное и ряд других мелких и безымянных);

Гсн — многочисленных небольших снежных полей, распространенных как и в пределах открытого льда, где они довольно быстро превращаются в фирн, пополняя баланс ледника, так и в пределах каменных глетчеров и в нижних частях скальных кулуаров, по которым скатываются снежные массы. Иногда на пологих частях рельефа образуют зачаточные снежные ниши с выровненными снежными полянами и формированием зачаточного водного стока;

 Γc — близко расположенные к ледникам и снежникам окружающие части склонов, как и перигляциальные территории, испытывающие активное влияние ледников и снежников, окружающие вышеописанные в этой зоне разновидности, сложенные скальными геологическими породами: гранитами (Γc_{γ}), габбро-диоритами ($\Gamma c_{v\delta}$), диоритами (Γc_{δ}), метаморфическими силикатными (Γc_{5i}) и их динамометаморфическими разновидностями (тектонитами) в большей своей части могут представлять из себя с геоморфологической точки зрения курчавые скалы ($\Gamma c_{\gamma-\kappa}$, $\Gamma c_{\gamma\delta-\kappa}$, $\Gamma c_{\delta-\kappa}$, $\Gamma c_{Si-\kappa}$) или отдельные бараньи лбы ($\Gamma c_{\gamma-6ap}$, $\Gamma c_{\gamma\delta-6ap}$, $\Gamma c_{\delta-6ap}$, Γc_{Si-6ap}), окруженные осыпными моренами (ΓM). Все эти участки в большинстве своем являются областями сноса при формировании осыпных морен современных ледников.

В пределах термальной зоны (Т) выделяется комплекс карово-троговых форм реобразованный палеоледниками льефа Древне-Северным, ВСГАО, Древне-Рыжим, Авиастроитель, 60 лет победы ВОВ, XXVI Партсъезда, Геологов, Звериным, Банным и многими другими, описанными ранее в статье С.Н. Коваленко, Ю.В. Акуловой (2022). Эти глетчеры находятся на второй — четвертой стадиях деградации Л.Н. Ивановского и отражают закономерную абляционную последовательность прекращения процессов гляциальной деятельности на территории в современный межледниковый период. Граница их распространения определяет нижнюю границу термальной зоны. В основных троговых долинах (по Бел. Иркуту, Мугувеку, Среднему Иркуту и Жохою верхние части склонов долин, как правило, несут следы обработки более древними ледниками (см. Коваленко, Акулова, 2022а, с. 132, рис. 3) окинского времени О комплекса, рассмотренного ниже — своеобразные крутосклонные курчавые скалы и плечи трогов (Окс и Октр). Это долинный карово-троговый комплекс ледников низовий современных речных долин 6-8-го СВУК, предположительно смешанного регрессивно-возрожденного типа оледенения с дополнительной подпиткой от нестаявших частей покровного Окинского ледника. Этот комплекс отступающих ледников добавил к Vобразным долинам подледникового заложения вложенные троги, чем окончательно сформировал их современный корытообразный облик.

В этом комплексе на территории исследования выделяются следующие морфогенетические разновидности литогенногеоморфологических оснований высокогорных ландшафтов:

Тм_{ос} — поверхности и склоны осыпных морен палеоледников 2-5-го СВУК, внутри которых сохраняется гляциальный и инфильтрационный (конжеляционный) лед, медленное движение которого перпендикулярно простиранию долины приводит к формированию сложного западинногрядового рельефа с живыми (неустойчивыми осыпающимися) стенками;

То — палеоледниковых каровых озер (Эхойское, Солярис, Высокое, Квадратное, Егоровское и многие другие, разбросанные по всей территории термальной зоны. Это как правило глубокие и в большинстве своем промерзающие до дна озера, с прибрежными сильно увлажненными выровненными пониженными участками с полигональными морозобойными трещинами (То_{мрз}) (Коваленко, Гергенов, 2022б, с. 130).

Тс — склоновые денудационные скальные территории (в центре долин они, как правило, представляют собой курчавые скалы (Тсду-к) вокруг палеоледниковых озер) и аккумуляционные рыхлые обломочные, окружающие вышеуказанные разновидности, сложенные скальными геологическими породами: гранитами (Тсд_у), габбродиоритами (Тсд_{νδ}), диоритами (Тсд_δ), метаморфическими силикатными (Тсд_{Si}), карбонатными (Tca_{Ca}) и их динамометаморфическими разновидностями (Тсд_{tSi}, Тсд_{tCa}, Тсд_{ty}, Тсді и т. п.) (тектонитами) и аккумуляционными рыхлыми отложениями: коллювиальными (Тсако), дерупционными (обвальными) (Тса_{дер}), десперсионными (осыпи) (Тса_{десп}), делювиальными (Тса_д), десербционными (криогенный и термогенный) (Тсадес).

Тсн — небольшие снежники развиты на поверхности каменных глетчеров (снежник руч. Заозерного, выше оз. Эхой) в трещинахпровалах и промоинах и довольно широко распространены. У отдельных крупных снежников имеются даже тальвег-водосток талых вод, например, у снежника № 1 в верховьях Среднего Иркута;

В пределах эрозионной ступени (Э) развития селевых потоков, склоновых процессов и эрозионной деятельности горных рек на территории исследования выделяются следующие морфогенетические разновидности литогенно-геоморфологических оснований высокогорных ландшафтов:

Эм — бывшие крупноглыбовые осыпные морены (Эм_{ос}), местами абляционные (Эм_а) с антицедентными субгоризонтальны-

бугристоми слабо-наклонными И западинные поверхностями и устойчивыми задернованными бортами и склонами 6-8-го СВУК (верхние части уровня безлесные, а ниже границы леса — покрытые лесом — Эмосл и Эмал), внутри которых гляциальный и инфильтрационный (конжеляционный) лед давно исчез, частично размытые селевыми процессами пролювиальных конусов выноса (см. Эп). Сюда же следует отнести борта и крутые склоны моренных валов, представленные открытыми крупно-глыбовыми каменными курумами (Эмку) и их залесенными аналогами (Эмкул);

Этр — троги палеоледников 6-8 СВУК: их плечи Этр_{пл}, покрытые маломощными моренами Этр_{пла} и с цокольными поверхностями Этр_{плц} и скальными или задернованными поверхностями склонов (Этр_{ск});

Эка — каровые структуры, представленные скальными стенками (Эка_{ск}) и выровненными каровыми днищами (Эка_д);

Эп_{конк} — пролювиальные мощные аккумуляционные конуса выноса катастрофических селевых потоков, осложненные маломощными современными пролювиальными (селевыми) потоками (Эп_{совр}) (Коваленко, Гергенов, 2022);

Эмрз — мерзлотный аккумуляционный комплекс, к которому мы относим территории с проявлениями мерзлотных процессов, развивающихся, в основном на почвах и в рыхлых осадочных породах экзогенного происхождения за счет кремнистокарбонатных, кремнистых И слюдистокварцевых слабометаморфизованных пород, гранитов, диоритов и габбро-диоритов и их динамометаморфически измененных аналогах с развитием следующих ландшафтных литогенных разновидностей: — солифлюксий заболоченных участков и увлажненных тундровых террасок выше границы леса с морозобойными трещинами, а в зоне леса террасы с пьяным лесом и извилистыми морозобойными трещинами, на более крутых склонах возможные трещины отпора в сползающем по замёрзшему или не успевшему оттаять весной ледяному грунту (Эмрзсол); участки проявления и развития; мерзлотно-

каменных горных потоков (Эмрзкгп) формируемых в основном из склонового обломочного материала с существенной долей перлювиального материала из морен на плечах трогов 6-го СВУК так и формирующихся на основе склоновых отложений (Активный) с конжеляционным подземным льдом, так и перекрытых пролювием катастрофических селей (Таборный) и с движением материала по ложбинам висячих палеоледников 6-7-го уровней перпендикулярно основной долине с формированием долго живущих обрывов, живых осыпей (см. Эсажо), суффозионных промоин, оврагов и воронкообразных западин, озерков (Эмрзкгп-суф) (см. подробно Коваленко, Гергенов, 2022, с. 122-124), движущихся к краю своего уничтожения к живой осыпи, реликтовых частей заросших лесом (Эмрзкгп-л) и новообразованных заболоченных участков, заполненных рыхлым склоновым осыпным материалом (своеобразные осыпные «морены») (Эмрзкп-ос) каменистые или покрытые молодым лиственничным подростом (кедры на таких местах с почти отсутствующей почвой не селятся, как не селятся пока и на современных пролювиальных и аллювиальных отложениях) с кустами разбитыми многочисленными продольными и поперечными раздвиговыми и провальными трещинами провалами, а также залесенных участков похожих на оползни с остановившимся или дискретным движением в прошлом (Эмрзкгп-оп-л) с кедроволиственничным реликтовым густым лесом; высокогорных пойменных речных наледных полян (Эмрз_{нп}) с зарождающимися (Эмрз_{ност}) или реликтовыми (исчезающими) наледными островами — остатками террас (см. Эт) и боковых грунтовых наледей с грунтовым питанием и с существенной долей перлювиального материала из вышележащих по склону палеогляциальных и древне-селевых (катастрофических) образований (От, Эгл, Эгк, Эпс);

Эт — террасовый надпойменный аккумуляционный аллювиальный комплекс, представленный наледными и чисто речными, разновидностями, которые выше границы леса безлесные или тундровые (Эт_{нт} и Эт_{рт}), а ниже заросшие лесом или боровые (Эт_{нб} и Эт_{рб});

Эс — склоновые участки с разновидностями: скальные с денудационными процессами и участки с аккумуляционными процессами накопления рыхлых обломочных образований. Первые сложены скальными геологическими породами: гранитами (Эсд_ν), габбро-диоритами (Эсд_{νδ}), диоритами метаморфическими силикатными (Эсд_δ), (Эсд_{Si}), карбонатными (Эсд_{Ca}) и их динамометаморфическими разновидностями (Эсд_{tSi}, Эсд_{tCa}, Эсд_{ty}, Эсд_t и т. п.) (тектонитами), вторые — аккумуляционными конусами осыпей: присклоновых коллювиальными дерупционными (обвальными) $(\Im ca_{\kappa o}),$ (Эса_{дер}), десперсионными: (Эса_{десп}), делювиальными (Эсад), десербционными (криогенные и термогенные подтипы) (Эсалес), живыми осыпями (Эсажо) с постоянным движением осыпающегося материала поставляемого МКГП (Белоиркутная в левом борту р. Бел. Иркут, Большая Мугувекская в левом борту каньона Мугувека).

Реликтовый комплекс геологогеоморфологических ландшафтных основ для района исследований (О) это геоморфологические структуры Окинского плоскогорья (рис. 2) оставшиеся от древних ледников окинского времени оледенения, начиная с покровного ледника и заканчивая последними отступающими крупными языками перед термальным максимумом, которые при совместной эрозионной деятельности с подледными реками заложили основные долины Vобразного поперечного профиля рр. Иркута, Белого и Среднего Иркутов, Мугувека, Буговека и Жохоя.



Рис. 2. Ландшафт южной части Окинского плоскогорья, ф. 4720 от 31.07.2010. **Fig. 2.** Landscape of the southern part of the Oka plateau, f. 4720 dated 31.07.2010.

В пределах этой зоны можно выделить следующие разновидности геолого-геоморфологических ландшафтных основ:

Ок — курчавых скал, хорошо выделяюсубгоризонтальных обработанных щихся ледником скальных поверхностей различных гранитоидов в виде пологих куполовидных вершин, на вершинах которых лежат огромные эрратические валуны, а склоны несут на своей поверхности ледниковые борозды и фрагменты краевых боковых морен (см. Ом) (фото) и небольших хребтиков-водоразделов среди обводненных мелко-озерных заболоченных пространств Окинского плоскогорья (Коваленко, Гергенов, 2022а, рис. 1), представляющих в большинстве своем флювиогляциально-пролювиальные отложения отступающих ледников (см. Тм, Эп); сюда же следует отнести и своеобразные склоновые фрагментарные плечи и склоны самых высоких трогов и их стенок в пределах долин рек, т. е. своеобразных крутосклонных курчавых скал (Окск и Октр) в значительной степени преобразованных склоновыми процессами склоновые разновидности геолого-(см. геоморфологических основ ландшафтов эрозионного Э и частично термального Т типа),

развитые в пределах термальной и эрозионной зон;

Ом — прислоненные к склонам пологих куполовидных вершин полосы маломощных морен, моренные холмы и гряды, местами подпруживающие водные потоки с образованием болотистых ложбин, мощные плейстоценовые моренные отложения в верховьях рек Нижняя Ишунда и Бажир;

Омрз — гидролакколиты, термокарстовые воронки и промоины, развивающиеся, в основном, в пределах моренного комплекса (Ом), мерзлотные каменные формы рельефа, являющиеся результатом структурной солифлюкции: солифлюкционные террасы, полосатые (дели), отражающие медленные смещения каменного материала, ячеястые, отражающие более быстрые скорости смещения солифлюксия (Коваленко, Гергенов, 20226, с. 129–130).

Сведения о ландшафтных геологогеоморфологических условиях формирования ландшафтов высокогорного массива Мунку-Сардык позволяют дать их рабочую классификацию (таблица) и использовать ее для определения благоприятности проведения геологосъемочных и геолого-поисковых работ в горных районах.

Таблица

Сводная таблица геолого-геоморфологических основ высокогорных ландшафтов горного массива Мунку-Сардык

Зона	Наименование ос- новы	Индексы	Геолого-геоморфологические признаки						
	Скальные водо- разделы	$ \begin{array}{l} \Pi x_{\gamma}, \Pi x_{Si}, \\ \Pi x_{tSi}, \Pi x_{t\gamma} \end{array} $	Гранитоиды, ортометаморфические породы силикатного состава и их динамометаморфические разновидности (тектониты)						
(E)	Скальные верши- ны	$ \begin{array}{l} \Pi B_{\gamma}, & \Pi B_{Si}, \\ \Pi B_{tSi}, \Pi B_{t\gamma} \end{array} $	Скальные вершины, возвышающие над хребтами сло- женные как выше теми же разновидностями пород						
щиальная	Водораздельные элювиально- коллювиальные образования	Пх _е Пх _{ко}	Аккумуляционный рыхлый элювий перевалов и около скальный коллювий						
Перигля	Скальные денуда- ционные склоны	Псд _ү , Псд _{tү} , Псд _{Si} , Псд _{tSi} ,	Денудационные скальные склоны сложенные гранитои- дами: разнообразными гранитами и их тектонитами, ор- тометаморфитами существенно силикатного состава и их тектонитами						
	Аккумуляционные присклоновые об- разования	Пса _{ко} , Пса _{дер-} дес, Пса _{лав}	Аккумуляционные коллювиальные шлейфы и осыпи, де- рупционно-десперсные осыпи, лавинные осыпи						
	Открытые части ледников	Гол	Открытый лед ледников, фирн, снежные осовы и снеж- ники						
T)	Погребенные лед- ники — каменные глетчеры	Гкг	Каменные глетчеры с маломощной осыпной мореной, грядово-западинной поверхностью, воронкообразными, линейными провалами и промоинами с неустойчивыми (осыпающимися) бортами						
Гляциальная (]	Снежники	Гсн	В виде многочисленных небольших снежных полей, рас- пространенных как в пределах открытого льда, где они довольно быстро превращаются в фирн, пополняя баланс ледника, так и в пределах каменных глетчеров и в ниж- них частях скальных кулуаров, по которым скатываются снежные массы						
	Окружающие склоны	$ \begin{array}{l} \Gamma c_{\gamma}, \ \Gamma c_{t\gamma}, \ \Gamma c_{\gamma\text{-}\kappa}, \\ \Gamma c_{\nu\delta}, \qquad \Gamma c_{t\nu\delta}, \\ \Gamma c_{\gamma\delta\text{-}\kappa}, \qquad \Gamma c_{\delta}, \\ \Gamma c_{t\delta}, \ \Gamma c_{\delta\text{-}\kappa}, \ \Gamma c_{Si}, \\ \Gamma c_{tSi}, \ \Gamma c_{Si\text{-}\kappa}, \end{array} $	Гранитоиды: разнообразные граниты и их тектониты, ор- тометаморфиты существенно силикатного состава и их тектониты						
	Осыпных морен палеоледников 2- 5-го СВУК	Тмос	Сложный западинно-грядовый рельеф крупно-глыбовых морен с живыми (неустойчивыми осыпающимися) стен- ками						
	Снежники	Тсн	Отмечаются на поверхности каменных глетчеров (снеж- ник руч. Заозерного, выше оз. Эхой) в трещинах- провалах и промоинах						
ая (Т)	Палеоледниковых каровых озер	То	Глубокие и в большинстве своем промерзающие до дна озера с прибрежными сильно увлажненными выровнен- ными пониженными участками с полигональными мо- розобойными трещинами						
	Склоновые дену- дационные скаль- ные территории	$\begin{array}{ll} Tc_{{{\cal A}}_{\gamma}\text{-}\kappa}, & Tc_{\gamma}, \\ Tc_{\nu\delta}, & T{\it A}c_{\delta}, \\ Tc{\it A}_{Si}, & Tc{\it A}_{Ca}, \\ Tc{\it A}_{tSi}, & Tc{\it A}_{tCa}, \\ Tc{\it A}_{t\gamma}, & Tc{\it A}_{t\delta} \end{array}$	Курчавые скалы сложенные гранитами, габбро- диоритами, диоритами, метаморфическими силикатными, карбонатными и их динамометаморфическими разновид- ностями (тектонитами)						
Термальн	Склоновые терри- тории занятые рыхлыми аккуму- ляционными ком-	$ \begin{array}{l} Tca_{\kappa o}, & Tca_{\pi e p}, \\ Tca_{\pi e c}, & Tca_{\pi}, \\ Tca_{\pi e c} \end{array} $	Рыхлые коллювиальные, дерупционные (обвальные), десперсионные (осыпи), делювиальные, десербционные (криогенный и термогенный)						

	плексами							
Эрозионная (Э)	Крупноглыбовых осыпных и абля- ционных морен 6- 8-го СВУК	Эм _{ос} , Эм _а , Эм _{осл} , Эм _{ал} , Эм _{ск}	Антицедентные бугристо-западинные с устойчивыми за- дернованными бортами субгоризонтальные и слабо- наклонные поверхности и склоны, а также борта и кру- тые склоны плечей трогов представленные открытыми крупно-глыбовыми каменными курумами и скалами. Верхние части уровня безлесные, а ниже границы леса — покрытые лесом					
	Палеотроги (пле- чи и склоны)	Этр, Этр _{пл} , Этр _{пла} , Этр _{плц}	 троги палеоледников 6-8 СВУК: их плечи покрытые маломощными моренами и с цокольными поверхностями и скальными или задернованными поверхностями скло- нов (Этр_{ск}) 					
	Каровых структур	Экаск, Экад	Скальные стенки и выровненные площадки в долинах рек, бывших каровых днищ					
	Пролювиальные мощные аккуму- ляционные конуса выноса	$\exists \Pi_{kat}, \exists \Pi_{cobp}$	Катастрофические селевые потоки, осложненные мало- мощными современными потоками					
	Мерзлотный ак- кумуляционный комплекс	Эмрз _{сол} , Эмрз- _{кпт} , Эмрз _{кпп-с} , Эмрз _{кпп-о} , Эмрз _{кпп-о} , Эмрз _н , Эмрз _{н-} , Эмрз _{н-к} , Эмрз _{н-к} , Эмрз _{н-с} , Эмрз _{н-с} , Эмрз _{нт} , Эмрз _{но}	 солифлюксий заболоченных участков и увлажненны тундровых террасок выше границы леса с морозобойны ми трещинами, а в зоне леса — террасы с пьяным лесом извилистыми морозобойными трещинами, на более кр тых склонах возможные трещины отпора в сползающе по замёрзшему или не успевшему оттаять весной лед ному грунту; участки проявления и развития мерзлотно-каменны горных потоков с конжеляционным подземным льдо как перекрытых пролювием катастрофических селей (Т борный) с небольшой подпиткой осыпным склоновы материалом, так с обильной подпиткой склоновым мат риалом (Активный) и с движением материала по ложб нам висячих палеоледников 6–7-го уровней перпендик лярно основной долине с формированием долго живущи обрывов, живых осыпей (см. Эса_{жо}), суффозионных пр моин, оврагов и воронкообразных западин, озерков, р ликтовых частей заросших лесом и новообразованны заболоченных участков, заполненных рыхлым склон вым осыпным материалом (своеобразные осыпные «м рены»), каменистые или покрытые молодым лиственни ным подростом с кустами разбитыми многочисленным продольными и поперечными раздвиговыми и провал ными трещинами провалами, а также деляпсий оползн вых залесенных участков с остановившимся или ди кретным движением в прошлом с кедров лиственничным реликтовым густым лесом; высокогорных наледей (наледных полян) развитых пределах пойм рек, на наледных террасах, на пролюв альных конусах выноса, и скальных поверхностях с э рождающимися или реликтовыми (исчезающими) нале ными островами — остатками террас (см. Эт) и боковы грунтовых наледей с грунтовым питанием и с суш ственной долей перлювиального материала из вышел жащих палеогляциальных и древне-селевых (катастроф ческих) образований 					
	I еррасовый надпойменный аккумуляционный аллювиальный комплекс	Эт _н Эт _р Эт _{нт} Эт _{рт} Эт _{нб} Эт _{рб}	Представлен наледными и чисто речными, разновидно- стями, которые выше границы леса безлесные или тунд- ровые, а ниже заросшие лесом или боровые					
	Склоновый ком- плекс	$\begin{array}{cccc} \Im c \pi_{\gamma}, & \Im c \pi_{v\delta}, \\ \Im c \pi_{\delta}, & \Im c \pi_{Si}, \\ \Im c \pi_{Ca}, & \Im c \pi_{Si}, \\ \Im c \pi_{tCa}, & \Im c \pi_{t\gamma}, \end{array}$	Скальные с денудационными процессами и участки с ак- кумуляционными процессами накопления рыхлых обло- мочных образований. Первые сложены скальными геоло- гическими породами: гранитами, габбро-диоритами, дио-					

		Эсд _{tð} , Эса _{дер} Эса _д , Эса _{жо}	, Эс Э	Эса _{ко} , а _{десп} , са _{дес} ,	ритами, метаморфическими силикатными, карбонатными и их динамометаморфическими разновидностями (текто- нитами), вторые — коллювиальными, дерупционными (обвальными), десперсионными (конусами присклоновых осыпей), делювиальными, десербционными (криогенные и термогенные подтипы), живыми осыпями с постоян- ным движением осыпающегося материала поставляемого МКГП (Белоиркутная в левом борту р. Бел. Иркут, Боль- шая Мугувекская в левом борту каньона Мугувека)
Реликтовая надзона (О)	Комплекс древних ледников окин- ского времени оледенения	Ок, С Ом, С	Юк _{ск} , мрз	Ок _т , От	Курчавые скалы, хорошо выделяющиеся на субгоризон- тальных обработанных покровным ледником скальных поверхностях различных гранитоидов в виде пологих ку- половидных вершин, на вершинах которых лежат огром- ные эрратические валуны, а склоны несут на своей по- верхности ледниковые борозды и фрагменты краевых бо- ковых морен (см. Ом) и небольших хребтиков- водоразделов среди обводненных мелко-озерных заболо- ченных пространств Окинского плоскогорья (Коваленко, Гергенов, 2022a, рис. 1), представляющих в болышинстве своем флювиогляциально-проловиальные отложения от- ступающих ледников (см. Тм, Эп); сюда же следует отне- сти и своеобразные склоновые фрагментарные плечи и склоны самых высоких трогов и их стенок (От) в преде- лах долин рек, т. е. своеобразных крутосклонных курча- вых скал в значительной степени преобразованных скло- новыми процессами (см. склоновые разновидности гео- лого-геоморфологических основ ландшафтов эрозионного Э и частично термального Т типа своеобраз- ные крутосклонные курчавые скалы и плечи трогов, раз- витые в пределах термальной и эрозионной зон; присло- ненные к склонам пологих куполовидных вершин полосы маломощных морен, моренные холмы и гряды, местами подпруживающие водные плейстоценовые моренные отло- жения в верховьях рек Нижняя Ишунда и Бажир; гидро- лакколиты, термокарстовые воронки и промоины, разви- вающиеся, в основном, в пределах моренного комплекса (Ом), мерзлотные каменные формы рельефа, являющиеся результатом структурной солифлюкции: солифлюкцион- ные террасы, полосатые (дели), отражающие медленные более быстрые скорости смещения солифлюксия (Кова- ленко, Гергенов, 20226, с. 129–130)

В заключение необходимо остановиться на некоторых особенностях описанной силандшафтной стемы геологогеоморфологической систематики. Разновидности литолого-геоморфологических комплексов основ ландшафтов и их признаки четко следуют выявленной вертикальной зональности, они как бы успевают вписаться в нее, что, конечно, не правильно, вернее сказать, они ее определяют, а вот растительные, гидрогенные несколько отстают. Так мерзлотные солифлюкционные ландшафты развиваются в гипсометрически верхней части эрозионной зоны (2300-2350 м) и являются своеобразной переходной разновидностью мерзлотных процессов очень похожих на процессы термальной зоны. Развитие гидрогенных наледных процессов, зависящих от степени промерзания грунтовых вод, уже отстают (2200 м) и не достают до верхнего предела эрозионной зоны. Лесные ландшафты еще больше отстают (2100 м), хотя единичные экземпляры довольно зрелых лиственниц иногда поднимаются выше наледей к самой верхней границе зоны (2300 м). Причем, развитие кедровых сообществ отстает от развития лиственничных на 10-30 м, хотя в регионах довольно зрелого развития или длительного существования эрозионной зоны (хр. Хамар-Дабан) кедры распространяются по вертикали выше лиственниц.

В ближайших последующих выпусках журнала будет подготовлена следующая статья, в которой приведем детальные картографические фрагменты геологогеоморфологических основ высокогорных ландшафтов горного массива Мунку-

Литература

Иванов Е.Н. Особенности изменения нивально-гляциальных геосистем горного обрамления юга России // Изв. Иркут. гос. ун-та, сер. «Науки о Земле». 2011. Т. 4, № 2. С. 90–106. Электрон. версия печат. публ. – Режим доступа: http://isu.ru/ru/publication/izvestia/article.html?artic le=_0b3663e5392c4e4cb368e405ba70fc2d&journal =_d7abbf4b3ed74d03acb5fdd2053a2d0c (21 марта 2024).

Иванов Е.Н. Динамика нивальногляциальных геосистем гор юга Восточной Сибири : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.23 / Е.Н. Иванов ; науч. рук. В.М. Плюснин ; Ин-т географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. Иркутск, 2013. 22 с.

Иванов Е.Н. Динамика снежно-ледовых геосистем гор юга Восточной Сибири. Иркутск : Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015. 125 с.

Ивановский Л.Н. Гляциальная геоморфология гор (на примере Сибири и Дальнего Востока). Новосибирск : Наука, 1981. 173 с.

Китов А.Д. Особенности трансформации и самоорганизации нивально-гляциальных горных геосистем // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2021. Т. 35. С. 33–43. DOI: org/10.26516/2073-3402.2021.35.33.

Китов А.Д., Коваленко С.Н. Палеоклиматический анализ палеоледниковых и мерзлотнокаменных образований горного массива Мунку-Сардык (Восточный Саян) // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М. : Географический факультет МГУ. 2021. Т. 27. Ч. 3. С. 136–150. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-136-150.

Коваленко С.Н. Гляциальная геоморфология района г. Мунку-Сардык. Статья 1. Формы локального оледенения долин рек Мугувек и Белого Иркута // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. гос. академии образования. 2011. № 1 (2). Сардык, построенные для каждого морфогенического высотного уровня. На этих картах будут показаны принципы их графического представления и визуализации современных ландшафтов при помощи интерактивных ГИС-технологий.

С. 38–62. Электрон. версия печат. публ. Режим доступа: http://www.twirpx.org/file/701108/ (21 марта 2024).

Коваленко С.Н. Гляциальная геоморфология района г. Мунку-Сардык. Статья 2. Формы локального оледенения долин рек Бугота, Буговек, Средний Иркут и Жохой // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. гос. академии образования. 2011а. № 2 (3). С. 48–59.

Коваленко С.Н. Гляциальная геоморфология района г. Мунку-Сардык. Статья 3. Статистический геоинформационный анализ форм локального оледенения // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. государственной академии образования. 2013. № 1-2 (7). С. 47–62. Электрон. версия печат. публ. Режим доступа: http://www.twirpx.org/file/1691935/ (21 марта 2024).

Коваленко С.Н. О границах и объемах современного оледенения района г. Мунку-Сардык (Восточный Саян) // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. государственной академии образования. 2014. № 1 (9). С. 19–31.

Коваленко С.Н. К уточнению параметров карово-трогового комплекса в районе горы Мунку-Сардык // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. государственной академии образования. 2014а. № 2–3 (10). С. 75–77. Электрон. версия печат. публ. Режим доступа: http://www.twirpx.org/file/1691916/ (22 декабря 2022).

Коваленко С.Н. К возрасту рельефа в районе горы Мунку-Сардык (Восточный Саян) // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. государственной академии образования. 2014б. № 4 (11). С. 56–65. Электрон. версия печат. публ. Режим доступа: http://www.twirpx.org/file/1691910/ (22 марта 2024).

Коваленко С.Н. К выделению каменных глетчеров в районе горы Мунку-Сардык // Байкал-Родина-Планета / Материалы Т Всероссийской научно-практической конференции (г. Иркутск, 21-22 октября 2016 г. Иркутск : Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2016. С. 32–35.

Коваленко С.Н. Рельефообразующая роль высокогорных наледей хребта Мунку-Сардык // Байкал-Родина-Планета / Материалы II Всероссийской научно-практической конференции (г. Иркутск, 21–22 октября 2016 г. Иркутск : Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2016а. С. 35–38.

Коваленко С.Н. Орогенез в количественных параметрах гляциальной геоморфологии горного массива Мунку-Сардык // Рифтогенез, орогенез и сопутствующие процессы : материалы IV Всероссийского симп. с участием иностранных ученых, посвящ. 90-летию со дня рождения академика Н.А. Логачева. Иркутск, 14–15 октября 2019 г. Иркутск : Изд. ИЗК СО РАН, 2019. С. 75–77.

Коваленко С.Н. Некоторые особенности и геоморфологические признаки палеоледников и палеоснежников горного массива Мунку-Сардык DOI 10.26516/2541-9641.2023.4.182 // Геология и окружающая среда : Электрон. науч. журн. 2023. Т. 3, № 4. С. 182–196.

Коваленко С.Н. «Каменный глетчер» Белого Иркута / С.Н. Коваленко, А.Д. Китов, Э.В. Мункоева, Н.А. Зацепина // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. государственной академии образования. 2013. № 1-2. С. 29–37. Электрон. версия печат. публ. Режим доступа: http://www.twirpx.org/fПle/1691935/ (21 марта 2024).

Коваленко С.Н., Акулова Ю.В. Высокогорные криогенные литопотоки района горы Мунку-Сардык // Байкал-Родина-Планета: Материалы VП Всероссийской научно-практической конференции (г. Иркутск, 29–30 октября 2021 г.). Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2021. С. 56–61.

Коваленко С.Н., Акулова Ю.В. Каменные глетчеры горного массива Мунку-Сардык // Геология и окружающая среда : Электрон. науч. журн. 2022. Т. 2, № 1. С. 135–153. DOI 10.26516/2541-9641.2022.1.135.

Коваленко С.Н., Акулова Ю.В. Криогенные литопотоки горного массива Мунку-Сардык // Геология и окружающая среда : Электрон. науч. журн. 2022а. Т. 2, № 2. С. 128–138. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.128.

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 : Электрон. науч. журн. 2022. Т. 2, № 3. С. 120–132. DOI 10.26516/2541-9641.2022.3.120.

Коваленко С.Н., Гергенов И.И. Опыт выделения современных и древних снежников горного массива Мунку-Сардык // Геология и окружающая среда : Электрон. науч. журн. 2022а. Т. 2, № 3. С. 133–148. DOI 10.26516/2541-9641.2022.3.133.

Коваленко С.Н., Гергенов И.И. Высокогорные формы рельефа горного массива Мунку-Сардык // Геология и окружающая среда : Электрон. науч. журн. 20226. Т. 2, № 4. С. 122– 140. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.122.

Коваленко С.Н., Кушнер А.В. Денудационноаккумуляционные формы высокогорного рельефа горного массива Мунку-Сардык // Байкал-Родина-Планета / Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Иркутск, 9–10 ноября 2018 г. Иркутск : Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2018. С. 31–33.

Коваленко С.Н., Лихтарович Э.В. Геологическая деятельность наледей в районе горы Мунку-Сардык (Восточный Саян) // Геология и окружающая среда : Электрон. науч. журн. 2021. Т. 1, № 1. С. 74–86. DOI 10.26516/2541-9641.2021.1.80.

Коваленко С.Н., Мункоева Э.В., Зацепина Н.А. Климат района Мунку-Сардык (Восточный Саян) // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. государственной академии образования. 2013. № 1-2. С. 15–23. Электрон. версия печат. публ. Режим доступа: http://www.twirpx.org/file/1691935/ (21 марта 2024).

Коваленко С.Н., Мункоева Э.В. Типы горного рельефа и происхождение наледей в районе горы Мунку-Сардык // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. государственной академии образования. 2013а. № 3-4 (8). С. 24–44. Электрон. версия печат. публ. Режим доступа: http://www.twirpx.org/file/1691928/ (22 марта 2024).

Коваленко С.Н., Мункоева Э.В. Некоторые морфометрические параметры и характеристика наледей района г. Мунку-Сардык // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. государственной академии образования. 2014. № 1 (9). С. 54–68.

Коваленко С.Н., Мункоева Э.В. Гидрологические исследования 2014 г. в районе горы Мунку-Сардык // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. государственной академии образования. 2014а. № 2-3 (10). С. 53-60. Электрон. версия печат. публ. Режим доступа: http://www.twirpx.org/file/1691916/ (22 марта 2024).

Мункоева Э.В., Коваленко С.Н. Объемы наледей в высокогорном районе горы Мунку-Сардык // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. государственной академии образования. 2014. № 2-3 (10). С. 64–66. Электрон. версия печат. публ. Режим доступа: http://www.twirpx.org/file/1691916/ (22 марта 2024).

Суворов Е.Г., Китов А.Д. Ландшафтная структура юго-восточной части Восточного Саяна // География и природные ресурсы. 2013. № 4. С. 107–114.

Суворов Е.Г., Китов А.Д. Изменчивость природных условий перигляциальной зоны массива Мунку-Сардык (Восточный Саян) // География и природ. ресурсы. 2017. № 1. С. 152–162.

Суворов Е.Г., Китов А.Д., Новицкая Н.И. Динамика распространения древесной растительности в перигляциальной зоне массива Мунку-Сардык (Восточный Саян) // Проблемы изучения и сохранения растительного мира Евразии: Материалы II Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти Л.В. Бардунова (1932-2008 гг.) (Иркутск, Кырен, 11–15 сентября 2017 г.). Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2017. С. 137–139.

Шейнкман В.С., Антипов А.Н. Байкальская палеоклиматическая летопись: дискуссионные вопросы ее возможной корреляции с древними оледенениями гор Сибири // География и природные ресурсы. 2007. № 1. С. 5–13.

References

Ivanov E.N. Features of changes in nival-glacial geosystems of the mountainous frame of southern Russia // Izv. of Irkutsk State University, ser. "Earth Sciences". 2011. V. 4, No. 2. P. 90-106. Electron. version printed. publ. Mode of access: http://isu.ru/ru/publication/izvestia/article.html?artic le=_0b3663e5392c4e4cb368e405ba70fc2d&journal =_d7abbf4b3ed74d03acb5fdd2053a2d0c (March 21, 2024).

Ivanov E.N. Dynamics of nival-glacial geosystems of mountains in the south of Eastern Siberia : autoref. disc. ... Cand. of geogr. sciences : 25.00.23 / E.N. Ivanov ; scientific supervisor. V.M. Plusnin ; V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS. Irkutsk, 2013. 22 p.

Ivanov E.N. Dynamics of snow and ice geosystems of mountains in the south of Eastern Siberia. Irkutsk : Izd. of the Institute of Geography named after V.B. Sochava, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. V.B. Sochava SB RAS, 2015. 125 p.

Ivanovsky L.N. Glacial geomorphology of mountains (on the example of Siberia and the Far East). Novosibirsk : Nauka, 1981. 173 p.

Kitov A.D. Features of transformation and selforganization of nival-glacial mountain geosystems // Izvestia Irkutsk State University. Series Earth Sciences. 2021. V. 35. P. 33-43. DOI: org/10.26516/2073-3402.2021.35.33.

Kitov A.D., Kovalenko S.N. Paleoclimatic analysis of paleoglacial and permafrost-stone formations of the Munku-Sardyk mountain massif (Eastern Sayan) // InterKarto. InterGIS. Geoinformation support of sustainable development of territories: Proceedings of the International Conf. M. : Geography Department of Moscow State University. 2021. V. 27. PART 3. P. 136-150. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-136-150.

Kovalenko S.N. Glacial geomorphology of the Munku-Sardyk area. Article 1. Forms of local glaciation of the valleys of the Muguvek and White Irkut rivers // Bulletin of the Department of Geography, Vost.-Sib. State Academy of Education. 2011. No. 1 (2). C. 38-62. Electronic version of the printed version. access mode: http://www.twirpx.org/file/701108/ (March 21, 2024).

Kovalenko S.N. Glacial geomorphology of the Munku-Sardyk area. Article 2. Forms of local glaciation of the valleys of the Bugota, Bugovek, Sredny Irkut and Zhokhoi rivers // Bulletin of the Department of Geography, Vost.-Sib. State Academy of Education. 2011a. No. 2 (3). C. 48-59.

Kovalenko S.N. Glacial geomorphology of the Munku-Sardyk area. Article 3. Statistical geoinformational analysis of the forms of local glaciation // Bulletin of the Department of Geography, Vost.-Sib. State Academy of Education. 2013. No. 1-2 (7). P. 47-62. Electron. version printed. publ. access mode: http://www.twirpx.org/file/1691935/ (March 21, 2024).

Kovalenko S.N. On the boundaries and volumes of modern glaciation of the Munku-Sardyk area (Eastern Sayan) // Bulletin of the Department of Geography, Vost.-Sib. State Academy of Education. 2014. No. 1 (9). P. 19-31.

Kovalenko S.N. To clarify the parameters of the cow-tree complex in the area of Mount Munku-Sardyk // Bulletin of the Department of Geography, Vost.-Sib. State Academy of Education. 2014a. No. 2-3 (10). P. 75-77. Electronic version of printed publ. access mode: http://www.twirpx.org/file/1691916/ (December 22, 2022).

Kovalenko S.N. To the age of the relief in the area of Mount Munku-Sardyk (Eastern Sayan) // Bulletin of the Department of Geography of the Vost.-Sib. State Academy of Education. 20146. No. 4 (11). P. 56-65. Electron. version printed. publ. access mode: http://www.twirpx.org/file/1691910/ (March 22, 2024).

Kovalenko S.N. To the identification of stone glaciers in the area of Mount Munku-Sardyk // Baikal-Rodina-Planet / Proceedings of the T All-Russian scientific-practical conference (Irkutsk, October 21-22, 2016. Irkutsk : Izd. of the Institute of Geography named after V.B. Sochava of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. V.B. Sochava SB RAS, 2016. P. 32-35.

Kovalenko S.N. Relief-forming role of highmountain glaciers of the Munku-Sardyk Ridge // Baikal-Rodina-Planet / Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference (Irkutsk, October 21-22, 2016. Irkutsk : Izd. of the Institute of Geography named after V.B. Sochava of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. V.B. Sochava SB RAS, 2016a. P. 35-38.

Kovalenko S.N. Orogenesis in quantitative parameters of glacial geomorphology of the Munku-Sardyk mountain massif // Riftogenesis, orogeny and related processes : proceedings of the IV All-Russian Symposium with participation of foreign scientists, dedicated to the 90th anniversary of the birth of Academician N.A. Logachev. Irkutsk, October 14-15, 2019 Irkutsk : Izd. IZK SB RAS, 2019. P. 75-77.

Kovalenko S.N. Some peculiarities and geomorphologic features of paleoglaciers and paleosnowfields of the Munku-Sardyk mountain massif DOI 10.26516/2541-9641.2023.4.182 // Geology and Environment : Electronic scientific journal. 2023. V. 3, No. 4. P. 182-196.

Kovalenko S.N., Akulova Y.V. High-altitude cryogenic lithopotoks of the Munku-Sardyk Mountain area // Baikal-Rodina-Planeta: Proceedings of the VP All-Russian scientific-practical conference (Irkutsk, October 29-30, 2021). Irkutsk: Izd-vo IG SB RAS, 2021. P. 56-61.

Kovalenko S.N., Akulova Yu.V. Stone glaciers of the Munku-Sardyk mountain massif // Geology and Environment : Electronic scientific journal. 2022. V. 2, No. 1. P. 135-153. DOI 10.26516/2541-9641.2022.1.135.

Kovalenko S.N., Akulova Yu.V. Cryogenic lithocurrents of the Munku-Sardyk mountain massif // Geology and Environment : Electron. nauchn. zhurn. 2022a. V. 2, No. 2. P. 128-138. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.128.

Kovalenko S.N., Gergenov I.I. To the question about the sources of loose material, causes and places of origin of catastrophic mudflows in the area of the Munku-Sardyk mountain massif // Geology and Environment : Electron. scientific journal. 2022. V. 2, No. 3. P. 120-132. DOI 10.26516/2541-9641.2022.3.120.

Kovalenko S.N., Gergenov I.I. Experience in the identification of modern and ancient snowfields of the Munku-Sardyk mountain massif // Geology and Environment : Electron. scientific journal. 2022a. V. 2, No. 3. P. 133-148. DOI 10.26516/2541-9641.2022.3.133.

Kovalenko S.N., Gergenov I.I. High-altitude relief forms of the Munku-Sardyk mountain massif // Geology and Environment : Electronic scientific journal. 2022b. V. 2, No. 4. P. 122-140. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.122.

Kovalenko S.N., Kitov A.D., Munkoeva E.V., Zatsepina N.A. "Stone glacier" of the White Irkut // Bulletin of the Department of Geography of the Vost.-Sib. State Academy of Education. 2013. No. 1-2. P. 29-37. Electron. version printed. publ. mode of access: http://www.twirpx.org/fIIle/1691935/ (March 21, 2024).

Kovalenko S.N., Kushner A.V. Denudationaccumulation forms of high-mountain relief of the Munku-Sardyk mountain massif // Baikal-Rodina-Planet / Proceedings of the IV All-Russian scientific-practical conference with international participation (Irkutsk, November 9-10, 2018 Irkutsk : Izdvo In-ta geografiya im. V.B. Sochava SB RAS, 2018. P. 31-33.

Kovalenko S.N., Likhtarovich E.V. Geological activity of glaciers in the area of Munku-Sardyk Mountain (Eastern Sayan) // Geology and Environment : Electron. scientific journal. 2021. V. 1, No. 1. P. 74-86. DOI 10.26516/2541-9641.2021.1.80.

Kovalenko S.N., Munkoeva E.V., Zatsepina N.A. Climate of the Munku-Sardyk area (Eastern

Sayan) // Bulletin of the Department of Geography Vost.-Sib. State Academy of Education. 2013. No. 1-2. P. 15-23. Electron. version printed. publ. access mode: http://www.twirpx.org/file/1691935/ (March 21, 2024).

Kovalenko S.N., Munkoeva E.V. Types of mountain relief and the origin of glaciers in the area of Mount Munku-Sardyk // Bulletin of the Department of Geography of the East Siberian State Academy of Education. 2013a. No. 3-4 (8). P. 24-44. Electronic version of printed publ. access mode: http://www.twirpx.org/file/1691928/ (March 22, 2024).

Kovalenko S.N., Munkoeva E.V., Zatsepina N.A. Climate of the Munku-Sardyk area (Eastern Sayan) // Bulletin of the Department of Geography of the Vost.-Sib. State Academy of Education. 2013. No. 1-2. P. 15-23. Electron. version printed. publ. access mode: http://www.twirpx.org/file/1691935/ (March 21, 2024).

Kovalenko S.N., Munkoeva E.V. Some morphometric parameters and characterization of ice in the area of Munku-Sardyk // Bulletin of the Department of Geography, Vost.-Sib. State Academy of Education. 2014. No. 1 (9). P. 54-68.

Kovalenko S.N., Munkoeva E.V. Hydrological studies in 2014 in the area of Munku-Sardyk Mountain // Bulletin of the Department of Geography, East Siberian State Academy of Education. 2014a. No. 2-3 (10). P. 53-60. Electronic version of printed publ. access mode: http://www.twirpx.org/file/1691916/ (March 22, 2024). Munkoeva E.V., Kovalenko S.N. Volumes of glaciers in the high-mountain area of Munku-Sardyk Mountain // Bulletin of the Department of Geography, Vost.-Sib. State Academy of Education. 2014. No. 2-3 (10). P. 64-66. Electronic version of printed publ. access mode: http://www.twirpx.org/file/1691916/ (March 22, 2024).

Suvorov E.G., Kitov A.D. Landscape structure of the southeastern part of the Eastern Sayan // Geography and Natural Resources. 2013. No. 4. P. 107-114.

Suvorov E.G., Kitov A.D. Variability of natural conditions of the periglacial zone of the Munku-Sardyk massif (Eastern Sayan) // Geography and Natural Resources. 2017. No. 1. P. 152-162.

Suvorov E.G., Kitov A.D., Novitskaya N.I. Dynamics of distribution of woody vegetation in the periglacial zone of the Munku-Sardyk massif (Eastern Sayan) // Problems of studying and preserving the flora of Eurasia: Proceedings of the II All-Russian Conference with international participation, dedicated to the memory of L.V. Bardunov (1932-2008) (Irkutsk, Kyren, September 11-15, 2017). Irkutsk: Izd-vo IG SB RAS, 2017. P. 137-139.

Sheinkman V.S., Antipov A.N. Baikal paleoclimatic chronicle: discussion issues of its possible correlation with the ancient glaciations of the Siberian mountains // Geography and Natural Resources. 2007. No. 1. P. 5-13.

Коваленко Сергей Николаевич,

кандидат геолого-минералогических наук, 664025 Иркутск, ул. Ленина, д. 3, Иркутский государственный университет, геологический факультет, доцент кафедры динамической геологии, тел.: (3952)20-16-39, email: igpug@mail.ru. **Kovalenko Sergey Nikolaevich,** Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, 664025 Irkutsk, Lenin str., 3, Irkutsk State University, Faculty of Geology, Associate Professor of the Department of Dynamic Geology, tel.: (3952)20-16-39, email: igpug@mail.ru.

Экспедиции

УДК 910.2(079.3) https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.131

Экспедиции клуба Портулан в район г. Мунку-Сардык в 2022 году

А.Д. Китов¹, С.Н. Коваленко², И.И. Гергенов²

¹Институт географии им. В.Б. Сочавы, СО РАН, г. Иркутск, Россия ²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Подводятся итоги экспедиций 2022 года студенческо-преподавательского клуба «Портулан» в район горы Мунку-Сардык, в рамках которых были проведены полевые научные исследования нивально-гляциальных образований, речных и присклоновых наледей, склоновых форм рельефа и процессов их формирующих по долинам рек Белый Иркут, Мугувек, Буговек: режимные обследования высокогорных наледей, а также традиционно проводился мониторинг погоды и температурного режима на всем вертикальном размахе рельефа, изучение каменного потока «Активный» и летнего состояния ледников, наледей и снежников.

Ключевые слова: хребет Мунку-Сардык, наледи, снежники, нивально-гляциальные образования, научно-исследовательские работы студентов, режимные наблюдения за наледями, погода.

Portulan Club expedition to the Munku-Sardyk region in 2022

A.D. Kitov¹, S.N. Kovalenko², I.I. Gergenov²

¹Sochava Institute of Geography, CO RAS, Irkutsk, Russia ²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Abstract. We summarize the results of the 2022 expeditions of the student-teaching club "Portulan" to the Munchu-Sardyk mountain area, which included field scientific research of nival-glacial formations, river and near-slope aufeis, slope forms of relief and processes forming them in the valleys of the Bely Irkut, Muguvek, Bugovek rivers: regime surveys of high-mountainous aufeis, as well as traditionally conducted monitoring of weather and temperature regime over the entire vertical extent of the relief, study of the stone stream "Active" and summer condition of glaciers, aufeis and snowfields.

Keywords: Munku-Sardyk Ridge, aufeis, snowfields, nival-glacial formations, research work of students, regime observations of aufeis, weather.

В 2022 г. к горе Мунку-Сардык продолжились экспедиции предыдущих лет при участии членов клуба Портулан. Состоялось две экспедиции: 20-я весенняя и 21-я летняя. Первая прошла в период максимального развития нивально-гляциальных и мерзлотных процессов, вторая — во время минимального состояния ледников (июль-август). Изучаемая территория представлена на рис. 1.

В результате камеральной обработки материалов полевых исследований этого года с применением ГИС-технологий обработки космоснимков и топокарт были уточнены характеристики форм рельефа нивальногляциального, мерзлотно-солифлюкционноналедного и склонового характера, подробно описанных в последних статьях авторов (Коваленко, 2023; Коваленко, Акулова, 2022, 2022а; Коваленко, Гергенов, 2022, 2022а, 2022б).

20-я весенняя экспедиция

Экспедиция состоялась с 27 апреля по 6 мая 2022 г. (Двадцатая весенняя... 2024). В течение первых трёх дней была предпринята попытка георадарных исследований, и в течении семи дней — исследование наледных и склоновых процессов, а также мониторинг погодных условий. В организации экспедиции большую помощь оказали преподаватели каф. географии, безопасности жизнедеятельности и методики ПИ ИГУ, каф. динамической геологии геологического факультета ИГУ, фонда снежного барса Иркутского сельскохозяйственного университета. Непосредственно в экспедиции участвовало 20 человек: 3 из ИГ СО РАН, 2 из ИЗК СО РАН и 15 из клуба Портулан. Активное участие приняли члены РГО сотрудники ИГ СО РАН — с.н.с., кандидат технических наук А.Д. Китов и инженер-аспирант кандидат географических наук В.Н. Иванов; преподаватель Иркутского госуниверситета доцент, кандидат геолого-минералогических наук С.Н. Коваленко, н.с. ИЗК СО РАН Иван Александрович Денисенко.

Работа велась по следующим научным проблемам:

1. Геолого-географические особенности высокогорных наледей массива Мунку-Сардык, детально разрабатываемая с 2011 года. 2. Склоновый рельеф и процессы его формирующие.

3. Геологическая характеристика района исследований.

4. Метеорологический и температурный мониторинг погоды на разных высотных уровнях исследуемого района.

5. Георадарные исследования нивально гляциальных объектов: ледников, наледей и мерзлотно-каменных горных потоков.

Задачу по пятой научной проблеме — георадарное профилирование Южного ледника из-за погодных условий выполнить не удалось, а по проблемам 1–4 было сделано следующее:

Сотрудниками ИГ СО РАН произведена смена термохронов, отмечающих каждые три часа температуру воздуха в различных местах туристических маршрутов от устья Бел. Иркута до вершины Мунку-Сардык. Карта установки термохронов, по которым ведётся температурный мониторинг представлен на рис. 1. Ряд термохронов установлен в труднодоступных в данное время местах. Эти термохроны имеют большой объем память и позволяют накапливать данные в течение года. Поэтому их показания будут сняты во время летней экспедиции. В данной экспедиции считаны данные с термохронов с малым объёмом памяти, находящиеся в доступных местах и, которые необходимо заменить на современные термохроны. Данные получены с термохронов под номерами (см. рис. 1): 1, 2, 3, 4 и 11.

Ход температур представлен на рис. 2-6.



Рис. 1. Район исследования: *а* – фрагмент топокарты с местами установки термохронов; *б* – местоположение района (ключевой участок Мунку-Сардык).

1 – вершины; 2 – места установки термохрон (красные метки с номерами); 3 – места стоянок экспедиции; 4 – границы изменения ледников.

Fig. 1. Study area: a - topo map fragment with thermochron installation sites; b - location of the area (key site Munku-Sardyk).

1 - summits; 2 - thermochron installation sites (red marks with numbers); 3 - expedition camp sites; 4 - glacier change boundaries.



Рис. 2. Показания термосамописца на самой нижней высотной ступени района в долине р. Бел. Иркут, ниже ущелья Ворота Речки.

Fig. 2. Readings of the thermosampler at the lowest altitude stage of the area in the valley of the Bel. Irkut River valley, below the Rechka Gorge.



Рис. 3. Показания термосамописца в пойме р. Бел. Иркут вблизи устье руч. Ледяной.

Fig. 3. Readings of the thermosampler in the floodplain of the Bel. Irkut River floodplain near the mouth of Ledyanoy brook.



Рис. 4. Показания термосамописца в районе стрелки рек Муговек и Бел. Иркут. **Fig. 4.** Readings of the thermosampler in the area of the Mugovek and Bel. Irkut.



Рис. 5. Показания термосамописца на границе леса по р. Мугувек. **Fig. 5.** Thermosampler readings at the forest edge along the Muguvek River.



Рис. 6. Показания термосамописца на границе леса по Бел. Иркуту.

Fig. 6. Thermosampler readings at the forest boundary along the Bel. Irkut.

С. Коваленко со студентом первого курса Игорем Гергеновым проведены режимные ежегодные наблюдения за зимнем состоянием высокогорных наледей по долинам рек Бел. Иркут, Буговек, Ледяной. Наблюдения ведутся с 2002 г. Также проведено режимное ежегодное изучение состояния живой Белоиркутной осыпи (рис. 7), наблюдения за которой ведутся с 2009 года.



Рис. 7. Живая осыпь Белоиркутная весной 2022 г. В верхней части виден выдвигающийся блок мерзлых пород мерзлотно-каменного горного потока Активный, внизу по речной наледи проходит трасса всех туристических маршрутов, 5.05.2022, 18²⁰, ф. 2272-65.

Fig. 7. Beloirkutnaya live scree in the spring of 2022. In the upper part one can see the advancing block of frozen rocks of the permafrost-stone mountain stream Active, at the bottom the route of all tourist routes runs along the river ice, 5.05.2022, 18²⁰, ph. 2272-65.



Рис. 8. Выдвигающийся блок мерзлых пород мерзлотно-каменного горного потока Активный, 16.04.2022, 15²⁰, фото О. Безгодовой (Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН).

Fig. 8. Extending block of frozen rocks of the permafrost-rock mountain stream Active, 16.04.2022, 15²⁰, photo by O. Bezgodova (V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences).

Выдвигающаяся мёрзлая масса каменного потока ещё не обвалилась, наледи Красивой нет. Имеется глубокая промоина с правой стороны осыпи, где её обычно не бывает. Как и предсказывалось нами, произошло дальнейшее смещение подвижек материала горного потока со средней части на правую, что связано, вероятно, с уменьшением количества ледяной массы с правого края потока и как следствие прекращение выделения наледных вод наледи Красивой. Скатившихся камней на речной наледи по сравнению с предыдущими годами также не много.

Студенту первого курса ПИ ИГУ Игорю Гергенову предварительно определена тема НИРС и дипломной работы под названием «Природные опасности на туристических маршрутах в районе горного массива Мунку-Сардык и защита от них».

Взято 39 сроков метеозамеров за состоянием погоды в период прохождения экспедиции, отснято 141 снимков фотографий научного содержания, из них 8 панорам, 60 жанровых и пейзажных. Общий объем фотоматериалов RAW-формата составил 15.8 ГБ.

Общая характеристика условий работы

1. Было относительно тепло, ночью термометр опускался до минимальной температуры -6.9 °С (в ночь с 4 на 5 мая), а днем поднимался до 16 и 17.5 °С. Тёплые дни были 28–30 апреля, 2 мая, холодные 1, 4–5 мая. Снега было не много, вечером 3 мая шёл дождь, а снег вечером 4 мая.

2. Более строгий пограничный пропускной контроль. В 2–3 местах проверяли наличие пропусков и паспортов (на устье Ледяного, оз. Эхой и в п. Монды).

3. Так же много, как все последние годы, предприимчивых бурят на квадроциклах и буранах предлагало свои услуги по доставке рюкзаков и вещей до Стрелки. Из-за этого было много шума и выхлопных газов.

Наледи в этом году протяжённые и не столь мощные, видимо зима была довольно тёплая. Данные с минимального термометра Перетолчина (-30.1 °C), полученные летом, подтвердили эту догадку. Лёд наледи Лесной затопил все метки. Живая осыпь Белоиркутная в этом году без наледи Красивой или же она засыпана обломками, на льду речной наледи скатившихся камней довольно мало. Сама наледь высокая, ровная и широко разливается, доходя почти до автомобильного моста.

Достижения

1. Из научных успехов следует отметить, что не смотря на недостатки и трудности экспедиции было сделано:

1.1. Взято 39 метеорологических сроков на лагере Рязановского.

1.2. Произведено 141 научных снимков, из них 8 панорам, 60 жанровых и пейзажных общим объёмом в RAW 15.8 ГБ.

2. Шесть человек поднялись на вершину.

3. Почти все получили опыт поведения в приграничной полосе и взаимоотношений с пограничниками, т. е. на практике на собственной шкуре испытали все прелести приграничной горной 5-ти километровой полосы. Если вас обнаруживают в этой полосе без разрешения (пропуска), то на вас накладывается административное взыскание в виде штрафа 500 руб. и вы лишаетесь права получения пропуска в эту зону до 2-3 лет.

Те же правила действуют, если вас обнаружили в пограничной или приграничной полосе без паспорта, пример, Настя, которую продержали более 2-х часов и оформили административное взыскание.

4. Хорошая тёплая погода, всего одна ночь была –7 °С.

5. Тихие ночи лагеря Рязановского без ночного туристического шума на массовых лагерях Стрелки.

Недостатки

1. Заезжали тремя группами, из-за неправильно оформленных пропусков жили тремя лагерями. Оформлять необходимо, как это делалось всегда, коллективный пропуск. Изза разных сроков возвращения в Иркутск общественное оборудование и снаряжение заносится большим количеством человек, а выносится малым.

2. По выше указанной причине и программа НИРС была выполнена на 50 %.

3. Список продуктов, как правило составляется одним человеком, а варить приходиться другому, который даже часто не представляет для чего взято столько разнообразных продуктов.

Выводы

ХХ юбилейная экспедиция клуба Портулан в район г. Мунку-Сардык весной 2022 г. прошла довольно неудачно. Заезжали тремя группами, жили тремя лагерями. Сроки заезда и выезда для всех должны быть одинаковы. Исключение предоставлять максимум одному двум человекам.

Но так или несколько иначе XX экспедиция все же состоялась и завершилась без чрезвычайных происшествий.

21-я летняя экспедиция

В 2022 году летняя экспедиция Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН и клуба Портулан Иркутского госуниверситета состоялась 21 июля – 4 августа (Двадцать первая летняя... 2024). Участников было пятеро: Александр Китов, Влад Белоусов, Артем и Сергей Коваленко, Игорь Гергенов (студент первого курса ПИ ИГУ, уже побывавший возле Мунку-Сардык в мае этого года). Расклад и закупку продуктов делали А. Китов и С. Коваленко.

Сбор в Институте географии СО РАН назначили в 8⁰⁰, выезд сразу, как все соберутся. Но выехать, из-за поломки машины удалось только на следующий день. Вероятно, сработала примета — все опоздали к назначенному сроку, а обычно Сергей и Артем Коваленко приходили намного раньше.

В летних экспедициях как правило ведётся мониторинг основных ледников (Перетолчина и Радде) и исследуются процессы трансформации горных геосистем в связи с динамикой названных ледников. Проводятся климатические и погодные наблюдения на данной территории: наблюдения за изменением минимальной температуры по термометру, установленному С.П. Перетолчиным в 1900 г. (Перетолчин, 1908), регистрируется температура на разных высотных уровнях массива с помощью термохронов, проводятся режимные наблюдения погоды во время экспедиции в местах стоянок.

В 2022 г. были проведены очередные оценочные режимные наблюдения за летним состоянием многолетних наледей и многолетних снежников (уровень заснеженности оказался выше предыдущих лет), исследования динамики (мониторинг) ледников Перетолчина и Радде. Открытая часть ледников заметно увеличилась. Там, где в предыдущие годы можно было идти по камням, в настоящее время поднимались по фирну. Расширена сеть температурного наблюдения с помощью самописцев iButton (добавлены самописцы в устье р. Средний Иркут и в нижнем течении р. Буговек). Годовая средняя температура на высотных характерных участках показана на рис. 10. Номера мест установки термохронов (см. рис 1, 9, 10, табл. 1). Дополнительно установленные термохроны — № 14 и № 15.



Рис. 9. Средняя годовая температура (Тср) по возрастанию высоты (участки 1-13).

1 – Ворота Бел. Иркута, 1560 м; 2 – Устье р. Ледяной (выход из ущелья), 1690 м; 3 – Стрелка рек Бел. Иркут и Муговек, 1860 м; 4 – Лагерь под старой мореной до границы леса по Муговеку, 2120 м; 5 – Граница леса по Бел. Иркуту, 2160 м; 6 – граница леса по Муговеку, 2180 м; 7 – ригель с видом на Мунку-Сардык, 2330 м; 8 – перед подъёмом к оз. Эхой, под пер Горный, 2510 м; 9 – озеро Эхой, 2660 м; 10 – моренное поле ледника Радде, 2780 м; 11 – останец Фараон, термометр Перетолчина, низ открытой части ледн. Перетолчина, 2860 м; 12 – на лед. Радде у озера, 2970 м; 13 – Восточная предвершина Мунку-Сардык, 3470 м.

Fig. 9. Mean annual temperature (Tcp) by increasing elevation (plots 1-13).

1 – Gates of Bel. Irkut, 1560 m; 2 – Mouth of the Ledyanoy r. (exit from the gorge), 1690 m; 3 – Arrow of the Bel. Irkut and Mugovek, 1860 m; 4 – Camp under the old moraine up to the forest border along Mugovek, 2120 m; 5 – Forest border along Bel. Irkut, 2160 m; 6 – Forest border along Mugovek, 2180 m; 7 – Rigel with a view to Munku-Sardyk, 2330 m; 8 – Before ascent to Ekhoy Lake, under Gorny Per, 2510 m; 9 – Ekhoy Lake, 2660 m; 10 – Moraine field of Radde glacier, 2780 m; 11 – Faraon remnant, Peretolchin thermometer, bottom of the open part of the ice. Peretolchina, 2860 m; 12 – on the ice. Radde glacier near the lake, 2970 m; 13 – Eastern pre-top of Munku-Sardyk, 3470 m.

Таблица 1

Установленные термохроны

.

Table 1

	Installed	thermochrons		
№ п/п	Место установки	Номер термохрона	Средняя тем- пература, °С	Абсолютная высота, м
1	Ворота Речки (Бел. Иркут)	21CB0F31000001D	-2.4	1560
2	Руч. Леляной	21B44D320000043	-3.11	1690
3	Стрелка	212D1A3200000A0	-3.51	1860
4	Лагерь Дом-2	21B00431000000D	-4.34	2120
5	Граница леса по Бел. Иркуту	218F31310000092	-4.56	2160
6	Граница леса по Муговеку	C5000000788CFE41	-2.9	2180
	На летней тропе в точке первого вида на г.	E10000078814441		
7	Мунку–Сардык		-3.59	2330
8	Под пер. Горным	F8000000788CA041	-2.97	2510
9	Оз. Эхой	A90000078836841	-5.52	2660
10	Морены ледника Радде	A7000000787F0541	-6.9	2780
11	Вершина Фараон	0800000078861D41	-6.91	2860
12	Ледник Радде	04000000787D2C41	-4.93	2970
13	Гора Мунку–Сардык	7200000078858A41	-10.47	3470
14	Р. Ср. Иркут	C8_000003106D7_21	уст-н	1610
15	Лагерь Буговек-1	A_000000310E62_21	уст-н	1620



Рис. 10. Места установки термохронов: 1 – вершины; 2 – места установки термохрон (красные метки с номерами); 3 – места стоянок экспедиции; 4 – границы изменения ледников. Фон — космоснимок Landsat-8.

Fig. 10. Thermochron installation sites: 1 - summits; 2 - thermochron installation sites (red marks with numbers); 3 - expedition camp sites; 4 - glacier change boundaries. Background – Landsat-8 satellite image.

Минимальные температуры хотя и повысились на 5 градусов, но остались в пределах, наблюдаемых величин. Данные спиртового термометра Перетолчина показывали характерные абсолютные температуры. В 2022 году минимальная температура по термохрону, расположенному вблизи термометра Перетолчина, получилась на уровне верхних значений (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Тср	Дисп
-38.4	-33.2	-34.1	-35.5	-31.7	-30.8	-38.5	-35	-33.3	-35.5	-30.1	-33.7	4.9
-37.4	-30	-33.5	-28.5	-31.6	-30.2	-37.2	-37.3	-28.0	-36.2	-25.3	-31.3	21.2
-37.4	-30	-33.5	-28.5	-31.6	-30.2	-37.2	-37.3	-28.0	-36.2	-25.3	-31.3	21.2

Minimum temperatures 2012-2022

Минимальные температуры 2012-2022 гг.

Верхняя строка – год, ниже – температура по термометру Перетолчина, ещё ниже – минимальная температура по термохроне. Тср – средняя минимальная температура за указанный период, Дисп. – дисперсия температур.

Во время экспедиции были проведены традиционные полевые ежегодные научные режимные исследования нивальногляциальных образований долин рек Бел. Иркут, Мугувек: отснято несколько сотен фотографий, отражающих трансформацию этих горных геосистем. Так изменение общего вида ледника Перетолчина за период с с 2006 по 2022 годы в сравнении с 1898 г. представлены на рис. 11, а ледника Радде на рис. 12.



Рис. 11. Изменение ледника Перетолчина с 2006 по 2022 годы в сравнении с 1898 г. Фото 1898 г. взято из работы С.П. Перетолчина и было произведено П. Павловом 21 июня 1898 г. (Перетолчин, 1908, табл. VIII). Качественные большие фотографии можно посмотреть в авторском блоге на сайте ЛайфЖурнала (Коваленко, 2024).

Fig. 11. Change of the Peretolchin glacier from 2006 to 2022 in comparison with 1898. The photo of 1898 was taken from the work of S.P. Peretolchin and was made by P. Pavlov on June 21, 1898 (Peretolchin, 1908, Table VIII). High-quality large photos can be viewed in the author's blog on the LifeJournal website (Kovalenko, 2024).



Рис. 12. Изменение ледника Радде с 2006 по 2022 годы в сравнении с 1898 г. Фото 1898 г. взято из работы С.П. Перетолчина и было произведено П. Павловом (Перетолчин, 1908, табл. X).

Fig. 12. Change of the Radde Glacier from 2006 to 2022 in comparison with 1898. The photo of 1898 is taken from the work of S.P. Peretolchin and was produced by P. Pavlov (Peretolchin, 1908, Table X).



Рис. 13. Ледник Перетолчина 30.07.2022, фото 3289. **Fig. 13.** Peretolchina glacier 30.07.2022, photo 3289.

Как видно по фотографиям, прослеживается аномалия 2013–2014 гг., когда открытая часть ледника имела наибольшую площадь. Аналогичная ситуация может сложиться и в настоящее время, т. к., после 2020 г. постепенно увеличивается заснеженность ледников. Это явление отмечается на многих ледниках мира. Так по космоснимкам Landsat выявлено, что в Гималаях было также накопление снега к 2014 году, что в сочетании с произошедшим в эти же годы землетрясением некоторые ледники обрушились. В местности Лангтанг (Непал) смело деревню, да и на Базовом лагере Эвереста завалило некоторые лагеря (Китов, Плюснин, 2019). По космоснимкам Landsat такая же картина (увеличение ледников к 2014 г.) наблюдается в Китайском Тянь-Шане (хребет Карлыктаг) и на ледниках хребта Алтынтаг.

Современное состояние ледника Перетолчина (рис. 13) примерно соответствует состоянию 2017 г. (табл. 3, рис. 12).

Таблица 3

Динамика ледников Перетолчина (площадь открытой части ледников)

Table 3

Dynamics of Peretolchin glaciers (area of the open part of glaciers)								
Год	Наименование ледника	Источник	Площадь, км ²					
1900	Перетолчина, северный	Реконструкция схемы Перетолчина	0,83					
1900	Перетолчина, южный	Реконструкция схемы Перетолчина	0,6					
2006	Перетолчина, северный	Снимок Quick Bird	0,32					
2006	Перетолчина, южный	Снимок Quick Bird	0,15					
2014	Перетолчина, северный	Снимок Landsat-7	0,4					
2014	Перетолчина, южный	Снимок Landsat-7	0,18					
2017	Перетолчина, северный	Снимок Landsat-8	0,26					
2017	Перетолчина, южный	Снимок Landsat-8	0,1					
2022	Перетолчина, северный	Снимок Landsat-9	0,27					
2022	Перетолчина, южный	Снимок Landsat-9	0,13					



Рис. 14. Динамика ледников Перетолчина по космоснимкам: 1 – вершина Мунку-Сардык, 3491 м; 2, 3 – границы ледников в 1900 г. (соответственно северного и южного); 4, 5 – в 2006 г.; 6, 7 – в 2022 г. Фон – космоснимок Quick Bird 29.09.2006.

Fig. 14. Dynamics of Peretolchin glaciers according to satellite images: 1 – Munku-Sardyk peak, 3491 m; 2, 3 – boundaries of glaciers in 1900 (respectively northern and southern); 4, 5 – in 2006; 6, 7 – in 2022. Background – Quick Bird satellite image 29.09.2006.

Проведены дополнительные исследования мерзлотно-каменного горного потока Активный. Согласно установленному в прошлом году профиля с пикетами для определения скорости движения поверхности грунта в правой шовной контактовой зоне каменного потока, было выявлено, что нижний, около осевой линии шовной зоны, пикет сместился на 3 м. Это говорит о существенных подвижках грунта, по крайней мере, в краевой его части. Предыдущие измерения толщины объекта с помощью георадара показали, что линзы погребённого льда имеют толщину порядка 20 м (Китов и др., 2022а).

Достижения и открытия

1. А. Китов выполнил всю свою программу: снял данные со всех термохронов и

установил новый в устье Ср. Иркута и у лагеря Буговек (рис. 15), снял данные с минимального термометра Перетолчина (-30.1 °С) (рис. 16), сходил посмотрел ледник Радде, посетил МКГП Активный. И. Гергенов впервые посетил ледник Перетолчина и Радде, горный поток Активный, зашёл на г. Мунку-Сардык, провёл подсчёт падающих камней на живой осыпи Белоиркутной (с 500 до 1200) (рис. 17). С. Коваленко на 75 % выполнил намеченное: сходил и сфотографировал заснеженный в этом году ледник Перетолчина, остатки льда Бол. Мугувекской и Бол. Белоиркутной наледей, живую осыпь Белоиркутную, снял данные с реперов, установленных летом 2009 г. на краю обрыва расширяющегося Мугувекского каньона.



Рис. 15. Студент ИГУ И. Гергенов снимает термохрон. **Fig. 15.** IGU student I. Gergenov taking a thermochron.



Рис. 16. Железная капсула с минимальным термометром, установленным С.П. Перетолчиным 19 июня 1900 г. по старому стилю или 2 июля по новому стилю.

Fig. 16. Iron capsule with the minimum thermometer installed by S.P. Peretolchin on June 19, 1900 old style or July 2 new style.



Рис. 17. Живая осыпь Белоиркутная летом 2022 г, формируемая МКГП «Активный». **Fig. 17.** Beloirkutnaya live scree in the summer of 2022, formed by ICGP Active.

2. Было совершено 10 маршрутов (80 пог. км). Всеми участниками экспедиции было отснято 1394 (31.37 Гб) научных фотокадров: из них А. Китовым 886 кадров формата .jpg с разрешением 1920х1080 (1.56 Гб), 343 научных, остальные бытовые и жанровые, 12 видео .MP4 с разрешением 3840х2160 рх. С. Коваленко за 14 дней полевых работ было отснято 3409 снимков (117.82 ГБ), из них 430 высокого разрешения 9568х6376 рх (48.606 ГБ) и 2979 снимков с разрешением 6024х4024 рх, всего научных снимков было сделано 383 (82.3 ГБ), ландшафтных (пейзажных) — 371 (13 ГБ), жанровых 333 (16.08 ГБ), отснято 116 видеофрагментов формата МР4 с разрешением 3840х2160 рх (43.728 ГБ). Общий объем фото-видеоматериалов составил 161 ГБ. В постполевой камеральный период было отсортировано и подготовлено к описанию 50
ландшафтных (пейзажных) снимков (2.58 ГБ), 332 жанровых (14.3 ГБ) и 375 снимков научного содержания (24.4 ГБ), из последних изготовлено 30 фотопанорам (2.7 ГБ).

3. Традиционно проводился мониторинг погоды. С 22 июля по 4 августа было взято 89 метеосроков. Непосредственными наблюдениями фиксировались следующие параметры погоды: температура воздуха на высоте 1.5 м, температура на поверхности почвы, атмосферное и барометрическое (приведённое на уровень моря) давление, характер и количество жидких осадков, характер облачности и ветра, комфорт. Погода не баловала, но и не препятствовала, уровень в реках был на минимальном уровне, позволявшем их переходить, в некоторых местах даже в сапогах (брод на тропе Макаренко).

4. Обнаружен целый склад остатков стволов «древних» деревьев (Коваленко, Гергенов, 2022, с. 127). Хотя деревья могут быть и современные, так как грунт постоянно сползает и у многих деревьев виден комель с корнями, а не только обнажённые верхушки ствола. Если бы в низу оврага стволы были сильно обнажены, а выше, чуть торчали из склона оврага, то вероятность, что вымываются древние деревья была бы выше, да и кора у некоторых сохранилась.

5. Замерили за 13-летний период (с 2009 г.) темп и величину роста обрыва левого борта Мугувекского каньона и за год движение грунта по правому краю МКГП Активный в средней его части.

6. Хорошие остатки льда режимных наледей к моменту нашей экспедиции в этом году отмечены в пределах Бол. Белоиркутной и Бол. Мугувекской наледей, Бол. Буговекская наледь в этом году, как и в прошлом, не обследовалась.

7. В. Белоусовым обследованы все режимные снежники.

8. Сняли показания за зиму 2021–2022 гг. с минимального термометра Перетолчина $(-30,1 \ ^{\circ}C)$ и биметаллического минимально-максимального термометра на портулановской поляне (t°min.-32°, t°max.+19 °C).

9. В курумнике в районе лагеря Дом-2, где жили почти одомашненные нами пищу-

хи, поселились новые более осторожные, чем прежние.

10. Обнаружена новая тропа, идущая по краю обрыва Мугувекского каньона от лагеря Дом-2 до крутого спуска по руч. Осыпному, натоптанная альпинистами с 2010 г.

Выводы

По сравнению с прошлыми малоснежными годами в этом году значительно больше выпало снега и, поэтому многолетние снежники были значительно больше, увеличилась зона питания ледников, в кулуарах подхода к вершине образовался фирн. Увеличение доли твёрдых осадков наблюдается с 2020 года. В этом году это проявилось фактически в наступании ледников Перетолчина и Радде. Значительно увеличилась заснеженность ледников и сместилась ниже граница открытой части ледников. Однако наледей в июле сохранилось меньше, особенно в низовьях Бел. Иркута и Мугувека.

Из-за изменения климата в сторону потепления границы геосистем смещаются. Поднимается граница леса (молодая поросль продвинулась вверх по долине Мугувека на 50-80 м), значительно раньше начинается вегетация в зоне горных лугов (Китов и др., 2022). Однако в нивальной зоне в последнее время наблюдается обратный процесс, вероятно из-за увеличения осадков.

Анализ данных регистраторов термохрон показывает, что по долинам есть зоны инверсии (участки 6–8, 12), хотя тренд температуры с высотой показывает понижении средних годовых температур (см. рис. 9). Вообще вся зона долин от Ворот Бел. Иркута (1550 м н.у.м.) до вершины Мунку-Сардык (3491 м н.у.м.) лежит в области отрицательных среднегодовых температур, что, вероятно, и способствует медленному таянию ледников горного массива Мунку-Сардык.

Благодарности

Исследование выполнено за счёт средств государственного задания (№ госрегистрации темы: АААА-А21-121012190056-4); при поддержке РФФИ, гранта № 20-05-00253А «Трансформация геосистем Байкальской природной территории».

Литература

Китов А.Д. Первая 2020 года экспедиция на Мунку-Сардык и сравнительные особенности прохождения маршрута / А.Д. Китов, Е.Н. Иванов, В.Н. Ноговицин. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.174 // Геология и окружающая среда : электрон. науч. журн. 2022. Т. 2, № 2. С. 174– 181.

Китов А.Д. Экспедиция Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН и клуба Портулан в Восточные Саяны (горный массив Мунку-Сардык) в апреле-мае 2021 года / А.Д. Китов, С.Н. Коваленко, Е.Н. Иванов, И.А. Денисенко. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.182 // Геология и окружающая среда : электрон. науч. журн. 2022. T. 2, № 2. С. 182–187.

Китов А.Д., Плюснин В.М. Сравнение динамики ледников в Гималаях и горах юга Восточной Сибири // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле», 2019, Т. 29. С. 68–84. DOI 10.26516/2073-3402.2019.29.68.

Коваленко С.Н. Некоторые особенности и геоморфологические признаки палеоледников и палеоснежников горного массива Мунку-Сардык. DOI 10.26516/2541-9641.2023.4.182 // Геология и окружающая среда : электрон. науч. журн. 2023. Т. 3, № 4. С. 182–196.

Коваленко С.Н. Горные ледники Мунку-Сардык — еще один источник чистейшей горной пресной воды // Мунку-Сардык: фотоархив : сайт : URL https://www.livejournal.com/post?draft=https://sergkov1654.livejournal.com/d8.html (дата обращения 14.02.2024).

Двадцать первая летняя экспедиция с 21 июля по 4 августа 2022 года // Munku-Sardyk.ru : сайт : URL: http://munku-sardyk.ru/sammer2022 (дата обращения 14.02.2024).

Двадцатая весенняя экспедиция с 27 апреля по 6 мая 2022 года // Munku-Sardyk.ru : сайт : URL: http://munku-sardyk.ru/spring2022 (дата обращения 14.02.2024).

Коваленко С.Н., Акулова Ю.В. Каменные глетчеры горного массива Мунку-Сардык. DOI 10.26516/2541-9641.2022.1.135 // Геология и окружающая среда : электрон. науч. журн. 2022. Т. 2, № 1. С. 135–153.

Коваленко С.Н., Акулова Ю.В. Криогенные литопотоки горного массива Мунку-Сардык. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.128 // Геология и

окружающая среда : электрон. науч. журн. 2022а. Т. 2, № 2. С. 128–138.

Коваленко С.Н., Гергенов И.И. К вопросу об источниках рыхлого материала, причин и мест зарождения катастрофических селей в районе горного массива Мунку-Сардык. DOI 10.26516/2541-9641.2022.3.120 // Геология и окружающая среда : электрон. науч. журн. 2022. Т. 2, № 3. С. 120–132.

Коваленко С.Н., Гергенов И.И. Опыт выделения современных и древних снежников горного массива Мунку-Сардык. DOI 10.26516/2541-9641.2022.3.133 // Геология и окружающая среда : электрон. науч. журн. 2022а. Т. 2, № 3. С. 133–148.

Коваленко С.Н., Гергенов И.И. Высокогорные формы рельефа горного массива Мунку-Сардык. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.122 // Геология и окружающая среда : электрон. науч. журн. 20226. Т. 2, № 4. С. 122–140.

Перетолчин С.П. Ледники хребта Мунку-Сардык. Томск: Типо-литография Сиб. Печатного Дела, 1908. 60 с.

References

Kitov A.D. The first 2020 expedition to Munku-Sardyk and comparative features of the route / A.D. Kitov, E.N. Ivanov, V.N. Nogovitsin. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.174 // Geology and Environment : electronic scientific journal. 2022. V. 2, No. 2. P. 174–181.

Kitov A.D. Expedition of the Institute of Geography named after V.B. Sochava, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. V.B. Sochava SB RAS and Portulan Club in the Eastern Sayan Mountains (Munku-Sardyk mountain massif) in April-May 2021 / A.D. Kitov, S.N. Kovalenko, E.N. Ivanov, I.A. Denisenko. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.182 // Geology and Environment : electronic scientific journal. 2022. V. 2, No. 2. P. 182–187.

Kitov A.D., Plusnin V.M. Comparison of glacier dynamics in the Himalayas and mountains of the south of East Siberia // Izvestiya Irkutsk State University. Series "Earth Sciences", 2019, V. 29. P. 68–84. DOI 10.26516/2073-3402.2019.29.68.

Kovalenko S.N. Some peculiarities and geomorphologic features of paleoglaciers and paleosnowfields of the Munku-Sardyk mountain massif. DOI 10.26516/2541-9641.2023.4.182 // Geology and Environment : electronic scientific journal. 2023. V. 3, No. 4. P. 182-196.

Kovalenko S.N. Mountain glaciers of Munku-Sardyk – another source of the purest mountain fresh water // Munku-Sardyk: photo archive : website : URL https://www.livejournal.com/post?draft=https:// serg-kov1654.livejournal.com/d8.html (accessed 14.02.2024).

Twenty-first summer expedition from July 21 to August 4, 2022 // Munku-Sardyk.ru : website : URL: http://munkusardyk.ru/sammer2022 (accessed 14.02.2024).

Twentieth spring expedition from April 27 to May 6, 2022 // Munku-Sardyk.ru : website : URL: http://munku-sardyk.ru/spring2022 (date of address 14.02.2024).

Kovalenko S.N., Akulova Yu.V. Stone glaciers of the Munku-Sardyk mountain massif. DOI 10.26516/2541-9641.2022.1.135 // Geology and Environment : electronic scientific journal. 2022. V. 2, No. 1. P. 135–153.

Kovalenko S.N., Akulova Yu.V. Cryogenic lithocurrents of the Munku-Sardyk mountain

Китов Александр Данилович,

кандидат технических наук, 664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Институт географии им. В.Б Сочавы, СО РАН, стариий научный сотрудник, тел.: (3952) 42–74–72 email: kitov@irigs.irk.ru. **Kitov Aleksandr Danilovich,** Candidate of Technical Sciences, 664033 Irkutsk, Ulaanbaatarskaya str., 1, Sochava Institute of Geography, CO RAS, Senior Research Fellow, tel.: (3952) 42–74–72, email: kitov@irigs.irk.ru.

Коваленко Сергей Николаевич,

кандидат геолого-минералогических наук, 664025 Иркутск, ул. Ленина, д. 3, Иркутский государственный университет, геологический факультет, доцент кафедры динамической геологии, тел.: (3952)20-16-39, email: igpug@mail.ru. **Kovalenko Sergey Nikolaevich,** Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, 664025 Irkutsk, Lenin str., 3,

massif. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.128 // Geology and Environment : electronic scientific journal. 2022a. V. 2, No. 2. P. 128–138.

Kovalenko S.N., Gergenov I.I. To the question about the sources of loose material, causes and places of origin of catastrophic mudflows in the area of Munku-Sardyk mountain massif. DOI 10.26516/2541-9641.2022.3.120 // Geology and Environment : electronic scientific journal. 2022. V. 2, No 3. P. 120–132.

Kovalenko S.N., Gergenov I.I. Experience in the identification of modern and ancient snowfields of the Munku-Sardyk mountain massif. DOI 10.26516/2541-9641.2022.3.133 // Geology and Environment : electronic scientific journal. 2022a. V. 2, No. 3. P. 133–148.

Kovalenko S.N., Gergenov I.I. Highaltitude relief forms of the Munku-Sardyk mountain massif. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.122 // Geology and Environment : electronic scientific journal. 2022b. V. 2, No. 4. P. 122–140.

Peretolchin S.P. Glaciers of the Munku-Sardyk Ridge. Tomsk: Tipo-lithography of Sib. Pechatnoe Dela, 1908. 60 p. Irkutsk State University, Faculty of Geology, Associate Professor of the Department of Dynamic Geology, tel.: (3952)20-16-39, email: igpug@mail.ru.

Гергенов Игорь Иванович,

студент 3 курса, 664011 Иркутск, ул. Нижняя Набережная, д. 6, Педагогический институт Иркутского государственного университета, тел.: 89016680809, электронная почта: tantal14igor@mail.ru. **Gergenov Igor Ivanovich,** 3nd year student, 664011 Irkutsk, ul. Nizhnyaya Naberezhnaya, d. 6, Pedagogical Institute of Irkutsk State University, tel.: 89016680809, email: tantal14igor@mail.ru.

Ученые-первопроходцы

УДК 551.4.022 https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.149

По следам Восточно-Африканской рифтовой экспедиции (заметки и рисунки глазами очевидцев)

Т.Ю. Тверитинова, А.И. Гущин

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, г. Москва, Россия

Аннотация. Приводится обзор опубликованных и архивных материалов по Восточно-Африканской рифтовой экспедиции АН СССР, состоявшейся под руководством В.В. Белоусова в 1960-х гг.

Ключевые слова: Африка, рифт, вулканы, впадины, экспедиция, история геологии.

On the footsteps of the East African Rift Expedition (Notes and Drawings through Eyes of Eyewitnesses)

T.Y. Tveritinova, A.I. Gushchin

Moscow State University, Department of Geology, Moscow, Russia

Abstract. A review of published and archived materials on the East African Rift Expedition of the USSR Academy of Sciences, which took place under the leadership of V.V. Belousov in the 1960s.

Keywords: Africa, rift, volcanoes, depressions, expedition, history of geology.

К 95-летию Н.А. Логачева

В 60-70 годы прошлого века АН СССР организовала ряд экспедиций по изучению континентальных рифтовых систем. Инициатором экспедиций выступил В.В. Белоусов, президент Международного союза геофизики и геодезии, председатель Научного совета по комплексному исследованию земной коры и верхней мантии при ОГГГ (Отделение геологии, геофизики и геохимии) АН СССР, заслуженно пользовавшийся в то время исключительным авторитетом и чрезвычайной популярностью в международном научном сообществе. Его называли «королем глобальных тектонических теорий» [Wood, 1980. c. 235] (цит. по Иогансон, https://ifz.ru/institut/kniga-pamyati/vvbelousov).

Проект предполагал изучение верхней мантии Земли. Первым объектом была из-

брана Восточно-Африканская континентальная рифтовая система, следующим – Исландская рифтовая система, входящая в систему Срединно-Атлантического спредингового хребта. В.В. Белоусов был научным руководителем обеих экспедиций. В этой работе мы коснемся в основном Восточно-Африканской экспедиции.

Научные результаты Восточно-Африканской экспедиции широко публиковались и хорошо известны. Восточно-Африканская рифтовая система была всесторонне изучена и выделена в тектонотип континентальных рифтов, был получен исключительно ценный и богатый материал для сравнительного анализа различных рифтовых зон Африкано-Аравийского, а также хорошо изученного советскими исследователями Байкальского рифтового пояса, заложены основы учения о рифтогенезе.

А вот о другой важной стороне экспедиции, ее быте, царившем в экспедиции духе, известно значительно меньше. О Восточно-Африканской экспедиции в те шестидесятые годы прекрасно написал в нескольких очерках А.П. Капица (Капица, 1969–1970), в которых использовал рисунки Е.Е. Милановского. Рисунки Евгения Евгеньевича в большом количестве присутствуют в выпущенной по результатам экспедиции 3-х-томной монографии (Восточно-Африканская..., 1968). Они также сохранились в семейном архиве, а в 2012 г. часть из них увидела свет в альбоме «Мир глазами геолога» (2012). В 1970 году в газете «Неделя» о буднях экспедиции небольшую статью написал Н.А. Логачев «У древних вулканов 1970). Африки» (Логачев, Очерки А.П. Капицы и Н.А. Логачева ценны тем, что из них мы можем узнать отдельные моменты жизни экспедиции, увидеть живых интересных людей, почувствовать дух того времени, когда по инициативе Советского Союза осуществлялись крупные международные геологические проекты. Кроме того, в архиве Е.Е. Милановского сохранился экземпляр копии Информационного отчета о работах Советской комплексной Восточно-Африканской экспедиции Академии наук СССР в 1967 году (Капица, Белоусов, 1967), в котором описаны все маршруты 1967 года. Общий план и районы работ экспедиции (рис. 1) описал Е.Е. Милановский (1970). Эти архивные и изданные материалы послужили основой предлагаемой публикации, в которой максимально полно сохранены авторские впечатления участников экспедиции иллюстрированные рисунками Е.Е. Милановского.

Более 100 тыс. км было пройдено участниками экспедиции за три полевых сезона. Главным средством передвижения служили хорошо приспособленные для длительных путешествий в условиях Африки автомашины Ленд-ровер. Для маршрутов по рекам и озерам Уганды использовались катера. В составе коллектива были шоферы и рабочие из местных жителей (африканцы), а также студенты – геологи и географы из Кении, Танзании и Уганды, обучавшиеся в советских вузах.

«Районы работ были выбраны с таким расчетом, чтобы иметь возможность изучить и сравнить между собой рифтовые зоны, резко отличающиеся по роли проявления вулканизма... В качестве вулканической рифтовой зоны была избрана Кенийская (или рифт Грегори), а в качестве зоны с весьма ограниченными проявлениями вулканизма... – Центрально-Африканская». ... Центрально-Африканская область «исключительно интересна и разнообразна по своим природным условиям. На преобладающем фоне однообразной типичной африканской саванны здесь резко выделяются глубокие котловины бессточных соленых озер, приуроченные к дну рифтовых впадин, ограничивающие эти впадины крутые сбросовые уступы высотой до нескольких сот метров, и многочисленные вулканические постройки различного типа, размера и возраста, начиная от мелких шлаковых конусов и воронок взрыва, места скопления которых создают подобие лунного ландшафта, до гигантских длительно формировавшихся вулканов Килиманджаро (6 км) и Меру (4.5 км), и от руин среднеплиоценовых вулканических построек до действующего вулкана Олдоиньо-Ленгаи» (Милановский, 1970).

Вид различных участков Эфиопской и Кенийской рифтовых зон сводововулканического типа с расположенными здесь крупнейшими в Африке стратовулканами (Килиманджаро, Меру, Олдоиньо-Ленгаи) и щелевых рифтов Танганьикской зоны отражены в африканских зарисовках Е.Е. Милановского (Восточно-Африканская..., 1968).

Восточная Африка необычайно интересна не только для геологов. Здесь, к западу от Восточно-Африканского рифта, расположено знаменитое Олдувайское ущелье, где выдающийся исследователь антропогенеза Л. Лики со своей женой М. Лики обнаружил остатки древнейших предков человека, возраст которых в настоящее время определен в 2.588 тыс. лет.

В состав советской комплексной Восточно-Африканской экспедиции вошли геологи в возрасте от 36 до 60 лет. Научным руководителем был назначен Владимир Владимирович Белоусов, «известный геолог, тектонист, геофизик, за глаза обычно называемый «Вэвэ»... Сотрудниками экспедиции стали: «профессор Евгений Евгеньевич Милановский – преподаватель геологического факультета Московского университета, потомственный геолог, с интеллигентной внешностью и характером, немного мягковатым, когда это касается негеологических вопросов; Аркадий Васильевич Горячев – научный сотрудник Института физики Земли АН СССР, тектонист-геолог, он недавно защищал кандидатскую диссертацию, но по решению ученого совета ему присвоена степень доктора наук, характер скептический и склонный к пессимистическим оценкам, человек с большим опытом полевой работы и блестящий специалист в своей области; Николай Алексеевич Логачев - научный сотрудник Иркутского института земной коры Сибирского отделения АН СССР, специалист в области петрографии, человек веселый и энергичный, склонный к оптимизму; Александр Алексеевич Краснов – аспирант Института экономики минерального сырья и геологоразведочных работ, вулканолог, энергичный мужчина, выглядящий очень молодо и поэтому пытающийся скомпенсировать этот «недостаток» внешней степенностью поведения» (Капица, 1969₁). Возглавлять экспедицию в качестве начальника было поручено Андрею Петровичу Капице.

В экспедиции с самого начала существовало определенное разделение труда. Стратиграфией кайнозойских континентальных отложений занимался Н.А. Логачев, геоморфологией рифтовой зоны и обрамляющих ее областей – Е.Е. Милановский, вопросами тектоники и связи тектонических движений и вулканизма – А.А. Горячев и Е.Е. Милановский, вулканологическими исследованиями – А.А. Краснов.

Позже, в 1968 г. к экспедиции присоедиотряды геофизиков (профессор нились Л.Н. Рыкунов научный сотрудник И В.В. Седов) геохимиков (профессор И В.И. Герасимовский и научный сотрудник А.И. Поляков). Геохимики изучали геохимию продуктов кайнозойского магматизма рифтовых зон. Сейсмологи развернули сеть фиксирующих очень слабые землетрясения временных сейсмостанций, что дало возможность судить о степени современной тектонической активности разных участков рифтовой зоны. В 1969 г. экспедиция пополнилась исследователем кор выветривания и почв В.В. Добровольским.

Экспедиция началась 21 июня 1967 г. Полет Москва-Хартум-Аддис-Абеба-Найроби – столица Кении, где была организована основная база экспедиции. К месту базирования полевого лагеря летели на местном стареньком самолете. Уже в полете начались геологические наблюдения: «Летим низко, всего 1.500–2.000 метров над поверхностью. Прекрасно видны детали рельефа, растительность, сухие русла рек, геология. Мы разворачиваем карты. Вот они, эскарпы Великих африканских разломов» (Капица, 1969₁)



Рис. 1. Маршруты советской комплексной геолого-геофизической экспедиции в Восточной Африке (Милановский, 1970).

Fig. 1. Routes of the Soviet complex geological and geophysical expedition in East Africa (Milanovsky, 1970).

Успешной работе экспедиции способствовало содействие правительственных учреждений Кении, Танзании, Уганды и активная поддержка руководителей и сотрудников геологических служб и университетских колледжей этих стран. Работа велась в тесном сотрудничестве с Кенийской геологической службой, возглавляемой доктором Бейкером, одновременно являвшимся председателем комиссии стран Восточной Африки по проблеме верхней мантии. Во время пребывания в странах Африки члены советской экспедиции неоднократно выступали с научными докладами и лекциями в университетах Кении, Танзании, Уганды, Эфиопии, Судана, в геологическом клубе Найроби. Встречались с геологами ОАР в Каире, принимали, участие в работах научного конгресса Восточно-Африканской Академии (Найроби, 1967) и международной конференции, посвященной 50-летию геологической службы Уганды (Энтеббе, 1969).

Перед началом полевых работ участники экспедиции распределили между собой обязанности по их подготовке. «Портфель «министра информации» получил Евгений Евгеньевич Милановский, в его задачи входит собрать все нужные нам карты и сведения по району рифтовой долины. Он же по совместительству выполняет функции «министра здравоохранения», следит за комплектацией полевой аптечки, за своевременным приепрофилактических антималярийных мом препаратов, санитарией и т.д. «Министерство путей сообщения», то есть следить за нашими машинами, шоферами, бензином, рабочими, поручено Александру Алексеевичу Краснову, он же первый заместитель «премьер-министра». Функции «министра пищевой промышленности» ложатся на Аркадия Васильевича Горячева, ему предстоит провести закупку продовольствия и скомплектовать нашу кухню. Подготовка оборудования, выдача нам и рабочим спальных мешков, спецодежды, закупка недостающих предметов поручаются нашему сибиряку Николаю Алексеевичу Логачеву. Владимир Владимирович – «министр без портфеля», или «чиновник по особо важным поручени-Кабинет сформирован...» (Капица, ям». 19691).

Благодаря сотрудничеству с департаментом геологии экспедиция пополнилась сотрудниками из местных жителей, среди них: имевший опыт полевой работы Гидрон из племени луа, хорошо знаюший английский язык Джеймс из племени кекуев, водители Морари, Фана и Джагуна, повар Джеймс и охранник Калеб. Не сразу работа местных помощников была безупречной, так как привычки и различные бытовые предпочтения русских и африканцев несколько различались. Например «...целый ряд блюд Джеймс почему-то считал ненужным солить. Только к концу экспедиции он кое-как освоился с причудами этих русских. Надо сказать, что это стоило больших усилий Логачеву» (Капица, 1969₁).

А.П. Капица вспоминал, что он «приходил в восхищение, глядя, как Логачев объясняется. Свой небольшой словарный запас он возмещал жестикуляцией и мимикой. И это ему блестяще удавалось. Его отлично понимали все, от Фаны до Бейкера. Если Милановский, хорошо владеющий английским, иногда становился в тупик, объясняя чтонибудь нашим рабочим, то Логачев никогда не смущался. Он ломился напролом через правила английской грамматики и всегда достигал нужного результата. Я давно заметил, что способность к разговору на какомлибо иностранном языке зависит вовсе не от словарного запаса, а от смелости, лучше даже сказать – нахальства (в самом хорошем смысле этого слова). Говорить научишься только практикуясь, и если отбросить ложный стыд за несовершенство своей речи, то можно достигнуть прекрасных результатов. Мне кажется, что некоторая замкнутость Горячева сильно вредила его успехам в английском языке. Надо сказать, что нам мешало незнание местного языка суахили. Но быстро компенсировать этот недостаток было невозможно, не помогло бы никакое нахальство» (Капица, 19691).

Через неделю после вылета из Москвы, 28 июня, экспедиция на грузовике и трех Лендроверах была готова к выезду в поле. «Допоздна длятся наши личные сборы: отбираются карты района нашей поездки – мы едем в среднюю часть рифтовой долины, в район озера Магади; заряжаются фото- и кинокамеры, идут споры об одежде. Большинство из нас купило роскошные шляпы «стетсоны» и ботинки на каучуковой подошве с соблазнительным названием «сафари». Я считаю деньги, прикидывая, сколько наличности нам потребуется в первой поездке. Мы планируем ее небольшой, на три-четыре дня, надо испробовать снаряжение, машины и самим понюхать саванну. Ночь накануне первого выезда в поле. Солжет тот из нас, кто скажет, что он спал спокойно в эту ночь. Завтра мы попадем в эту таинственную Африку, где ползают плюющиеся кобры, бегают капризные носороги, где мы можем подвергнуться нападению всеядных термитов. Смейтесь над нашей наивностью, посмотрел бы я на вас на нашем месте. Африка есть Африка, и только тот может о ней рассуждать спокойно, кто сам в ней пожил и поработал, а таких я что-то мало встречал (Капица, 1969₁)».

«В знаменательное утро первого выезда в поле мы поднялись затемно. Завтрак. И вот уже наши машины выруливают со двора базы. Сегодня мы все едем вместе в одном большом Ленд-ровере, в двух остальных машинах рабочие, в грузовике снаряжение... Наш путь лежал к югу от Найроби. Уже через двадцать километров кончилась асфальтовая дорога, и начался пыльный африканский грейдер. Пыль на африканских дорогах какая-то особенная, как пудра рыжеватого цвета. Она облаком повисает за прошедшей машиной, и нужно около 10–15 минут, чтобы она осела. Эта пыль преследовала нас всюду. Невольно вспоминался Киплинг:

"Мы идем по Африке...

И только пыль, пыль, пыль

От шагающих сапог" (Капица, 19691).

Основные базы экспедиции располагались в городах: в 1967 г. в Найроби – столице Кении, в 1968 г. в городке Моши у подножия Килиманджаро. В 1969 г. экспедиция имела «две базы с видом на озеро Виктория и на величественный Килиманджаро, шесть автомашин, необходимый штат шоферов и рабочих, научные материалы для маршрутов, подготовленные Е.Е. Милановским и А.А. Красновым» (Логачев, 1970). Полевых лагерей за всю экспедицию было множество. «Где только не стояли наши палатки – на высоких прохладных плато и в жарких низинах, на берегах великих озер Виктория и Танганьика и у мелких ручейков, на лавовых плато и в кратерах потухших вулканов. Двое наших товарищей – вулканолог Краснов и геохимик Поляков ухитрились переночевать даже в кратере активного вулкана Олдоиньо-Ленгаи» (Логачев, 1970).

Места для лагерей выбирались в стороне от населенных пунктов, на берегах горных ручьев. Ярко-желтые, оранжевые, синие и красные палатки располагались или кольцом, или двумя рядами. Между палаток ставили длинный стол, днем служивший местом для обеда, а вечером использовавшийся как рабочий, чтобы посмотреть карты, обсудить результаты дня. Немного в стороне от основного лагеря обычно стояли автомобили и палатки водителей. Кухня окружалась ящиками с продовольствием и полевыми газовыми холодильниками. Частыми, но ненавязчивыми гостями в лагере были местные жители. Взрослые воины и мальчишки, присев на корточки или опираясь на копье, могли часами наблюдать за жизнью в лагере.

«Около шести часов утра раздается крик Василия Ивановича: «Подъем!» Еще темно, в палатках одна за другой вспыхивают газовые лампы, лагерь начинает пробуждаться. Газовая лампа не только освещает, но и немного согревает палатку. Утро в горах обычно холодное и сырое, температура падает ниже 10 градусов. Вылезая из спального мешка, меньше всего ощущаешь себя в Африке, около экватора, где, по наивному представлению московских друзей и знакомых, ты должен изнывать от жары. Быстро помывшись, побрившись и надев на себя все теплые вещи, которые оказываются под рукой, бредешь к обеденному столу, где уже готов завтрак. Между палаток клочьями висит утренний туман, а за столом сидят нахохлившиеся фигуры твоих коллег. Некоторые, с накинутыми на плечи одеялами, могли бы позировать для картины «Отступление французов из Москвы в 1812 году». Но вот кружка горячего кофе согревает тебя, да и первые лучи солнца создают иллюзию тепла.

После завтрака маршруты на машинах группами по 2–3 человека. Основной транспорт – «ленд-роверы» – крепкие, выносливые машины, хорошо приспособленные к полевой работе, а внешне напоминающие советские «газики», но больше и с цельнометаллическим кузовом. И кроме того, американский «джип» – огромная белая легковая машина с мощным двигателем.

Нужно сказать, что практически у каждого участника экспедиции было прозвище, так как африканцам трудно запоминать непривычные иностранные имена и фамилии, особенно русские, поэтому в разговоре между собой они используют прозвища. Обычно такое прозвище очень метко характеризует или характер, или внешность человека. Владимира Владимировича Белоусова за гранитную монументальность во внешности звали «Мистер камень». Евгений Евгеньевич Милановский за способность иногда в самых неподходящих условиях, например, когда машина карабкается по крутой дороге, требовать остановки в погоне за каким-нибудь редким геологическим объектом или явлением, получил имя «Стоп, стоп».

Василия Ивановича Герасимовского прозвали «Человеком с противным голосом», так как именно он вставал по утрам раньше всех и кричал «Подъем!» и экспедиции приходилось выползать из теплых спальных мешков в бодрящую прохладу утра – процесс крайне неприятный, он и получил свое прозвище.

Аркадий Васильевич Горячев из-за незнания английского языка почти не разговаривал с нашими африканцами, за что и был назван «Неразговорчивым», а Николай Алексеевич Логачев в противоположность этому – «Разговорчивым». У А. Капицы – «Шеф» и «Лысый». Геофизикам Рыкунову и Седову было присвоено прозвище «Опасные братья», так как геофизическое снаряжение включало цилиндры со страшным словом «хатари» – опасно.

Саванна. «...саванна – холмистая степь... без кустов и деревьев, покрытая рыжеватой высокой травой. Дорога медленно поднимается вверх, мы должны перевалить через хребет и спуститься по его противоположному склону в рифтовую долину. Когда мы достигли гребня, перед нами открылась величественная картина рифтовой долины... Слева от нас поднимался конус потухшего вулкана. Тени от пушистых кучевых облаков медленно скользили по саванне. Здесь она покрыта колючими кустарниками и акациями. К югу на горизонте – несколько правильных конусов вулканов, нам пока еще трудно определить их названия. Общая ширина рифтовой долины в этом месте была около 100 километров. Ну что же, вот он, «рифт», перед нами... Серпантин дороги медленно спускает нас в долину. Высокий кустарник скрывает от нас величественную панораму этого крупнейшего грабена мира... Несколько небольших вулканов образуют довольно правильные конусы, некоторые из

них разбиты сбросами, и тогда на обнажившейся стенке хорошо видно строение конуса вулкана, слои лав, поднимающиеся к центру, месту бывшего кратера. Мы с огорчением отмечаем, что обнаженность довольно плохая. Это затруднит нашу работу» (Капица, 1969₂).

Первый полевой лагерь. «Первая ночь в саваннах. Напрасно я прислушивался к полуночной тишине – ни рева львов, ни хохота гиен, всегда присутствующих в описании других авторов, не было слышно... Ночь прошла спокойно, только от холода пришлось влезть в спальный мешок почти с головой, было, наверное, градусов 8–10. Африканское утро тоже нас встречало прохладой».

«Первые шаги по саванне... Не знаю, как чувствовали себя другие, но мне, когда я шагал по высокой траве саванн или продирался через колючий кустарник, все время казалось, что я сейчас наступлю на хвост плюющейся кобры или споткнусь о льва. Но скоро это ощущение исчезло, и, хотя до конца этого дня я каждый раз внимательно смотрел, куда ставлю свои ступни, настороженность постепенно проходила... К полудню стало жарко, вернее, сильно припекало экваториальное солнце. Но стоило зайти в тень, и жара не чувствовалась. Иногда мы отрывались от наших машин и пешком поднимались на возвышенности. Очень мешал ходить колючий кустарник, покрывающий саванну. Колючки, напоминающие рыболовные крючки, отчаянно цеплялись за одежду. Приходилось тратить немало времени, чтобы отцепиться от них» (Капица, 19691).

В первый год экспедиция работала на территории Кении, а также в Танзании – в ее самых живописных местах, которые Хемингуэй описал в «Зеленых холмах Африки».

«Оставив машины у подножия вулкана, мы стали карабкаться на его склон. Забрались на плечо одного из лавовых потоков, огляделись. Вчера вид на юг нам загораживал этот самый вулкан, на котором мы теперь стояли. Отсюда, с его склона, рифт просматривался как бы из центра. На западе ясно виден эскарп, который переходит в горный массив. На востоке эскарп ниже, но очень четко выражен в рельефе отвесной стенкой.

Отсюда прекрасно видно, что днище рифтовой долины не плоское, небольшими сбросами оно разбито на параллельные полосы – клавиши, одни из которых опущены, другие подняты, причем поверхности их наклонены в разные стороны: на запад, на восток. Хорошо видны правильные конусы вулканов на юге – это Олдоиньо-Ленгаи и Гелай...

Первый маршрутный день прошел успешно. Мы познакомились с очень обширной территорией, с широким комплексом пород. Вернулись в лагерь. Ужин был готов. Приняли душ, смывший с нас толстый слой пыли, сели за стол. Ну что ж, Африка как Африка! По мнению тех, кто работал в Северном Казахстане, напоминает тамошние условия. Даже не очень жарко, днем было около 28 градусов» (Капица, 1969).

По ощущениям членов экспедиции, дороги Танзании в основном грунтовые и ужасно пыльные. В период дождей могут быть наводнения, дороги портятся, сносятся многие мосты. В сухой период проехать по саване можно практически везде, за исключением лесных и скальных участков. Для экономии времени экспедиция очень активно использовала машины, проезжая в день по 100–120 километров. Чтобы осмотреть коренные выходы пород и естественных обнажений нужно совершить небольшие боковые пешеходные маршруты. Исключение составляли большие пешие маршруты на вулканы или через тропические леса.

В машинах над сиденьями в крыше были прорезаны люки, из которых открывался круговой обзор и можно было на ходу вести фото- и киносъемку, ориентироваться и следить за изменениями в рельефе и в скальных выходах пород. Ездить в маршрут было лучше на одной машине, так как поднятая ею пыль долго мешала сидящим во второй машине видеть окружающее.

Погода в саване в тот год благоприятствовала работе. Обычно стояли облачные дни, но дождей не было, дневная температура около 25°. Средняя высота составляла 1.000–2.500 м над уровнем моря. Жарко было ниже, например, в Дар-эс-Саламе. Маршруты проходили как через густонаселенные, так и пустынные, нередко безводные районы. Например, в лагерь в районе вулкана Олдоиньо-Ленгаи нужно было воду доставлять на машине за 25–30 миль. Тем не менее, два сотрудника экспедиции – Поляков и Краснов – совершили на вулкан Олдоиньо-Ленгаи восхождение с ночевкой в его кратере.

В маршрутах обычно устраивался дневной перекус бутербродами и фруктами. Маршрут продолжался до пяти часов, к шести надо было возвращаться в лагерь. Но естественно, в маршруте невозможно предусмотреть все возможные осложнения и препятствия. В конце лета в саване часто бывали травяные пожары. И участникам экспедиции приходилось несколько раз с ними сталкиваться. Когда горит саванна с высокой травой, стена пламени иногда достигает 15-20-метровой высоты. Через такую стену огня прорваться практически невозможно. Но к концу года травяной покров становился невысоким, полосу огня высотой всего 1-2 м можно было пересечь на быстро идущей машине. Крупные животные как правило не страдают от таких пожаров, но мелкие животные: мыши, грызуны, насекомые - гибнут в огне. «В августе дым горящей саванны затягивает горизонт мглой, а воздух насыщен запахом гари. Ночью цепочки огней от горящей травы на склонах гор производят впечатление ночного города. И хотя ты и знаешь, что до ближайшего освещенного населенного пункта десятки, а то и сотни километров, иллюзия очень сильна. Кажется, что можешь различить огни фонарных столбов, отблески от фар идущих машин, рекламы, вспыхивающие красными и желтыми огнями. И тебя, как городского жителя, начинает тянуть к ним, к удобству и комфорту города, из этой дикой и неуютной саванны.

Вечером, когда все возвращались из маршрута, мы ужинали и садились за обработку собранных материалов, упаковывали образцы, обменивались результатами наблюдений. На обеденном столе раскладывались карты, аэрофотоснимки, обсуждались выводы и намечались маршруты на следующий день. Одна за другой в палатках загорались газовые лампы, включались радиоприемники. К одиннадцати часам лагерь засыпал, только на общем обеденном стола горела большая дежурная лампа, освещая заснувший лагерь и отпугивая, как мы надеялись, нежелательных ночных посетителей. А утром снова раздавался крик «Подъем!», и снова начинался трудовой день...

Через каждые 8–10 полевых дней мы возвращались на нашу городскую базу. Здесь ждали письма из дома, горячая ванна, удобные постели, кино по вечерам, бутылка пива за ужином. Машины уходили на профилактику в гараж, покупались продукты для следующего выезда в поле, производилась генеральная стирка, ремонтировалось снаряжение, просматривались полученные из проявки диапозитивы и пленки, оплачивались полученные в наше отсутствие счета. А через пару дней снова в поле, в лагерную жизнь» (Капица, 1969₃).

В период, когда экспедиция базировалась на оз. Маньяра в лагере ощущалось землетрясение. В то же время участники экспедиции стали свидетелями феерического извержения карбонатитового вулкана Олдоиньо-Ленгаи (рис. 2). «Интенсивное пепловое извержение этого вулкана мы наблюдали в непосредственной близости от него 8 июля 1967 г. Он особенно интересен тем, что представляет собой единственный известный на Земле активный вулкан, продуктами современной деятельности которого являются не силикатные образования, а лавы и пеплы преимущественно карбонатного состава (так называемые карбонатиты). Неподалеку от этого вулкана находится одна из самых грандиозных на Земле кальдера Нгоронгоро – округлая чаша диаметром 20 км, образовавшаяся в результате проседания крупного позднеплиоценового вулкана» (Милановский, 1970).



Рис. 2. Извержение карбонатитового пепла вулканов Олдоиньо-Ленгаи. 8.VII 1967 г. Вид с востока.

Fig. 2. Carbonatite ash eruption of the Aldoinho-Lengai volcanoes. 8.VII 1967 View from the east.

Небо при извержении было зловещечерным. «Мы двинулись дальше, и вот перед нами открылся разбуженный Олдоиньо-Ленгаи. Совершенно правильный конус вулкана со срезанной верхушкой, окутанной облаком, извергал огромный столб дыма, вернее, пепла. Довольно сильный ветер относил дым к востоку, образуя огромный шлейф. Вертикальные полосы в шлейфе, наподобие ливневых занавесей, которые можно наблюдать при сильных грозах, показывали, что идет обильное выпадение пепла. Наши машины последние километры поднимали за собой огромное облако пыли, вернее, мелкого пепла, уже выпавшего на поверхность саванны. Подъезжаем ближе. До вулкана оставалось мили полторы. Отсюда, с небольшого холма, мы решили рассмотреть и сфотографировать вулкан. В черной туче, висевшей над вершиной, хорошо был виден плотный столб пепла, поднимавшийся из кратера. Нам трудно было определить высоту этого столба. Наблюдения, которые проводились до нас с самолета, показывали, что столб дыма поднимается на высоту до 15 километров. В черной туче

сверкают молнии, мы слышим раскаты грома. Молнии сверкают очень часто: два-три раза в минуту. По-видимому, облако сильно наэлектризовано. Склоны вулкана имеют бурый цвет, и время от времени по склонам тянутся полоски дыма. Мы заспорили, что это: фумаролы (горячие источники) или паразитические выходы газов в трещинах главного конуса. Потом мы узнали, что это были просто облака пыли, поднятые скатывающимися камнями и обломками, выброшенными из кратера. Этим объяснялось и появление таких же полосок дыма на склоне соседнего безмолвствующего вулкана Килимаси. Даже до него долетали отдельные «бомбы», выкинутые из жерла вулкана. И, хотя не было раскаленных потоков лавы, не было огнедышащего вулкана, все равно извержение производило сильное впечатление. Карбонатитовый пепел, который сейчас засыпал всю округу, через несколько дней посветлеет, и гора станет белой, словно засыпанной снегом. Сейчас вулкан имеет мрачный, бурый оттенок, а нависшая над саванной туча все дальше и дальше расползается по небу» (Капица, 1969₁).

В период работы участникам экспедиции довелось стать свидетелями только этого извержения вулкана, хотя известных крупных вулканов в восточной части Африки они видели много. Килиманджаро – высочайший стратовулкан Африки, возвышающийся над плоскогорьем Масаи на северо-востоке Танзании тремя вулканическими вершинами: наиболее древняя Шира, Мавензи и самая молодая и высокая – Кибо – спящая (рис. 3). В сухой период вулкан Килиманджаро чаще всего закрыт облачностью. «Только иногда вечером пелена облаков расходится, обнажая снежную вершину Кибо» (Капица, 1970).

Меру – вулкан на севере Танзании на территории национального парка Аруша (рис. 4–6). Последняя активность вулкана была зарегистрирована в 1910 году. Меру считается туристическим объектом, экспедиция на него не считается чем-то сложным. На склонах и в окрестностях вулкана можно повстречать разных диких животных, например, жирафов, буйволов, зебр, антилоп и даже слонов. С вершины Меру открывается уникальный вид на Килиманджаро (рис. 7).



Рис. 3. Четвертичный вулканический массив Килиманджаро. Вид с востока. Впереди – раннеплейстоценовый вулкан Мавензи с отпрапарированным некком. Сзади – плейстоценголоценовый вулкан Кибо с хорошо выраженным голоценовым кратером.

Fig. 3. Quaternary volcanic massif of Kilimanjaro. View from the east. In front is the Early Pleistocene Mawenzi volcano with a deposited nekk. Behind – Pleistocene-Holocene volcano Kibo with a well-defined Holocene crater.



Рис. 4. Гора Меру с запада, с дороги Мондули – Аруша. 28.07.67. **Fig. 4.** Mount Meru from the west, from the Monduli - Arusha road. 28.07.67.



Рис. 5. Четвертичный стратовулкан Меру с севера. **Fig. 5.** Quaternary stratovolcano Meru from the north.



Рис. 6. Эксцентричная кальдера вулкана Меру (с востока). Внутри кальдера видны экструзивный купол и голоценовый шлаковый конус с молодыми лавовыми потоками.

Fig. 6. Eccentric caldera of Meru volcano (from the east). An extrusive dome and a Holocene cinder cone with young lava flows are visible inside the caldera.



Рис. 7. Холмистая равнина направленного взрыва к востоку от вулкана Меру. На заднем плане – вулкан Килиманджаро, справа – вулкан Нгурдото. Вид с запада, из кальдеры Меру.

Fig. 7. The hilly plain of the directional explosion east of Meru volcano. Kilimanjaro volcano is in the background and Ngurdoto volcano is on the right. View from the west, from the Meru caldera.

В юго-восточной Уганде – субвулканический щелочно-карбонатитовый массив Тороро и неогеновые вулканы Элгон и Морото (рис. 8, 9). Вулкан Элгон имеет форму щита с плоской вершиной и плохо сохранившейся кальдерой диаметром более 10 км. Вулкан окружен труднопроходимыми пиками высотой более 4 км.

Е.Е. Милановский рисовал не только вулканы, озера, места полевых лагерей, но и просто виды саванны с ее неповторимыми силуэтами зонтичной акации (рис. 10–14).



Рис. 8. Отпрепарированный миоценовый субвулканический щелочно-карбонатитовый массив Тороро в юго-восточной Уганде. Вдали – склон вулкана Элгон. Вид с юго-запада.

Fig. 8. Dissected Miocene subvolcanic alkaline-carbonatite Tororo massif in southeastern Uganda. In the distance is the slope of Elgon volcano. View from the southwest.



Рис. 9. Полуразрушенный нижне-среднемиоценовый щелочной вулкан Морото. Вид с северозапада.

Fig. 9. Semi-eroded Lower-Middle Miocene alkaline volcano Moroto. View from the northwest.



Рис. 10. У лагеря Серонгеро. Вид на СЗ. Ландшафт Северо-Африканской саваны. **Fig. 10.** At the Serongero campground. View to the NW. Landscape of the North African savanna.



Рис. 11. Вид африканской саванны.

Fig. 11. View of the African savannah.



Рис. 12. Вулкан Гелай. **Fig. 12.** Gelai volcano.

Рис. 13. Озеро Магади... **Fig. 13**. Lake Magadi...



Рис. 14. В лагере. **Fig. 14**. In the camp.

В процессе экспедиционных работ естественно и часто происходили встречи с местными жителями (рис. 15). В Кении и Танзании это были в основном масаи – полукочевой, живущий в саванне, коренной африканский народ, один из самых известных племен Восточной Африки. «...племя, находящееся на очень примитивной стадии развития. Копье, лук и стрелы – вот их оружие, причем оружие защиты от крупных хищников. Они не охотятся, а добывают себе пищу скотоводством. Молоко и кровь, которую они берут у коровы, надрезая у нее вену на шее, – вот основное их питание. Коровы при этом не гибнут, ранка на шее, замазанная глиной, прекращает кровоточить, и корова снова нагуливает взятую у нее кровь. Масаи – очень красивое племя. Мужчины, завернутые в кусок коричневой ткани, стройны и изящны в своих движениях. Массам не любят, когда их снимают, они загораживаются рукой, даже сердятся, потому что считают, что при фотографировании частица их тела переходит на фотографию» (Капица, 1969₂).



Рис. 15. На улице г. Аруша. 6.07.67. **Fig. 15.** On the street of Arusha. 6.07.67.

Масаи легко меняют место своего жительства. Так, экспедиция наблюдала переселение масаев от вулкана Олдоиньо-Ленгаи. «На нескольких десятках мулов было нагружено их нехитрое добро, они двигались нам навстречу, обеспокоенно поглядывая на север. Ведь при каждом извержении, когда карбонатитовые вулканы выбрасывали в воздух огромное количество пепла, жизнь местного населения ставилась под угрозу. Нет, им не грозила судьба жителей Помпеи. Но пепел засыпает пастбища, покрывает все тонким слоем едкого содового налета, и скот, единственный источник их существования, гибнет от нехватки питания. И вот перед нами первые беженцы, уходящие от

извержения. Нам рассказывают, что масаи поклоняются вулкану как божеству, ибо оно может разгневаться и лишить их пищи. Интересно, что масаи совершенно не охотятся на диких животных, которые в изобилии пасутся вокруг их деревень. В местах, где живут другие племена, занимающиеся охотой, количество диких животных резко сокращается. Мы подъехали к масаям спросить о дороге, которую мы потеряли. Морари с трудом объяснялся с ними: он не знал, повидимому, местного диалекта, а может быть, масаи не понимали суахили или не хотели нам объяснить дорогу к их разгневанному божеству, только ответы мы получали самые невразумительные. Пожилой масай, который вел с нами переговоры, вдруг начал размахивать копьем, явно угрожая. Оказывается, кто-то из наших пытался его сфотографировать, и это привело его в бешенство. Можно было понять нервозность масаев. Им приходится уходить из родных мест, неприятностей и так немало, а тут еще эти белые с их расспросами и «машинками, лишающими силы» (Капица, 1969₃).

Однажды в Танзании участникам экспедиции удалось наблюдать коллективный африканский танец: «Человек сто мужчин и женщин двигались в огромном хороводе, мерно звучали барабаны, и монотонный хор толпы вторил им. Не было вариаций мелодий или ритма, просто люди в хороводе, держась друг за друга, качались в такт барабанному бою и что-то пели. Красочные одежды на фоне африканской природы создавали яркое пятно» (Карица, 1969₃).

При работе геофизической группы сейсмоприемники устанавливались в саванне на несколько дней. Чтобы обеспечить безопасность приборов у группы было письмо от властей Танзании о безопасности и научном значении работ, и что местные власти должны оказывать содействие при их проведении. На металлических контейнерах с аппаратурой были установлены таблички с красными скрещенными костями, черепом и двумя надписями «опасно»: на суахили – «хатари» и по-английски – «дейнджер». Местные племена воспринимали появление этих странных сооружений по-разному. Когда приборы устанавливались в местах, где работали миссионеры, обычно все происходило спокойно, но там, где по поводу установки приборов приходилось общаться только с коренными жителями, возникали сложные ситуации. На территории «племени мангати (датога), известного своей свирепостью» для установки приборов пришлось общаться с вождями племени. «Они стояли в гордых, независимых позах, внимательно слушая переводчика, которым был наш шофер Абдулла ... Выслушав пространную речь Абдуллы, вожди посовещались между собой и предложили нам уплатить племени денежную компенсацию за ущерб ... если какаянибудь корова забредет на прибор и погибнет»... Племени предложили выставить вокруг приборов охрану ... «После некоторой торговли вопрос об охране был согласован, и мы, уплатив некоторую сумму, под наблюдением вождей установили сейсмостанцию. Уже позже, через несколько дней, приехав снимать прибор, мы познакомились с миссионером-американцем, и он очень смеялся над тем, как вожди вытянули у нас деньги» (Капица, 1970).

В некоторых же случаях приходилось добиваться встречи с комиссаром района, если на месте группа сталкивалась «с бешеным сопротивлением». А однажды «...смелые, рослые воины бросились бежать от нас... и близлежащая масайская деревня снялась с насиженного места и срочно эвакуировалась...» (Капица, 1970).

Были встречи и с племенами пигмеев группой низкорослых негроидных народов, обитающих в экваториальных лесах Африки. «Мы уже знали, что к западу от Рувензори можем встретиться с пигмеями. Проехав с десяток миль от горячих источников, заметили у дороги прибитый к дереву щит из фанеры, на котором написано по-английски: «Нью Пигмей вилледж» («Новая пигмейская деревня»). Вскоре нашу машину остановила группа низкорослых мужчин и подростков. Они протягивали в окна нехитрые поделки из дерева и шкур диких животных, предлагая купить это. От низеньких хижин на опушке леса к нам устремились старики, женщины, дети. Вокруг поднялся такой невообразимый гам, что мы решили немедленно продолжить маршрут...» При возвращении снова была встреча с пигмеями. На вопрос: «Кто вождь в этой деревне? Вперед выступили сразу четверо. Каждый из них показывал на себя. После недолгого спора остался один претендент – бородатый плотный мужчина, отличавшийся от своих сородичей тем, что на нем были шорты и рубаха». На просьбу о разрешении сделать несколько снимков он потребовал плату в сто долларов. «По-видимому, нас приняли за богатых американских туристов, которые появляются в этой глуши и не щадят денег, чтобы по возвращении похвастать, как они встречались с пигмеями» (Логачев, 1970).

В районе Карамоджа на территории Уганды были встречи с племенем карамод-

жа, «представители «сильной» половины которого отличаются воинственным характером. Карамоджа не слишком обременяют себя одеждой. Мужчины довольствуются короткой накидкой из материи или шкуры животного, едва прикрывающей грудь и спину. Кроме копья и щита, непременные атрибуты каждого карамоджа – маленький трехногий стульчик из дерева, на который мужчина усаживается, встретив знакомого, да короткая палка-подставка, на которую беседующий кладет натруженную руку. Туалет женщин карамоджа состоит из набедренной повязки или передничка из полосок кожи, расшитых бисером, алюминиевых или латунных обручей на запястьях, щиколотках и шее; в ушах большущие серьги. Чтобы сфотографировать карамоджа, нужно угостить их чем-нибудь или дать несколько монет. Они берут это не из корыстолюбия, а из предубеждения, что фотографирование якобы забирает у них часть силы и должно быть компенсировано. Съемка без согласия вызывает столь бурный протест, что карамоджа может пустить в ход и оружие» (Логачев, 1970).

У участников экспедиции случались и встречи с представителями частных европейских компаний, работавших в Африке. В частности, в районе озера Магади работала бельгийская компания по добыче соды. Вот как описал свои впечатления об этом А.П Капица: «И вот мы сидим на краю небольшого бассейна в глубоких плетеных креслах, с нас капает вода: мы только что купались, в руках у нас по стакану ледяного пива, и мы несколько ошарашено переглядываемся. Что-то это мало отвечает нашим представлениям о раскаленной саванне» (Капица, 19691).

Полевые работы экспедиции чередовались с пребыванием на базах в городах, где можно было отдохнуть, привести в порядок свои записи, подготовиться к новому выезду в поле. Это было время деловых и дружеских встреч.

Среди друзей экспедиции было много очень интересных людей. Пожилой мистер Робсон – добродушный и гостеприимный хозяин с привлекательной улыбкой. Он владел в Найроби аптекой, обучал плаванию детей и тренировал молодых пловцов, так как в молодости сам был первоклассным пловцом. Радиолюбитель, прекрасный знаток Африки, изъездивший ее вдоль и поперек, автор нескольких фильмов о ее природе, альпинист. Кроме того, мистер Робсон интересовался геологией и археологией.

Начальник английской геофизической экспедиции доктор Бэзил Кинг, тоже работавший в рифтовой долине к северу от Найроби и сотрудники его экспедиции – Бишоп и Хан. Их очень интересовали задачи нашей экспедиции. Со стороны англичан чувствовалось какое-то недоверие. «Они никак не могли поверить, что цели экспедиции не имеют под собой никакой сугубо практической стороны. «Экспедиция для решения крупных теоретических вопросов строения Земли? Это понятно. Но как вам под такую тему дают деньги? Конечно, исследования базисных вопросов науки очень важны, но как вы убедили свое начальство в этом?» Когда мы объяснили, что у нас решение этих вопросов поручено самим ученым, они отказывались верить. Нам много приходилось рассказывать о своей стране, о принципах организации науки и высшего образования, порой надо было разбивать наивные и нелепые представления о Советском Союзе» (Капица, 19691).

Дружеские отношения у участников экспедиции сложились с представителями социалистических стран в Найроби, в частности, торгпредом Венгерской Народной Республики товарищем Мартином Вашем. Часто были встречи в советском посольстве, где сотрудников экспедиции радушно встречал посол Д.П. Горюнов и другие сотрудники посольства. Здесь можно было прочесть свежие газеты с Родины, посмотреть советский фильм, посидеть в библиотеке.

Животный мир африканского континента славится своим разнообразием. Естественно в полевых маршрутах участники экспедиции неоднократно встречались с различными необычными для европейского человека представителями африканской фауны. Это были жирафы, зебры, антилопы, обезьяны – бабуины, крупные ящерицы – вараны. Зайцы, похожие на наших. Многочисленные птицы - страусы, цесарки, куропатки. В национальных парках - львы, бегемоты, гепарды, носороги, слоны, разнообразные змеи, в том числе кобры. Первое время встречи с хищниками вызывали опасения. «...несколько раз на дороге, вернее, на обочине, светились чьи-то глаза зеленым кошачьим блеском, когда мы подъезжали ближе, огоньки исчезали. Пылкая фантазия рисовала нам пантер и леопардов, но чего не видели, того не видели» (Капица, 1969). Экспедиция была обеспечена оружием, хотя пользоваться им оказалось практически невозможно, так как обладание оружием в Кении сопряжено с целым рядом сложных формальностей.

В Танзании, где работала экспедиция, много заповедников – на плато Серенгети, на склонах вулканов Нгоро-Нгоро и Меру, у берегов озера Маньяра, на склонах Килиманджаро. «В парке на берегу озера Маньяра можно встретить носорогов и слонов, диких буйволов и антилоп, но самый знаменитый экспонат здесь – это львы на деревьях. Мы не поверили глазам, когда увидели на ветке огромного дерева льва. Он лежал, разместившись на развилке веток, положив голову на удобно изогнутый сук, и помахивал хвостом» (Капица, 1959₂).

Еще один заповедник Нгоро-Нгоро расположен в гигантской кальдере диаметром около тридцати километров, окруженной отвесными стенами кратера. Это особый изолированный мир: леса и озера, саванны и степи, и десятки тысяч животных. В этом заповеднике с участниками экспедиции произошел забавный случай. В траве отдыхало сонное семейство львов. Экспедиционный Ленд-ровер подъехал вплотную к зверю. Лев лениво поднялся, повернулся задом, отошел метров на пятьдесят и снова лег. Мы продолжали преследовать льва. Из люков торчали головы с готовыми к съемке фото- и киноаппаратами. Лев снова попытался отойти, не поворачиваясь к машине мордой. Когда машина подъехала ко льву в третий раз, лев повернулся к машине и рявкнул царственным голосом. Вид льва с роскошной черной гривой, его рык заставил всех испугаться. Все быстро сели на свои места, сжимая фото- и киноаппараты в руках. Испуг был таким, что никто так и не сфотографировал этого царя зверей.

Иногда звери приходили близко к палаткам. Однажды ночью в лагере бродил носорог. «...когда хрюканье носорога надоело Владимиру Владимировичу, он поднялся с кровати и пытался прогнать нашего нахального гостя. Мелкие камни, шум и свет фонарей не понравились носорогу, и он несколько отошел от нашего лагеря. Утром в кустах еще слышался какой-то шорох, но носорога не было видно» (Капица, 1969₁).

Однажды в течение нескольких ночей в лагерь на берегу протока Казанга между озерами Георга и Эдуарда приходили львы. «Сперва было все спокойно, но во второй половине ночи начался такой «концерт», что о сне нечего и думать. Львиный рык в нескольких метрах от тебя кажется громовым. Одни звуки походили на короткие взрывы, другие начинались протяжным низким раскатом, за которым следовал целый каскад коротких, постепенно ослабевающих рычащих выдохов. Львы что-то обсуждали. Они ушли лишь под утро» (Логачев, 1970).

В первый год работы участники экспедиции опасались ядовитых змей. Но за два года видели их не больше десяти, и ни разу они не предпринимали попыток атаки. Гораздо больше неприятностей доставляли многочисленные насекомые. Ночью только противомоскитные сетки давали возможность спокойно уснуть. Почти не было способов борьбы с мухой цеце, которая способна прокусывать даже толстую ткань рубашек. При этом были сезоны, когда работы шли в районах, где наблюдались случаи заболевания сонной болезнью. Приходилось делать специальные анализы крови, чтобы убедиться, что никто не стал носителем этой страшной болезни.

Со временем острота первых ощущений у участников экспедиции стала исчезать. Африка постепенно становилась все более привычным объектом для глубокого и всестороннего изучения.

Литература

Восточно-Африканская рифтовая система: в 3 томах. Т. 1. Основные черты строения. Стратиграфия. М.: Наука, 1974. 263 с. Т. 2: Гипергенные образования: Геоморфология. Неотектоника. 1974. 259 с. Капица А. Из Африканского дневника (Путевые заметки) // Наука и жизнь. 1969. № 1. С. 84– 90; Наука и жизнь. 1969. № 2. С. 120–126; Наука и жизнь. 1969. № 3. С. 97–102; «Наука и жизнь», 1970. № 2. С. 56–65.

Капица А.П., Белоусов В.В. Информационный отчет о работах советской комплексной Восточно-Африканской экспедиции Академии наук СССР в 1967 году / Архив Е.Е. Милановского.

Логачев Н.А. У древних вулканов Африки / Неделя. 1970, № 21 (533). С. 8–9.

Милановский Е.Е. Основные черты строения и формирования рифтовой системы Восточной Африки и Аравии // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 1969. № 1. С. 42–60.

Милановский Е.Е. Изучение рифтовых зон Восточной Африки // Вестн. АН СССР. 1970. № 5. С. 96–101.

Мир глазами геолога. Путевые зарисовки Евгения Евгеньевича Милановского // М.: ООО «Логата», 2012. 252 с.

https://ifz.ru/institut/kniga-pamyati/vv-belousov.

References

East African Rift System: in 3 volumes. T. 1. Main structural features. Stratigraphy. M.: Nauka, 1974. 263 p. T. 2: Hypergene formations: Geomorphology. Neotectonics. 1974. 259 p.

Kapitsa A. From the African Diary (Travel Notes) // Science and Life. 1969. No. 1. P. 84–90; Science and life. 1969. No. 2. P. 120–126; Science and life. 1969. No. 3. P. 97–102; "Science and Life", 1970. No. 2. P. 56–65.

Kapitsa A.P., Belousov V.V. Information report on the work of the conscientious complex of the East African expedition of the USSR Academy of Sciences in 1967 / Archive of E.E. Milanovsky.

Logachev N.A. At the ancient volcanoes of Africa / Week. 1970, No. 21 (533). pp. 8–9.

Milanovsky E.E. Main features of the structure and formation of the rift system of East Africa and Arabia // Vestn. Moscow State University. Ser. 4. Geology. 1969. No. 1. P. 42–60.

Milanovsky E.E. Study of rift zones of East Africa // Vestn. Academy of Sciences of the USSR. 1970. No. 5. P. 96–101.

The world through the eyes of a geologist. Travel sketches of Evgeny Evgenievich Milanovsky // M.: Logata LLC, 2012. 252 p.

Приложение

По следам Восточно-Африканской рифтовой экспедиции (заметки и рисунки глазами очевидцев)

Т.Ю. Тверитинова, А.И. Гущин

Фотографии комплексной Восточно-Африканской рифтовой экспедиции



Танзания. Н.А. Логачев, В.В. Белоусов и Е.Е. Милановский в кратере Нгурдото на склонах вулкана Меру. 1969.



Танзания. Извержение вулкана Олдоиньо-Ленгаи 7-8.7.1967. Слева направо: Е.Е. Милановский, А.П. Капица, В.В. Белоусов.



Кения. Переправа экспедиции через реку после тропических дождей. 1967.



Кения. Полевой лагерь в национальном парке Цаво. 1967.



Кения. Полевой лагерь на берегу оз Нукуру. 1967.



Кения. Озеро Магади и эскарп Игруман. Слева направо: Е.Е. Милановский, А.В. Горячев, А.А. Краснов. 1967.



Уганда, близ Мбале. В.В. Белоусов и африканские дети на западном склоне потухшего вулкана Элгон. 1967.



Танзания. Встреча Н.А. Логачева с масаями на побережье оз. Нотрон 1967.



Уганда. Экватор к югу от массива Рувензори. Между машинами Н.А. Логачев, спинами Е.Е. Милановский (слева) и В.В. Белоусов (справа).1967.



Уганда. Е.Е. Милановский на экваторе на шоссе Кисуму-Кампала. 1967.



Танзания. Е.Е. Милановский на склоне кальдеры Нгоронго. 1967.



Н.А. Логачев и Е.Е. Милановский на фоне Килиманджаро. 1968.



Танзания. Полевой лагерь у горы Лонгидо. 1968.



Е.Е. Милановский в маршруте



Уганда. В.В. Белоусов (слева) и Н.А. Логачев в маршруте на склонах массива Рувензори. 1969.



Уганда. Западный склон Рувензори. 1969.



Уганда. Массив Рувензори. Е.Е. Милановский и В.В. Белоусов. 1969.



Уганда. Полевой лагерь недалеко от г. Форт-Портал. 1969



Танзания. В лагере. На машине Е.Е. Милановский. 1968.



Уганда. В маршруте. У машины стоит Н.А. Логачев, в люке машины Е.Е. Милановский. 1969.



Уганда. Е.Е. Милановский в маршруте по заповеднику. Слоновая трава. 1969.



Уганда. Горный массив Рувензори. Е.Е. Милановский в маршруте. 1969.



Прощание с африканскими коллегами-геологами. 1969 г.



Африканские львы.



Африканские слоны

Тверитинова Татьяна Юрьевна,

кандидат геолого-минералогических наук, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, доцент кафедры региональной геологии и истории Земли, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
старший научный сотрудник лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики,

men.: 495-939-2750, email: tvertat@yandex.ru.
Tveritinova Tatyana Yuryevna, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Lomonosov Moscow State University, Department of Geology, Associate Professor, Department of Regional Geology and Earth History, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. O.Yu. Schmidt Institute of Earth Physics, Russian Academy of Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Fundamental and Applied Problems of Tectonophysics, tel.: 495-939-2750, email: tvertat@yandex.ru.

Гущин Александ Иванович, кандидат геолого-минералогических наук,

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, доцент кафедры динамической геологии, тел.: (3952) 42–74–72, email: alexmsu-824@mail.ru. **Gushchin Alexander Ivanovich,** Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Lomonosov Moscow State University, Department of Geology, Associate Professor of the Department of Dynamic Geology, tel.: +7(495) 939-2081, email: alexmsu-824@mail.ru.

УДК 075.8(551.5) https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.182

О Мефодии Ивановиче Грудинине – исследователе базитов и гипербазитов Сибири и преподавателе основ геологии

С.В. Рассказов

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Автор статьи длительное время общался с профессором Мефодием Ивановичем Грудиным и характеризует его вклад в изучение пород основного и ультраосновного состава юга Сибири и в обучение студентов на геологическом факультете Иркутского госуниверситета.

Ключевые слова: базиты, гипербазиты, юг Сибири, Байкал.

About Methodius Ivanovich Grudinin – researcher of basites and hyperbasites of Siberia and teacher of fundamentals of geology

S.V. Rasskazov

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

Abstract. The author of the paper have been in touch with Prof. Grudinin for a long time and characterizes the Grudinin's contribution to study of basic and ultrabasic rocks in Southern Siberia and on training of students at the geological faculty of Irkutsk State University.

Keywords: Mafic rocks, hyperbasic rocks, Southern Siberia, Baikal.

Введение

Мефодий Иванович Грудинин, доктор геолого-минералогических наук, профессор оставил глубокий след в познании геологии базитов и гипербазитов юга Восточной Сибири и воспитал ни одно поколение студентов как преподаватель геологического факультета Иркутского госуниверситета. Мне пришлось с ним профессионально общаться долгое время, поэтому я пишу очерк о нем как о дорогом мне человеке.

Научный руководитель моей выпускной дипломной работы

С Мефодием Ивановичем Грудининым меня свела учеба на геологическом факультете ИГУ. В 1975 г. меня направили в Институт земной коры ВСФ СО АН СССР для прохождения преддипломной геологической практики. В то время М.И. работал старшим научным сотрудником и пока еще не защитил докторскую диссертацию. Кроме меня, у М.И. проходил практику первокурсник того же геологического факультета Ю. Меньшагин. Мы втроем должны были провести полевые работы на труднодоступных массивах: Шаманском, гипербазитовом и Витимконском, базитовом.

С брезентовой четырех-местной палаткой, со спальниками и месячным запасом продуктов наша группа на небольшом самолете АН-2 долетела до дер. Бамбуйки, распложенной на р. Витим. Мы наняли моторку и, минуя несколько опасных шивер, добрались до Шаманского массива. Сделали лагерь на берегу и около 2 недель ходили в маршруты. Однажды был сильный ливень. Витим поднялся на 14 м. Мы были вынуждены ночью снимать лагерь и переносить его в безопасное место. Обошлось без потерь.

Массив высится на правом берегу Витима и состоит из огромных серпентинитовых глыб. При хождении в маршрутах нужно было из одной 5-10-метровой глыбы перебираться на другую. М.И. только исполнилось 46 лет. Он был физически крепок и нагружал нас каждый день. Здесь я узнал, что у научных работников нет выходных, особенно во время полевых работ. Один маршрут был двухдневным на вершину гольца Шаман с ватными спальниками. Спали без костра, поскольку на вершине дров не было. С очередной глыбы я упал и приземлился на спину. Перетянул рюкзак, нагруженный образцами. От удара при падении меня спас спальник.

У нас была карта Шаманского массива, составленная Э.Л. Прудовским, но без деталей. Контакты гипербазитов с вмещающими породами (сланцами) везде тектонические. Опробование в пересечениях центральной и южной частей массива дало лишь крайне редкую возможность видеть в шлифах реликтовые зерна оливина и ортопироксена. Все минеральное разнообразие определялось распространением вторичных минералов: талька, брусита, тремолита и разных типов серпентина (лизардита, антигорита), вторичного оливина. Изредка в обнажениях встречались прожилки вторичных оливинитов и карбонатных пород.

Мы подходили к очередному обнажению. М.И. рассказывал мне, что он видит как геолог, и предлагал мне опровергнуть его наблюдение. Я, по наивности, включался в Начинался обсуждение. спор, который обычно заканчивался моим приговором как студента с суровой оценкой преподавателя. отношения преподаватель-студент Наши сохранились на все последующие общение до наших последних встреч. Он всегда имел для меня непререкаемый авторитет преподавателя, мудрого и знающего. Моя учеба продолжалась даже тогда, когда мы вместе с М.И. проводили учебные практики студентов-первокурсников, на обнажениях он требовал от меня объяснений для всех студентов наблюдаемых геологических соотношений.

Однажды я поднял на берегу Витима красивую уплощенную гальку яблочнозеленого цвета с поперечником 10 см. Был солнечный день. Мы впервые получили передышку. Я лег на песке под солнце. Галька была на моем животе. М.И., проходя мимо, ее увидел и завладел ею. У него сразу возникло подозрение, что она нефритовая. Как мы не пытались найти что-то подобное, больше таких галек на берегу не было. Позже оказалось, что подобной галькой был усыпан противоположный берег Витима, на Большой Косе. Но об этом мы узнали только тогда, когда по заявке М.И., основанной на яблочно-зеленой гальке, «Байкалкварцсамоцветы» организовали поиски нефрита в районе Шаманского массива и в его бассейне выше по Витиму. При этих поисках в бассейне р. Цыпа было найдено уникальное месторождение белого нефрита нового апокарбонатного типа. За это открытие М.И. получил от Института земной коры премию – целых 200 р.!

После возвращения в Бамбуйку, начался новый этап нашей экспедиции. Мы на машине проехали вверх по р. Витимкон до Витимконского габброидного массива. Здесь к нам присоединился Герман Иванович Конников, известный базит-гипербазитчик. Позже он какое-то время руководил Геологическим институтом БФ СО АН СССР. Габброиды существенно отличались от гипербазитов Шаманского массива большим разнообразием петрографических разновидностей пород. Витимконский массив имел зональное строение и был петрографически по-разному представлен в разных частях изза тектонического наклона блока. Этот массив был одним из основных объектов, которые М.И. рассматривал в монографии «Базит-гипербазитовый магматизм Байкальской горной области», опубликованной в 1979 г. (рис. 1) и защищенной в качестве докторской диссертации.

АКАДЕМИЯ НАУК СССР СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ ИНСТИТУТ ЗЕМНОВ КОРЫ М. И. ГРУДИНИН БАЗИТ-ГИПЕРБАЗИТОВЫЙ МАГМАТИЗМ БАЙКАЛЬСКОЙ ГОРНОЙ ОБЛАСТИ Ответственный редактор д-р геол.-мин, наук проф. В. А. Вахрушев procey (nade in a Wowane mudikone In ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА» СИБИРСКОЕ ОТЛЕЛЕНИЕ Новосибирск-1979

Рис. 1. Титульный лист монографии «Базит-гипербазитовый магматизм Байкальской горной области» с надписью М.И. Грудинина.

Fig. 1. Title page of the monograph "Basite-hyperbasite magmatism of the Baikal mountain region" with the inscription by Grudinin.

По возвращению в Иркутск, я стал постоянным гостем у Мефодия Ивановича в кабинете 358 ИЗК. В его комнате стоял вместительный шкаф, забитый литературой по базитам и гипербазитам разных районов Мира. Я целиком погрузился в эту тематику. Смотрел шлифы пород, собранных во время нашей экспедиции. М.И. научил меня пользоваться федоровским столиком, определять кристаллооптические константы минералов. Пробудил интерес к определительской петрографической работе в гипербазитах и базитах. Ее сложность заключалась в развитии вторичных изменений пород, существенно усложняющих интерпретацию происхождения изначально неизмененных пород, кристаллизовавшихся из расплавов.

Осенью 1975 г. в районе Пивоварихи упал метеорит. Директор ИЗК М.М. Одинцов отправил М.И. Грудинина на обследование места падения как ведущего специалиста в области базитов и гипербазитов. М.И. нашел признаки падения тела и из поврежденной коры березы извлек высокобарический минерал коэсит. Он неосторожно оставил этот минерал на столе, уходя на обеденный перерыв. В это время, к несчастью, пришли двое студентов. Ценная находка оказалась сметенной со стола и безвозвратно исчезла. Когда М.И. вернулся, один из студентов (С.Н. Коваленко) быстро ретировался. Мне же было некуда бежать. Я узнал, что такое настоящее разочарование преподавателя. Так наша любознательность не дала возможности Мефодию Ивановичу сделать открытие и представить геологической общественности обоснование факта падения метеорита. Для подготовки моей дипломной работы было достаточно образцов гипербазитов, отобранных на Шаманском массиве. Работа выполнялась на кафедре минералогии и петрографии геологического факультета ИГУ (рис. 2), которой в то время руководил Валентин Александрович Вахрушев, увлеченный минералог, по совместительству – сотрудник Института геохимии СО АН СССР.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР
Иркутский государственный университет им.А.А.Жданова
Геологический факультет. Кофелля Минелялогии и
петрографии.
PACCKA30B C.B.
дипломная работа
по теме: Петрология Шаманского массива
альпинотивных гипербазитов.
Дипломант Рассказов С.В./
Руководитель: кандидат геолого-минералогических
наук, ст. научный сотрудник И.З.К.
Грудинин М.И. Му
Я Зав. кафедрой: доктор геолого-минералогических
наук, профессор Вахрушев В.А. Астенууну
Иркутск 1976 год.

Рис. 2. Рис. 2. Титульный лист моей дипломной работы «Петрология Шаманского массива альпинотипных гипербазитов», защищенной в 1976 г. под руководством М.И. Грудинина.

Fig. 2. Title page of my diploma work "Petrology of the Shaman massif of alpine-type hyperbasites", defended in 1976 under the guidance of Grudinin.

В декабре 1975 г. в штатном расписании Института земной коры образовались новые ставки в связи с работами в зоне БАМ. Меня приняли 11 декабря «смотреть шлифы» в лабораторию неотектоники и геоморфологии, которой руководил Н.А. Логачев. Я получал жалование старшего лаборанта 70 р. уже при подготовке диплома. Шлифы кайнозойских вулканических пород и содержащихся в них базит-гипербазитовых включений выгодно отличались от шлифов базитов и гипербазитов из массивов М.И. Минералы этих пород были идеально чистыми, лишенными какихлибо вторичных изменений. Этот контраст заставил меня прочувствовать преимущество изучения кайнозойских базитов и гипербазитов перед изучением более древних пород, для которых само понятие «магматическая порода» употребляется в значительной мере условно, поскольку первичный состав, который должен соответствовать магсохраняется ме. часто совсем не И предполагается весьма условно.

Исследователь-первопроходец

В 1960–1980-х гг. представления о геологической роли базит-гипербазитового магматизма на континенте только складывались. Работая в ИЗК, я совершил еще одну экспедиционную поездку вместе с М.И. Грудининым и Ю.В. Меньшагиным. На машине ГАЗ-66 в июле 1980-го г. мы пересекли хр. Хамар-Дабан в районе пос. Бабушкин и спустились в долину р. Темник. Долго искали брод через эту полноводную реку, но не нашли. Были вынуждены делать большой объезд по мосту. В бассейне р. Дархинтуй (левый приток р. Джиды) мои спутники обследовали гипербазиты и базиты Джидинского пояса. В бассейне Дархинтуя Мефодий Иванович впервые охарактеризовал структуры тектонического гипербазитового меланжа.

В 1980-х гг. работы моих экспедиционных спутников, однако, были в основном сосредоточены на других объектах. Они выполнили систематическое изучение всех находок ультрабазит-базитовых ассоциаций раннего докембрия в выходах фундамента юго-западной части Сибирской платформы и подготовили монографию «Ультрабазитбазитовые ассоциации раннего докембрия», в которой впервые в полном объеме охарактеризовали ультрабазиты повышенной желеэтой территории (Грудинин, зистости Меньшагин, 1982, 1983, 1987).



Рис. 3. М.И. Грудинин в маршруте со студентами в пос. Листвянке, на берегу Байкала в поисках фрагментов гипербазитов повышенной железистости.

Fig. 3. M.I. Grudinin on a route with students in the Listvyanka village, on the shore of Lake Baikal, in searching fragments of hypermafic rocks with elevated iron content.

Исследователь и преподаватель

Я вернулся на геологический факультет в качестве преподавателя в 2002 г. В это время М.И. уже прочно освоился на кафедре динамической геологии и вел один из главных предметов - общую геологию с организацией первой учебной практики студентов (Грудинин, Хрусталева, 2001). Его разработанный курс Общей геологии давал основы предмета с демонстрацией объектов в окрестностях Иркутска от древнейших пород Земли до самых молодых. Я подключился к практикам. Мы с М.И., как когда-то раньше, делили палатку на двоих и ходили в маршруты со студентами (Рассказов и др., 2011).

Во время летних полевых сезонов 1998 и 1999 гг. М.И. Грудинин и С.Н. Коваленко с парой аспирантов ИГУ делали многодневные маршруты по р. Снежной на труднодоступный Снежнинский габбро-сиенитовый массив (рис. 4). В 2000 г. М.И. отобрал для такого маршрута около 10 крепких студентов-первокурсников. Серия отобранных об-

разцов была передана мне для анализов. В результате была подготовлена серия публикаций (Грудинин и др., 2001, 2004, 2006), в которых в Снежнинском габбро-сиенитовом массиве были охарактеризованы породы умеренно щелочного состава и переходного к нормально щелочному: габброиды, сиениты и гранодиориты. Мы пришли к выводу, о том, что магматические расплавы внедрялись после образования зонального метаморфического комплекса Юго-Западного Прибайкалья, обусловленного раннеордовикской коллизией. Наиболее ранними были габброиды с мантийными и надсубдукционными геохимическими характеристиками. Секущие их маломощные жилы гранодиоритов представляли собой гранитоиды S-типа. Наиболее поздние жилы сиенитов имели геохимические характеристики гранитоидов І-типа. Впоследствии мы не раз обращались к материалам, полученным по этому массиву, и продолжали обработку этих данных с привлечением студентов (Коваленко и др., 2022; и др.).



Рис. 4. Схема размещения Снежнинского и более мелких массивов габбро-сиенитового состава в бассейне р. Снежная (Грудинин и др., 2004). Метаморфические породы: 1 – харагольской, 2 –

безымянской свит; 3, 4 – палеозойские: 3 – габброиды и сиениты, 4 – граниты; 5 – элементы залегания пород; 6 – разломы; 7 – зоны развития тектонитов; 8 – участок детального опробования; А–Б – разрез. На врезке показано положение габбро-сиенитовых массивов в Юго-Западном Прибайкалье: БМ – Быстринского, БЗМ – Безымянского, СМ – Снежнинского. Линия Главного Саянского разлома (ГСР) и изограды регионального метаморфизма (по А.А. Шафееву): І – граната, II – ставролита, андалузита и кордиерита, III – силлиманита, IV – калиевого полевого шпата, V – гиперстена.

Fig. 4. Location of Snezhnaya and smaller massifs of gabbro-syenite composition in the Snezhnaya River basin (Grudinin et al., 2004). Metamorphic rocks: 1 - Kharagol series, 2 - Bezymyanka series; 3-4 - Paleozoic rocks: 3 - gabbroids and syenites, 4 - granites; 5 - elements of rock occurrences; 6 - faults; 7 - zones of tectonites; 8 - sampling site; AB - cross-section. Insert displays position of gabbro-syenite massifs: BM - Bystraya, B3M - Bezymyanny, CM - Snezhnaya. The Main Sayan fault (MSF) and isogrades of regional metamorphism (after Shafeyev): I - garnet, II - staurolite, and alusite and cordierite, III – sillimanite, IV – potassium feldspar, V – hypersthene.

Еще один объект, который был предметом внимания М.И., – Озерский массив озерского магматического комплекса в Приольхонье (этот массив в поздних работах известен под новым наименованием «Берхинский»). Детальное петрографическое изучение пород массива показало его сложение метаморфизованными габброидами (Грудинин, Меньшагин, 1987). Контакты пород массива с вмещающими породами тектонические и частично залечены поздними гранитоидными телами (рис. 4). Расположенный к юго-западу Бугульдейский массив метагабброидов растащен по разломам на более мелкие фрагменты. По вторичным слюдам и амфиболам метагабброидов получались раннепалеозойские датировки, подобные датировкам калиевых гранитов. Однако специальные поиски вывели Н.А. Срывцева на неизмененные габбро-нориты, для которых по магматическому парагенезибыла получена cv минералов Rb–Srизохронная датировка 1823 ± 61 млн лет (Грудинин и др., 2007; Срывцев и др., 2007). Эта датировка выявила заблуждение геологов, приписывающих результаты радиоизотопного датирования метаморфизованных габброидов магматическому процессу. Древняя трактовка возраста коренным образом меняет представление о роли метагабброидов в геологической структуре территории Приольхонья. Фактически, все метагабброиды находятся тектонических в пластинах.



Рис. 5. Схематическая геологическая карта Озерского массива. Составлена А.С. Ескиным. 1 – плагиомигматиты; 2 – мраморы; 3 – амфиболиты; 4 – андезитобазальтовые метапорфириты и туфы; 5 – метагабброиды (*a* – массивные, *б* – рассланцованные); 6 – микроклиновые метасоматиты; 7 – граниты. Из книги (Байкал. Геология. Человек, 2011).

Fig. 5. Geological sketch map of Ozersky massif. Compiled by A.S. Yeskin. 1 -plagiomigmatites; 2 -marbles; 3 -amphibolites; 4 -basaltic andesite metaporphyres and tuffs; 5 -metagabbroids (a -mas-

sif, b – schistose); 6 – microcline metasomatites; 7 – granites. From (The Baikal. The Geology. The Human being, 2011).

В 2008 г. у М.И. появилась идея подготовить монографию по геологии побережья Байкала. Мы вместе с ним уже участвовали в подобной монографии «Геологические памятники Байкала», составителем которой был Г.В. Рязанов. Но он ушел из жизни, не закончив эту работу. По просьбе директора ИЗК Н.А. Логачева издание коллективной «Геологические монографии памятники Байкала» доделывал М.И. Грудинин. Благодаря его энергии даже в трудное время, этот коллективный труд был все-же издан в 1993 г., но на плохой бумаге и с невыразительными черно-белыми иллюстрациями. В трудное время для страны не было денег на зарплату научных сотрудников, не было возможностей хорошей печати.

Мне понравилась идея М.И. подготовить новую монографию по геологии побережья Байкала в 2008 г. Мы задумались над названием. Я предложил начать с главного слова – Байкал. М.И. добавил – Геология. Следующее слово вырвалось у меня само-собой – Человек. Так появилось название книги «Байкал. Геология. Человек». К нам присоединилась И. Чувашова. Мы втроем зарядились на сборку и оформление текстов и красивых иллюстраций. Работа двигалась к концу и требовала редакции. Я сделал общую правку текста и неосторожно поправил текс М.И., от чего вызвал его негодование. М.И. сказал мне, что убирает меня из составителей. Я не возражал, поскольку у меня в это время было много другой безотлагательной работы. Но я был рад тому, что в коллективную монографию вошел мой отредактированный текст.

М.И. отнесся к работе над монографией о геологии Байкал с душой. Он подобрал к ней эпиграф Валентина Распутина: «Посмотрел Господь: неласковая вышла земля...как бы не стала она на Создателя обижаться... И чтоб не держала обиды, взял и вымахнул ей не какую-нибудь подстилку для ног, а саму меру щедрот Своих, которой мерил, чему сколько быть от Него. Упала мера и превратилась в Байкал». Когда зашла речь о финансировании издания, М.И. предложил использовать деньги, доставшиеся ему от его старшего брата Иннокентия, который в это время ушел из жизни. Монография «Байкал. Геология. Человек» была издана за счет личных средств М.И. и геологического факультета ИГУ (рис. 6, 7).



Рис. 6. Обложка книги о геологии побережья оз. Байкал. **Fig. 6.** Cover of a book about the geology of the lake Baikal coast.



Рис. 7. Обзорная геологическая схема побережья оз. Байкал. Геология. Человек, 2011). Легенда этой схемы составлена с уточнением геологических контуров М.И. Грудининым и С.В. Рассказовым с участием В.Г. Беличенко.

Fig. 7. Review geological scheme of the Baikal coast (The Baikal. The Geology. The Human being, 2011). Developing of the legend of this scheme and clarifying the geological contours was performed by M.I. Grudinin and S.V. Rasskazov with participation of V.G. Belichenko.

В 2009–2014 гг. было открыто финансирование ВУЗов по программе «Научные и педагогические кадры России». М.И. предложил сделать проект на кафедре динамической геологии ИГУ «Эволюция базитгипербазитового магматизма в истории Земли». Такой проект был подготовлен и получил финансовую поддержку в 2012–2014 гг. Выполняя проект, мы обратились к теме ультрабазитов повышенной железистости Шарыжалгайского блока фундамента Сибирской платформы. По привязкам М.И., зимой на лыжах я опробовал фрагменты железистых ультрабазитов Крутой Губы. Мы вместе посмотрели фрагменты железистых ультрабазитов в Листвянке. После изучения отобранных образцов в шлифах и получения данных по петрогенным оксидам и микроэлементам, мы пришли к выводу о подобии этих пород коматиитам (рис. 8) (Рассказов и др., 2011; Чувашова, Рассказов, 2014).



Рис. 8. Диаграммы TiO₂ – Al₂O3 (а) и Mg# – SiO2 (б) сопоставления коматиитоподобных пород Прибайкалья с измененными и неизмененными коматиитами и базальтовыми коматиитами зеленокаменных поясов. 1–2 – Al-обедненные коматииты и коматиитовые базальты зеленокаменного пояса Барбертон: 1 – формация мендон, 2 – формация комати; 3 – то же, Al-необедненные, свиты Велтевреден этого же пояса; 4–5 – такие же породы пояса Абитиби, Al-необедненные: 4 – потока Тексмонт, 5 – потока Алексо. Прямоугольник КМ – эталонные составы коматиитов (Богатиков и др., 2010). Для пород из поясов Барбертон и Абитиби использованы данные из работы (Lahaye et al., 1995). Из работы (Чувашова, Рассказов, 2014).

Fig. 8. Diagrams TiO₂ versus Al₂O₃ (*a*) and Mg# – SiO₂ (*b*) comparing komatiite-like rocks of the Baikal region with altered and unaltered komatiites and basaltic komatiites of greenstone belts. 1-2 – Al-depleted komatiites and komatiite basalts from the Barberton greenstone belt: 1 – Mendon formation, 2 – Komati formation; 3 – the same, Al-undepleted, Weltevreden formations of the same belt; 4-5 – the same rocks from the Abitibi belt, Al-undepleted: 4 – Texmont flows, 5 – Alexo flows. Rectangle KM – reference compositions of komatiites (Bogatikov et al., 2010). For rocks from the Barberton and Abitibi belts, data from (Lahaye et al., 1995) are used. From (Chuvashova, Rasskazov, 2014).

Мефодий Иванович вел курс Общей геологии до 2015 г. Уходя с преподавания, он оставил курс этого предмета с региональными примерами (Грудинин, Чувашова, 2017). Последние лекции он читал в возрасте 86 лет. Для меня и студентов-первокурсников М.И. был и останется воплощением полевика-геолога, исследователя-первопроходца базитов и гипербазитов Сибири, передающего общее знание о геологии студентам. Его лекции слушали более тысячи студентов, которые связали свою жизнь с геологией и сейчас трудятся в ее разных областях.

Литература

Байкал. Геология. Человек / М.И. Грудинин, И.С. Чувашова (составители). Иркутск: Изд-во ИГУ, 2011. 239 с.

Богатиков О.А., Коваленко В.И., Шарков Е.В. Магматизм, тектоника, геодинамика Земли: новая серия. Ин-т геологии руд. Месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН. М., 2010. 606 с.

Геологические памятники Байкала / Г.В. Рязанов (составитель). Новосибирск: ВО "Наука". Сибирская издательская фирма, 1993. 160 с.

Грудинин М.И. Базит-гипербазитовый магматизм Байкальской горной области. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1979. 156 с.

Грудинин М.И., Меньшагин Ю.В. Ультрабазиты ранних стадий развития земной коры // ДАН СССР. 1982. Т. 265, № 6.

Грудинин М.И., Меньшагин Ю.В. Архейские ультрабазиты Прибайкалья // Геология и геофизика. 1983. № 5. С. 14–22.

Грудинин М.И., Меньшагин Ю.М. Ультрабазит-базитовые ассоциации раннего докембрия. Новосибирск: Наука. 1987. 155 с.

Грудинин М.И., Хрусталева А.В. Первая учебная геологическая практика: Учебное пособие. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2001. 52 с.

Грудинин М.И., Чувашова И.С. Основы геологии : учеб. пособие. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2017. 228 с.

Грудинин М.И., Герасимов Н.С., Рассказов С.В. Гетерогенный габбро-сиенитовый комплекс Прибайкалья // Щелочной магматизм Земли и его рудоносность. Киев, 2007. С. 57–58.

Грудинин М.И., Рассказов С.В., Коваленко С.Н., Ильясова А.М. Снежнинский массив – петротип раннеордовикской габбро-сиенитовой формации Южного Прибайкалья // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Вып. 2. Мат-лы научной конференции. Томск: Томский госуниверситет, 2001. С. 129–132.

Грудинин М.И., Рассказов С.В., Коваленко С.Н., Ильясова А.М. Раннепалеозойский габбросиенитовый Снежнинский массив Юго-Западного Прибайкалья // Геология и геофизика. 2004. Т. 45, № 9. С. 1092–1101.

Грудинин М.И., Рассказов С.В., Меньшагин Ю.В., Ершов К.В., Парыгина А.Н. Ультрабазитбазитовые комплексы и глубинные ксенолиты из кайнозойских вулканических пород в структуре Южного Прибайкалья // Офиолиты: геология, петрология, металлогения и геодинамика. Матлы Международной конференции (XII чтения пямяти А.Н. Заварицкого). Екатеринбург: Институт геологии и геохимии Уро РАН, 2006. С. 196–199.

Коваленко С.Н., Рассказов С.В., Грудинин М.И. Структурно-петрологическая эволюция Снежнинского габбро-сиенитового массива (Южное Прибайкалье) // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 3. С. 20–29. DOI 10.26516/2541-9641.2022.3.20

Рассказов С.В., Грудинин М.И., Снопков С.В., Чувашова И.С. Вулканизм, осадконакопление и тектоника Тункинской долины – экскурсионные объекты для геологов, студентов и школьников // Расширенные тезисы доклада в сборнике: Природоохранная деятельность в современном обществе. Мат-лы Международной научно-практической конференции «Тункинскому национальному парку – 20 лет; природоохранная деятельность в современном обществе». Иркутск: изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2011. С. 76–78.

Рассказов С.В., Грудинин М.И., Чувашова И.С. Переход от хадия к архею: смена магматизма и характера эволюции рудных свинцов // Тектоника, магматизм и геодинамика Востока Азии. VII Косыгинские чтения: мат-лы всероссийской конференции. Хабаровск: Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 2011. С. 612–620.

Срывцев Н.А., Герасимов Н.С., Грудинин М.И., Калмычкова Т.Н. К вопросу изотопного датирования Озерского массива Приольхонья // Геология и полезные ископаемые Восточной Сибири. Сборник научных трудов. Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2007. С. 181–188.

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

Lahaye Y. et al. The influence of alteration on the trace-element and isotopic compositions of komatiites // Chem. Geology. 1995. Vol. 126. P. 43– 64.

References

The Baikal. The Geology. The Human being. / M.I. Grudinin, I.S. Chuvashova (compilers). Ir-kutsk: ISU Publishing House, 2011. 239 p.

Bogatikov O.A., Kovalenko V.I., Sharkov E.V. Magmatism, tectonics, geodynamics of the Earth: a

new series. Institute of Ore Geology. Deposits, petrography, mineralogy and geochemistry RAS. M., 2010. 606 p.

Geological monuments of the Baikal / G.V. Ryazanov (compiler). Novosibirsk: "Science". Siberian Publishing Company, 1993. 160 p.

Grudinin M.I. Mafic-ultrabasic magmatism of the Baikal mountain region. Novosibirsk: Science. Sib. department, 1979. 156 p.

Grudinin M.I., Chuvashova I.S. Fundamentals of Geology: textbook. Irkutsk: ISU Publishing House, 2017. 228 p.

Grudinin M.I., Menshagin Yu.V. Ultrabasites of the early stages of development of the earth's crust // DAN USSR. 1982. T. 265, No. 6.

Grudinin M.I., Menshagin Yu.V. Archean ultrabasites of the Baikal region // Geology and Geophysics. 1983. No. 5. P. 14–22.

Grudinin M.I., Menshagin Yu.M. Ultramaficmafic assamlages of the Early Precambrian. Novosibirsk: Science. 1987. 155 p.

Grudinin M.I., Khrustaleva A.V. First educational geological practice: Textbook. Irkutsk: ISU Publishing House, 2001. 52 p.

Grudinin M.I., Gerasimov N.S., Rasskazov S.V. Heterogeneous gabbro-syenite complex of the Baikal region // Alkaline magmatism of the Earth and its ore content. Kyiv, 2007. P. 57–58.

Grudinin M.I., Rasskazov S.V., Kovalenko S.N., Ilyasova A.M. Early Paleozoic gabbro-syenite Snezhnaya massif of the South-Western Baikal region // Geology and Geophysics. 2004. Vol. 45, No. 9. P. 1092–1101.

Grudinin M.I., Rasskazov S.V., Kovalenko S.N., Ilyasova A.M. Snezhnaya massif – petrotype of the Early Ordovician gabbro-syenite formation of the Southern Baikal region // Petrology of igneous and metamorphic complexes. Vol. 2. Proceedings of the scientific conference. Tomsk: Tomsk State University, 2001. P. 129–132.

Grudinin M.I., Rasskazov S.V., Menshagin Yu.V., Ershov K.V., Parygina A.N. Ultramaficmafic complexes and deep xenoliths from Cenozoic volcanic rocks in the structure of the Southern Baikal region // Ophiolites: geology, petrology, metallogeny and geodynamics. Proceedings of the International Conference (XII reading in memory of A.N. Zavaritsky). Ekaterinburg: Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006, P. 196–199. Kovalenko S.N., Rasskazov S.V., Grudinin M.I. Structural and petrological evolution of the Snezhnaya gabbro-syenite massif (Southern Baikal region) // Geology and Environment. 2022. Vol. 2, No. 3. P. 20–29. DOI 10.26516/2541-9641.2022.3.20

Rasskazov S.V., Grudinin M.I., Snopkov S.V., Chuvashova I.S. Volcanism, sedimentation and tectonics of the Tunka Valley – excursion objects for geologists, students and schoolchildren // Extended abstracts of the report in the collection: Environmental activities in modern society. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Tunka National Park – 20 years old; environmental activities in modern society." Irkutsk: publishing house of the Institute of Geography named after. V.B. Sochavy SB RAS, 2011, P. 76–78.

Rasskazov S.V., Grudinin M.I., Chuvashova I.S. Transition from the Hadean to Archean: change in magmatism and the nature of the evolution of ore lead // Tectonics, magmatism and geodynamics of East Asia. VII Kosygin readings: materials of the All-Russian conference. Khabarovsk: Institute of Tectonics and Geophysics named after. Yu.A. Kosygina Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 2011, P. 612–620.

Sryvtsev N.A., Gerasimov N.S., Grudinin M.I., Kalmychkova T.N. On the issue of isotope dating of the Ozersky massif of the Olkhon region // Geology and minerals of Eastern Siberia. Collection of scientific papers. Irkutsk: Irkut. state Univ., 2007. P. 181–188.

Chuvashova I.S., Rasskazov S.V. Sources of magmatism in the mantle of the evolving Earth. Ir-kutsk: ISU Publishing House, 2014. 291 p.

Список основных опубликованных работ М.И. Грудинина

Грудинин М.И. Петрография Нюрундуканского и Довыренского габбро-перидотитовых массивов (Северное Прибайкалье) // Петрография Восточной Сибири. М.: Наука. 1965. Т.111. С. 5–112.

Прудовский Э.Л., Летягин В.С., Грудинин М.И. Габброидная формация Центральной Бурятии // Палеозойские магматические формации Байкальской горной области. Улан-Удэ, 1972. С. 109–125.

Грудинин М.И., Прудовский Э.Л., Елизарьева Т.И. Формации основных и ультраосновных пород Байкальской горной области // Известия АН СССР, серия геол. 1974. № 10. С. 40–48. Грудинин М.И. Прибайкальский нефрит // Природа. 1976. № 10.

Грудинин М.И., Прудовский Э.Л. Офиолиты складчатого обрамления юга Сибирской платформы // Геотектоника. 1976. № 4. С. 37–44.

Грудинин М.И. Базит-гипербазитовый магматизм Байкальской горной области. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1979. 156 с.

Грудинин М.И., Меньшагин Ю.В. Ультраосновные породы Крутой губы // Известия АН СССР. Серия геол. 1982. № 7.

Грудинин М.И., Меньшагин Ю.В. Ультрабазиты ранних стадий развития земной коры // ДАН СССР. 1982. Т. 265, № 6.

Грудинин М.И., Меньшагин Ю.В. Архейские ультрабазиты Прибайкалья // Геология и геофизика. 1983. № 5. С. 14–22.

Грудинин М.И., Лашкевич В.В., Меньшагин Ю.В. Моделирование на ЭВМ процессов гранитизации габброидов // ДАН СССР. 1985. Т. 280, № 2. С. 446–449.

Грудинин М.И., Меньшагин Ю.В. Докембрийские ультрабазит–базитовые ассоциации юго-западного Прибайкалья // Советская геология. 1985. № 7. С. 108–113.

Грудинин М.И., Меньшагин Ю.М. Ультрабазит-базитовые ассоциации раннего докембрия. Новосибирск: Наука. 1987. 155 с.

Грудинин М.И., Меньшагин Ю.В. О находке гранитовых ультрабазитов и эклогитов в Южно-Муйской глыбе архея Северного Прибайкалья // ДАН СССР. 1988. Т. 299, № 2. С. 434–437.

Грудинин М.И. и др. Гранатовые ультрабазиты и эклогиты Южно-Муйской глыбы Северного Прибайкалья // Советская геология. 1988. № 8. С. 76–82.

Грудинин М.И., Меньшагин Ю.В. Ультраосновные и основные породы Южно-Муйской глыбы и ее обрамления (Северное Прибайкалье) // Геология и геофизика. 1989. № 9. С. 32–38.

Грудинин М.И., Демин И.А. Среднеамериканский лерцолит-пироксенит-габбровый массив (Северо-Байкальское нагорье) // Геология и геофизика. 1990. № 5. С. 67–74.

Грудинин М.И., Меньшагин Ю.В. Флюидопетрохимические типы ультраосновных пород Байкальской горной области // Советская геология. 1990. № 1. С. 76–82. Грудинин М.И., Меньшагин Ю.В. Типы ультра-базит-базитовых формаций в докембрии Байкальской горной области // Геология и геохронология докембрия Сибирской платформы и ее обрамления. Л., 1990. С. 95–103.

Грудинин М.И., Меньшагин Ю.В. Химизм ультрабазитов геодинамических режимов Байкальской горной области // Изв. АН СССР. 1990, № 12. С. 21–29.

Грудинин М.И., Демин И.А., Коваленко С.Н. Дайковый комплекс Байкало-Муйского офиолитового пояса (Северное Прибайкалье) // ДАН СССР. 1991. Т. 320, № 1. С. 165–168.

Грудинин М.И., Демин И.А., Митрофанов В.Г. Петрогеохимические типы габброидных массивов Средне-Витимской горной области (Северное Прибайкалье) // Геология и геофизика. 1991. № 9. С. 15–23.

Грудинин М.И. Зеленокаменные и офиолитовые пояса Юго-Восточной Сибири // Геология и геофизика. 1992. № 12. С. 15–22.

Grudinin M.I., Demin I.A. Riphean ofiolites of the Northern Baikal region (East Siberia). Proc. 29th Int. Geol. Congr. Part. D. 1994. P. 263–272.

Грудинин М.И., Рожок С.Н., Иванов А.И. Янский перидотит-пироксенит-габбровой массив Северо-Байкальского нагорья // Отечественная геология. 1995. № 11. С. 38–43.

Грудинин М.И., Сизых А.И. Магматические формации // Иркутск: Издательство ИГУ. 1996.

Грудинин М.И., Мазукабзов А.М. Геодинамика и рудоностность ультрабазит-базитовых формаций Байкальской складчатой области // Геология и геофизика. 1996.

Грудинин М.И. Формационные типы дунитов // Иркутск: Издательство ИГУ, 1996.

Грудинин М.И., Митрофанов В.Г. Положение и состав Кедровского габбро-анортозитового массива (Средне-Витимская горная область) // Иркутск: Издательство ИГУ, 1996.

Грудинин М.И., Петрова З.И. Магматические формации ранней стадии развития Земли // Геотектоника. 1996.

Грудинин М.И., Мазукабзов А.М., Демин И.А. Ультрабазит-базитовый магматизм обрамления Муйской глыбы (Средневитимская горная область) // Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. геол. 2002. Т. 77, № 4. С. 77–86.

Грудинин М.И., Рассказов С.В., Коваленко С.Н., Ильясова А.М. Раннепалеозойский габбро-

сиенитовый Снежнинский массив Юго-Западного Прибайкалья // Геология и геофизика. 2004. Т. 45, № 9. С. 1092–1101.

Грудинин М. И. Фиксизм и мобилизм в геологии Прибайкалья // Отечественная геология. 2016. № 1–2. С. 77–80.

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор, 664025 Иркутск, ул. Ленина, д. 3, Иркутский государственный университет, геологический факультет, заведующий кафедрой динамической геологии. 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, заведующий лабораторией изотопии и геохронологии, тел.: (3952) 51-16-59, email: rassk@crust.irk.ru. Rasskazov Sergei Vasilievich, doctor of geological and mineralogical sciences, professor, 664025 Irkutsk, Lenin st., 3, Irkutsk State University, Faculty of Geology, Head of Dynamic Geology Char, 664033 Irkutsk, Lermontov st., 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS, Head of Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies, tel.: (3952) 51-16-59. email: rassk@crust.irk.ru.

Грудинин М.И., Чувашова И.С. Основы геологии : учеб. пособие. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2017. 228 с.



МЕФОДИЙ ИВАНОВИЧ ГРУДИНИН – доктор геолого-минералогических наук, профессор, известный сибирский учёный, старейший сотрудник кафедры динамической геологии геологического факультета ушел из жизни на 95-м году 13 марта 2024 г.

Мефодий Иванович родился 24 июня 1929 г. в д. Грудинино Иркутского района. В 1953 г. окончил геологический факультет Иркутского госуниверситета по специальности «геология» с присвоением квалификации геолога. В 1953–1955 гг. работал геологом, старшим геологом в Иманской и Синанчинской геологоразведочных партиях комбината «Дальолово» г. Уссурийска Приморского края, затем был переведен в трест «ВостСибцветметразведка» г. Иркутска, в котором был назначен начальником участка в Саяно-Ленскую экспедицию. При реорганизации треста, в начале 1957 г., был переведен в КТЭ Иркутского геологического управления Мингео СССР, где работал старшим геологом тематической титановой партии. С 1957 г. обучался в очной аспирантуре при Восточно-Сибирском геологическом институте СО АН СССР. По окончании аспирантуры был переведен на должность младшего научного сотрудника. В 1964 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Петрография Нюрундуканского и Довыренского габбро-перидотитовых массивов (Северное Прибайкалье)». В 1968 г. был приглашен на кафедру минералогии и петрографии Иркутского госуниверситета и работал там старшим преподавателем, затем доцентом до 1972 г. В 1972 г. был избран на должность старшего научного сотрудника в Институт земной коры СО АН СССР. Защитил докторскую диссертацию на тему «Базит-гипербазитовые формации Байкальской складчатой области». До 1999 г. был ведущим научным сотрудником в Институте земной коры. С 1999 до 2015 гг. работал на кафедре динамической геологии Иркутского госуниверситета, читал курс лекций «Общая геология», руководил учебной практикой и дипломными работами студентов.

Научные интересы Мефодия Ивановича были связаны с изучением базитов и гипербазитов Сибири. Он опубликовал более 200 научных работ, в том числе 10 монографий. Работая в комбинате «Дальолово» и в тресте «ВостСибцветметразведка», М.И. Грудинин занимался разведкой и поисками полиметаллических, оловорудных и золоторудных месторождений в Приморье и Восточном Саяне. В содружестве с геологами Бурятского и Иркутского геологических управлений занимался поисками сульфидно-никелевых и золоторудных проявлений в Прибайкалье. По заявке М.И. Грудинина в 1979 г. экспедицией «Байкалкварцсамоцветы» было открыто уникальное месторождение белого нефрита нового апокарбонатного типа в Средне-Витимской горной области.

Мефодий Иванович был депутатом Иркутской городской Думы. В научно-педагогическом сообществе он пользовался огромным авторитетом. Он подготовил и воспитал за годы активной научной и педагогической деятельности многих талантливых учеников. Под его руководством защищены 3 кандидатские диссертации. Его яркая педагогическая деятельность в Иркутском госуниверситете сочеталась им с подготовкой учебных пособий и учебника «Основы геологии», работой во Всесоюзном обществе «Знание», организацией и проведением геологических конкурсов для школьников. Конкурсы не раз транслировались телевидением. Он любил свою малую Родину и написал о ней книги: «Мои воспоминания» (2005 г.), «Варварин лесик» (2007 г.), «Байкал. Геология. Человек» (2011 г.), «Моя Иркутия» (2014 г.). М.И. Грудинин награжден многочисленными почетными грамотами, знаком «За активную работу Всесоюзного общества "Знание"» (1989) и почетным знаком СО РАН «Серебряная Сигма» (2007).

Похоронен М.И. Грудинин на кладбище в Ново-Грудинино.

Правила для авторов

В журнале «Геология и окружающая среда» публикуются материалы научнообразовательного направления, отражающие теоретические, методические и практические результаты научной деятельности молодых и зрелых геологов и географов — научных сотрудников, преподавателей, аспирантов, студентов магистерской и бакалаврской подготовки. Кроме научных статей, в журнале помещаются рецензии и отзывы на монографии, учебники, учебные пособия, сборники научных трудов. Важное место отводится тематическим обзорам и событиям научно-учебной деятельности вузов по профилю издания. Важной задачей журнала является опубликование научных статей (в авторстве или соавторстве) студентов, аспирантов и молодых научных сотрудников.

Ответственность за достоверность изложения фактов в публикуемых материалах, плагиат (вольный или невольный) несут авторы. Все заимствованные в рукописи элементы (графика, текст, первичные данные) должны обязательно сопровождаться соответствующими корректными ссылками или разрешением правообладателя.

Мнение редколлегии может не совпадать с мнением авторов. Журнал является рецензируемым. Опубликование рукописей бесплатное. Гонорар авторам не выплачивается.

Рукописи статей присылаются на электронные адреса редакции или ответственного секретаря: kaf-dinamgeol@mail.ru или igpug@mail.ru. Работа должна быть полностью подготовлена для печати. Редакция оставляет за собой право вносить правки по согласованию с авторами. Приемка работ в рукописном или бумажном виде, требующем технического оформления, возможна за дополнительную плату с заключением договора.

Максимальный объем научной статьи — 1.5 печатных листа или 24 страницы с нижеследующими параметрами. На первой странице указывается УДК, далее на русском и английском языках приводятся: название статьи; инициалы и фамилия авторов, название учреждения; аннотация и ключевые слова. Аннотация должна содержать не более 15 строк, количество ключевых слов — не более 8.

Шрифт основного текста — Times New Roman, размер 14, межстрочный интервал 1, поля по 2.5 см. Представлять работы необходимо в формате текстового редактора Word или RTF. Более подробная информация об авторах дается в конце статьи (см. примеры в последнем выпуске).

В тексте статьи не допускаются сокращения (кроме стандартных); сокращенные названия поясняются при первом упоминании; все местные географические названия должны быть проверены. Применяется международная система единиц измерения СИ. В расчетных работах необходимо указывать авторов используемых программ.

Не допускается использовать при наборе:

- более одного пробела;
- формирование красной строки с помощью пробелов;
- автонумерацию (нумерованные и маркированные списки) в главах и абзацах;
- принудительные переносы.

Вставленные в работу рисунки, необходимо дублировать отдельными файлами рисунков размером не менее 10x15 см и разрешением не менее 300 dpi, в следующих графических форматах: .jpg, .cpt и .cdr. Количество рисунков в статье не должно превышать 10. Рисунки должны иметь все необходимые обозначения и подписи.

Ссылки на рисунки приводятся в круглых скобках в формате: (рис. 1) или (рис. 1, 2) или (рис. 1–4).

Если рисунок единственный в статье, то он не нумеруется, а слово «рис.» в подписи к нему не пишется. Ссылка на него — рисунок.

При представлении материалов по конкретным объектам, статья должна содержать обзорную карту или схему, на которой показан район исследований. На картах необходимо указы-

вать географические координаты, а на рисунках — ориентировку и линейный масштаб. Обозначения сторон света, широт и долгот должны быть указаны на русском языке.

Вставленные в работу таблицы книжного формата, должны иметь ширину не более 16 см, альбомного — 20 см; табличный шрифт Times New Roman, размер 11, межстрочный интервал 1, иметь сквозную порядковую нумерацию в пределах статьи, ссылки на таблицы приводятся в круглых скобках в формате: (табл. 1) или (табл. 1, 2) или (табл. 1–4). Если таблица единственная в статье, то она не нумеруется, а слово «Таблица» в названии не пишется. Ссылка на нее — таблица.

Перед тем, как вставить в статью диаграммы 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 косого креста. Перенос на знаке деления не допускается. Математический знак, на котором разрывается формула при переносе, должен быть повторен в начале следующей строки.

Формулы и уравнения нумеруются в порядке следования по тексту статьи с правой стороны. Ссылки в тексте на формулу или уравнение обозначаются числом в круглых скобках: (1), (2), (3).

В журнале принято использование разделительного знака точки. Следует избегать смешанного употребления русских и латинских символов в одной статье. Все греческие и специальные символы печатаются через опции «Вставка» и «Символ».

Статью желательно разбивать на разделы, отражающие ее содержание. Допускаются следующие стандартные рубрики статьи: «Введение», «Исходные данные», «Методы исследования», «Результаты исследования», «Обсуждение результатов», «Выводы», «Заключение»; можно ввести раздел «Результаты и их обсуждение». Другие необходимые автору рубрики помещаются в начале соответствующего абзаца. Если работа выполнена при поддержке какого-либо гранта или технической поддержке преподавателя или аналитика, то эта информация приводится в конце статьи с рубрикой «Благодарности».

В конце рукописи необходим список использованной и цитируемой литературы, оформленный в соответствии с правилами библиографического описания литературных источников под заголовком «Литература» в алфавитном порядке: сначала русские работы, затем иностранные. Русские источники переводятся на английский язык и помещаеются 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; Hatton, 2014; Peyerl et al., 2018) (см. примеры в статьях последнего номера журнала).

В списке литературы работы не нумеруются, инициалы имен и отчеств пробелом не отделяются. Каждая работа должна занимать отдельный абзац.

Пример:

Федонкин М.А. Две летописи жизни: опыт сопоставления (палеобиология и геномика о ранних этапах эволюции биосферы) // Проблемы геологии и минералогии. Сыктывкар : Геопринт, 2016. С. 331–350.

Марков А.В., Куликов А.М. Происхождение эукариот как результат интеграционных процессов в микробном сообществе // Доклад в Институте биологии развития 29 января, 2019. Режим доступа: http://evolbiol.ru/dok_ibr2009.htm. (дата обращения: 23.10.2023). Допускаются ссылки на открытые отчеты геологических фондов.

Требуется акт экспертизы и официальное направление от организации на опубликование статьи в журнале Геология и окружающая среда на бланке организации (в электронном виде в форматате JPEG). Ссылки на неопубликованные материалы других авторов и организаций не допускаются.

На отдельной странице в редакцию присылается авторская справка, содержащая фамилию, имя, отчество, ученую степень, звание, должность, место работы, почтовый адрес, телефон, факс и адрес электронной почты каждого автора. Необходимо указать фамилию автора, ответственного за прохождение статьи в редакции. Желательно указать трех специалистов, работающих по тематике статьи, как возможных рецензентов. Решение по вопросам рецензирования рукописей принимаются редколлегией.

Рукописи, оформленные без соблюдения настоящих правил, редколлегией журнала не рассматриваются.

Почтовый адрес редакции: 664025, г. Иркутск, ул. Ленина, д. 3, Геологический факультет Иркутского государственного университета.

Электронный адрес редакции: kaf-dinamgeol@mail.ru.

Редколлегия журнала