

3 (1) 2023

ISSN 2541-9641



ГЕОЛОГИЯ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Спецвыпуск

Последствия и оценка угрозы землетрясений



ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Геология и
о окружающая
среда

Том 3
№ 1
2023

Geology and
Environment

Преемник Вестника кафедры географии Восточно-Сибирской государственной академии образования
Год основания 2010 г.

Научный электронный журнал

Выходит четыре раза в год

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

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

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

Редакционная коллегия: Акулова В.В., – кандидат геол.-минерал. наук, Институт земной коры СО
РАН, Иркутск, Россия; Баженова О.И. – доктор геогр. наук, профессор, Институт географии СО РАН,
Иркутск, Россия; Бат Б. – доктор философии, профессор, Национальный университет Монголии,
Улан-Батор, Монголия; Борняков С.А. – канд. геол.-минерал. наук, Институт земной коры СО РАН,
Иркутск, Россия; Бычинский В.А. – кандидат геол.-минерал. наук, доцент, Иркутский
государственный университет, Иркутск, Россия; Горячев Н.А. – член-корр. РАН, доктор геол.-
минерал. наук, профессор, Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт
ДВО РАН, Магадан, Россия; Давыденко А.Ю. – доктор физ.-мат. наук, профессор, Иркутский
государственный университет, Иркутск, Россия; Дэмбэрэл С. – кандидат физ.-мат. наук, Институт
астрономии и геофизики, Улан-Батор, Монголия; Исаев В.П. – доктор геол.-минерал. наук,
профессор, Иркутский государственный университет, Иркутск; Кононов Е.Е. – кандидат геол.-
минерал. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Иркутск, Россия; Корольков А.Т. – доктор геол.-минерал. наук, профессор, 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; Чувашова И.С. – кандидат геол.-минерал. наук, Иркутский
государственный университет, Иркутск, Россия.

Адрес редакции:

664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 3. Сетевое издание «Геология и окружающая среда»
Учредитель: ФГБОУВО «Иркутский государственный университет»

Тел.: (3952)243278. Гл. редактор: С.П. Примина

Email: kaf-dinamgeol@mail.ru Регистрирующий орган: Федеральная служба по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Сайт: <http://geoenvir.ru> Номер свидетельства о регистрации: ЭЛ № ФС 77-82002, от 24.09.2021 г.
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

Фотография «Разрушение застройки в турецком городе 6 февраля 2023 г.». Фотография заимствована из общедоступных ресурсов Интернета, не содержащих указаний на авторов этого материала и каких-либо ограничений для заимствования.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

<u>С.В. Рассказов, В.В. Ружич, С.Н. Коваленко</u> Последствия и оценка угрозы землетрясений: введение	5
<u>В.В. Ружич, Л.П. Бержинская, Е.А. Левина, Е.И. Пономарева</u> О причинах возникновения и последствиях двух разрушительных землетрясений в Турции 06.02.2023 г.	22
<u>Р.Т. Акбиев, М.С. Абаканов</u> Оперативная оценка последствий разрушительного землетрясения в Турции	35
<u>С.А. Борняков, Я. Го, И.А. Пантелеев, Я-К Жуо, А.А. Добрынина, В.А. Саньков, Д.В. Салко, А.Н. Шагун, А.А. Каримова</u> Этапы подготовки к прерывистому скольжению на предварительно вырезанных разломах в лабораторных моделях и проверка этапов в природе	52
<u>А.М. Ильясова, С.В. Снопков</u> Косейсмические временные вариации термфильного элемента Si подземных вод западного побережья оз. Байкал в 2012–2022 гг.	72
<u>И.С. Чувашова, А.М. Ильясова</u> Косейсмические вариации Li в подземных водах станции 27 Култукского полигона	106
<u>Е.П. Чебыкин, С.В. Рассказов</u> Сравнительные исследования косейсмических изменений концентраций термфильных элементов Si, Na и Li в подземных водах ст. 27 на Култукском полигоне, оз. Байкал	124
<u>Е.П. Чебыкин, И.С. Чувашова</u> Косейсмическая химическая гидрогеодинамика Култукского резервуара подземных вод: индикаторные роли Na/Li, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ и ^{234}U	141
<u>С.В. Снопков, А.А. Куроленко</u> Хубсугульское землетрясение 12 января 2021 г. и афтершоки: электрохимические отклики подземных вод юго-западного побережья Байкала	172
<u>С.В. Рассказов, С.В. Снопков, С.А. Борняков</u> Соотношение времени землетрясений Байкало-Хубсугульской активизации с вариациями окислительно-восстановительного потенциала в подземных водах Култукского полигона	181
Правила для авторов	202

C O N T E N T S

<u>S.V. Rasskazov, V.V. Ruzhich, S.N. Kovalenko</u> Consequences and threat assessment of earthquakes: an introduction	5
<u>V.V. Ruzhich, L.P. Berzhinskaya, E.A. Levina, E.I. Ponomareva</u> On the causes and consequences of two devastating earthquakes in the Türkiye on February 6, 2023	22
<u>R.T. Akbiev, M.S. Abakanov</u> Operational assessment of the consequences of the devastating earthquake in Turkey	35
<u>S.A. Bornyakov, Y. Guo, I.A. Pantelev, Y-Q Zhuo, A.A. Dobrynina, V.A. Sankov, D.V. Salko, A.N. Shagun, A.A. Karimova</u> Stages of Stick-Slip Preparation on Precut Faults in Laboratory Models and Verification of the Stages in Nature	52
<u>A.M. Ilyasova, S.V. Snopkov</u> Coseismic temporal variations of thermophilic element Si in groundwaters from the SW coast of Lake Baikal in 2012–2022	72
<u>I.S. Chuvashova, A.M. Ilyasova</u> Coseismic variations of Li in groundwaters from station 27 of the Kultuk polygon	106
<u>E.P. Chebykin, S.V. Rasskazov</u> Comparative study of coseismic changes in thermophilic elements Si, Na, and Li in groundwaters from station 27 in the Kultuk polygon, Lake Baikal	124
<u>E.P. Chebykin, I.S. Chuvashova</u> Coseismic chemical hydrogeodynamics of the Kultuk groundwater reservoir: indicator roles of the Na/Li, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, and ^{234}U	141
<u>S.V. Snopkov, A.A. Kurolenko</u> The Khubsugul earthquake of January 12, 2021 and its aftershocks: electrochemical responses of groundwaters from southwestern coast of Lake Baikal	172
<u>S.V. Rasskazov, S.V. Snopkov, S.A. Bornyakov</u> Relationship between timing of earthquakes of the Baikal-Khubsugul reactivation and oxidation–redox potential in groundwaters from the Kultuk polygon	181
Rules for authors	202

Мониторинг окружающей среды

УДК 550.844+546.791.027+632.126
<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.5>

Последствия и оценка угрозы землетрясений: введение

С.В. Рассказов^{1,2}, В.В. Ружич¹, С.Н. Коваленко²

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

²*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*

Аннотация. Спецвыпуск журнала «Геология и окружающая среда» по теме: «Последствия и оценка угрозы землетрясений» выходит два месяца спустя после двух 9-10-бальных катастрофических землетрясений в Юго-Восточной Турции, произошедших 6 февраля 2023 г. В выпуске представлены статьи о последствиях этих землетрясений и сделаны шаги к теоретическому осмыслению природы землетрясений, разработкам методов прогноза землетрясений в Байкальском регионе и мероприятий по снижению ущерба.

Ключевые слова: землетрясения, разработка прогноза землетрясений, сейсмостойкое строительство.

Consequences and threat assessment of earthquakes: an introduction

S.V. Rasskazov^{1,2}, V.V. Ruzhich¹, S.N. Kovalenko²

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

²*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

Abstract. A special issue of the journal “Geology and Environment” on the topic: “Consequences and assessment of the threat of earthquakes” comes out two months after the catastrophic earthquakes in Southeast Turkey that occurred on February 6, 2023. The issue presents articles on the consequences of these earthquakes and takes steps towards a theoretical understanding the nature of earthquakes, developing methods for predicting earthquakes in the Baikal region and measures to reduce damage.

Keywords: earthquakes, earthquake forecasting, earthquake-resistant construction.

Введение

Настоящий тематический выпуск журнала «Геология и окружающая среда» подготовлен как отклик на трагические последствия двух катастрофических землетрясений, произошедших в Турции 6 февраля 2023 г. с интервалом 9 часов. Материалы о тектонических условиях и последствиях проявления этого события были представлены 16 марта 2023 г. в докладах на секции «Современная геодинамика и сейсмотектоника» конференции в Геологическом институте СО РАН (Ружич, Левина, 2023; Бержинская и др., 2023). Последствия и уроки турецких землетрясений освещены в двух статьях выпуска. В других статьях выпуска отражены региональные разработки подходов к оценке угрозы землетрясений в Байкальской рифтовой системе (БРС), которая относится к числу сейсмически нестабильных областей и обозначается на карте общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-2015) как зона 8–10-балльных землетрясений. Эта карта – нормативный документ для строительства. Однако население Байкальского региона живет большей частью в уже существующих домах, многие из которых построены до принятия строгих нормативных требований, или в ветхих зданиях. Поэтому для смягчения разрушительных последствий очередных сильных землетрясений и числа жертв, требуется технически более совершенная организация инструментальных наблюдений, необходимых для разработки вероятностных методов прогноза, чтобы своевременно оценивать время и места подготовки будущих сильных местных землетрясений. Также необходимы дополнительные меры, направленные на повышение сейсмостойкости обветшалых и возводимых строительных сооружений, способных противостоять будущим высоко балльным сейсмическим сотрясениям.

Катастрофа 6 февраля 2023 г.

Эти два произошедших землетрясения войдут в историю как одно из самых трагических событий, унесшее жизни почти 50 тыс. человек в Турции и более 8 тыс. чело-

век в Сирии. Возникают актуальные вопросы о том, как реально можно оценивать угрозу от будущих сильных землетрясений и противостоять подобным будущим угрозам населению разных стран, проживающему в сейсмоопасных регионах.

В статье В.В. Ружича, Л.П. Бержинской, Е.А. Левиной, Е.И. Пономаревой (2023) анализируется режим подготовки двух наиболее сильных 9–10 балльных землетрясений в Турции, произошедших в юго-западном сегменте Восточно-Анатолийского межплитного разлома. С позиций опыта среднесрочного прогноза землетрясений в Байкальской рифтовой системе рассмотрены признаки подготовки этих землетрясений. Показано, что основные причины большого количества жертв среди местного городского населения и огромного экономического ущерба для Турции, нанесенного землетрясениями, связаны с чрезвычайно неблагоприятными природными сейсмотектоническими условиями, а также недостаточным вниманием к разработкам мер по выявлению предвестников землетрясений и соблюдению строгих норм и правил при проектировании и строительстве жилых и промышленных сооружений.

В статье Р.Т. Акбиева и М.С. Абаканова (2023) по результатам оперативной экспертной оценки рассмотрены причины и последствия произошедшей сейсмической катастрофы 6 февраля 2023 года на юге Турции. Отмечено, что сейсмическое событие объявлено сильнейшим из когда-либо зарегистрированных в Ближневосточном регионе. По смертоносности среди произошедших землетрясений на территории Анатолии оно уступает лишь землетрясению в Киликии (1268 г.), а с учётом последствий на региональном уровне – землетрясению в Алеппо (1822 г.). Большое внимание уделено последствиям разрушений городской застройки, оценки её состояния до и после землетрясения. Выполнен сравнительный анализ норм по сейсмостойкому строительству Турции, России и стран СНГ с целью извлечения надлежащих уроков.

**От лабораторного эксперимента
к интерпретации результатов**

деформационного мониторинга во время сейсмического события

Модель

В статье С.А. Борнякова и др. (2023) исследуется модель прерывистого скольжения (“stick-slip”) с постоянной заданной скоростью деформации вдоль существующей неоднородности в упруго-вязкопластичном материале (Ma et al., 2012, 2014). Модель стик-слип представляет прерывистое скольжение и не с постоянной скоростью деформирования. В чем дело – стоит пояснить далее. В этой модели различается стабильная, метастабильная и метанестабильная стадии процесса подготовки подвижки по модельному разлому. Выполненные эксперименты показали активизацию разлома механизмом сегментации. Приведен анализ характера сегментации, реализующейся в рамках регрессивного и прогрессивного сценариев. Регрессивная сегментация происходит на стабильных и метастабильных стадиях деформационного процесса с уменьшением количества активных сегментов и их длины. Прогрессивная сегментация начинается на ранней подстадии метанестабильной стадии процесса скольжения и диагностируется по увеличению активных сегментов до некоторого критического уровня. На поздней подстадии этой стадии наблюдается быстрое разрастание и объединение всех сегментов с последующей полной активизацией всего разлома.

Интерпретация результатов деформационного мониторинга

Феноменологические свойства модели распознаются в характере деформаций, сопровождающих Быстринское землетрясение 2020 г. в восточной части Тункинской долины Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). Результаты моделирования интерпретируются в данных мониторинга деформаций горных пород на геодинамическом полигоне Талая. Проведенный анализ подтверждает, что специфические особенности аномальной деформации пород аналогичны деформационным признакам, наблюдаемым вдоль модельного разлома на метанестабильной стадии. Предполагается, что метанестабиль-

ное состояние разлома может использоваться в качестве краткосрочного предвестника землетрясений.

От поисков предвестников землетрясений к парагенетическому анализу развития резервуара подземных вод и сейсмичности

Поиски предвестников землетрясений

Одновременно с началом систематических исследований БРЗ как единой активной кайнозойской тектонической структуры (Флоренсов, 1960) в ней была организована сеть сейсмических станций, с помощью которой началась инструментальная регистрация землетрясений Байкало-Монгольского региона (Андрей Алексеевич Тресков, 2006; Карта..., 2023). Параллельно с изучением последствий сильных сейсмических событий (Солоненко, Тресков, 1959; и др.) проводились наблюдения за процессами несейсмической природы, которые сопоставлялись по времени и месту с землетрясениями разной силы.

С целью выявления гидрогеологических предвестников землетрясений были организованы режимные наблюдения подземных вод (Пиннекер, Ясько, 1980; Пиннекер, 1984; Пиннекер и др., 1983, 1984, 1985, 1989). В 1976–1979 гг. на территории, прилегающей к северной части оз. Байкал, на Даванском и Северо-Муйском (Ангараканском) перевалах, измерялась температура на выходе подземных вод, концентрации гелия, радона и макрокомпонентов К, Na, Ca, F, Cl, Si, гидрокарбоната, а также общая минерализация. Результаты режимных наблюдений показали разную чувствительность территорий к происходившим сейсмическим событиям.

Из данных, полученных на Даванском перевале, были сделаны выводы о том, что: «а) изученные компоненты режима подземных вод неоднозначно реагируют на подготовку землетрясений, расположенных на расстоянии 120–250 км, или вообще индифферентны; б) изменение составляющих режима не зависит от силы сейсмического толчка (в пределах энергетических классов 10–13) и расстояния пункта наблюдений до эпицентра землетрясения; в) высокодинамичные

холодные ультрапресные воды неглубоких тектонических нарушений, расположенные в области питания и тесно связанные с метеорологическими факторами, не могут быть объектом гидросейсмологических режимных наблюдений.» (Пиннекер и др., 1984, стр. 150).

На Ангароканском перевале были получены более содержательные результаты. Здесь отмечено осязаемое нарастание дебита Окусиканского источника № 35 термальных вод для 7 сейсмических толчков из 12 за 10–15, реже – за 20 дней до толчка. Установлены колебания дебита, связанные с землетрясениями, для холодного источника № 99. В то же время подчеркнута наличие значимых колебаний, не связанных с подготовкой землетрясений. На изливе источников термальных и холодных вод выявлены положительные и отрицательные отклонения температуры, связанные с отдельными землетрясениями.

К гидрогеохимическим предвестникам отнесены изменения содержаний гидрокарбоната, калия, хлора и гелия и сделан общий вывод о слабой информативности анионно-катионной составляющей подземных вод для прогноза землетрясений. «Несмотря на то, что для большинства компонентов ионно-солевого состава подземных вод намечаются определенные закономерные изменения их концентрации в период подготовки очагов землетрясений, практическое использование этой взаимосвязи в настоящее время весьма проблематично. Это связано с тем, что на изменение содержаний компонентов влияют многие факторы (метеорологические, лунно-приливные силы, производственная деятельность человека и др.), которые вызывают сопоставимые, а часто и превосходящие возмущения режима ионно-солевого состава подземных вод по сравнению с возмущениями его в периоды подготовки землетрясений. Достаточно четко на подготовку землетрясений реагирует растворенный в термальных водах гелий, аномальные концентрации которого возникают за несколько суток перед основным толчком.» (Там же, стр. 158–159).

При наблюдениях подготовки и реализации Южно-Байкальского землетрясения

1999 г. в районе пос. Листвянка (Коваль и др., 2003, 2006) были определены концентрационные всплески ртути, связанные с сейсмичностью, которые превысили фон в 20–30 и более раз при максимальной эмиссии ртути из разломов накануне сейсмических событий. Более поздние наблюдения в районе пос. Листвянка показали отдельные выбросы ртути, продолжавшиеся после Южно-Байкальского землетрясения до 2004 г. Последний слабый всплеск концентрации Hg был определен в 2006 г. До 2013 г. концентрация ртути не превышала фоновых значений (Гребенщикова и др., 2020). Таким образом, при Култукском землетрясении 27 августа 2008 г. и позже аномалий ртути не проявлялось.

Также как режимные наблюдения на Даванском и Ангароканском перевалах, эти работы в районе пос. Листвянка показали пространственную избирательность предвестников землетрясений. Ряд наблюдений 1997–2013 гг. свидетельствовал о возрастании концентрации Hg в районе пос. Листвянка в связи с проявлением одного из сильных землетрясений в Южно-Байкальской впадине 1999 г. и о проявлении другого сильного землетрясения 2008 г. без каких-либо отклонений концентрации ртути.

С 1968 г. в центральной части БРЗ проводились прецизионные наблюдения за изменениями магнитного поля (тектономагнитный мониторинг напряженного состояния земной коры): ежегодный опрос в сети закрепленных пунктов и непрерывные наблюдения на стационарных пунктах. В районе дельты Селенги были выявлены 3-х, 4х-летние интервалы повышения амплитуд тектономагнитных аномалий (в 1969–1972, 1979–1982 и 1991–1993 гг.), свидетельствующие о более быстрых и интенсивных изменениях напряжений в земной коре этого района в эти периоды, к которым были приурочены наиболее сильные землетрясения с M 2–5. Отмечалась близкая к 11-летней квазипериодичность повторения таких периодов сейсмотектонической активизации (Дядьков и др., 1999).

Здесь же теми же наблюдениями были установлены три временных интервала смены тектонических напряжений. Эти интер-

валы сопоставлялись с изменениями механизмов очагов землетрясений. В первом интервале, с 1982 г. до середины 1991 г., наблюдались преимущественно сбросовые типы подвижек. Во втором интервале, во второй половине 1991 г. и в первой половине 1992 г., распространились подвижки в очагах землетрясений со взбросовой компонентой, а со второй половины 1992 г. до середины 1993 г. в очагах землетрясений преобладали взбросы, взбросо-сдвиги и сдвиго-взбросы, которые составляли 60–80 % от общего числа событий. Преобладание механизмов со взбросовой компонентой подвижки наблюдалось одновременно в центральной, юго-западной и северо-восточной частях рифтовой зоны. Третий интервал, продолжавшийся с середины 1993 г. до осени 1996 г., характеризовался, подобно первому интервалу, сбросовыми подвижками, иногда со сдвиговыми составляющими, при отсутствии механизмов со взбросовой компонентой подвижки и только в конце 1996 г. проявилось несколько очагов взбросового типа. Эти выводы были согласованы также с данными спутниковой геодезии. Повышенная сейсмическая активность в Байкальском регионе в 1994–1995 гг., при исключительно сбросовом характере механизмов очагов землетрясений с 1994 до середины 1996 г., рассматривалась как показатель стадии интенсивного растяжения коры после эпизода сжатия 1992–1993 гг. (Дядьков и др., 2000).

Эти исследования показали временную изменчивость напряженного состояния коры рифтовых структур. На основе полученных результатов была сформулирована концепция геофизического мониторинга на Байкале, которая заключалась в том, чтобы ориентировать мониторинг не на поиск предвестников, а на изучение и отслеживание напряженного состояния и деформационного процесса как в БРЗ в целом, так и в конкретных известных очаговых зонах. Однако указывалось, что «Поиск предвестников не прекращается, но упор делается: а) на поиск комплексов многодисциплинарных (геофизических, геодезических, гидрогеологических и геохимических) предвестников, действующих в каждой из очаговых зон в зависимости от общего напряженного состояния

в Байкальском регионе; б) на площадной мониторинг уже известных и поиск новых тензочувствительных (индикаторных) участков земной коры в БРЗ» (Гольдин и др., 2001, с. 1494).

В 2000–2020-х годах в разломных зонах БРЗ был сделан акцент на исследования объемной активности радона (Бобров, 2008, 2016; Семинский К.Ж. и др., 2014, 2017; Семинский К.Ж., Бобров, 2018; Семинский А.К., Семинский К.Ж., 2016, 2018а,б, 2020; Семинский А.К., 2022). Параллельно с рядами содержания радона были получены ряды содержания гелия (Семенов и др., 2010, 2018, 2020; Семенов, 2020; Лопатин, Семенов, 2021). Осуществлялся деформационный мониторинг с выходом на предсейсмогенное состояние коры (Борняков, 2010; Борняков и др., 2016, 2017, 2021а,б). Предпринимались попытки связать сейсмичность южной части Байкальской впадины с современными горизонтальными движениями по данным спутниковой геодезии (Саньков и др., 2014) и с результатами режимных наблюдений магнитотеллурического поля Земли (Семинский И.К., Поспеев, 2022).

В 2020–2022 г. на территории Предбайкалья был организован комплексный мониторинг опасных геологических процессов в трех пунктах: «Бугульдейка», «Приольхонье» и «Листвянка», каждый из которых был оснащен современным высокоточным цифровым оборудованием, включающим в себя широкополосную сейсмическую станцию, спутниковый навигатор, деформометры, датчик эманаций почвенного радона, станцию наблюдений за электромагнитным полем Земли (Семинский К.Ж. и др., 2022). Во время Кударинского землетрясения были отмечены временные изменения деформаций на земной поверхности в пунктах «Бугульдейка» и «Приольхонье» и определены особые вариации объемной активности почвенного радона и искажения электромагнитного поля. В данных спутникового мониторинга отклик на Кударинское землетрясение отсутствовал. Пробы на гидрогеохимические исследования подземных вод перед этим землетрясением в районе Бугульдейки не отбирались, но были отобраны серии проб, показавшие гидрогеохимические отклики на

Голоуспенское землетрясение ($M_w=4.7$), произошедшее 5 сентября 2015 г. В рамках проводившегося мониторинга были опубликованы данные, полученные разными методами для Быстринского землетрясения ($M_w=5.4$), произошедшего 22 сентября 2020 г. (Семинский К.Ж. и др., 2021). Предполагается, что созданная сеть комплексного мониторинга будет использоваться в будущем для целенаправленного изучения предвестников сильных землетрясений.

Парагенетический анализ развития Култукского резервуара подземных вод и сейсмичности

В шести статьях тематического выпуска журнала приводятся результаты мониторинга подземных вод на Култукской торцовой тектонической ступени Южно-Байкальской впадины, полученные в 2012–2022 гг. Эта структура была выбрана в качестве чувствительного полигона для разработки подходов к оценке угрозы землетрясений (Рассказов и др., 2015; Чебыкин и др., 2015). Она находится в сочленении Южно-Байкальской впадины – главной структуры растяжения центральной части БРС – с западной частью Тункинской долины, испытавшей в позднем кайнозое тектоническую инверсию с переходом от растяжения, сопровождавшегося вулканизмом, к сжатию, сопровождавшемуся его угасанием и развитием взбросов и надвигов. Эпицентры сильных землетрясений, за редким исключением, локализируются в акватории оз. Байкал и вдоль осевых суходольных впадин рифтовой зоны (Мельникова и др., 2012; Ружич, Левина, 2015; Карта..., 2023), поэтому наибольшую чувствительность к их подготовке должна иметь именно осевая рифтовая структура.

На стадии разработки полигона в исходном определении степени информативности станций мониторинга на полигоне проводился анализ временных вариаций отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (ОА4/8) и концентрации U в подземных водах. Затем в анализ временных рядов гидрогеохимических данных включались вариации активности ^{234}U (А4), концентраций Hg и Li, а также окислительно-восстановительного потенциала (ОВП). Развитие деформаций коры в цен-

тральной части БРС рассматривалось в рамках полного сейсмогеодинамического цикла, проявившегося от Култукской до Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации. Первая началась с сильного Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. и продолжалась до 04 января 2011 г., вторая началась с сильного Быстринского землетрясения в ночь с 21 на 22 сентября 2020 г. и продолжается до настоящего времени. При мониторинге подземных вод на Култукском полигоне в 2012–2022 гг. устанавливалось снижение ОА4/8 и А4, свидетельствующее об относительном закрытии микротрещин (о возрастании фактора сжатия коры), а затем – повышение этих параметров, свидетельствующее об открытии микротрещин (о возрастании фактора растяжения коры). Сжатие реконструировалось в середине сейсмогеодинамического цикла (в 2014–2015 г.), растяжение – в его конце с развитием Байкало-Хубсугульской активизации (в 2020–2022 гг.) (Чебыкин и др., 2022; Rasskazov et al., 2022). Установленная временная смена сжатия и растяжения коры по гидрогеохимическим наблюдениям 2012–2022 гг. может сопоставляться с подобной сменой, охарактеризованной при наблюдениях за изменениями магнитного поля в дельте Селенги в 1982–1996 гг. в сочетании с изменениями механизмов очагов землетрясений и скоростей движений по данным GPS-геодезии (Дядьков и др., 2000).

В статье А.М. Ильясовой и С.В. Снопкова (2023) в интерпретации результатов мониторинга Култукского резервуара подземных вод используется опыт определений вариаций содержания H_4SiO_4 в подземных водах БРС как предвестника землетрясений (Пиннекер и др., 1984). Во время режимных наблюдений 1976–1979 гг. была установлена в целом слабая чувствительность Окусиканского источника № 35 к сейсмическим событиям северо-восточной части БРС, но показано резкое возрастание содержания кремниевой кислоты в середине апреля 1979 г. одновременно с землетрясением средней силы ($K = 12$), эпицентр которого находился в 13 км от этого источника. Землетрясение сопровождалось скачкообразным подъемом концентрации этого компонента.

При наблюдениях на всех станциях Култукского полигона было установлено подобное скачкообразное возрастание концентрации Si в подземных водах при Голоуственном землетрясении 05 сентября 2015 г. и при перестройке 20 июня – 02 июля 2019 г., не сопровождавшейся землетрясениями, но определившей настрой последующей Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации. Эти вариации Si подчеркнули значение перестройки сейсмогенерирующих процессов в масштабе всей центральной части БРС, от Байкала до Хубсугула. В ходе развития полного сейсмогеодинамического цикла, от Култукской до Байкало-Хубсугульской активизации, на станциях полигона были обозначены интервалы последовательного скачкообразного возрастания Si с повышением общей минерализации. Соответственно, тренды элементов в рядах наблюдений прослеживались в 4-х временных интервалах: 1) 2012–2015 гг. (мониторинговый ряд до Голоустного землетрясения 5 сентября 2015 г.), 2) 2015–2019 гг. (от 5 сентября 2015 г. до 20 июня 2019 г.), 3) 2019–2020 гг. (предсейсмический мониторинговый ряд от 02 июля 2019 г. до 22 сентября 2020 г.) и 4) 2020–2022 гг. (сейсмический мониторинговый ряд, начавшийся Быстринским землетрясением 22 сентября 2020 г. и продолжающийся в настоящее время).

В статьях И.С. Чувашовой, А.М. Ильясовой (2023) и Е.П. Чебыкина, С.В. Рассказова (2023) сделан особый акцент на анализе мониторинговых рядов подземных вод ст. 27. Подземные воды этой станции представляют собой конечный компонент NE в изотопной систематике U и Sr подземных вод полигона, которая описывается моделью смешения изотопных отношений компонентов NE (nonequilibrium U) и E (equilibrium U), соответственно, с составами: $OA4/8=3.17$, $^{87}Sr/^{86}Sr=0.70534$ и $OA4/8=1.0$, $^{87}Sr/^{86}Sr=0.7205$ (Рассказов и др., 2020; Rasskazov et al., 2020).

В первой статье по подземным водам ст. 27 анализировались временные ряды термофильного микрокомпонента Li и геохимически связанных с ним макрокомпонентов Cl и S. Температура подземных вод в резервуаре рассчитывалась по уравнению Na/Li геотер-

мометра (Fouillac, Michard, 1981). Полученные значения температуры интерпретировались в связи с эффектом механического размешивания в воде частиц глинки трения при усилении взаимодействия вода–порода в плоскости активного разлома, разогревающейся при трении. В 2013–2015 гг., при Котовской и Муринской сейсмических активизациях на западе Южно-Байкальской впадины, установлен Na/Li температурный отклик $116\text{ }^{\circ}\text{C}$ в подземных водах, обогащенных серой и хлором. В 2015–2020 гг., при активизации Голоустенской и Муринской эпицентральных линий землетрясений, обозначено состояние, близкое к стабильному. В 2020–2022 гг., во время Байкало-Хубсугульской активизации, прослежен переход от эпизодического внешнего воздействия сейсмогенных процессов на Култукский резервуар подземных вод к развитию автоколебаний.

Во второй статье по подземным водам ст. 27 сопоставлялись мониторинговые ряды термофильного макрокомпонента Si и термофильного отношения Na/Li. Расхождения температурных оценок связывались с разными принципами генерации температуры резервуара подземных вод, заложенными в кремниевой и Na/Li геотермометрии. Первый геотермометр основан на зависимости растворимости Si от температуры. Концентрация Si может снижаться из-за разбавления термальных вод, поднимающихся из резервуара. По кремниевому геотермометру определяется температура растворения–разбавления (TRP). Второй геотермометр служит показателем косейсмических деформаций в плоскости активного разлома, сопровождающихся возрастанием температуры за счет трения с образованием глинки трения. По Na/Li геотермометру определяется температура трения (TT). Благодаря различию принципов генерации температуры подземных вод развитие резервуара под ст. 27 расшифровывается в терминах временно-го соотношения TT и TRP.

В подземных водах этой станции в 2013–2015 гг. наблюдаются относительно низкие TRP резервуара. Косейсмические движения коры приводят к возрастанию TT с образованием глинки трения в плоскости активного разлома, в связи с чем T(Na/Li) подзем-

ных вод варьируется от 8 до 53 °С. Один эпизод $T(\text{Na/Li}) = 116$ °С проявляется при низком значении $T(\text{Si})$ (12 °С), другой эпизод $T(\text{Na/Li}) = 67$ °С – при повышенном значении $T(\text{Si})$ (37 °С). В 2015–2019 гг. в резервуаре оформляется более глубокий гидрогеодинамический центр при значении $T(\text{Si}) = 31$ °С (глубина около 1.2 км). Тренд ТРР+ТТ показывает возрастание $T(\text{Na/Li})$ до 50 °С одновременно со снижением $T(\text{Si})$ до 25 °С. В 2019–2020 гг. продолжается поступление подземных вод из гидрогеодинамического центра без заметного косейсмического возрастания $T(\text{Na/Li})$. Это состояние резервуара оценивается как предсейсмическое. С началом Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2022 гг. компонент гидрогеодинамического центра дает тренды ТРР и ТТ. Соответственно, $T(\text{Si})$ возрастает до 42 °С (глубинный эквивалент температуры – до 1.7 км) и $T(\text{Na/Li})$ – до 99 °С.

В статье Е.П. Чебыкина и И.С. Чувашовой (2023) в рамках полного сейсмогеодинамического цикла центральной части БРС рассматриваются все ряды гидрогеохимических данных, полученные в 2012–2022 гг. на мониторинговых станциях Култукского полигона, прослеживаются вариации термofильных элементов Na и Li и Na/Li отношения в связи с изменениями ОА4/8 и А4, отражающими открытие и закрытие микротрещин для циркулирующих подземных вод. На разных станциях Култукского полигона получен интервал $T(\text{Na/Li})$ от 8 до 123 °С. Парагенетические соотношения развития Култукского резервуара и сейсмичности центральной части БРС интерпретируются в рамках «косейсмической химической гидрогеодинамики». Применение этого подхода приводит к выводу о том, что сейсмическая опасность в центральной части БРС не может оцениваться в категориях событий, происшедших до перестройки деформационного поля коры между Муринским землетрясением 6 июля 2020 г. и Быстринским землетрясением 22 сентября 2020 г., но может осуществляться на основе получения новых мониторинговых данных и расшифровки косейсмической химической гидрогеодинамики по ходу продолжающихся сейсмических событий.

В статьях С.В. Снопкова, А.А. Куроленко (2023) и С.В. Рассказова, С.В. Снопкова, С.А. Борнякова (2023) анализируются ряды мониторинга электрохимических параметров подземных вод в соотношении с землетрясениями Байкало-Хубсугульской активизации. Высокая чувствительность к землетрясениям окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) была установлена при резком падении значений этого параметра в подземных водах всех станций Култукского полигона во время Быстринского землетрясения 22 сентября 2020 г. (Семинский и др., 2021).

В первой статье об ОВП приводятся результаты ежедневных наблюдений ОВП и рН на ст. 190 во время серии сейсмических событий, произошедших на оз. Хубсугул, на расстоянии более 200 км от Култукского полигона, в начале 2021 года. Определяются отклики с понижением ОВП, предшествующие сейсмическим событиям, и отклики с понижением рН (повышением кислотности), следующие после сейсмических толчков. Замечено, что, чем сильнее было сейсмическое событие, тем раньше возникала аномалия ОВП и быстрее повышалась кислотность воды после землетрясения.

Во второй статье об ОВП обосновывается необходимость организации на Култукском полигоне наблюдений откликов на подготовку землетрясений центральной части БРС в режиме реального времени. С начала Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации получались первичные сигналы об опасном сейсмическом состоянии территории определением ОВП в подземных водах полигона с помощью портативных приборов «Hanna» и «Эксперт». Ряды наблюдений ОВП интерпретировались исходя из роли потоков флюидов-восстановителей как индикатора дегазации коры, сопутствующей подготовке и реализации сейсмогенных деформаций. В определении времени землетрясений Байкало-Хубсугульской активизации учитывалось: 1) снижение атмосферного давления, 2) вхождение в режим согласования и рассогласования ОВП разных станций и 3) общее снижение ОВП на станциях полигона. По результатам измерений определены места, в которых должны быть уста-

новлены два мультипараметрических зонда, один из которых должен находиться на Култукской тектонической ступени, другой – в зоне Обручевского разлома.

Заключение

Катастрофические землетрясения 6 февраля 2023 г. нанесли колоссальный ущерб инфраструктуре Турции, (более 105 млрд долларов), весьма ощутимый для сопредельных стран и повлекли многочисленные жертвы среди населения. Это событие выявило насущную необходимость практических шагов, направленных на детальное изучение геологических процессов, происходящих в земной коре в местах расположения потенциально опасных сейсмических зон для своевременного предупреждения властных структур и населения о грядущей сейсмической опасности. Рассмотренные в представленных материалах сведения о последствиях катастрофических землетрясений в Турции наглядно обозначили актуальность разработок вероятностного среднесрочного прогноза землетрясений, результаты которого можно использовать для более объективных оценок сейсмической опасности и для выбора превентивных мероприятий по снижению ущерба от приближающегося сильного землетрясения. Авторами отмечается, что значимые успехи в прогнозе землетрясений могут быть достигнуты лишь при всестороннем изучении геологических условий подготовки очагов землетрясений в сегментах разломов, поскольку информация в каталогах землетрясений для этого недостаточна. Многолетний поиск предвестников землетрясений в разных регионах мира способствовал накоплению информации, однако причинно-следственные связи между землетрясениями и их разнообразными предвестниками остаются во многом еще не распознанными.

На Култукском полигоне получен 10-летний опыт гидрогеохимического мониторинга. По его результатам, приведенным в статьях предлагаемого читателю тематического выпуска журнала «Геология и окружающая среда», выстроено понимание развития Култукского резервуара подземных вод в осевой структуре центральной части

БРС. Реконструирован процесс, протекающий в резервуаре, в терминах ОА4/8, А4 (закрытия и открытия микротрещин), температуры растворения–разбавления (ТРР) и температуры трения (ТТ) в плоскости разлома. Показано, что развитие резервуара имело парагенетические соотношения с подготовкой и реализацией землетрясений в центральной части БРС.

Первичный оперативный сигнал об опасном сейсмическом состоянии центральной части БРС может быть выявлен по характерным изменениям ОВП и других электрохимических параметров подземных вод, однако редких точечных определений механизмов возникновения этих сигналов недостаточно. Требуется установка на полигоне мультипараметрических зондов, отслеживающих изменения Култукского резервуара подземных вод, происходящие в режиме реального времени.

Литература

Акбиев Р.Т., Абаканов М.С. Оперативная оценка последствий разрушительного землетрясения в Турции (по официальным опубликованным данным СМИ и глобальной сети) // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 35–51. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.35>

Андрей Алексеевич Тресков. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2006. 217 с.

Бержинская Л.П., Акбиев Р.Т., Ружич В.В., Саландаева О.И. Системный подход к комплексной оценке региональной сейсмобезопасности урбанизированных территорий // Геодинамика и минералогия Северной Евразии: материалы VI Международной научной конференции, посвященной 50-летию Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН. Улан-Удэ: Издательство Бурятского госуниверситета, 2023. С. 81–84.

Бобров А.А. Исследование объемной активности радона в разломных зонах Приольхонья и Южного Приангарья: методика и предварительные результаты // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2008. Вып. 6, № 32. С. 124–129.

Бобров А.А. В. К вопросу о сейсмической активности и поле радона в Приольхонье (Западное Прибайкалье) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской акаде-

мии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 3 (56). С. 76–85. DOI 10.21285/0130-108X-2016-56-3-76-85

Бобров А.А. Поле эманаций радона и землетрясения в Прибайкалье: первый опыт применения информационной энтропии // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 4. С. 69–76. DOI: 10.21285/2541-9455-2017-40-4-69-76

Борняков С.А. Деформационные предвестники Усть-Баргузинского землетрясения 20 мая 2008 г. // ДАН. 2010. Т. 431, № 3. С. 400–402.

Борняков С.А., Добрынина А.А., Семинский К.Ж., Саньков В.А., Радзиминович Н.А., Салко Д.В., Шагун А.Н. Быстринское землетрясение в южном Прибайкалье (21.09.2020 г., Mw = 5.4): общая характеристика, основные параметры и деформационные признаки перехода очага в мета-нестабильное состояние // Доклады академии наук. Науки о Земле. 2021а. Т. 498, № 1. С. 84–88. DOI: 10.31857/S2686739721050042

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

Борняков С.А., Салко Д.В., Встовский Г.В. Методология деформационного мониторинга в Южном Прибайкалье и концептуальный подход к прогнозу землетрясений // Известия ИГУ. Серия «Науки о Земле». 2021б. Т. 38. С. 13–40. DOI: 10.26516/2073-3402.2021.38.13

Борняков С.А., Салко Д.В., Семинский К.Ж., Дэмбэрэл С., Ганзориг Д., Батсайхан Ц., Тогтохбаяр С. Инструментальная регистрация медленных деформационных волн на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне // Доклады академии наук. 2017. Т. 473, № 3. С. 355–358.

Гольдин С.В., Дядьков П.Г., Дашевский Ю.А. Стратегия прогноза землетрясений на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 10. С. 1484–1496.

Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И., Ключевский А.В., Демьянович В.М., Ключевская А.А. Повышенные содержания ртути в воде истока реки Ангара: отклики на геодинамические воздействия и сильные землетрясения // Доклады академии наук. 2020, том 491, № 2, с. 77–81.

Дядьков П.Г., Мандельбаум М.М., Татьков Г.И., Ларионов В.А., Жирова Н.В., Михеев О.А.,

Низамутдинов Р.С., Чебаков Г.И. Особенности развития сеймотектонического процесса и процессов подготовки землетрясений в Центральной части Байкальской рифтовой зоны по результатам тектономагнитных исследований // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 3. С. 346–359.

Дядьков П.Г., Мельникова В.И., Саньков В.А., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Тимофеев В.Ю. Современная динамика Байкальского рифта: эпизод сжатия и последующее растяжение в 1992–1996 гг. // Доклады РАН. 2000. Т. 372, № 1. С. 99–103.

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

Карта эпицентров землетрясений. Иркутск: Байкальский филиал Федерального исследовательского центра Единая геофизическая служба РАН, 2023. <http://www.seis-bykl.ru>

Коваль П.В., Удодов Ю.Н., Андрулайтис Л.Д., Саньков В.А., Гапов А.Е. Ртуть в воде истока р. Ангара: пятилетний тренд концентрации и возможные причины его вариаций // Доклады академии наук. 2003. Т. 389. № 2. С. 235–238.

Коваль П.В., Удодов Ю.Н., Саньков А.В., Ясеновский А.А., Андрулайтис Л.Д. Геохимическая активность разломов Байкальской рифтовой зоны // Доклады академии наук. 2006. Т. 409. № 3. С. 389–393.

Лопатин М.Н., Семенов Р.М. Циклы при выявлении гидрогеохимического предвестника // П Всероссийская научная конференция с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений» (29–30 сентября 2021 г.). Москва: ИТПЗ РАН, 2021. С. 69–70.

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

Пиннекер Е.В. Особенности исследований для целей прогноза землетрясений по гидрогеохимическим показателям // Исследования по созданию научных основ прогноза землетрясений. Иркутск, 1984. С. 39–43.

Пиннекер Е.В., Ясько В.Г. Результаты изучения гидрогеологических предвестников землетрясений в Байкальской рифтовой зоне // Тезисы

докладов Всесоюзного совещания по прогнозу землетрясений. Алма-Ата, 1980. С. 10–12.

Пиннекер Е.В., Дзюба А.А., Папшев М.В. и др. Основные результаты и задачи изучения изменений гидрогеологических условий при подготовке землетрясений в Байкальской рифтовой зоне // Исследования по созданию основ прогноза землетрясений в Сибири. Иркутск, 1989. С. 42–43.

Пиннекер Е.В., Шабынин Л.Л., Ясько В.Г. и др. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Гидрогеология. Новосибирск: Наука, 1984. 167 с.

Пиннекер Е.В., Ясько В.Г., Шкандрий Б.О. Гидрогеохимические предвестники землетрясений // Гидрогеохимические методы поисков рудных месторождений и прогноза землетрясений. Алма-Ата, 1983. С. 120–123.

Пиннекер Е.В., Ясько В.Г., Шкандрий Б.О. Результаты изучения гидрогеологических предвестников землетрясений в Байкальской рифтовой зоне // Гидрогеохимические предвестники землетрясений. М.: Наука, 1985. С. 259–285.

Расказов С.В., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Оргильянов А.И., Коваленко С.Н., Семинский А.К., Попов Е.П., Чебыкин Е.П. Гидрогеохимическая зональность изотопов урана ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) на юге Сибирского палеоконтинента: роль резервуара Южного Байкала в формировании подземных вод // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11, № 3. С. 632–650. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496>

Расказов С.В., Снопков С.В., Борняков С.А. Соотношение времени землетрясений Байкало-Хубсугульской активизации с вариациями окислительно-восстановительного потенциала в подземных водах Култукского полигона // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 181–201. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.181>

Расказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А. Разработка Култукского сейсмопрогностического полигона: вариации ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, № 4. С. 519–553.

Ружич В.В. О среднесрочном прогнозе землетрясений в Прибайкалье // Геофизические исследования в Восточной Сибири на рубеже XXI века. Новосибирск: Наука, СИФ, 1996. С. 143–147.

Ружич В.В. Сейсмотектоническая деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны // Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 144 с.

Ружич В.В., Левина Е.А. Среднесрочный прогноз землетрясений в Байкальской рифтовой зоне // Национальная ассоциация ученых (НАУ) / Геолого-минералогические науки. 2015. # VI, № 11. С. 94–98.

Ружич В.В., Левина Е.А. О разработке сейсмогеологического подхода к среднесрочному прогнозу землетрясений в Байкальской рифтовой зоне // Динамические процессы в геосферах. 2022. № 1. С. 17–28. https://doi.org/10.26006/22228535_2022_14_1_17

Ружич В.В., Левина Е.А. Промежуточные результаты применения сейсмогеологического подхода к среднесрочному прогнозу землетрясений в Байкальской рифтовой зоне // Геодинамика и минерагения Северной Евразии: материалы VI Международной научной конференции, посвященной 50-летию Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН. Улан-Удэ: Издательство Бурятского госуниверситета, 2023. С. 457–459.

Ружич В.В., Бержинская Л.П., Левина Е.А., Пономарева Е.И. О причинах возникновения и последствиях двух разрушительных землетрясений в Турции 06.02.2023 г. // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 22–34. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.22>

Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Добрынина А.А., Ашурков С.В., Бызов Л.М., Дембелов М.Г., Кале Э., Девершер Ж. Современные горизонтальные движения и сейсмичность южной части Байкальской впадины (Байкальская рифтовая система) // Физика Земли. 2014. № 6. С. 70–79. [doi:10.7868/S0002333714060076](https://doi.org/10.7868/S0002333714060076)

Семенов Р.М. Землетрясение 27.08.2008 года на юге Байкала и его предвестники // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 1, № 4. С. 441–447.

Семенов Р.М., Имаев В.С., Смекалин О.П. и др. Гелий в глубинной воде Байкала – предвестник землетрясений // Доклады РАН. 2010. Т. 432. № 4. С. 533–536.

Семенов Р.М., Кашковский В.В., Лопатин М.Н. Модель подготовки и реализации тектонического землетрясения и его предвестников в условиях растяжения земной коры // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 1. С. 165–175. [doi:10.5800/GT-2018-9-1-0343](https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0343)

Семенов Р.М., Лопатин М.Н., Чечельницкий В.В. Изучение концентраций растворенных гелия и радона в подземных водах Южного Прибайкалья в связи с сейсмическими процессами //

Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 1. С. 63–74.

Семинский А.К. Вариации радона в подземных водах при подготовке и реализации сейсмических событий Байкальского региона // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13, № 2. С. 1–7. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0631>

Семинский А.К., Семинский К.Ж. Предварительные результаты исследования взаимосвязи сейсмической активности с концентрацией радона в подземных водах Южного Приангарья // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2020. Т. 33. С. 100–111.

Семинский А.К., Семинский К.Ж. Мониторинг радона и физико-химических характеристик подземных вод Южного Прибайкалья // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2018а. Т. 26. С. 84–98. DOI: 10.26516/2073-3402.2018.26.84.

Семинский А.К., Семинский К.Ж. Мониторинг физико-химических параметров подземных вод Южного Приангарья при проведении радиометрических исследований // Вопросы естествознания. 2018б. № 3 (17). С. 120–127.

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., Семинский А.К. Радон в подземных водах Прибайкалья и Забайкалья: пространственно-временные вариации // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 3. С. 477–493. doi:10.5800/GT-2016-7-3-0218.

Семинский К.Ж., Бобров А.А. Геоэлектрический имидж сбросовых зон: тектонофизическая интерпретация малоглубинной электротомографии на примере Бугульдейско-Чернорудского грабена в Западном Прибайкалье // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1339–1361. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0399>

Семинский К.Ж., Бурзунова Ю.П., Семинский А.К., Бобров А.А. Роль структурного фактора в распределении подземных вод с повышенным содержанием радона на юго-западном фланге Южно-Байкальской рифтовой впадины // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 949–969.

Семинский К.Ж., Борняков С.А., Добрынина А.А., Радзиминович Н.А., Рассказов С.В., Саньков В.А., Миалле П., Бобров А.А., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Семинский

А.К., Чебыкин Е.П., Шагун А.Н., Герман В.И., Тубанов Ц.А., Улзибат М., 2020. Быстринское землетрясение в Южном Прибайкалье (21.09.2020г., Mw=5.4): основные параметры, признаки подготовки и сопровождающие эффекты // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 5. С. 727–743.

Семинский К.Ж., Добрынина А.А., Борняков С.А., Саньков В.А., Поспеев А.В., Рассказов С.В., Перевалова Н.П., Семинский И.К., Лухнев А.В., Бобров А.А., Чебыкин Е.П., Едемский И.К., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Король С.А. Комплексный мониторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: организация пилотной сети и первые результаты // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13, № 5. С. 0677.

Семинский К.Ж., Рассказов С.В., Семинский А.К., Михеева Е.А. Радон в нерадоновых подземных водах Байкальского региона: пространственно-временные вариации // Доклады АН. 2014. Т. 457. № 5. С. 573–578. doi:10.7868/S0869565214230236.

Снопков С.В., Куроленко А.А. Хубсугульское землетрясение 12 января 2021 г. и афтершоки: электрохимические отклики подземных вод юго-западного побережья Байкала // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 172–180. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.172>

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

Чувашова И.С., Ильясова А.М. Косейсмические вариации Li в подземных водах станции 27 Култукского полигона // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 106–123. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.106>

Чебыкин Е.П., Рассказов С.В. Сравнительные исследования косейсмических изменений концентраций термофильных элементов Si, Na и Li в подземных водах ст. 27 на Култукском полигоне, оз. Байкал // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 124–140. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.124>

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

Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В. Первые результа-

ты мониторинга $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // Доклады академии наук. 2015. Т. 460, № 4. С. 464–467.

Bornyakov S.A., Guo Y., Panteleev I.A., Zhuo Y-Q., Dobrynina A.A., Sankov V.A., Salko D.V., Shagun A.N., Karimova A.A. Stages of stick-slip preparation on pre-cut faults in laboratory Models, and Verification of the Stages in Nature // *Geology and Environment*. 2023 Vol. 3, No. 1. P. 52–71. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.52>

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

Ma J., Guo Y, Sherman S. I. Accelerated synergism along a fault: A possible indicator for an impending major earthquake // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2014. Vol. 5, No. 2. P. 387–399. doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0134.

Ma J., Sherman S.I., Guo Y.S. Identification of meta-unstable stress state based on experimental study of evolution of the temperature field during stick-slip instability on a bending fault // *Science China Earth Sciences*. 2012. V. 55. P. 869–881. doi.org/10.1007/s11430-012-4423-2.

Rasskazov S., Ilyasova A., Bornyakov S., Chuvashova I., Chebykin E. Responses of a $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio in groundwater to earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia // *Front. Earth Sci*. 2020. Vol. 14, No. 4. P. 711–737; doi.org/10.1007/s11707-020-0821-5

References

Akbiev R.T., Abakanov M.S. Operational assessment of the consequences of the devastating earthquake in the Türkiye (according to official published data of media and global network) // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 35–51. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.35> (in Russian)

Berzhinskaya L.P., Akbiev R.T., Ruzhich V.V., Salandaeva O.I. A systematic approach to a comprehensive assessment of the regional seismic safety of urbanized territories // *Geodynamics and Mineralogy of Northern Eurasia: Materials of VI International scientific conference*. Ulan-Ude: Buryat State University Publishing Department, 2023. P. 81–84. (in Russian)

Bobrov A.A. Investigation of radon volumetric activity in the fault zones of the Olkhon and South Angara regions: methodology and preliminary results // *Proceedings of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, prospecting and explo-*

ration of ore deposits. 2008. Issue 6, No. 32. P. 124–129. (in Russian)

Bobrov A.A. On the issue of seismic activity and the radon field in the Olkhon region (Western Baikal region) // *Proceedings of the Siberian Branch of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, prospecting and exploration of ore deposits*. 2016. Issue 3, No. 56. P. 76–85. [doi:10.21285/0130-108X-2016-56-3-76-85](https://doi.org/10.21285/0130-108X-2016-56-3-76-85). (in Russian)

Bobrov A.A. The field of radon emanation and earthquakes in the Baikal region: the first experience of using information entropy // *Proceedings of the Siberian Branch of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, exploration and development of mineral deposits*. 2017. V. 40, No. 4. P. 69–76. (in Russian)

Bornyakov S.A. Deformational precursors of the Ust-Barguzin earthquake on May 20, 2008 // *Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*. 2010. V. 431, No. 3. P. 400–402. (in Russian)

Bornyakov S. A., Dobrynina A. A., Seminsky K. Zh., Sankov V. A., Radziminovich N. A., Salko D. V., Shagun A.N. Bystrinsky earthquake in the southern Baikal region (21.09.2020 g., Mw = 5.4): general characteristics, main parameters and deformation signs of the transition of the focus to a meta-unstable state // *Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*. 2021a, V. 498, No. 1. P. 84–88. DOI: 10.31857/S2686739721050042 (in Russian)

Bornyakov S.A., Miroshnichenko A.I., Salko D.V. Diagnostics of the pre-seismogenic state of structurally inhomogeneous media according to deformation monitoring data // *Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*. 2016. Vol. 468, No. 1. P. 84–87. (in Russian)

Bornyakov S.A., Salko D.V., Vstovsky G.V. Methodology of deformation monitoring in the Southern Baikal region and a conceptual approach to earthquake prediction // *Izvestiya of Irkutsk State University. Earth Sciences series*. 2021b. V. 38. DOI: 10.26516/2073-3402.2021.38.13 (in Russian)

Bornyakov S.A., Salko D.V., Seminsky K.Zh., Demberel S., Ganzorig D., Batsaikhan Ts., Togtokhbayar S. Instrumental registration of slow deformation waves at the South Baikal geodynamic range // *Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*. 2017. V. 473, No. 3. P. 355–358. (in Russian)

Chebykin E.P., Chuvashova I.S. Coseismic chemical hydrogeodynamics of the Kultuk groundwater reservoir: indicator roles of Na/Li, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$,

and ^{234}U // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 141–171. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.141> (in Russian)

Chebykin E.P., Rasskazov S.V. Comparative studies of coseismic changes in concentrations of thermophilic elements Si, Na, and Li in groundwaters from station 27 in the Kultuk polygon, Lake Baikal // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 124–140. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.124> (in Russian)

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

Chuvashova I.S., Ilyasova A.M. Coseismic variations of Li in groundwaters at station 27 of the Kultuk polygon // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 106–123. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.106> (in Russian)

Goldin S.V., Dyadkov P.G., Dashevsky Yu.A. Earthquake prediction strategy at the South Baikal geodynamic region // *Geology and Geophysics*. 2001. Vol. 42, No. 10. P. 1484–1496. (in Russian)

Dyadkov P.G., Mandelbaum M.M., Tatkov G.I., Larionov V.A., Zhirova N.V., Mikheev O.A., Nizamutdinov R.S., Chebakov G.I. Peculiarities of the development of the seismotectonic process and processes of earthquake preparation in the central part of the Baikal rift zone according to the results of tectonomagnetic studies // *Geology and Geophysics*. 1999. Vol. 40, No. 3. P. 346–359. (in Russian)

Dyadkov P.G., Melnikova V.I., Sankov V.A., Nazarov L.A., Nazarova L.A., Timofeev V.Yu. Modern dynamics of the Baikal Rift: An episode of compression and subsequent extension in 1992–1996 // *Reports of the Russian Academy of Sciences*. 2000. Vol. 372, No. 1. P. 99–103. (in Russian)

Florensov N.A. Mesozoic and Cenozoic depressions of the Baikal region / *Proceedings of East Siberian Department, Siberian Branch AS USSR*. Issue 19. Series geol. M.–L.: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1960. 258 p. (in Russian)

Grebenshchikova V.I., Kuzmin M.I., Klyuchevsky A.V., Demyanovich V.M., Klyuchevskaya A.A. Elevated mercury levels in the source water of the Angara River: responses to geodynamic impacts and strong earthquakes // *Reports of the Academy of Sciences*. 2020, Vol. 491, No. 2. P. 77–81. (in Russian)

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

Koval P.V., Udodov Yu.N., Andrulaitis L.D., Sankov V.A., Gapov A.E. Mercury in water of the source of the Angara River: a five-year concentration trend and possible reasons for its variations // *Reports of the Academy of Sciences*. 2003. V. 389, No. 2. P. 235–238. (in Russian)

Koval P.V., Udodov Yu.N., Sankov A.V., Yasenovsky A.A., Andrulaitis L.D. Geochemical activity of faults in the Baikal rift zone // *Reports of the Academy of Sciences*. 2006. Vol. 409, No. 3. P. 389–393. (in Russian)

Lopatin M.N., Semenov R.M. Cycles in the detection of a hydrogeochemical precursor // II All-Russian Scientific Conference with international participation "Modern methods for assessing seismic hazard and earthquake prediction" (September 29–30, 2021). Moscow: ITPZ RAN, 2021. P. 69–70. (in Russian)

Map of earthquake epicenters. Irkutsk: Baikal Branch of the Federal Research Center Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, 2023. <http://www.seis-bykl.ru> (in Russian)

Melnikova V.I., Gileva N.A., Arefiev S.S., Bykova V.V., Masalskiy O.K. The Kultuk earthquake in 2008 with $M_w = 6.3$ in the south of Lake Baikal: spatial-temporal analysis of seismic activity // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2012. Vol. 48, No. 11. P. 44–62. (in Russian)

Pinneker E.V. Features of research for the purposes of earthquake prediction by hydrogeochemical indicators // *Research on the creation of scientific foundations for earthquake prediction*. Irkutsk, 1984. P. 39–43. (in Russian)

Pinneker E.V., Yasko V.G. Results of the study of hydrogeological precursors of earthquakes in the Baikal rift zone // *Abstracts of reports of the All-Union meeting on earthquake forecasting*. Alma-Ata, 1980. P. 10–12. (in Russian)

Pinneker E.V., Dzyuba A.A., Papshev M.V. et al. Main results and tasks of studying changes in hydrogeological conditions during the preparation of earthquakes in the Baikal rift zone. Irkutsk, 1989. P. 42–43. (in Russian)

Pinneker E.V., Shabynin L.L., Yasko V.G. et al. *Geology and seismicity of the BAM zone*. Hydrogeology. Novosibirsk: Nauka, 1984. 167 p. (in Russian)

- Pinneker E.V., Yasko V.G., Shkandriy B.O. Hydrogeochemical precursors of earthquakes // Hydrogeochemical methods of searching for ore deposits and forecasting earthquakes. Alma-Ata, 1983. P. 120–123. (in Russian)
- Pinneker E.V., Yasko V.G., Shkandriy B.O. The results of the study of hydrogeological precursors of earthquakes in the Baikal rift zone // Hydrogeochemical earthquake precursors. M.: Nauka, 1985. P. 259–285. (in Russian)
- Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Vodneva E.N., Chuvashova I.S., Borneyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V., Chechelnytsky V.V., Gileva N.A. Development of the Kultuk seismic prognostic polygon: ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variations in groundwater from active faults on the western coast of the Baikal // Geodynamics and Tectonophysics. 2015. Vol. 6, No. 4. P. 519–553. (in Russian)
- Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Borneyakov S.A., Orgilyanov A.I., Kovalenko S.N., Seminsky A.K., Popov E.P., Chebykin E.P. Hydrogeochemical zoning of uranium isotopes ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) in the Southern Siberian paleocontinent: the role of the South Baikal reservoir in the groundwater formation // Geodynamics & Tectonophysics. 2020. Vol. 11, No. 3. P. 632–650. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496> (in Russian)
- Rasskazov S.V., Snopkov S.V., Borneyakov S.A. Relationship between timing of earthquakes of the Baikal-Khubsugul reactivation and oxidation–redox potential in groundwaters from the Kultuk polygon // Geology and Environment. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 181–201. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.181> (in Russian)
- Ruzhich V.V. On the medium-term forecast of earthquakes in the Baikal region // Geophysical research in Eastern Siberia at the turn of the XXI century. Novosibirsk: Nauka, SIF, 1996. P. 143–147. (in Russian)
- Ruzhich V.V. Seismotectonic Destruction of the Earth's Crust in the Baikal Rift Zone // Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 1997. 144 p. (in Russian)
- Ruzhich V.V., Levina E.A. On the development of a seismogeological approach to the medium-term forecast of earthquakes in the Baikal Rift Zone // Dynamic Processes in Geospheres. 2022. No. 1. P. 17–28. https://doi.org/10.26006/22228535_2022_14_1_17 (in Russian)
- Ruzhich V.V., Levina E.A. Intermediate results of applying the seismic-geological approach to the medium-term earthquake prediction in the Baikal rift zone // Geodynamics and Minerageny of Northern Eurasia: Materials of VI International scientific conference. Ulan-Ude: Buryat State University Publishing Department, 2023. P. 457–459. (in Russian)
- Ruzhich V.V., Berzhinskaya L.P., Levina E.A., Ponomareva E.I. On the causes and consequences of two devastating earthquakes in the Türkiye on February 6, 2023 // Geology and Environment. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 22–34. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.22> (in Russian)
- Sankov V.A., Lukhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Dobrynina A.A., Ashurkov S.V., Byzov L.M., Dembelov M.G., Kale E., Deverscher J. Modern horizontal motions and seismicity of the southern part of the Baikal depression (Baikal rift system) // Physics of the Earth. 2014. No. 6. P. 70–79. [doi:10.7868/S0002333714060076](https://doi.org/10.7868/S0002333714060076) (in Russian)
- Semenov R.M. Earthquake of 27 August 2008 in the Southern Baikal area and its precursors // Geodynamics & Tectonophysics. 2010. Vol. 1, № 4. P. 441–447. (in Russian)
- Semenov R.M., Imaev V.S., Smekalin O.P. et al. Helium in the deep water of the Baikal – a precursor of earthquakes // Reports of the Russian Academy of Sciences. 2010. V. 432, No. 4. P. 533–536. (in Russian)
- Semenov R.M., Kashkovsky V.V., Lopatin M.N. Model of tectonic earthquake preparation and occurrence and its precursors in conditions of crustal stretching // Geodynamics & Tectonophysics. 2018, Vol. 9, No. 1. P. 165–175. [doi:10.5800/GT-2018-9-1-0343](https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0343). (in Russian)
- Semenov R.M., Lopatin M.N., Chechelnytsky V.V. Study of the concentrations of dissolved helium and radon in groundwaters of the Southern Baikal region in connection with seismic processes // Geodynamics & Tectonophysics. 2020. V. 11, No. 1. P. 63–74. (in Russian)
- Seminsky A.K. Variations of radon in groundwater during the preparation and implementation of seismic events in the Baikal region // Geodynamics & Tectonophysics. 2022. Vol. 13, No. 2. P. 1–7. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0631> (in Russian)
- Seminsky A.K., Seminsky K.Zh. Preliminary results of the study of the relationship between seismic activity and radon concentration in the underground waters of the Southern Angara region // Bulletin of the Irkutsk State University. Earth Science Series. 2020. Vol. 33. P. 100–111. (in Russian)
- Seminsky A.K., Seminsky K.Zh. Monitoring of radon and physico-chemical characteristics of groundwaters in the Southern Baikal region // Bulletin of the Irkutsk State University. Earth Science Series. 2022. Vol. 35. P. 100–111. (in Russian)

tin of the Irkutsk State University. Earth Science Series. 2018a. Vol. 26. P. 84–98. DOI: 10.26516/2073-3402.2018.26.84. (in Russian)

Seminsky A.K., Seminsky K.Zh. Monitoring of physical and chemical parameters of groundwaters in the Southern Angara region during radiometric studies // Questions of natural sciences. 2018b. No. 3 (17). P. 120–127. (in Russian)

Seminsky I.K., Pospeev A.V. Reflection of large earthquakes for the Baikal rift in 2020–2021 in the data of regime observations of the Earth's magnetotelluric field // Physics of the Earth. 2022. No. 4. P. 46–55. <https://doi.org/10.31857/S0002333722040093> (in Russian)

Seminsky K.Zh., Seminsky A.K. Radon in groundwaters of the Baikal and Transbaikalia: spatial-temporal variations // Geodynamics & Tectonophysics. 2016. Vol. 7. No. 3. P. 477–493. doi:10.5800/GT-2016-7-3-0218. (in Russian)

Seminsky K.Zh., Bobrov A.A. Geoelectric image of fault zones: tectonophysical interpretation of shallow electrotomography on the example of the Buguldei-Chernorud graben in the Western Baikal region // Geodynamics & Tectonophysics. 2018. Vol. 9. No. 4. P. 1339–1361. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0399> (in Russian)

Seminsky K.Zh., Burzunova Yu.P., Seminsky A.K., Bobrov A.A. The role of the structural factor in the distribution of groundwater with high radon content on the southwestern flank of the South Baikal Rift Basin // Geodynamics & Tectonophysics. 2017. Vol. 8. No. 4. P. 949–969. (in Russian)

Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Radzimovich 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., 2020. 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. (in Russian)

Seminsky K.Zh., Dobrynina A.A., Bornyakov S.A., Sankov V.A., Pospeev A.V., Rasskazov S.V., Perevalova N.P., Seminskiy I.K., Lukhnev A.V., Bobrov A.A., Chebykin E.P., Edemskiy I.K., Ilyasova A.M., Salko D.V., Sankov A.V., Korol

S.A., 2022. Integrated monitoring of hazardous geological processes in Pribaikalye: Pilot network and first results // Geodynamics & Tectonophysics. Vol. 13, No. 5. P. 0677. doi:10.5800/GT-2022-13-5-0677 (in Russian)

Seminsky K.Zh., Rasskazov S.V., Seminsky A.K., Mikheeva E.A. Radon in non-radon groundwaters of the Baikal region: spatial and temporal variations // Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences. 2014. V. 457. No. 5. P. 573–578. doi:10.7868/S0869565214230236. (in Russian)

Snopkov S.V., Kurolenko A.A. The Khubsgul earthquake of January 12, 2021 and aftershocks: electrochemical responses of groundwaters on the southwestern coast of Lake Baikal // Geology and Environment. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 172–180. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.172> (in Russian)

Bornyakov S.A., Guo Y., Panteleev I.A., Zhuo Y.-Q., Dobrynina A.A., Sankov V.A., Salko D.V., Shagun A.N., Karimova A.A. Stages of stick-slip preparation on pre-cut faults in laboratory Models, and Verification of the Stages in Nature // Geology and Environment. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 52–71. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.52>

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

Ma J., Guo Y., Sherman S. I. Accelerated synergism along a fault: A possible indicator for an impending major earthquake // Geodynamics and Tectonophysics. 2014. Vol. 5, No. 2. P. 387–399. doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0134.

Ma J., Sherman S.I., Guo Y.S. Identification of meta-unstable stress state based on experimental study of evolution of the temperature field during stick-slip instability on a bending fault // Science China Earth Sciences. 2012. V. 55. P. 869–881. doi.org/10.1007/s11430-012-4423-2.

Rasskazov S., Ilyasova A., Bornyakov S., Chuvashova I., Chebykin E. Responses of a $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio in groundwater to earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia // Front. Earth Sci. 2020. Vol. 14, No. 4. P. 711–737; doi.org/10.1007/s11707-020-0821-5

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
зав. лабораторией,

664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет, геологический факультет,
зав. кафедрой,
email: rassk@crust.irk.ru.

Rasskazov Sergei Vasilyevich,
Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Head of Laboratory,
664003 Irkutsk, Lenin str., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Head of Chair,
email: rassk@crust.irk.ru.

Ружич Валерий Васильевич,
доктор геолого-минералогических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
главный научный сотрудник,
email: ruzhich@crust.irk.ru.

Ruzhich Valariy Vasilievich,
doctor of geological and mineralogical sciences,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Major Researcher,
email: ruzhich@crust.irk.ru.

Коваленко Сергей Николаевич,
кандидат геолого-минералогических наук,
664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет, геологический факультет,
доцент,
email: igpug@mail.ru.

Kovalenko Sergey Nikolaevich,
candidate of geological and mineralogical sciences,
664003 Irkutsk, Lenin str., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Assistant Professor,
email: igpug@mail.ru.

О причинах возникновения и последствиях двух разрушительных землетрясений в Турции 06.02.2023 г.

В.В. Ружич¹, Л.П. Бержинская^{1,2}, Е.А. Левина¹, Е.И. Пономарева¹

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

²Иркутский научно-исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. С применением разработанной геоинформационной системы “Prediction” проведен анализ доступных из СМИ сведений о двух разрушительных землетрясениях в Турции, произошедших 06.02.2023 г. Анализировались сейсмогеологические условия режимов подготовки и проявления сейсмогенных деформаций грунтов в эпицентральных областях двух Турецких землетрясений, эпицентры которых возникли в юго-западном сегменте Восточно-Анатолийского разлома. Обсуждаются возможности распознавания признаков подготовки данных землетрясений средствами среднесрочного прогноза, разработанными для Байкальской рифтовой зоны, которые важны для оценок сейсмической опасности и сейсмического риска. На основании анализа последствий масштабного разрушения жилой и промышленной инфраструктуры Турции рассмотрены причины огромного ущерба экономике страны, нанесенного землетрясениями, которые во многом обусловлены крайне неблагоприятными сейсмотектоническими условиями и проблемами урбанизации, возникшими вследствие недостаточного соблюдения необходимых требований и норм сейсмостойкого строительства.

Ключевые слова: активные разломы, сейсмический режим, среднесрочный прогноз, сейсмическая опасность, сейсмический риск.

On the causes and consequences of two devastating earthquakes in the Türkiye on February 6, 2023

V.V. Ruzhich¹, L.P. Berzhinskaya^{1,2}, E.A. Levina¹, E.I. Ponomareva¹

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

²Irkut Technical Research University, Irkutsk, Russia

Abstract. Using the developed geoinformation system “Prediction”, an analysis was made of information available from the media on two devastating earthquakes in the Türkiye that occurred in the western segment of the East Anatolian fault on February 6, 2023. The possibilities of recognizing signs of the preparation of earthquake data by means of medium-term forecasting developed for the Baikal rift zone, which are important for assessing seismic hazard and seismic risk, are discussed. Based on the analysis of the consequences of the large-scale destruction of residential and industrial infrastructure in the Türkiye, the causes of the huge damage to the country's economy caused by earthquakes, which are largely due to unfavorable seismotectonic conditions and urbanization problems that arose as a result of insufficient compliance with the necessary requirements and norms of earthquake-resistant construction, are considered.

Keywords: active faults, seismic regime, medium-term forecast, seismic hazard, seismic risk.

Введение

Одна из величайших сейсмических трагедий в последнее столетие, произошедшая 6 февраля 2023 г. на юго-востоке Турции, в очередной раз наглядно напомнила о

том, какими масштабными и губительными могут быть последствия неожиданного сейсмического события, после которого зафиксированы почти 50 тысяч погибших, а также огромные экономические потери. Произошедшая стихийная катастрофа нанесла зна-

чительный урон и ряду соседних государств: Сирии, Таджикистану, Армении, Грузии. Огромные масштабы трагедии усугублялись тем, что высокоамплитудные сейсмические сотрясения распространялись в пределах плотно заселенной территории с многочисленными городами, расположенными на активных межплитных разломах, что привело к разрушению более 150 тысяч многоэтажных жилых зданий, с появлением многочисленных жертв среди местного населения. Для широкой аудитории огромный совокупный ущерб остается вероятнее всего оцененным, но закрытым. На повестке дня в очередной раз возник злободневный вопрос о путях решения острейшей проблемы, касающейся обеспечения сейсмической безопасности. В мировом сообществе в настоящее время используемые способы снижения сейсмического риска признаются недостаточно эффективными, что способствует распространению пессимистических настроений среди населения является причиной упреков научному сообществу по поводу отсутствия эффективных способов более успешного противостояния подземной природной стихии. Во многом это связано с недооценкой важности более детального изучения закономерностей геологических процессов, влияющих на подготовку землетрясений в недрах литосферной оболочки Земли. Предпринимаемые в настоящее время в России способы противостояния подземной стихии в основном строятся лишь на совершенствовании общего сейсмического районирования при весьма критическом отношении к результатам разработок различных видов прогноза землетрясений, а также к совершенствованию норм и правил, регламентирующих повышение сейсмостойкости сооружений городской инфраструктуры.

Общеизвестно, что причины возникновения масштабных трагических потерь в Турции были во многом обусловлены повышенной уязвимостью объектов застройки городов и крайне опасным уровнем сейсмотектонической активности многочисленных разломов в земной коре Анатолийской плиты при ее напряженном контактом взаимодействии с Африканской и Аравийской плитами. Поэтому не случайно при событиях в

Турции вновь всплыло воспоминание о том, что людей убивают не сами землетрясения, а разрушаемые ими здания, в которых находились люди. Например, на слабозаселенной территории Монгольской Республики при возникновении в 1905 г. двух сильнейших 10–11-бальных Болнайских землетрясений, а также при Гоби-Алтайском десятибалльном землетрясении 4.12.1957 г. общее число жертв не превысило первых десятков (Соловьев, 1960; Ружич, 1997).

Уместно вспомнить о том, что за двадцатый и начало двадцать первого века в Турции многочисленными сейсмическими станциями было зафиксировано более двадцати сильных землетрясений с интенсивностью 8–10 баллов по шкале MSK-64. Например, особенно губительным было сильнейшее разрушительное землетрясение в 1939 г. в г. Эрдзинжане.

Анализируя большой объем разноречивой информации, поступающей в виде фотодокументов, видеоклипов и газетных публикаций, авторы данного сообщения предприняли попытки осмыслить произошедшее событие в Турции, сопоставляя его с проявлениями высоко опасной сейсмической активности в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ) и Монголии. Ниже в кратком виде обсуждаются результаты проведенного анализа причин и последствий сейсмических событий в Турции, а также приводятся сведения, касающиеся возможностей применения метода среднесрочного прогноза землетрясений и техногенных мероприятий для смягчения разрушительных последствий.

К вопросу об условиях подготовки двух главных землетрясений в Турции

Разработанное авторами программное обеспечение и возможность доступа к мировому каталогу землетрясений с $M \geq 3.5$ (Ружич, 1997; Левина, 2011), позволяют нам изучать сейсмический режим при их подготовке в любом регионе Земли, в том числе в Турции. Таким путем изучались особенности проявления сейсмического режима, с учетом последовательности возникновения и пространственно-временной миграции эпицентров землетрясений в зоне активизации Восточно-Анатолийского разлома. Для этого

детально анализировалась пространственная миграция эпицентров более слабых землетрясений до возникновения главного первого землетрясения с $M=7.7$, и в течение 9 часов, перед вторым сильным землетрясением с $M=7.6$. Для иллюстрации на рисунке 1 в ви-

де прямоугольника показана территория, в пределах которой фиксировались перемещения эпицентров землетрясений, что позволяет оценивать режим вспарывания участков Восточно-Анатолийского разлома.



Рис. 1. Карта центральной части Турции, где черным прямоугольником обозначен район возникновения двух главных турецких землетрясений. Большими красными кружками отмечено положение эпицентров главных событий, а также форшоков и афтершоков с $M \geq 4.0$, вместо, возникших за период наблюдений с 2013 года до 23.02.2013 гг.

Fig. 1. Map of the central part of the Türkiye, where the black rectangle indicates the area of origin of the two main Turkish earthquakes and their epicenters. Large red circles mark the position of the epicenters of the main events, as well as foreshocks and aftershocks with $M \geq 4.0$, that occurred during the observation period from 2013 to February 23, 2013.

Проведенный анализ сейсмического режима, возникшего перед первым сильным землетрясением начиная с 2013 г., показал, что начало финальной стадии предшоковой активизации следует фиксировать с октября 2019 г. в соответствии с двухстадийной моделью подготовки землетрясений, рассмотренной в работе (Ружич, Левина, 2020). В указанный временной интервал, в пределах обозначенной прямоугольником территории, возникли характерные стадии: “предшоковой сейсмической

активизации” и последующей стадии “сейсмического затишья”. Данная модель была разработана на основании анализа многочисленных режимов подготовки землетрясений в БРЗ, Монголии и других регионах (Новый каталог..., 1977). Механизм ее возникновения был выявлен при проведении натурного физического моделирования и экспериментов в зонах разломов, а также при изучении эпизодов динамического разрушения ледяного покрова Байкала, которые

сопровождались излучением пакетов волновых колебаний сейсмического диапазона, сходных с землетрясениями (Ружич и др., 2014; Ostapchuk et al., 2019). Также установлено, что с применением данной модели есть возможность получать удовлетворительные результаты в рамках разрабатываемого среднесрочного прогноза землетрясений при оценках времени и энергии ожидаемых землетрясений (Ружич, Левина, 2020).

При анализе выявились некоторые примечательные особенности условий подготовки второго сильнейшего события. На рис.1 красными линиями показаны активизированный юго-западный сегмент зоны межплитного Восточно-Анатолийского разлома и пересекающий его субширотный региональный разлом, в котором и возник последующий за первым очаг второго разрушительного землетрясения в провинции Кахраманмараш. Заметим, что в том районе так же существовало сейсмическое затишье, как и перед моментом возникновения первого землетрясения, которое традиционно маскировало готовящуюся катастрофу. В пери-

оды сейсмического затишья в сегментах разломов необходимо изучить предшествующую сейсмическую активность, в которой содержатся сведения об энергетическом потенциале готовящегося очага землетрясения. Если прогноз строится только на сведениях стандартного каталога землетрясений, в котором нет сведений о слабых толчках с магнитудами менее 4, то в стадии сейсмического затишья оценивать сейсмическую опасность можно лишь с учетом длительности затишья. Подобный случай имел место и при обсуждении событий в Турции. Проведенный анализ сейсмического режима перед первым событием в местности Пазарджик с $M=7.7$ за период от 2013 г., показал, что начало финальной стадии в виде предшоковой активизации можно фиксировать с октября 2019 г. (рис. 2). Позднее, в 4 квартале 2021 года, в пределах обозначенной прямоугольником территории на карте, стали проявляться признаки стадии предшокового сейсмического затишья, согласно двухстадийной модели подготовки.

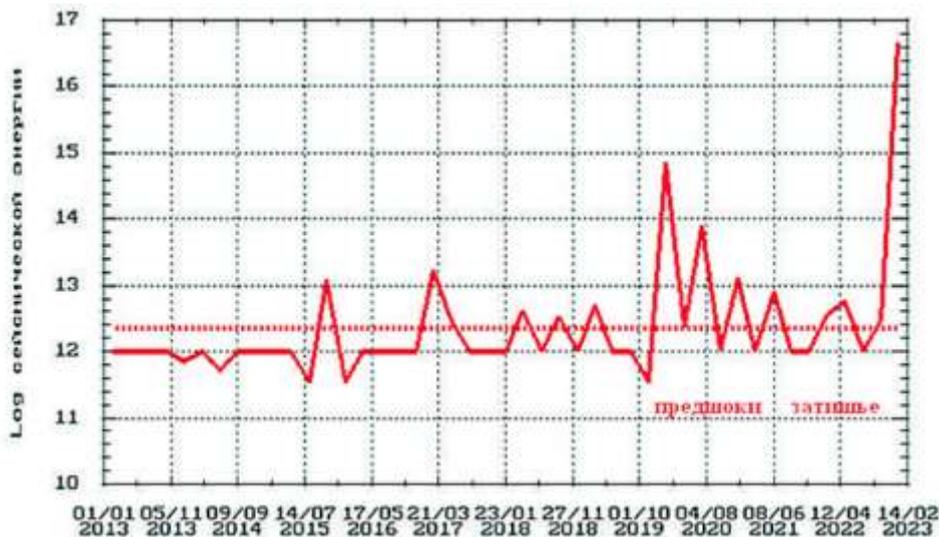


Рис. 2. Показан режим высвобождения энергии землетрясений в пределах обозначенной прямоугольником территории за период от 01.01.2013 г по 06.02.2023 г. Предположительно признаки финальной подготовки очага первого наиболее сильного землетрясения начинали проявляться в виде предшоковой активизации примерно в ноябре 2019 г. до окончания 2021 г. после чего началась стадия относительного сейсмического затишья перед максимальным шоком. По энергетическому уровню событий в период предшоковой активизации можно судить о сейсмическом потенциале готовящегося землетрясения при условии, что будет накоплен значительный объем упругой энергии в геоблоковом массиве.

Fig. 2. The mode of release of earthquake energy within the area indicated by the rectangle for the period from 01/01/2013 to 02/06/2023 is shown. Presumably, signs of the final preparation of the source of the first strongest earthquake began to display in the form of pre-shock reactivation approximately in November 2019 until the end of 2021, after which the stage of relative seismic calm before the maximum shock began. According to the energy level of events during the period of pre-shock reactivation, one can judge the seismic potential of the upcoming earthquake, provided that a significant amount of elastic energy is accumulated in the geoblock array.

Чтобы попытаться выяснить особенности режимов подготовки главных сдвоенных во времени сильных землетрясений, нами был проведен ретроспективный анализ сейсмического режима в сегменте Восточно-Анатолийского разлома за последние 15 лет. На некоторых картах разломов и эпицентрального поля землетрясений 2003 г. в Турции есть возможность обнаружения асейсмических участков разломов, то есть сейсмических брешей, в которых позднее и произошло возникновение двух главных разрушительных 9–10-балльных землетрясений. Наличие сейсмических брешей и разломных узлов нами рассматриваются как характерные признаки зон подготовки очагов готовящихся землетрясений в запертых сегментах разломов, в которых из-за высокого трения возникло контактное залипание крыльев.

Неожиданное возникновение второго землетрясения через 9 часов после первого требует отдельного изучения, поскольку режим его подготовки оказался не характерным. При рассмотрении наблюдаемой последовательности распространения афтершоковой серии после первого землетрясения было отмечено, что в районе возникновения второго очага несколько лет назад проявлялась лишь стадия сейсмического затишья. Нами предполагается, что подобный тип подготовки характерен для очагов наведенных землетрясений, возникающих при мощном сейсмодинамическом воздействии от близко расположенного ранее возникшего очага землетрясения. Можно предположить, что при вспарывании Восточно-Анатолийского разлома после первого шока возникло распространение эпицентров афтершоков в северо-восточном направлении, которое через 9 часов достигло места разломного пересечения с региональным высоконапряженным разломом взбросо-надвигового типа широтного простирания,

что послужило триггером для его активизации, то есть возникновения второго мощного сейсмического события в местности Эльбистан с $M=7.6$. Таким образом, наблюдаемый режим подготовки второго сильного землетрясения есть основание рассматривать как режим инициированного или наведенного землетрясения. Эпицентры афтершоков второго события распространились по простиранию субширотного разлома. Подобные случаи возникновения сдвоенных, то есть сближенных пространственно и во времени очагов землетрясений, нередко фиксировались во многих регионах Земли, что отмечено в работах, например, в (Кочарян, 2016, 2021; Ружич, Кочарян, 2017). В качестве примера можно напомнить сходную ситуацию, произошедшую в 1905 г. в Северной Монголии, где последовательно с интервалом в две недели возникли два катастрофических землетрясения – Цэцэрлэгское $M = 7.8$ и Болнайское $M = 8.2$ (Ружич, 1997).

О возможностях среднесрочного прогноза землетрясений

Прогностическая информация о сейсмических событиях в Турции, представленная средствами массовой информации, вызывает недоумение. Например, в научном сообществе Франк Хугербитс из Нидерландов, сказал за три дня до катастрофического землетрясения, о том, что: «...рано или поздно землетрясение с магнитудой примерно 7.5 произойдет в таких регионах как Южная или Центральная Турция, Иордан, Сирия, Ливан». Очевидно, что это был не самый «удачный прогноз» по времени ожидания опасного землетрясения, его энергии и местоположению. Наряду с такими сведениями по прогнозу землетрясений высказывались предположения о землетрясениях, спровоцированных глубинными взрывами или наведенным техническим секретным способом специалистами

недружественных стран. Более осведомленными специалистами в сфере прогноза землетрясений распространено простое объяснение о возникновении разрушительных толчков: они связаны с внезапно произошедшем сдвижении тектонических плит Аравийской и Анатолийской по зоне Восточно-Анатолийского разлома. Для многих чиновников подобное «обстоятельное» сообщение воспринимается как вполне исчерпывающее и не требующее более информативного объяснения. Против природы не пойдешь, приходится смириться и готовиться к разгребанию завалов и услугам МЧС. Нельзя исключить наличие более ответственных обоснованных высказываний по поводу прогноза произошедших событий, но они остались неизвестными. Не удивительно, что проблема обеспечения сейсмической безопасности воспринимается как не решаемая в ближней перспективе. Далее обратимся к представлениям о наличии признаков, которые позволяют судить о возможностях среднесрочного прогноза с большей определенностью.

Согласно проведенным работам специалистов по космической геодезии было установлено, что в районах готовившихся очагов землетрясений наблюдалось понижение скоростей деформаций в разломах, что вполне обоснованно трактуется как формирование сейсмических затиший (Kaftan, Melnikov, 2018). В рамках среднесрочного прогноза подобные признаки позволяют выявлять места подготавливаемых очагов землетрясений в течение ближайшего десятилетия. Они учитывались нами при разработках среднесрочного прогноза землетрясений с $M \geq 5.0$ для сейсмоопасной территории в БРЗ, где ранее фиксировались исторические землетрясения с $M=7.0 \div 7.5$. При анализе совокупности собранных материалов было выяснено, что для выявления мест подготовки формирующихся очагов опасных землетрясений наиболее информативными критериями являются: сегменты высокоранговых сейсмоактивных разломов или их узлов пересечений, а также сейсмические брешы в эпицентральной поле в сочетании с признаками возрастающей активности на их периферии в последнее десятилетие. В частности

отметим, что согласно полученным нами данным при проведении разработанного метода среднесрочного прогноза в БРЗ за период 2019–2022 гг. установлен следующий результат прогноза. Число попадания эпицентров произошедших землетрясений в места их ожидания, обозначенных в сводке о прогнозе, отправленной в 2019 г. в МЧС Иркутской области, составило 76 %. Авторами данного подхода предприняты усилия по дальнейшему улучшению подхода к совершенствованию среднесрочного прогноза в БРЗ с использованием двухстадийной модели подготовки землетрясений, о которой упоминалось выше. Таким путем есть возможность получения формализованных оценок двух других базовых параметров прогноза: E – энергия и T – время ожидания события (Ружич, Левина, 2020).

Согласно изложенным представлениям можно предположить, что последующая эволюция режима современной сейсмо тектонической активизации в зоне межплитного Восточно-Анатолийского разлома будет связана с распространением сейсмической активизации на северо-восток в сторону Северо-Анатолийского разлома до места пересечения с его зоной. При этом вполне возможно увеличение вероятности подготовки очередных сильных землетрясений с магнитудами порядка $M=7.5 \pm 0.5$ в ближайшие десятки лет. Подобная ситуация требует концентрации усилий по организации инструментальных наблюдений в зоне Восточно-Анатолийского разлома. С применением методов среднесрочного прогноза в течение последующих 1-2 десятков лет следует ожидать своевременное получение необходимой важной информации о подготовке последующих опасных землетрясений.

В настоящее время в связи с учетом поступления новых более объемных и детальных сведений о подготовке очагов землетрясений в разломах заметно сузился диапазон поиска новых более эффективных средств прогноза землетрясений, особенно в области среднесрочного. Следовательно, улучшается возможность точнее оценивать и сейсмический риск для населенных пунктов и уязвимых промышленных центров. При налажен-

ном сотрудничестве ученых с представителями властных структур могут заметно возрасти возможности более приемлемого сотрудничества, способствующего принятию оптимальных решений для выбора превентивных мер, направленных на снижение сейсмической опасности и сейсмического риска. В ряде стран подобные подходы уже применяются (Davis et al., 2010; Фролова и др., 2022).

Уроки о несоблюдении норм сейсмостойкого строительства в городах Турции

О применяемых нормах сейсмостойкого строительства в Турции

Сейсмические катастрофы последних десятилетий принесли как огромный ущерб тем государствам, которые они затронули, так и ряд неожиданностей, которые наглядно продемонстрировали, что отдельные фундаментальные концепции, позиции инженеров и сейсмологов и некоторые положения норм сейсмостойкого строительства нуждаются в более тщательном обосновании и корректировке.

Землетрясения в Турции с $M \geq 7$ за период XX начало XXI века происходили довольно часто (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Землетрясения на территории Турции с $M \geq 7$ за период XX-XXI век

Дата	Место	Число погибших	Магнитуда
9.08. 1912	Мюрефт	216	7.3
18.11. 1919	Балыкесир	3 000	7.0
7.05. 1930	Хаккари	2 514	7.2–7.5
26.12. 1939	Эрзинджан	32 700	7.8
20.12. 1942	Эрбае	3 000	7.0
26.11. 1943	Ладик	2824–5000	7.5
1.02. 1944	Герееде	3 959	7.5
18.03. 1953	Енице	265	7.2
25.04. 1957	Фетхие	67	7.1
26.05. 1957	Абант	52	7.1
6.10. 1964	Маньяс	23	7.0
22.07. 1967	Мудурну	89	7.2
28.03. 1970	Гедизе	1 086	7.2
24.11. 1976	Мурадие	4 000	7.5
17.08. 1999	Измит	17 127 –18 373	7.6
12.11. 1999	Дюздже	894	7.2
23.10. 2011	Ван	604	7.2
30.10. 2020	Эгейское море	117	7.0
6.02. 2023	Газиантеп	(50 096 в Турции; 8 500 в Сирии)	7.8
	Кахраманмараш		7.7

Первые правила, в области строительства в сейсмических районах Турции

появились в 1940 г. после землетрясения 1939 г. Затем нормы совершенствовались в

1942 г., 1975 г., 1997 г. Причем по нормам 1975 г. был возведен довольно значительный объем жилищного строительства в городах, хотя, как отмечают некоторые исследователи (Ицков, 2001), эти нормы в конструктивной части, в основном, отвечали мировому уровню того времени, а в части расчета зданий они были более «лояльными» по сравнению с нормами других стран.

С середины 90-х годов весь мир стал менять подходы к обеспечению сейсмической безопасности и требования к застройке в сейсмоопасных зонах. Нормы в Турции также были пересмотрены и после Измитского землетрясения 1999 г. были ужесточены (Afet..., 1998). С 2000 года стали действовать новые стандарты строительства с повышенными требованиями по сейсмостойкости зданий в различных зонах опасности, которые разработчики периодически дорабатывали и совершенствовали. В XXI веке, следуя мировым тенденциям, в Турции была принята Национальная стратегия с планом действий по смягчению последствий землетрясений на период 2012–2023 гг. (Кодекс..., 2020; Акбиев, Абаканов, 2023; Национальная стратегия..., 2023).

Ежегодно в Турции возводятся миллионы квадратных метров жилья (Опасность..., 2023), в том числе по социальной программе реновации зданий, действующей с 2012 года. С 2020 года действует программа по усилению многоквартирных жилых домов, согласно которой на 2023 год восстановлено 1.3 млн кв. м. жилья.

Однако на этом фоне всплывают и другие факты. Еще с конца 50-х годов XX века в Турции начался активный процесс так называемой «неконтролируемой урбанизации». В городах шел бурный рост этажности возводимых домов, плотность застройки стала максимальной. В 2015 году по жалобам покупателей недвижимости была создана рабочая группа, которую возглавил специалист из Турецкого института стандартов (TSE). Цель – определить новые стандарты качества жилья (Опасность..., 2023). К сожалению, под понятием «качество» подразумевалось четкое разделение жилья на классы А и В в зависимости от:

- использования отделочных материалов (например, качество выложенной плитки);
- стандарта определения площади квартиры (входят ли в эту площадь лестница, шахта лифта, парковка, сад и т. д.);
- есть ли в доме квартиры с запрещенной площадью менее 28.5 м²;
- есть ли квартиры с запрещенной планировкой: «студия» и т. д.

В 2018 году было реализовано Постановление о масштабном зонировании. Началась легализация недвижимого имущества, согласно которой можно было узаконить здания, построенные до конца 2017 года, заплатив за регистрацию определенную сумму в зависимости от вида и строительного объема постройки. «Зональная амнистия предполагала выдачу свидетельства о регистрации здания тем застройкам, которые не отвечали требованиям нормативной документации и нарушали законодательство» (Новости..., 2023). Авторы отмечают, что подобная амнистия зданиям, возведенным без разрешения или не соответствующим строительным нормам, в том числе и по сейсмостойкости, периодически объявлялась в стране, начиная с середины 1980-х годов. Строительный бум, который серьезно способствовал экономическому росту в стране, стал причиной «либерального» подхода к строительству, когда скорость возведения жилья стала приоритетом по сравнению с жесткими пунктами требований норм. По словам турецких экспертов (Проблемы..., 2023) «проблема в значительной степени игнорировалась, потому что ее решение было бы дорогостоящим, непопулярным и ограничивало бы ключевой двигатель экономического роста страны». Они отмечали, что «несмотря на то, что почти два десятилетия, как страна привела свои строительные нормы в соответствие с современными стандартами – много было старых слабых зданий, а дома, построенные в последнее время, были неустойчивыми, в них применялись некачественные материалы и методы, часто не соответствующие государственным стандартам» (Проблемы..., 2023).

В 2021 году Палата инженеров-геологов Турции обнародовала ряд отчетов,

которые вызвали тревогу в отношении уже построенных зданий, а также нового строительства, которое ведется в районах, ранее разрушенных землетрясениями. Эксперты заявили, что почти 50 % обследованных зданий характеризуются высоким риском обрушения, даже без дополнительного сейсмического воздействия. Большое беспокойство вызывают также бесчисленно самовольно построенные жилые массивы, возведенные предельно быстро и без разрешения. Такие постройки в переводе с турецкого именуют «построенные за ночь». Палата призвала проводить постоянное обследование зданий на соответствие действующим нормам и предупредила, что «безразличие к безопасности от стихийных бедствий приведет к большому количеству человеческих жертв» (Проблемы..., 2023).

Строительство в Турции

Турция – туристическая страна. Понятно желание застройщиков устраивать в нижних этажах зданий просторные магазины, кафе, культурно-развлекательные учреждения. Конечно, для этого необходимо иметь более свободную планировку помещений, освободить площади от «лишних» стен (рис. 3а). Поэтому большинство многоэтажных зданий имели в качестве конструктивной схемы монолитный железобетонный

каркас с заполнением стен кирпичной кладкой из многопустотного керамического кирпича или пеноблоков, а заполнение наружных стен нижних этажей часто заменялось сплошным остеклением. При этом высота нижних этажей достигала 4-5 м, что существенно больше высоты остальных типовых жилых этажей. Отсюда, жесткость нижних, так называемых «гибких» этажей становилась значительно меньше жесткости верхних типовых этажей (Ицков, 2001).

Фундаменты, в зависимости от характеристик грунта, устраивались свайными, но, чаще всего, выполнялись в виде монолитных лент, на площадках со слабыми грунтами и высоким уровнем подземных вод – в виде сплошной железобетонной плиты. К сожалению, обследование последствий землетрясений показало, что заглубление фундаментов не всегда было достаточным.

Особое внимание хочется уделить междуэтажным перекрытиям, при строительстве которых используется пенопласт (Строительство..., 2023). Причем турецкие строители уверяют, что пенопласт в междуэтажных перекрытиях «ни в коей мере не снижает несущей способности и прочности конструкций, а лишь облегчает ее и улучшает тепло- и звукоизоляционные свойства» (рис. 3б).



Рис. 3. Строительство многоэтажного здания по турецкой технологии. а – возведение монолитного каркасного здания с двумя нижними «гибкими» этажами (Акбиев, Абаканов, 2023); б – междуэтажное перекрытие с применением пенопласта (Строительство..., 2023).

Fig. 3. Construction of a multi-storey building using Turkish technology. а – erection of a monolithic frame building with two lower "flexible" floors (Akbiev, Abakanov, 2023); б – interfloor overlap with the use of foam (Construction ..., 2023).

Для решения жилищного вопроса горожан, не имеющих возможности приобрести его по рыночной цене, при строительстве типовых зданий часто использовалась система монолитного бетонирования «Туннельная опалубка», позволяющая быстро возводить здания (Строительство..., 2023). Застройщики используют эту систему для возведения стандартных жилищных зданий по специальной государственной программе.

Инженерный анализ последствий землетрясений

Выводы государственной комиссии Турции о причинах массового обрушения зданий еще не представлены широкой общественности. Поэтому стоит обратиться к выводам экспертной комиссии, которые были сделаны после Измитского землетрясения 17.08.1999 г., часть из которых была опубликована в работе (Айзенберг, 1999). Как показали последствия землетрясений 2023 г. эти выводы остаются актуальными и сейчас:

1. Применение неудачной конструктивной системы для массового строительства жилых домов в зонах с высокой сейсмической опасностью – несущий каркас без диафрагм жесткости, особенно в нижних «гибких» этажах.
2. Наличие прямоугольных колонн с предельно минимальным размером одной стороны колонны.
3. Расчетные сейсмические нагрузки существенно ниже, по сравнению с нормами других стран.
4. Множественные отступления от проекта при строительстве, применение некачественных строительных материалов, некачественное бетонирование конструкций.

Хотя нормы сейсмостойкого строительства для зданий в разных странах имеют свои особенности, комплекс основных правил и требований при строительстве, позволяющих существенно смягчить последствия землетрясений, отработан в мировой практике достаточно полно. Турецкие трагические события в связи с произошедшими землетрясениями показывает, что только строгое соблюдение этих правил способствует существенному уменьшению масштабов

разрушений и сохранению многих тысяч человеческих жизней.

Заключение

По мнению авторов, в настоящее время с учетом поступления новых сведений, свидетельствующих о подготовке очередных землетрясений, разработки в области среднесрочного прогноза помогают приблизиться к получению значимых результатов, позволяющих с удовлетворительной точностью выявлять районы подготовки очагов землетрясений в сегментах запертых разломов, оценивать их энергию и примерное время (Ружич, Левина, 2020). В таком случае появляется возможность более успешно оценивать и сейсмический риск для населенных пунктов и уязвимых промышленных центров. При налаженном сотрудничестве ученых с представителями властных структур возможно достижение приемлемого компромисса для принятия решений, касающихся выбора превентивных мероприятий, направленных на снижение сейсмической опасности и сейсмического риска от ожидаемых землетрясений. В ряде стран подобные подходы уже рассматриваются, например, в работах (Davis et al., 2010; Фролова и др., 2022).

Несмотря на то, что нормы сейсмостойкого строительства жилых и промышленных объектов в разных странах имеют свои особенности, следует всегда и неуклонно применять имеющийся комплекс основных правил и требований при строительстве. Это позволит успешнее смягчать разрушительные последствия сильных землетрясений, в мировой практике он «отработан» достаточно полно.

Произошедшие трагические события в Турции показали, что только неукоснительное соблюдение норм требований градостроительства в городах, расположенных на разломах или вблизи их, будет способствовать эффективному снижению уязвимости объектов инфраструктуры и сокращению числа погибших и пострадавших среди населения.

Благодарности

Работа подготовлена в рамках выполнения государственного задания Института земной коры РАН по теме НИР «Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии», № FWEF-2021-0009. Исследования проводились с использованием оборудования и инфраструктуры Центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (грант № 075-15-2021-682).

Литература

Айзенберг Я.М. Землетрясение в Турции 17 августа 1999 г. Основные факты и предварительный анализ // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 1999. № 6. С. 32–33.

Акбиев Р.Т., Абаканов М.С. Оперативная оценка последствий разрушительного землетрясения в Турции. Режим доступа: <http://akbiev.ru/wp-content/uploads/2023/03/> (дата обращения: 30.03.2023) (на русском языке).

Ицков И.Е. Последствия разрушительного землетрясения в Турции 17 августа 1999 г. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2001. № 1. С. 49–53.

Кодекс Турции (Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında esaslar), 2020.

Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М.: ГЕОС. 2016. 424 с.

Кочарян Г.Г. Возникновение и развитие процессов скольжения в зонах континентальных разломов под действием природных и техногенных факторов. Обзор современного состояния вопроса // Физика Земли. 2021. № 4. С. 3–41.

Левина Е.А. Геоинформационная система для прогноза землетрясений и горных ударов: разработка и примеры применения в Байкальской рифтовой зоне и Норильском месторождении: Дис. канд. геол.-минерал. наук. Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2011. 114 с.

Национальная стратегия Турции по землетрясениям (National earthquake strategy and action plan 2012-2023, Ankara-Türkiye). Режим доступа: <https://sputnik-ossetia.ru/20230215/21515231.html#> (дата обращения: 12.03.2023) (на русском языке).

Новости и публикации по землетрясению в Турции. Режим доступа:

<https://mskl.ru/text/world/2023/03/05/72054560/> (дата обращения: 12.03.2023) (на русском языке).

Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. М.: Наука, 1977. 506 с.

Опасность землетрясений. Стандарты качества в Турции. Режим доступа: <https://turk.estate/en/question-answer/new-housing-standards-in-turkey-in-2020/> (дата обращения: 12.03.2023) (на русском языке).

Проблемы соблюдения строительных норм в Турции до землетрясения. Режим доступа: <https://www.turan.az/ext/news/2023/2/free/Worldwide/ru/1449.htm> (дата обращения: 12.03.2023) (на русском языке).

Ружич В.В. Сейсмоструктурная деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск. Изд-во СО РАН. 1997. 144 с.

Ружич В.В., Кочарян Г.Г. О строении и формировании очагов землетрясений в разломах на приповерхностном и глубинном уровне земной коры. Статья I. Приповерхностный уровень // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 1021–1034. DOI:10.5800/GT-2017-8-4-0330.

Ружич В.В., Левина Е.А. Особенности распределения сейсмической активности в разных регионах Земли по фазам 11-летнего солнечного цикла // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 1. С. 30–35. DOI: 10.12737/szf-54201901.

Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Шилько Е.В., Левина Е.А., Пономарева Е.И. Физическое моделирование условий возникновения источников сейсмических колебаний при разрушении неровностей в зонах разломов // Физическая мезомеханика. 2014. Т. 17. № 3. С. 43–52.

Солоненко В.П. Гоби-Алтайское землетрясение // Геология и геофизика. 1960. № 2. С. 3–27.

Строительство в Турции. Этапы, технология, нормы и контроль качества. Режим доступа: <https://www.ataberkestate.com/articles/kak-stroyatv-turcii-etapy-tehnologiya-normy-i-kontrolstroitelstva> (дата обращения: 12.03.2023) (на русском языке).

Фролова Н.И., Малаева Н.С., Ружич В.В., Бержинская Л.П., Левина Е.А., Суцев С.П., Ларионов В.И., Угаров А.Н. Оценка социальных и экономических показателей сейсмического риска на примере г. Ангарск // Геофизические про-

цессы и биосфера. 2022. Т. 21, № 2. С. 86–113. <https://doi.org/10.21455/GPB2022.2-58>.

Afet bölgelerinde yapılacak yapılar ıkkında yönetmelik/ 2 Temmuz 1998 tarih, 23.390 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanan değişiklikler işlenmiştir/ İnşaat Mühendisleri Odası izmir Şubesi Yayın No 25. 1998. 92 s.

Davis C., P.E.; Keilis-Borok V.; Molchan G.; Shebalin P.; Lahr P., P.E., M. ASCE; and Plumb C. Earthquake Prediction and Disaster Preparedness Interactive Analysis: in Natural Hazards Review. November 2010. P. 173–183. DOI: 10.1061/_ASCE_NH.1527-6996.0000020.

Kaftan V., Melnikov A.: Revealing the deformation anomalies based on GNSS data in relation to the preparation and stress release of large earthquakes. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 54(1), 22–32 (2018). DOI: 10.1134/S1069351318010093

Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Ruzhich V.V. et al., (2019). Seismic-acoustics of a block sliding along a fault // *Pure and Applied Geophysics*. P. 163–168. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02375-1>.

References

Aizenberg Ya.M. Earthquake in Turkey on August 17, 1999 Key facts and preliminary analysis // *Earthquake construction. Building safety*. 1999. No. 6. pp. 32–33. (in Russian)

Akbiev R.T., Abakanov M.S. Operational assessment of the consequences of the devastating earthquake in Turkey. Access mode: <http://akbiev.ru/wp-content/uploads/2023/03/> (date of access: 03/30/2023) (in Russian)

Itskov I.E. Consequences of the devastating earthquake in Turkey on August 17, 1999 // *Earthquake-resistant construction. Building safety*. 2001. No. 1. pp. 49–53. (in Russian)

Turkish Code (Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında esaslar), 2020. (in Russian)

Kocharyan G.G. Geomechanics of faults. M.: GEOS. 2016. 424 p. (in Russian)

Kocharyan G.G. The emergence and development of sliding processes in the zones of continental faults under the influence of natural and technogenic factors. Review of the current state of the issue // *Physics of the Earth*. 2021. No. 4. P. 3–41. (in Russian)

Levina E.A. Geoinformation system for forecasting earthquakes and rock bursts: development and examples of application in the Baikal rift zone and the Norilsk field: Dis. cand. geol.-mineral. Sciences.

Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS. 2011. 114 p. (in Russian)

National Earthquake Strategy of Turkey (National earthquake strategy and action plan 2012–2023, Ankara-Türkiye). Access mode: <https://sputnik-ossetia.ru/20230215/21515231.html#> (date of access: 03.12.2023) (in Russian)

News and publications on the earthquake in Turkey. Access mode: <https://mskl.ru/text/world/2023/03/05/72054560/> (date of access: 03.12.2023) (in Russian)

New catalog of strong earthquakes on the territory of the USSR from ancient times to 1975 / Ed. N.V. Kondorskaya, N.V. Shebalin. M. : Nauka, 1977. 506 p. (in Russian)

Danger of earthquakes. quality standards in Turkey. Access mode: <https://turk.estate/en/question-answer/new-housing-standards-in-turkey-in-2020/> (accessed 12.03.2023) (in Russian)

Problems of compliance with building codes in Turkey before the earthquake. Access mode: <https://www.turan.az/ext/news/2023/2/free/Worldwide/ru/1449.htm> (date of access: 03.12.2023) (in Russian)

Ruzhich V.V. Seismotectonic destruction in the earth's crust of the Baikal rift zone. Novosibirsk. Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. 1997. 144 p. (in Russian)

Ruzhich V.V., Kocharyan G.G. On the structure and formation of earthquake sources in faults at the near-surface and deep levels of the earth's crust. Article I. Surface level // *Geodynamics and tectonophysics*. 2017. V. 8. No. 4. P. 1021–1034. DOI:10.5800/GT-2017-8-4-0330. (in Russian)

Ruzhich V.V., Levina E.A. Features of the distribution of seismic activity in different regions of the Earth by phases of the 11-year solar cycle // *Solnechno-zemnaya physics*. 2020. V. 6, No. 1. P. 30–35. DOI: 10.12737/szf-54201901. (in Russian)

Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Chernykh E.N., Shilko E.V., Levina E.A., Ponomareva E.I. Physical modeling of the conditions for the occurrence of sources of seismic vibrations during the destruction of irregularities in fault zones // *Physical mesomechanics*. 2014. V. 17. No. 3. P. 43–52. (in Russian)

Solonenko V.P. Gobi-Altai earthquake // *Geology and geophysics*. 1960. No. 2. P. 3–27. (in Russian)

Construction in Turkey. Stages, technology, norms and quality control. Access mode:

<https://www.ataberkestate.com/articles/kak-stroyat-v-turcii-etapy-tehnologiya-normy-i-kontrol-stroitelstva> (date of access: 03.12.2023) (in Russian)

Frolova N.I., Malaeva N.S., Ruzhich V.V., Berzhinskaya L.P., Levina E.A., Sushchev S.P., Larionov V.I., Ugarov A.N. Assessment of social and economic indicators of seismic risk on the example of the city of Angarsk // Geophysical processes and biosphere. 2022. V. 21, No. 2. P. 86–113. <https://doi.org/10.21455/GPB2022.2-58>. (in Russian)

Afet bölgelerinde yapılacak yapılar hakkında yönetmelik/ 2 Temmuz 1998 tarih, 23.390 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanan değişiklikler işlenmiştir/ İnşaat Mühendisleri Odası izmir Şubesi Yayın No. 25. 1998. 92 p.

Ружич Валерий Васильевич,
доктор геолого-минералогических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
главный научный сотрудник,
email: ruzhich@crust.irk.ru.

Ruzhich Valariy Vasilievich,
doctor of geological and mineralogical sciences,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Major Researcher,
email: ruzhich@crust.irk.ru.

Бержинская Лидия Петровна,
кандидат технических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
ведущий инженер Отдела сейсмостойкого строительства,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Иркутский научно-исследовательский технический университет,
доцент кафедры Архитектуры и градостроительства,
email: berj.lp@yandex.ru.

Berzhinskaia Lidiya Petrovna,
PhD in techniques, Leading,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Engineer of department earthquake engineering,

Davis C., P.E.; Keilis-Borok V.; Molchan G.; Shebalin P.; Lahr P., P.E., M.ASCE; and Plumb C. Earthquake Prediction and Disaster Preparedness Interactive Analysis: in Natural Hazards Review. November 2010. P. 173-183. DOI: 10.1061/_ASCE_NH.1527-6996.0000020.

Kaftan, V., Melnikov, A.: Revealing the deformation anomalies based on GNSS data in relation to the preparation and stress release of large earthquakes. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 54(1), 22–32 (2018). DOI: 10.1134/S1069351318010093

Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Ruzhich V.V., et al., (2019). Seismic-acoustics of a block sliding along a fault// Pure and Applied Geophysics. P. 163–168. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02375-1>.

664074 Irkutsk Lermontov street, 83,
Irkutsk National Research Technical University,
Assistant Professor of the Department of Architecture and Urban Planning,
email: berj.lp@yandex.ru.

Левина Елена Алексеевна,
кандидат геолого-минералогических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
научный сотрудник,
email: levina@crust.irk.ru.

Levina Elena Alekseevna,
Candidate of geological and mineralogical sciences,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Researcher,
email: levina@crust.irk.ru.

Пономарева Елена Иннокентьевна,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
ведущий инженер,
email: squirrel@crust.irk.ru.

Ponomareva Elena Innokentevna,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Lead Engineer,
email: squirrel@crust.irk.ru.

Оперативная оценка последствий разрушительного землетрясения в Турции (по официальным опубликованным данным СМИ и глобальной сети)

Р.Т. Акбиев^{1,2}, М.С. Абаканов¹

¹Евразийская СЕЙСМО Ассоциация, г. Москва, Россия

²Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России»), г. Москва, Россия

Аннотация. В данной статье, на основе анализа сейсмотектонической и сейсмологической ситуации, проводится оценка последствий землетрясения в Турции. Рассмотрены геотектонические процессы в регионе, крупнейшие землетрясения в новейшей истории Турции. Выполнен сравнительный анализ норм по сейсмостойкому строительству Турции, России и стран СНГ.

Ключевые слова: землетрясение, сейсмическая активность, градостроительное регулирование, сейсмостойкое строительство, разрушения, безопасность, сейсмические воздействия, защита зданий и сооружений.

Operational assessment of the consequences of the devastating earthquake in Turkey

(according to the official published data of the media and the global network)

R.T. Akbiev^{1,2}, M.S. Abakanov¹

¹Eurasian SEISMO Association, Moscow Russia – Almaty, Kazakhstan

²Central Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and, Russia "TsNIIP of the Ministry of Construction of Russia", Moscow, Russia

Abstract. In this article, based on the analysis of the seismotectonic and seismological situation, an assessment of the consequences of the earthquake in Turkey is carried out. Geotectonic processes in the region, the largest earthquakes in the recent history of Turkey are considered. A comparative analysis of the standards for earthquake-resistant construction in Turkey, Russia and the CIS countries was carried out.

Keywords: earthquake, seismic activity, urban planning regulation, earthquake-resistant construction, destruction, safety, seismic impacts, protection of buildings and structures.

Описание проблемы

Настоящая статья подготовлена по результатам оперативной экспертной оценки причин и последствий катастрофического землетрясения, которое произошло 6 февраля 2023 года на юге Турции, в результате чего погибли 49 000 и пострадали 87 000 человек, с целью извлечения уроков (Письмо

ЕАСА в Минстрой России № 24/23 от 17.02.2023 г).

Сейсмическое событие, которое коснулось двух стран региона – Турции и Сирии, стало катастрофой международного масштаба, признано самым мощным после землетрясения 1939 года в Эрзинджане, объявлено сильнейшим из когда-либо зарегистрированных в Ближневосточном регионе (Свободная энциклопедия... 2023; Национальный телеканал... 2023; Международная те-

лекомпания... 2023; Новостное агентство... 2023; ISC (2022)... 2023). По смертоносности среди произошедших землетрясений на территории Анатолии оно уступает лишь землетрясению в Киликии (1268), а с учётом последствий на региональном уровне — землетрясению в Алеппо (1822).

Последствия масштабной катастрофы очевидны при просмотре фотографий с

мест событий, сравнении разрушений городской застройки, оценки её состояния до и после землетрясения, эпизоды которых приведены на рис. 1, 2, в многочисленных публикациях глобальной сети (Свободная энциклопедия... 2023; Национальный телеканал... 2023; Международная телекомпания... 2023; Новостное агентство... 2023; и др.).



Рис. 1. Турция, г. Адияман (до и после землетрясения).

Fig. 1. Turkey, Adiyaman (before and after the earthquake).



Рис. 2. Турция, г. Нурдагы (до и после землетрясения).

Fig. 2. Turkey, Nurdagi (before and after the earthquake).

По разным оценкам экономике Турции нанесён ущерб в сумме до 84 миллиардов долларов, а общие потери этой страны достигли 2 % от ВВП (Свободная энциклопедия... 2023; Национальный телеканал...

2023; Международная телекомпания... 2023; Новостное агентство... 2023).

Сейсмотектоническая и сейсмологическая ситуация в Турции

На рис. 3, 4 отражены механизмы формирования сейсмической активности в регионе, которые формирует тектонические движения 4 из 8 основных плит (платформ) – Аравийская, Африканская, Евразийская и Индо-станская; при этом территория Турции рас-

положена в основном в пределах разместившейся между основными платформами Анатолийской плиты. Такая ситуация определяет данный регион как зону постоянного возникновения землетрясений, крупнейшие из происшедших в котором приведены на карте (рис. 5).



Рис. 3. Геотектонические процессы в регионе.

Fig. 3. Geotectonic processes in the region.



Рис. 4. Карта тектонических разломов.

Fig. 4. Map of tectonic faults.

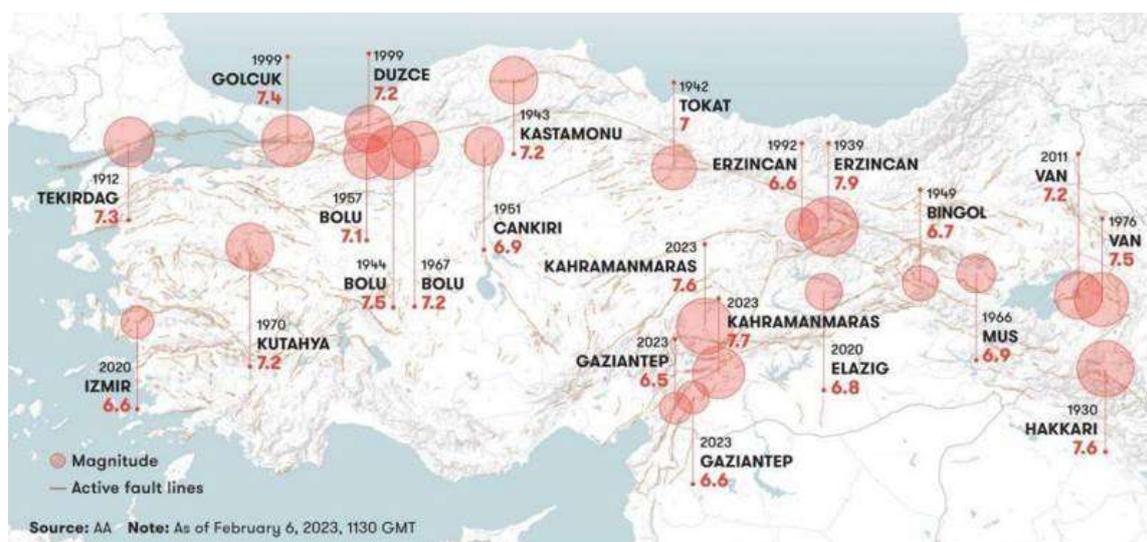


Рис. 5. Крупнейшие землетрясения в новейшей истории Турции.

Fig. 5. The largest earthquakes in the modern history of Turkey.

Сравнение данных по рис. 4, 5 показывает, что ранее происхождение землетрясений на территории Турции было связано, в первую очередь с активностью главного и наиболее активного Северо-Анатолийского разлома, на продолжении которого видны три почти параллельных ответвления на крайнем западе, начинающихся в районе города Эрзинджана. Вблизи этого города и далее разлом пересекается с Восточно-Анатолийским разломом, активность которого последнее столетие не проявлялась. Очевидно, что область пересечения именно этих двух разломов должна была привлекать внимание учёных как потенциально наиболее опасная в сейсмическом отношении.

С давних времён на территории Турции и Сирии были неоднократно отмечены землетрясения с магнитудой не менее 7.0: в 1912 году произошло землетрясение в районе Дарданелл; в 1939 году произошло самое крупное в регионе за всё историческое время землетрясение с магнитудой до 8.0, эпицентр которого находился вблизи города Эрзинджана. Далее, серия катастрофических землетрясений в 1939–1944 годах вызвала в сумме правый сдвиг на 3.0–4.4 м и подъём южного крыла до 1 м. В 1966 году сильное землетрясение близ села Варто также вызвало правый сдвиг в плитах. В 1999 году произошло Измитское землетрясение магниту-

дой 7.4–7.6 в западной оконечности разлома с эпицентром вблизи города Голчук, которое обрушилось на одну из самых густонаселённых и промышленно развитых городских территорий Турции, похоронив под обломками разрушенных строений 17 000 человек (Свободная энциклопедия... 2023; Национальный телеканал... 2023; Международная телекомпания... 2023; Новостное агентство... 2023).

Механизмы возникновения и прогнозов землетрясений в связи с активизацией Северо-Анатолийского разлома подробно описаны в работе (ISC (2022)... 2023). После землетрясения 6 февраля 2023 года выяснилось, что изучению Восточно-Анатолийского разлома учёные начали уделять повышенное внимание лишь недавно.

Характеристики землетрясения в Турции

Землетрясение 6 февраля 2023 года является результатом многолетнего давления Аравийской плиты на Анатолийскую, в результате чего напряжение в зоне их сопряжений постоянно возрастало и, поскольку мощных выбросов в этом регионе ранее не было, произошёл огромный выплеск накопленной энергии.



Рис. 6. Зона проявления толчков 06.02.2023 г.

Fig. 6. The zone of manifestation of tremors 06.02.2023.



Рис. 7. Очаги произошедших землетрясений и их последствия.

Fig. 7. Centers of earthquakes and their consequences.

Сведения о местах основных очагов, сильных афтершоков, их проявлениях произошедшего землетрясения показаны на рис.

б–8, а характеристики сейсмических событий 06.02.2023 г. приведены в таблице.

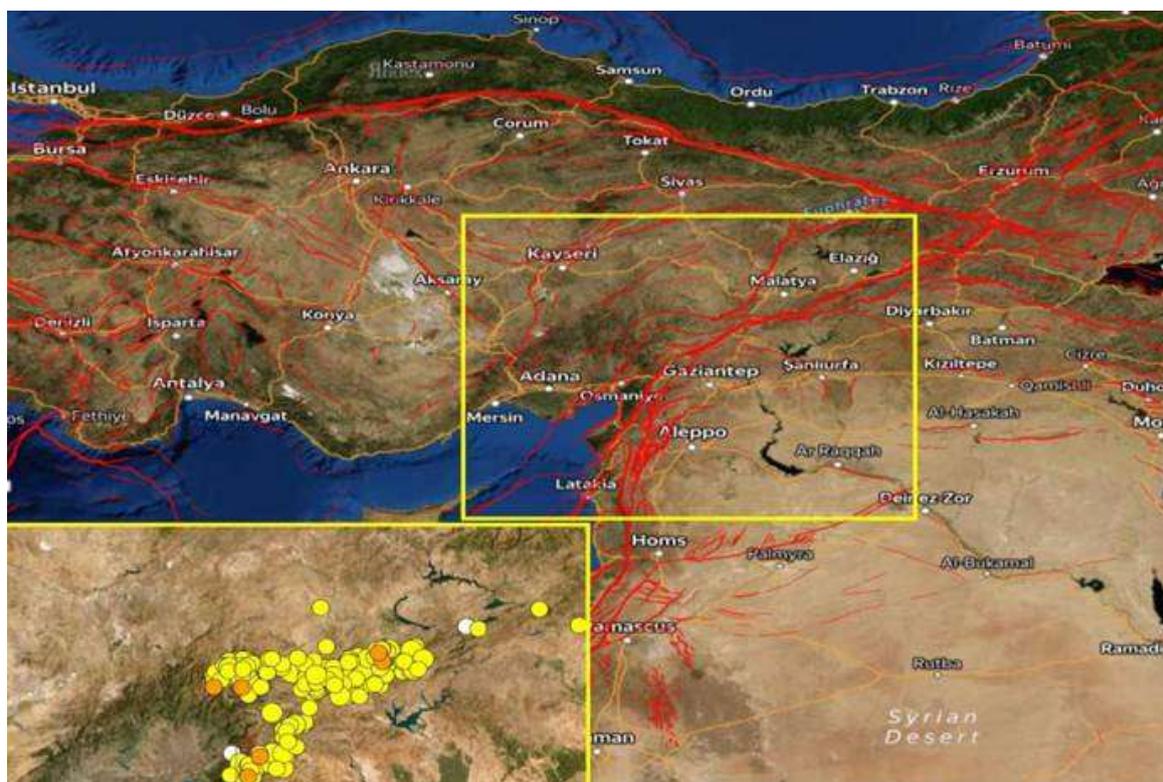


Рис. 8. Фиксация серии толчков 06.02.2023 г.

Fig. 8. Fixation of a series of tremors 06.02.2023.

Т а б л и ц а

Основные толчки и сильнейшие афтершоки

Дата	Время UTC	Магнитуда	Глубина	Координаты эпицентра	Место
6.02.2023	01:17:35	7.8	17.9 км	37.174° с. ш. 37.032° в. д.	33 км западнее г. Газиантепа
6.02.2023	01:28:15	6.7	14.5 км	37.127° с. ш. 36.943° в. д.	—
6.02.2023	10:24:49	7.5	10.0 км	38.024° с. ш. 37.203° в. д.	4 км восточнее г. Экинезю
6.02.2023	10:26:48	6.0	20.1 км	38.030° с. ш. 37.964° в. д.	—
6.02.2023	12:02:11	6.0	10.0 км	38.061° с. ш. 36.537° в. д.	—
6.02.2023	17:04:29	6.3	16.0 км	36.109° с. ш. 36.017° в. д.	в 9 км от г. Антакьи

Первое землетрясение произошло ранним утром в 04:17 по-местному времени в районе Шахиткамиль в Газиантепе на глубине 17.9 километров, его магнитуда по разным данным составила 7.7–7.8; сильные толчки ощущались в 10 турецких провинциях. В течение шести часов после первого землетря-

сения в Газиантепе произошло 24 повторных толчка, магнитуда сильнейшего из которых составила 6.7.

В тот же день произошло ещё одно мощное землетрясение магнитудой 7.5–7.6 с эпицентром в районе Эльбистан провинции Кахраманмараш. Через десять дней после

землетрясения всего было зафиксировано 4734 подземных толчка; существует мнение, что повторные толчки будут продолжаться как минимум ещё год (Свободная энциклопедия... 2023; Национальный телеканал... 2023; Международная телекомпания... 2023; Новостное агентство... 2023).

В момент высвобождения энергии при землетрясении плиты вдоль Восточно-

Анатолийского разлома протяжённостью 150 км разошлись, сместившись в течение нескольких секунд на расстояние до 3 и более метров; при этом смещение плит друг относительно друга произошло в горизонтальной и в вертикальной плоскости; на месте разлома образовалось ущелье глубиной до 30 метров и шириной до 200 метров (рис. 9).



Рис. 9. Фотофиксация разлома после землетрясения 06.02.2023 г.

Fig. 9. Photofixation of the fault after the earthquake on 06.02.2023.

В результате землетрясения Турция фактически сдвинулась относительно Сирии на юго-запад, а часть территории этой страны одновременно опустилась на 5-6 м, в результате чего выросла вероятность её затопления. Особенно настораживает факт, что

движение тектонических плит вдоль линии разлома фиксировалось после землетрясения.

На рис. 10 приведены характерные записи землетрясения, полученные в разных точках.

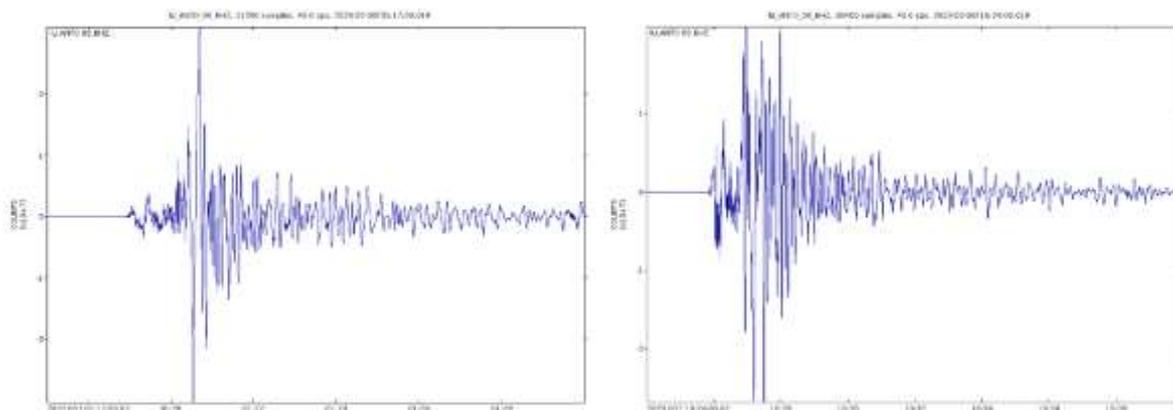


Рис. 10. Сейсмограммы: Газиантеп (справа) и Кахраманмараш (слева).

Fig. 10. Seismograms: Gaziantep (right) and Kahramanmarash (left).

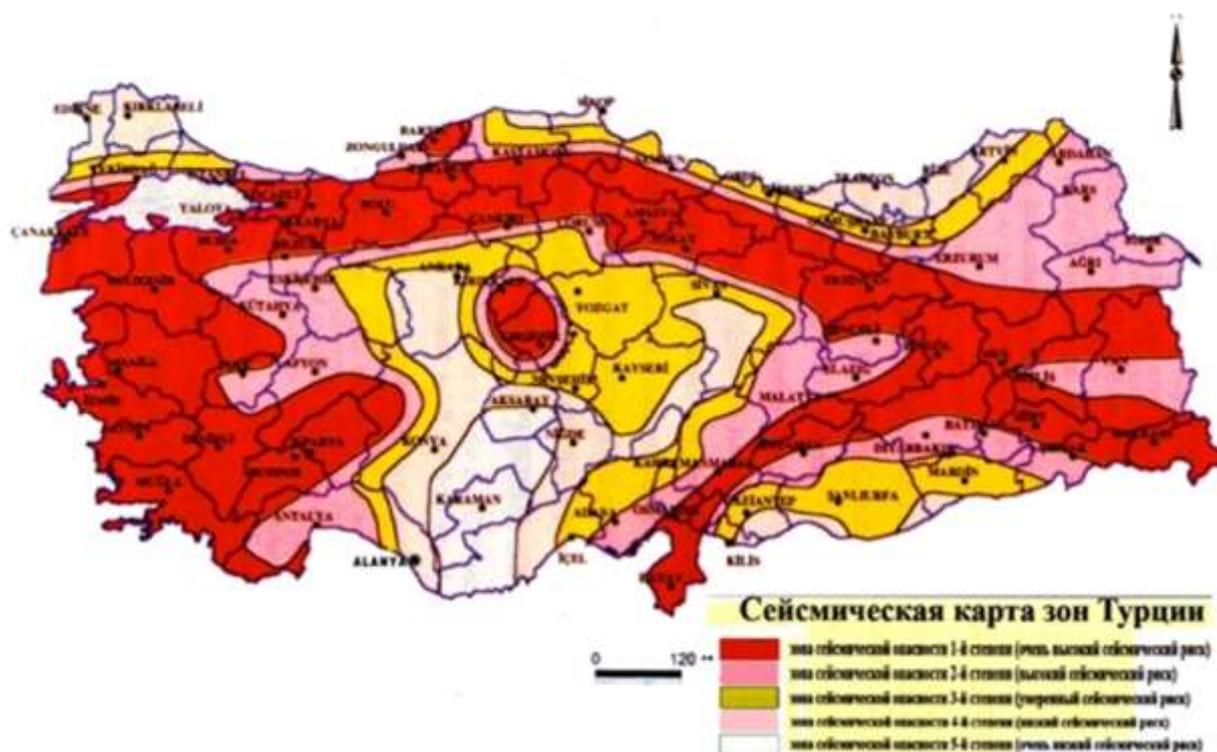


Рис. 11. Карта сейсмического зонирования Турции (Кодекс Турции, 2020).

Fig. 11. Seismic Zoning Map of Turkey (Turkish Code, 2020).

Сравнивая сложившуюся после землетрясения 6.02.2023 г. ситуацию с прогнозами вероятного проявления землетрясений определённой интенсивности по картам сейсмического зонирования территории Турции (рис. 11) можно сделать вывод о том, что опасность и риск территорий, где проявились максимальные разрушения оказалась несколько ниже ожидаемой.

Проявление последствий турецкого землетрясения в виде образовавшихся значительных разломов, выходящих на поверхность земли (рис. 9) и массовых разрушений зданий, повлёкших за собой многочисленные жертвы, материальный ущерб (рис. 1, 2) предполагает классифицировать произошедшее событие как катастрофическое.

Согласно описательной части шкалы MSK-64, с учётом рекомендаций (Шкала сейсмической... 1964; Методические рекомендации... 1981) некоторыми учёными в эпицентре интенсивность прошедшего землетрясения была оценена на уровне 10 и более баллов.

По нашему мнению, произошедшее землетрясение близкое по масштабу и характеру разрушений напоминают Спитакское землетрясение (1988), сила которого в эпицентре составляла 10 баллов, а в расположенных на расстоянии от 20 до 40 км от него – от 8 до 9 баллов.

Градостроительная регуляция в Турции

В Турции впервые обязательные нормативные требования по устройству сейсмостойких зданий (строительный Кодекс) были введены с 1940 года, положения которого до Измитского землетрясения (1999) ориентировались на итальянские правила с графическими приложениями. Экспертами указанные нормы оценивались, как весьма «либеральные», в сравнении с СНиП II-7-81*, действовавшими на тот момент в нашей стране. За весь период этот документ пересматривался более 10 раз, причём в последний раз в 2020 году (Кодекс Турции, 2020).

Известно, что после 50-х годов прошлого столетия в Турции начался период так называемой «неконтролируемой урбанизации», которая привела в городах и населённых пунктах к росту плотности застройки, этажности строений, перепланировкам без разрешений, в том числе во вновь возводимых зданиях.

С середины 90-х годов во всем мире начали меняться подходы к обеспечению

сейсмической безопасности территорий и застройки городов, в том числе в связи с началом реализации Международного проекта ООН-ХАБИТАТ по снижению сейсмической угрозы (Айзенберг и др., 2005).

В этой связи в Турции была принята Национальная стратегия с планом действий для смягчения последствий землетрясений (2012–2023) (Национальная стратегия... 2023).

Нормы по сейсмостойкому строительству Турции

Для выявления причин возникновения массовых разрушений, зафиксированных после землетрясения 06.02.2023 г. представим некоторый анализ турецких норм (Кодекса) по сейсмостойкому строительству.

Согласно действующей редакции строительного Кодекса территория Турции в зависимости от уровня сейсмической опасности и риска делится на 5 зон, при этом регион, в котором произошло землетрясение расположен в зонах от 1 до 3 уровня опасности с рисками от умеренного до очень высокого [Кодекс Турции, 2020].

За основу для расчётов в Кодексе, также как в нормах России и стран СНГ, основанных на базовых положениях СНиП II-7-81*, принят линейно-спектральный метод. При этом, характер огибающей расчётного (упругого) спектра реакций \Leftrightarrow коэффициент динамического усиления (рис. 12, слева) не отличается принципиально от установленного в российских нормах (СП 14.13.330 (Свод правил... 2018) и казахстанских нормах (СП РК 2.03-30-2017 (Свод правил... 2017)).

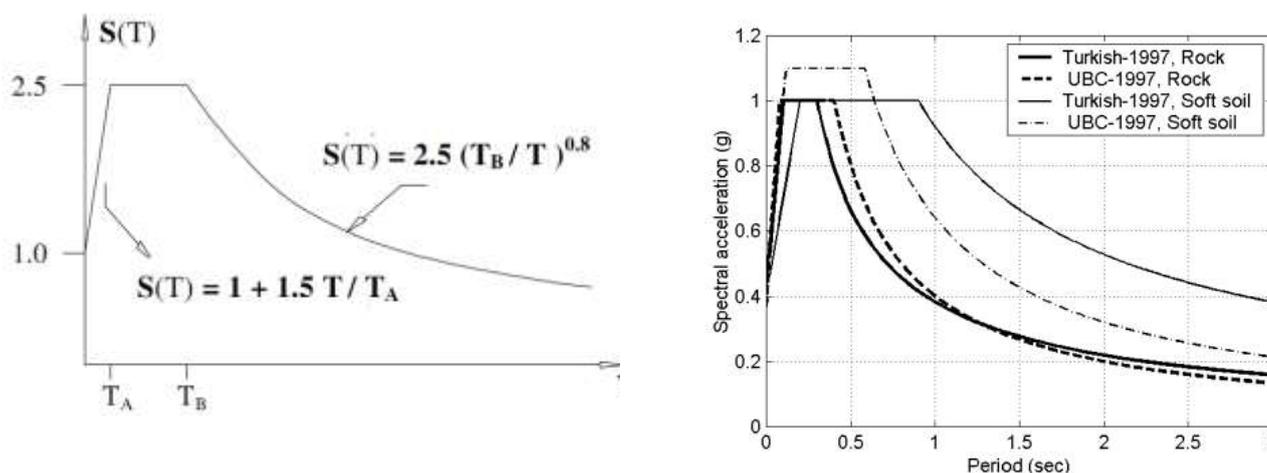


Рис. 12. Линейно-спектральный метод расчета сооружений (Турция).

Fig. 12. Linear-spectral method of calculation of constructions (Turkey).

В редакциях Кодекса после 2000 г. обновление коснулось правил учёта различий грунтов оснований зданий и сооружений, зависимости по которым продемонстрированы на рис. 12 (справа). Были ужесточены требования к составу инженерно-геологических изысканий, результатом которых является установление и устранение потенциальной возможности деградации грунтов и просадок фундаментов в момент возникновения и после землетрясений; установлены повышенные требования по глубине заложения фундаментов и используемым для их устройства материалам.

Ниже приведены положения Кодекса, которые специалисты именуют «несовершенством» или «недостатком», так как на практике при определённых условиях они приводят к негативным последствиям.

В Кодексе, также как в странах СНГ предусмотрена возможность учёта нелинейной работы конструкций, которая обеспечивается введением понижающих коэффициентов к расчётной нагрузке, полученной по результатам расчёта линейной модели. При этом предполагается возможность снижения нагрузок за счёт развития пластических деформаций для отдельных конструкций в 3-4 раза (как принято в СП 14.13330 (Свод правил... 2018) и СП РК 2.03-30 (Свод правил... 2017)). Для конструкций из железобетона и металла допускается возможность гораздо

больших повреждений за счёт нелинейных деформаций (расчётная нагрузка может быть снижена от 5 до 8 раз).

Другой отличительной особенностью Кодекса от наших норм является необязательность соблюдения застройщиками основополагающих правил, обязательных для применения в нормах России и стран СНГ:

- принимать регулярные конструктивные системы в плане и по высоте;
- обеспечивать пространственный характер работы сооружения, равномерное распределение нагрузок на перекрытия, масс и жёсткостей конструкций в плане и по высоте;
- обеспечивать устойчивость сооружений с учётом работы элементов и узлов соединений конструкций в области пластических деформаций (Свод правил... 2018; Свод правил... 2018).

Вышеперечисленное, включая желание застройщиков обеспечить в нижних этажах свободные планировки, освобождая помещения и площади под офисы и магазины, в итоге привело к повсеместному распространению в Турции зданий каркасной системы без диафрагм жёсткости, в том числе с «гибкими этажами», подобных представленному на рис. 13, а также другими аналогичными конструктивными схемами, весьма «уязвимыми» с точки зрения восприятия сейсмических нагрузок.



Рис. 13. Характерные для Турции недостатки объемно-планировочных и конструктивных решений при строительстве зданий.

Fig. 13. Characteristic for Turkey are the shortcomings of space-planning and constructive solutions in the construction of buildings.

Показанные на рисунке, иные аналогичные конструктивные системы, которые были использованы строителями в Турции весьма чувствительны:

— к проявлениям неравномерных осадок грунтовых оснований под фундаментами, например, в результате их замачивания водами техногенного происхождения;

— к крутильным формам колебаний, которые неизбежны при пространственных сейсмических воздействиях, возникновении «Р-Δ» эффектов второго рода, особенно при вертикальном «ударе» во время подземных толчков.

Как показывает мировой опыт, изложенное выше, а также сопутствующие этому факторы приводят к повреждениям или разрушениям несущих конструкций нижних этажей, или в случаях сохранения остаточной устойчивости в последующем подвергаются прогрессирующему разрушению.

Выводы по результатам анализа землетрясения в Турции

1. Несмотря на прогнозную вероятность возникновения катастрофического события в зоне Восточно-Анатолийского разлома, учёными в этом регионе не ожидалось землетрясение такой силы, прежде всего, двух сильных толчков с коротким промежутком, а также большого количества афтершоков (Свободная энциклопедия... 2023; Национальный телеканал... 2023; Международная телекомпания... 2023; Новостное агентство... 2023).

Из рис. 11 видно, что землетрясения высокой интенсивности, ранее произошедшие в регионе, отличаются от прогнозируемых действующими картами сейсмического зонирования территории Турции.

По совокупности оценок интенсивность землетрясения 06.02.2023 г. в эпицентральной области и близлежащих городах, где произошли массовые разрушения, оценивается силой от 8 до 10 баллов по шкале MSK-

64 (Кодекс Турции, 2020; Шкала сейсмической... 1964).

2. В Национальной стратегии Турции (2012–2023) одной из потенциальных угроз безопасности сооружений и городов была предопределена «неконтролируемой урбанизацией», результатом которой стала густонаселённость центров и даже развивающихся спальных районов, кроме того, в ряде случаев здания, как новые, так и старой постройки оказались с дефицитом сейсмостойкости (Национальная стратегия... 2023).

3. Дефицит сейсмостойкости существующей застройки связан в первую очередь с недооценкой сейсмической опасности и риска территорий, несовершенством норм (см. выше), низким качеством применяемых строительных материалов, возрастающим износом несущих конструкций зданий. В большинстве зданий за весь период жизненного цикла, как правило, не проводились плановые ремонтно-восстановительные работы или усиление, реконструкция с учётом современных норм, которые, кроме того, постоянно обновлялись.

4. Сведения о последствиях турецкого землетрясения, поступающие от СМИ, опубликованные в глобальной сети (Свободная энциклопедия... 2023; Национальный телеканал... 2023; Международная телекомпания... 2023; Новостное агентство... 2023), а также основанный на таких данных анализ дают общее представление о произошедшем землетрясении в Турции, но не позволяют в полной мере судить о фактическом дефиците сейсмостойкости объектов, которые были повреждены или разрушены. К тому же, неизвестно на какие сейсмические нагрузки рассчитывались конструкции зданий, с какими характеристиками использовались материалы и какие применялись антисейсмические мероприятия, изменились или не изменились значения параметров конструкций перед землетрясением по сравнению с проектными значениями и т. д.

Тем не менее, масштаб и характер разрушений, а также причины их происхождения в целом являются «типичными» для аналогичных событий, обусловлены: недооценкой специфики сейсмической активности и опасности региона; недостатками, несовер-

шенством и нарушением норм по сейсмостойкому строительству; необоснованной экономией материалов, низким качеством строительства; отсутствием необходимой ответственности участников градостроительной деятельности; отсутствием контроля за состоянием зданий при эксплуатации и пр., которые при турецком землетрясении проявились в наиболее неблагоприятной форме.

5. Выше нами отмечены очевидные недостатки строительных норм Турции в части установления требований к расчётам и проектированию сейсмостойких конструкций зданий, касающиеся подходов по учёту нелинейной работы, применяемым схемам и принципам конструирования. Характерным для существующей застройки в Турции, где произошли массовые повреждения и разрушения, является не соблюдение строителями требований по регулярности строений в плане и по высоте, которые в реальной жизни усугубилось необоснованными перестройками / перепланировками (данные из оперативных заключений экспертов).

6. Значительное число разрушенных зданий в Турции было построено по безригельной конструктивной схеме, в том числе с «гибкими нижними этажами», с перекрытиями минимальной толщины и недостаточным армированием, которые в связи с отсутствием необходимого числа вертикальных диафрагм (стен и связей) не могли обеспечить пространственный характер работы сооружений и их требуемую сейсмостойкость. Видеоролики в интернете свидетельствуют о наличии в основании некоторых таких зданий неблагоприятных для них «мягких» грунтов; по всей видимости они также попали в зону близкую к резонансной.

Комментарий: Мировая практика по анализу последствий сильных и разрушительных землетрясений показывает, что в общем, на «мягких» грунтах следует возводить здания с жёсткой конструктивной системой, а на жёстких грунтах – гибкой. В случае, если известны преобладающие периоды на определённых сейсмических зонах, как это принято в нормах Армении (Нормы США... 2023) в зависимости от категорий грунтов, то следует проектировать здания с периода-

ми, отличающимися от преобладающих периодов грунтов площадки строительства в 1.5–2 раза в большую или меньшую сторону, т. е. отдалить период собственных колебаний проектируемого сооружения от резонансной зоны. Такой принцип применяется в России при проектировании зданий с «выключающимися» и «включающимися» связями.

7. Одной из обсуждаемых тем в Турции среди журналистов (Al Jazeera и др.) после катастрофы стало несоблюдение требований строительных норм по безопасности, ненадлежащее качество используемых строительных материалов, низкое качество строительства и эксплуатации зданий, отсутствие надлежащего контроля и надзора в районах, пострадавших от землетрясений (Свободная энциклопедия... 2023; Национальный телеканал... 2023; Международная телекомпания... 2023; Новостное агентство... 2023).

8. В регулирующих и нормативных документах Турции выявлены недостатки, оказавшие негативное влияние на «уязвимость» зданий, в том числе не учитывалась возможность повышения сейсмических воздействий, их характер на площадках строительства, территориях близлежащих городов и населённых пунктов к очаговым зонам.

Важным фактором увеличения масштаба разрушений зданий в городах, близкорасположенных к эпицентру является характер сейсмических воздействий — высокая интенсивность вертикальных, как и горизонтальных составляющих, повторность сейсмических толчков, приведших к деформированию элементов конструктивных систем в области «малоциклового усталости», что не учитывается нормами ни в одной стране, включая Турцию.

Все вышеизложенные факторы привели к наиболее неблагоприятному «сценарию», бедствию при землетрясении 06.02.2023 г. и серии афтершоков, привело к полному разрушению 6217 зданий, в том числе: в Адане (24), Адиямане (600), Газиантепе (581), Диярбакыре (20), Кахраманмараше (310), Килисе (50), Малатье (130), Османии (101), Хатае (278), Шанлыурфе (201).

Уроки землетрясения в Турции

1. Землетрясение в Турции продемонстрировало следующее:

— в большей степени риски при землетрясениях связаны с разрушением существующей, в том числе старой застройки, объем которой оказался значительно больше по сравнению с вновь вводимыми в эксплуатацию объектами нового строительства;

— обеспечение сейсмической безопасности сооружений и городов является комплексной проблемой, которая должна решаться целевыми методами, путём системного выявления территорий и объектов повышенного риска в пределах границ застроенных территорий, с проектированием различных «сценариев бедствий» и ситуационных изменений, с построением на их основе и реализацией плана превентивных градостроительных мероприятий по снижению сейсмической угрозы на уровне микрорайона и/или города и/или агломерации.

2. Анализ показал, что проблема сейсмической безопасности существующих объектов и территорий, в первую очередь должна решаться градостроительными средствами и методами, а не только посредством проектирования и строительства новых сейсмостойких зданий.

В связи с этим, на первый план выходят задачи по организации проведения непрерывного мониторинга качества и безопасности градостроительных объектов, необходимость проведения сплошной паспортизации с оценкой дефицита сейсмостойкости после ввода таких объектов в эксплуатацию, планирования и реализации мероприятий, направленных на сохранение / обеспечение приемлемого уровня безопасности объектов на протяжении всего жизненного цикла (реконструкция, усиление, восстановительные работы).

3. Необходимо уточнять или при отсутствии определять характеристики потенциально возможных очагов сильных землетрясений, активных разломов, их расстояния до городов и населённых пунктов, оценивая усиления их воздействий на площадках строительства, устанавливая преобладающие амплитуды и периоды (спектры), соответствующим образом отражая вновь полу-

ченные данные в нормах как «региональные модели воздействий» или «сценарные землетрясения».

На основе полученных таким образом данных специалистами могут разрабатываться соответствующие рекомендации для возведения на конкретных площадках зданий и сооружений с конструктивными системами, наиболее «устойчивыми» с точки зрения сейсмической безопасности, а это, как правило, позволяет возводить оптимальные по показателям технико-экономической эффективности здания и сооружения.

4. При строительстве и реконструкции зданий и сооружений вблизи разломов (в зависимости от расстояний до очагов) следует учитывать повышение интенсивности горизонтальных, так и вертикальных составляющих сейсмических воздействий.

Например, в нормах США такие факторы в зависимости от категорий разломов и расстояния от 2 до 10 км до строительной площадки при ожидаемых ускорениях грунта 0.4g учитывается коэффициентом, изменяющимся в пределах от 1.5 до 1.0 (Нормы США... 2023).

В нормах Армении в 3-й сейсмической зоне (0.4g) для строительных площадок, расположенных на расстоянии менее 10 км от возможных очаговых зон (активных разломов) значение ожидаемого ускорения грунта (A) умножается на коэффициент 1.2 (Строительные нормы... 2006).

В нормах России (Свод правил... 2018], Казахстана [Свод правил... 2017), других стран СНГ указанные факторы никоим образом не учитываются.

5. Необходимо разработать для применения на практике методы расчёта на малоцикловую усталость элементов конструктивных систем и как следствие, прогрессирующее разрушение при землетрясениях, которые в отечественных нормах сейсмостойкого строительства пока не учитываются.

Для этого рекомендуется проанализировать и обобщить результаты имеющихся исследований по малоцикловой прочности при действии нагрузок типа сейсмических высокого уровня, в том числе приведённые в работе (Абаканов, 2013), где рассматривались

статически неопределимые балки, колонны со смешанным армированием, узлы каркасных зданий и пр.

Предлагается организовать целенаправленные экспериментальные исследования по этой актуальной проблеме, выработав единую методику комплексных статических и динамических испытаний по малоцикловой усталости строительных конструкций на действие нагрузок высокого уровня сейсмического характера, для получения новых дополнительных данных для разработки обоснованных рекомендаций и включения в нормы по сейсмостойкому строительству.

Литература

Абаканов М.С. Прочность железобетонных конструкций при малоцикловых нагружениях типа сейсмических. М.: Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2013, № 5.

Айзенберг Я.М., Сухов Ю.П., Акбиев Р.Т. О реализации и перспективах развития проекта ООН-ХАБИТАТ «Устойчивое развитие городов в условиях сейсмической угрозы. М.: Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2005, № 4.

Кодекс Турции (Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında esaslar), 2020.

Международная телекомпания «Аль Джазира». Новости и публикации по землетрясению в Турции, <https://www.aljazeera.com/>.

Методические рекомендации по инженерному анализу последствий землетрясений / Поляков С.В., Килимник Л.Ш., Жаров А.М. М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко Госстроя СССР, 1981.

Национальная стратегия Турции по землетрясениям (National earthquake strategy and action plan 2012-2023, Ankara-Türkiye).

Национальный телеканал РБК. Новости и публикации по землетрясению в Турции, <https://www.rbc.ru/>.

Никонов А.А. Сейсмическая катастрофа в Турции. М.: Природа, 1999, № 11.

Новостное агентство «SPUTNIK». Землетрясение в Турции: фото до и после, <https://sputnik-ossetia.ru/20230215/21515231.html#>.

Нормы США: ASCE STANDART ASCE/SEI 7-10. American Society of Engineers. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures.

Свободная энциклопедия: Новости и публикации по землетрясению в Турции, <https://ru.wikipedia.org/>.

Свод правил СП 14.13.330.2018 «Актуализированная редакция СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах» (Россия).

Свод правил СП РК 2.03-30-2017 «Строительство в сейсмических районах Республики Казахстан».

Строительные нормы и правила Республики Армения. СНРА II-6.02-2006 «Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования».

Шкала сейсмической интенсивности Медведа-Шпонхойера-Карника (MSK). –М.: Стройиздат, 1964.

ISC (2022), ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1904–2018), Version 9.1, International Seismological Centre (ISC).

References

Abakanov M.S. Strength of reinforced concrete constructions at low-cycle loads of seismic type. М.: Seismic-resistant construction. Safety of structures, 2013, No. 5. (in Russian)

Aizenberg Ya.M., Sukhov Yu.P., Akbiev R.T. On implementation and prospects for the development of the UN-HABITAT project "Sustainable development of cities in face of seismic threat". М.: Earthquake-resistant construction. Safety of Structures, 2005, No. 4. (in Russian)

Codex of Turkey (Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında esaslar), 2020. (in Russian)

International broadcaster "Al Jazeera". News and publications on the earthquake in Turkey, <https://www.aljazeera.com/>. (in Russian)

Methodical recommendations on engineering analysis of earthquake consequences / Polyakov S.V., Kilimnik L.Sh., Zharov A.M. М.: TsNIISK

named after V.A. Kucherenko Gosstroy USSR, 1981. (in Russian)

National earthquake strategy and action plan 2012–2023, Ankara - Turkey. (in Russian)

National TV channel RBC. News and publications on the earthquake in Turkey, <https://www.rbc.ru/>. (in Russian)

Nikonov A.A. Seismic disaster in Turkey. М.: Natura, 1999, No. 11. (in Russian)

Sputnik News Agency: Earthquake in Turkey: before and after photos, <https://sputnik-ossetia.ru/20230215/21515231.html#>. (in Russian)

US Standard: ASCE STANDART ASCE/SEI 7-10. American Society of Engineers. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. (in Russian)

Free Encyclopedia: News and publications on the earthquake in Turkey, <https://ru.wikipedia.org/>. (in Russian)

Set of Rules SP 14.13.330.2018 "Updated edition of SNiP II-7-81* "Construction in seismic areas" (Russia). (in Russian)

Set of Rules of the Joint Venture RK 2.03-30-2017 "Construction in seismic regions of the Republic of Kazakhstan". (in Russian)

Building codes and regulations of the Republic of Armenia. SNRA II-6.02-2006 "Earthquake-resistant construction. Design Standards". (in Russian)

Medvedev-Sponheuer-Karnik seismic intensity scale (MSK). М.: Stroyizdat, 1964. (in Russian)

ISC (2022), ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1904–2018), Version 9.1, International Seismological Centre (ISC).

Акбиев Рустам Тоганович,

кандидат технических наук,

председатель Координационного совета Евразийской СЕЙСМО Ассоциации, руководитель Департамента комплексной градостроительной безопасности ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России», Россия, Москва,

тел. +7 (926) 075-1111,

email: akbi.rust@gmail.com.

Akbiev Rustam Toganovich,

Candidate of Technical Sciences,

*Chairman of the Coordination Council of the Eurasian SEISMO Association, Head of the Department of Integrated Urban Planning Safety of the Federal State Budgetary Institution "TsNIP of the Ministry of Construction of Russia", Russia, Moscow,
tel. +7 (926) 075-1111,
email: akbi.rust@gmail.com.*

Абаканов Миркен Сейткасымович,
*доктор технических наук, профессор,
член-корр. Международной инженерной академии, вице-президент Евразийской СЕЙСМО Ассоциации, научный руководитель межрегионального Научно-исследовательского и экспериментального центра (НИЭКС), Казахстан, Алматы,
тел. +7 (701) 999-7192,
email: m.abakanov@mail.ru.*

Abakanov Mirken Seitkasymovich,
*Doctor of Technical Sciences, Professor,
Member-Corr. International Academy of Engineering, Vice-President of the Eurasian SEISMO Association, Scientific Director of the Interregional Research and Experimental Center (NIEX), Kazakhstan, Almaty,
tel. +7 (701) 999-7192,
email: m.abakanov@mail.ru.*

Этапы подготовки к прерывистому скольжению на предварительно вырезанных разломах в лабораторных моделях и проверка этапов в природе

С.А. Борняков^а, Я. Го^б, И.А. Пантелеев^с, Я-К Жуо^б, А.А. Добрынина^а, В.А. Саньков^{а,д},
Д.В. Салко^а, А.Н. Шагун^а, А.А. Каримова^{а,д}

^аИнститут земной коры СО РАН, г. Иркутск, 664033, Россия

^бИнститут геологии, Сейсмологического бюро Китая, г. Пекин, Китай

^сИнститут механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия

^дИркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Исследование посвящено аналоговому моделированию процесса прерывистого скольжения (“stick-slip”) вдоль существующего крупного разлома в упруго-вязкопластической модели при постоянной скорости деформации. Основываясь на полученных результатах и данных в публикациях (Ma et al., 2012, 2014), мы выделяем стабильную, метастабильную и метанестабильную стадии процесса подготовки динамической подвижки по модельному разлому. Выполненные эксперименты показали, что активизация разлома обеспечивается механизмом сегментации. Приводится анализ характера сегментации в пределах одного акта активизации разлома. Показано, что процесс сегментации реализуется в рамках регрессивного и прогрессивного сценариев. Регрессивная сегментация происходит на стабильных и метастабильных стадиях деформационного процесса. При регрессивной сегментации уменьшается количество активных сегментов и их длина. Прогрессивная сегментация начинается на ранней подстадии метанестабильной стадии процесса скольжения и диагонастируется по увеличению активных сегментов до некоторого критического уровня. На поздней подстадии этой стадии происходит быстрое разрастание и объединение всех сегментов с последующей полной активизацией всего разлома.

Результаты моделирования использованы для интерпретации данных мониторинга деформаций горных пород на геодинамическом полигоне перед Быстринским землетрясением. Проведенный анализ подтверждает, что специфические особенности аномальной деформации пород аналогичны деформационным признакам, наблюдаемым вдоль модельного разлома на метанестабильной стадии. Это позволяет предполагать, что метанестабильное состояние разлома может быть использовано в качестве краткосрочного предвестника землетрясений.

Ключевые слова: аналоговое моделирование, прерывистое скольжение, разлом, сегментация, метанестабильная стадия, землетрясение, предвестник.

Stages of Stick-Slip Preparation on Precut Faults in Laboratory Models and Verification of the Stages in Nature

S.A. Bornyakov^а, Y. Guo^б, I.A. Panteleev^с, Y-Q Zhuo^б, A.A. Dobrynina^а, V.A. Sankov^{а,д},
D.V. Salko^а, A.N. Shagun^а, A.A. Karimova^{а,д}

^аInstitute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033, Russia

^бInstitute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing, China

^сInstitute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

^дIrkutsk State University, Irkutsk, Russia

Abstract. This study is focused on analog modeling of the stick-slip process along an existing large fault in an elastic-viscoplastic model subjected to loading at a constant strain rate. Based on our model results and data from (Ma et al., 2012, 2014), we distinguish stable, meta-stable, and meta-unstable stages of the stick-slip process (the latter includes the early and late sub-stages). Our experiments show that the fault is periodically reactivated by segmentation. We analysed this mechanism from one fault reactivation to another, and identified regressive and progressive trends of segmentation. The regressive segmentation takes place during the stable and meta-stable stages of the stick-slip process. Under regressive segmentation the number of active segments and their lengths are reduced. The progressive segmentation is initiated at the early meta-unstable sub-stage of the stick-slip process. Its activity is displayed by an increase in the number of active segments to a certain critical density, while their pattern becomes more chaotic. In the late sub-stage, number of segments decreases as they rapidly grow and join with each other to form larger active segments, up to full reactivation of the entire fault.

For comparison with the model results, we interpret rock deformation monitoring records before the Bystroe earthquake. Our analysis confirms specific features of the anomalous rock deformation that are similar to the strain features observed along the model fault during the meta-unstable stage. There are evidence to suggest that meta-unstability of a fault is a potential candidate to short-term precursor of earthquakes.

Keywords: *analogue modeling, stick-slip, fault, segmentation, meta-unstable stage, earthquake, precursor.*

Introduction

In recent studies, tectonic earthquakes are generally related to two well-known seismic source mechanisms based on avalanche unstable fracturing (AUF) and stick-slip models. In AUF models, several short fractures rapidly join together to make a long fault, and their linkage is followed by a seismogenic displacement (Myachkin, 1978). In stick-slip models, seismogenic displacements take place along an existing fault during its reactivation (Brace and Byerlee, 1966). It is widely accepted that the stick-slip mechanism is a principal pattern of fault reactivation and a possible mechanism for earthquake occurrence at large faults located in seismically active zones of the continental lithosphere. Physical models and numerical simulations of the stick-slip mechanism have joined the forefront of investigations aimed at earthquake prediction. They aim to assess the recurrence of impulse displacements along a rupture / fault and groups of ruptures / faults, and also focus on physical phenomena preceding the displacements, which may suggest possible earthquake precursors in nature (e.g. (Rosenau et al., 2017, and their references). From 1960s to early 1990s, the problems of seismic event preparation and the origin of earthquake foci attracted much attention. Laboratory and field studies detected a wide range of short-term earthquake precursors, but their conceptual ba-

sis was unable to offer any solution to the problem of seismic forecasting and even raised doubts about the possibility of seismic prediction (e.g., Geller, 2007; Kogan, 1997). In that period, poor success of seismic forecasting models was due to many factors, including limited understanding of properties of the geophysical medium and insufficient knowledge of general regularities characterising the structural and dynamic development of faults. Furthermore, data collection and processing was hindered by the limited technical capacities of computers and equipment available for field and laboratory studies.

In 1990s, the knowledge advanced due to major transformations of ideas concerning the geophysical medium. The idea of a passive, deterministic, linear continuum has been replaced with the concept that described the geophysical medium as an active, discrete, non-linear system (e.g., Sadovsky et al., 1987; Pushcharovsky, 1993). Investigations have confirmed that the geophysical medium is heterogeneous; its structure is a hierarchy of blocks; and block sizes vary in a wide range, from minerals to lithospheric plates. Furthermore, self-similarity has been introduced in geophysics (e.g., Hirata, 1989; Turcotte, 1997; Seminsky, 2008).

A significant contribution to understating the development dynamics of large fault zones was brought by physical analog modeling. Based on its results, it is established that a discontinuous

internal structure of a fault zone originates from numerous ruptures and develops during their successive growth and propagation, and these ruptures join to form a major deep fault (e.g., Gzovsky, 1975; Stoyanov, 1977; Tchalenko, 1970; Wilcox et al., 1973). In the directional evolution of faulting, several stages are distinguished by differences in strain distribution patterns and fault-forming ruptures in space and time (e.g., Sherman et al., 1991; Seminsky, 2003). More detailed investigations of the deformation dynamics of large fault zones in physical models show that these stages can be subdivided into sub-stages, and rupturing in the internal structure of a fault zone is segmental (Bornyakov and Semenova, 2011; Bornyakov et al., 2014). The deformation dynamics of individual ruptures is displayed in the form of reactivation episodes repeating with a certain frequency. There is a regular trend in the evolution of their segmented structure from one reactivation episode to another (Bornyakov et al., 2018).

Recently, new types of displacements along faults have been instrumentally recorded, which is an important contribution to developing the deformation dynamics concept. It was previously believed that displacements along large faults took place in two deformation modes: rapid shear in fault wings (with a seismic effect), and long-term, slow, aseismic creep. Today, in addition to creep, other types of slow displacement (also termed as offset, shearing, shifting, slip) along faults are known. Such displacements differ in duration and generate seismic waves in a wide range of amplitudes and frequencies (Peng and Gomberg, 2010). Slow slip events were firstly attributed to subduction zones (Rogers and Dragert, 2003; Obara and Hirose, 2006; Brown et al., 2009); however, they can occur also in large fault zones of other types (Nadeau and Dolenc, 2005).

Although a solid classification of slow displacements and related seismic events is still lacking, the following types are generally recognized: silent earthquake, episodic tremor and slip, episodic creep event, slow slip event, low-frequency earthquake, and very low-frequency earthquake (Katsumata and Kamaya, 2003; Shelly et al., 2007; Peng and Gomberg, 2010; Sekine, 2010; Wei et al., 2013). Many studies show that slow slip events are generated / triggered by strong earthquakes; however, it is also found that slow displacements can also occur in aseismic periods (Gomberg et al., 2008; Idehara et al., 2014; Sun et al., 2015).

Attempts to solve the problem of earthquake prediction have faced new perspectives with the introduction of the synergism concept (Haken, 1977; Kondepud and Prigozhin, 1998). In its terms, a fault is a single open nonequilibrium dynamic system; an earthquake generated by a fault is a self-organized criticality (SOC) (Bak and Tang, 1989); and cooperative behavior is typical of the deformation process right before seismic reactivation of a fault (Feder, 1988; Feder and Feder, 1991; Olami et al., 1992; Ciliberto and Laroche, 1994). The SOC model is supported by simulations of seismic reactivations of faults and stick-slip mechanism (Ma et al., 2012, 2014; Zhuo et al., 2013; Guo et al., 2020).

In the above-mentioned publications, deformation is described as a process that precedes fault reactivation and develops during the metastable and meta-unstable stages. After the metastable stage (time interval O–A in analysed. 1), dynamic instability takes place as a slip impulse along the fault (time interval A–B1–B2 in Fig. 1). The meta-unstable stage includes two sub-stages, early and late (MIS-I and MIS-II, respectively), which characteristic feature is the autowave nature of deformation (Ma et al., 2012, 2014; Sobolev and Ponomarev, 2003). During MIS-I (time interval A–B1 in Fig. 1), numerous strain micro-foci begin to emerge on the fault plane, i.e. some segments of the fault become active. These isolated active segments slowly grow and randomly join with each other. As a result, the fault zone is gradually differentiated into the areas with relatively high and low volume strain values. During MIS-I, tremor-like displacements occur locally along the fault segments (Guo et al., 2020). During MIS-II (time interval B1–B2 in Fig. 1), segmentation accelerates. At point B2, all the segments join with each other, and dynamic slip takes place along the fault. A complete linkage of the segments is preceded by their short-term self-organization. The onset of the linkage is accompanied by the generation and propagation of a localized deformation front (Guo et al., 2020). These effects, observed in the laboratory experiments, are indirectly confirmed in nature by the cooperative behavior of microseisms observed before strong earthquakes (Sobolev et al., 2010; Lyubushin, 2012) and anomalies of ultra-low frequency (ULF) electromagnetic emissions (Schekotov et al., 2008, 2017).

Here, we present results of analog modeling of stick-slip process along a large fault in an elastic-viscoplastic model. Our experiments show that the fault is periodically reactivated

due to the fault segmentation mechanism that is investigated in detail. The modeling data allows distinguishing stable, meta-stable, and meta-unstable stages of stick-slip process.

For comparison with modeling results, we interpret rock deformation monitoring data from the South Baikal geodynamic polygon, using records taken six days before the Bystraya earthquake of September 21, 2020.

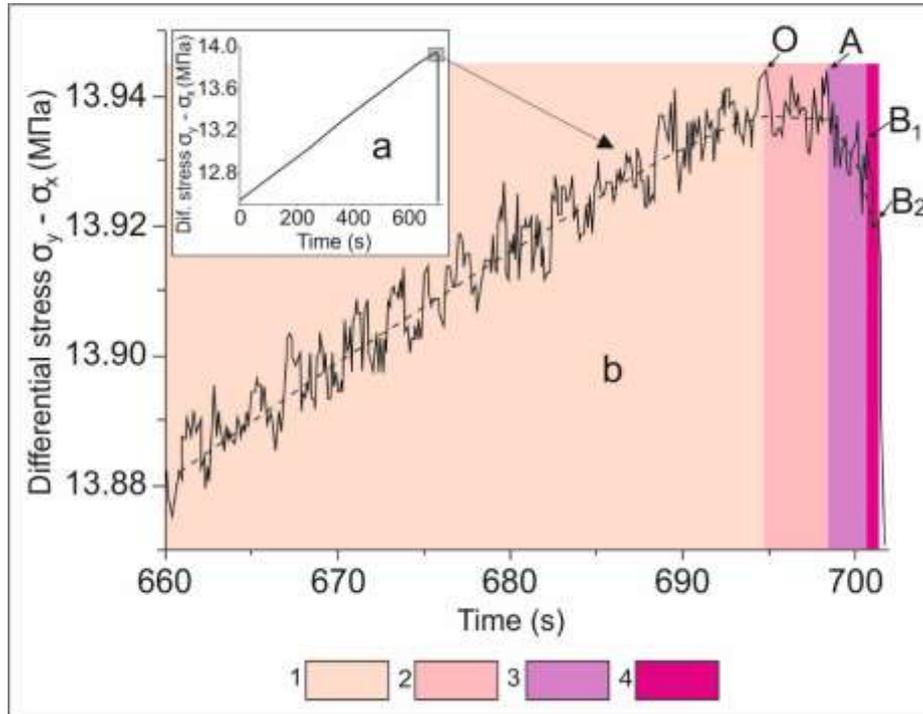


Fig. 1. Differential stress-time graph (a) and zoomed-in segment of the graph (b) showing differential stress variations during stages: up to point O – stable stage (1); from point O to A – meta-stable stage (2); from point A to B₁ – early meta-unstable sub-stage (MIS-I) (3); from point B₁ to B₂ – late meta-unstable sub-stage (MIS-II) (4).

Рис. 1. Дифференциальный график зависимости напряжения от времени (a) и увеличенный участок графика (b). Панель *б* показывает изменение дифференциального напряжения на стадиях: до точки O – стабильная стадия (1); из точки O до точки A – метастабильная стадия (2); от точки A до точки B₁ – ранняя метанестабильная подстадия (МИС-I) (3); от точки B₁ до B₂ – поздняя метанестабильная подстадия (МИС-II) (4).

Modeling techniques

Model scaling

Our modeling experiments aim to investigate stick-slip along a large fault and analyse its development dynamics in detail. Our procedure differs from the methodology adopted by Rosenau et al. [2009], Caniven et al. [2015] and Corbi et al. [2013] for similar experiments, who considered two different timescales for the interseismic and coseismic phases. We specify boundary conditions for only the interseismic phase.

The boundary conditions are set with respect to similarity criteria (Hubbert, 1939; Gzovsky,

1975; Sherman, 1984; Weijermars and Schmeling, 1986):

$$\eta / \rho g L T = \text{const}, \quad (1)$$

where η is viscosity, Pa s; ρ is density, kg/m³; g is free fall acceleration, m/s²; L is length, m; T is time, s.

Here, the main reological parameter is viscosity of the crust. An effective viscosity of the lower crust is at least $\sim 10^{18}$ Pa s (assuming a semi-infinite homogeneous viscous domain) (e.g., Bürgmann and Dresen, 2008; Bruhat et al., 2011). Our model simulates only the upper crust, which viscosity ranges from 10^{19} to 10^{20} Pa s.

Coefficients of similarity are as follows: $C_\eta = \eta_m / \eta_n = \sim 10^{-14}$ (viscosity); $C_\rho = \rho_m / \rho_n \sim 0.55$

(density); $C_g = g_m/g_n = 1$ (free fall acceleration); $C_l = l_m/l_n \sim 10^{-5}$ (length); $C_t = t_m/t_n \sim 2 \cdot 10^{-9}$ (time).

Considering the viscosity in the range of $10^{19} - 10^{20}$ Pa·s and the above-mentioned coefficients of similarity, the model material viscosity is $10^5 - 10^6$ Pa·s; one millimeter of the model length is similar to 100 m in nature; and one second of the experiment time is similar to 15 years in nature.

Model material

An aqueous paste of montmorillonite clay is used to simulate the elastic-viscoplastic behavior of the lithosphere subjected to long-term loading. The appropriate choice of this model material is justified by special studies reported in (Seminsky, 1986).

Experiment setup and techniques

Our physical modeling experiments are performed on the “Fault” installation (Fig. 2A). A model (1) is placed on a plexiglass sheet (2) greased with a vaseline oil (Fig. 2B). The model size: 0.65 m length x 0.45 m width x 0.1 m thickness. According to the similarity criteria, the dimensions of a simulated crustal block are as follows: 65 km length x 45 km width x 10 km thickness. Two long sides of the model are limited by fixed platens (3, 4). In the procedure to make a pre-cut fault, we use a rectangular Plexiglas sheet (length of 0.45 m, height of 0.1 m, thickness of 0.001 m). It is manually held vertically and oriented at an angle of 40° to the direction of future movement of an active platen (6). Its vertical position kept, the sheet is manually pressed down to make a cut in the model and taken out before starting an experiment. A pre-cut fault (5) simulates a regional fault in the lithosphere (Fig. 2C). According to the criteria of similarity, its length in nature is 45 km.

In the experiment, the model is subjected to tangential compression by the platen (6) that moves at a constant speed of 10^{-5} m/s (i.e. 6.7 cm per year in nature). At the right side, another movable platen (7) is connected via springs (8) with a fixed chock platen (9). In the course of deformation of the model, this platen (7) can move towards the chock platen (9).

Before the experiment, the model surface is covered with a thin layer of fine sand. Individual sand grains act as markers for measuring displacements. Images of the model surface are taken by a Basler acA1920-40gm digital camera at a rate of one frame per second in order to record details of the process taking place within the monitored area (10).

Data processing techniques

Digital image correlation

The digital images are processed using a 2D digital image correlation method (DIC) to obtain the displacement field (Sutton et al., 2009). The DIC data processing is implemented by Strain Master software (LaVision systems) that calculates the distribution of displacement vector components and strain tensors and estimates their increments in time (Panteleev et al., 2014). Before processing, special filters are used on each image to normalize the intensity of pixels over the entire image area in order to minimize the effect of uneven illumination of photographed objects. Furthermore, all the images are calibrated by a frame with a measuring ruler, which makes it possible to refer to the real spatial scale of photographed objects and reconstruct the displacement field in millimeters (instead of pixels).

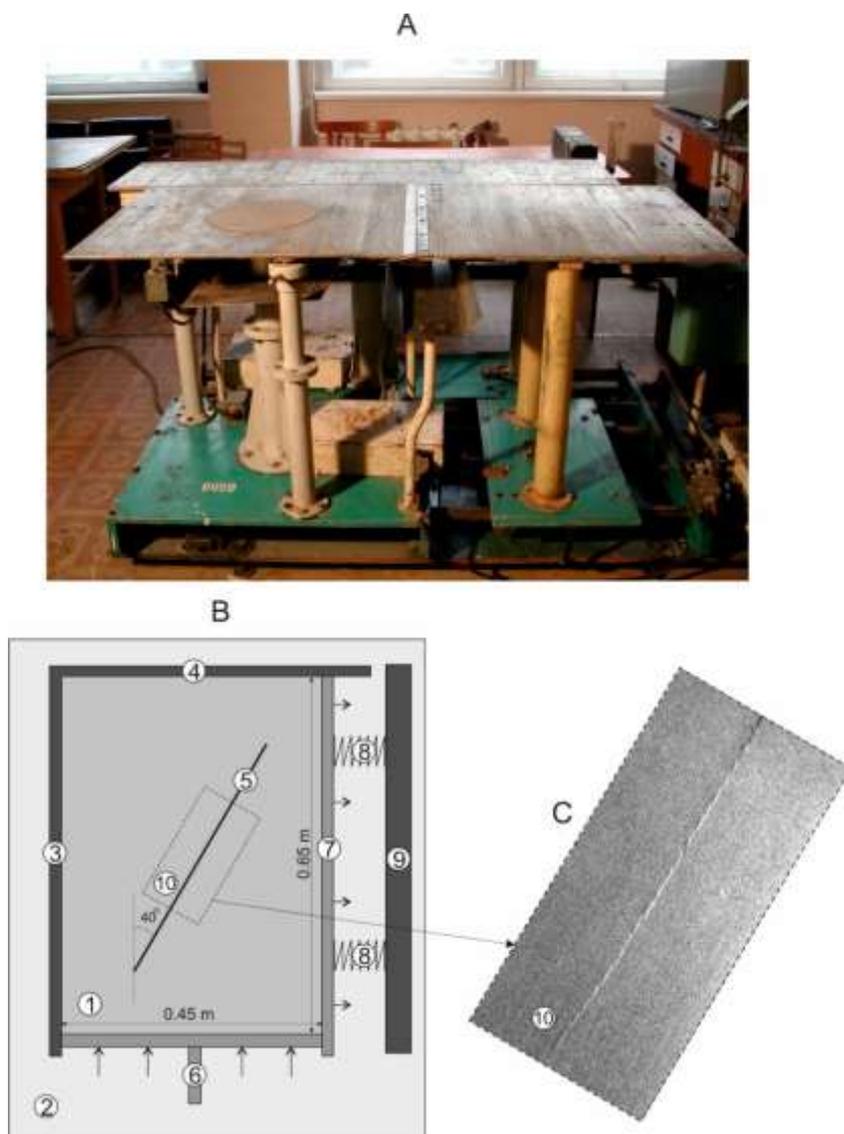


Fig. 2. Experimental installation “Fault” (a), schematics of experiment setup (b), and photo of the fault after its reactivation (c). Numbers – see in the text.

Рис. 2. Экспериментальная установка «Разлом» (a), схема экспериментальной установки (b) и фото разлома после его реактивации (c). Цифры – см. текст.

Image processing can be carried out in either integral or differential scenarios. In the integral scenario, the model deformation field is assessed by comparing every image with the first one, i.e. taken before the experiment start (Fig. 3a), and the pattern of consecutive accumula-

tion of deformation during loading can be reconstructed. In the differential scenario, the deformation field is assessed by comparing two images taken consecutively, one after another, and an increment of deformation from one image to another is calculated.

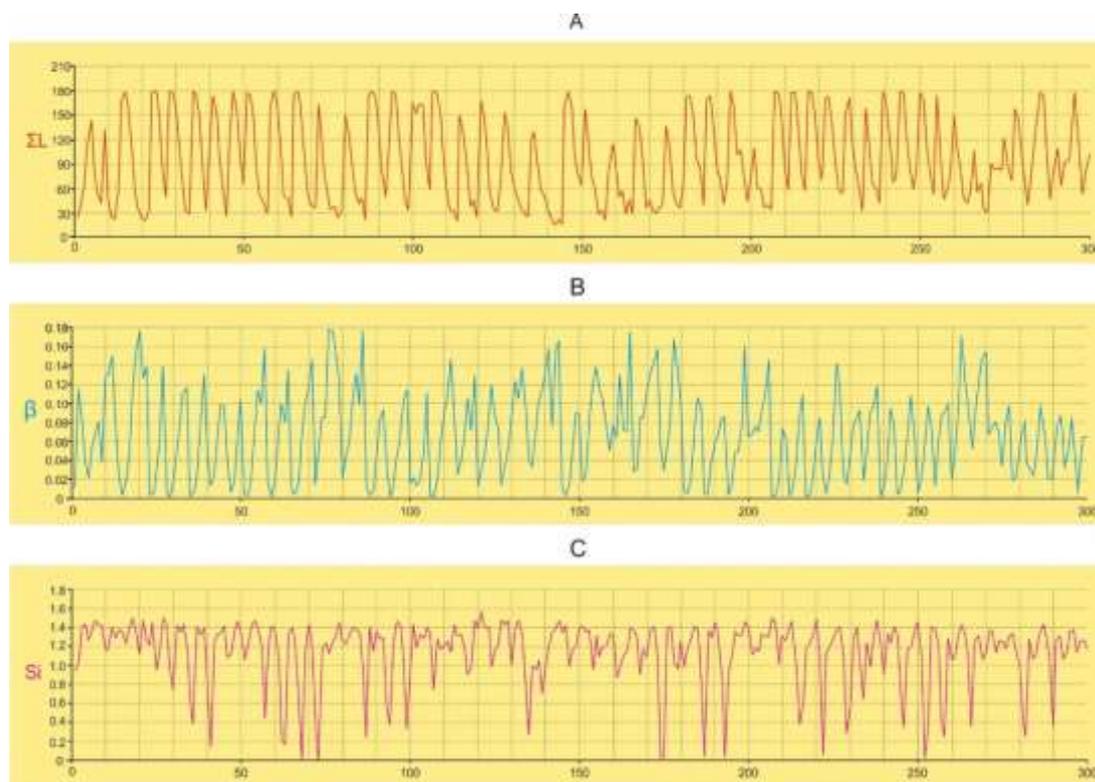


Fig. 3. Temporal changes in total length ΣL (a), inclination angle of recurrence graph β (b), and information entropy S_i (c) of active segments.

Рис. 3. Временные изменения общей длины ΣL (a), угла наклона рекуррентного графика β (b) и информационной энтропии S_i (c) активных сегментов.

We use the differential approach for processing the images in order to clearly identify the nonlinear, non-monotonic features of deformation. Displacement and deformation fields are reconstructed under the following DIC algorithm: correlation analysis – multi-pass with a sub-window size varying from 12.8x12.8 mm to 1.6x1.6 mm; step size – 50 % of the sub-window size; correlation function – normalized, second order. At each time step, the resultant field of velocity is smoothed by a two-dimensional Gaussian filter (0.6 x 0.6 mm). A 5-minute interval of the experiment time is chosen for processing purposes. In total, 300 images were processed.

Algorithms for statistical processing of quantitative parameters

The model data processing results show that deformation takes place as left-lateral shear along the entire fault or along its individual active segments. In the fault wings, deformation

occurs as localized plastic shearing along two conjugated systems of microruptures.

The calculated distribution patterns of shear deformation provide the basis to construct structural diagrams of the active segments and plastic microruptures in the fault wings. The diagrams are used to calculate their numbers (N) and lengths (Li). Initial parameters are then used to estimate their total (ΣLi) and average (L average = $\Sigma Li/N$) lengths, β value and information entropy (S_i) from parameter Li.

The β value is calculated by the maximum likelihood method (Aki, 1965):

$$\beta = \lg e / L_{\text{average}} - L_{\text{min}}, \quad (2)$$

where e is natural logarithm base; L average is average length; L min is minimum length of active segments in the data set that yields from the analysed structural diagram. The method described in (Aki, 1965) is adapted for analysing earthquake magnitudes. Here, in equation (2), the lengths of active segments are used instead of earthquake magnitudes – this is allowable as we take into account the known rela-

tionship between fault length and earthquake magnitude (Tocher, 1956; Golitsyn, 1996).

Information entropy is calculated as follows (Brillouin, 1964):

$$S_i = - \sum p_i \cdot \lg p_i, \quad (3)$$

where p is probability.

Results

Long-term deformation dynamics

Computer processing of the images showing the model surface during deformation confirms that even under constant loading, the structural evolution of active segments and displacements along the fault takes place according to the stick-slip mechanism as described in (Brace and Byerlee, 1966). During the monitored 300-second interval, 47 displacements (i.e. activation impulses) of various intensity occurred with a time discreteness of five to ten seconds either, and either the entire fault or its major part were activated. Between the activation impulses, activity concentrated in individual segments of the fault.

Based on the 300 processed images, 300 shear strain plots were constructed. For each plot, structural diagrams of active segments were drawn up, and lengths L_i were measured. These data were used to estimate the total length of active segments (ΣL), inclination angle of recurrence graph (β value), and information entropy (S_i) (Fig. 3).

Short-term deformation dynamics between two activations of the entire model fault

We analysed in detail the structural evolution of the model fault and changes in parameters of its active segments between two activations of the entire fault (Fig. 4). This cycle lasts for 2 seconds in the model and simulates a seismic cycle in nature (i.e. activations correspond to

seismic events). In the shear strain distribution diagram, full activation is a moment when the entire fault length within the monitored area is active. After the first activation (Fig. 4A, A'), displacements occur fragmentarily at several relatively large segments of the fault (Fig. 4B, B').

In the next six intervals of time, segmentation develops, and the large segments are split into a series of smaller ones (Fig. 4B'–G'). The number of segments increases, their average and total lengths decrease, and the inclination angle of the recurrence graph increases (Table 1; Fig. 4C'–G') Before the next full activation, segmentation stabilizes (Table 1; Fig. 4H, H') and then develops in the opposite direction: the number of segments decreases, their average and total lengths increase, and the inclination angle of the recurrence graph decreases (Table 1; Fig. 4I, I').

Short-term deformation dynamics in the model fault wing

Active plastic microruptures in the model fault wing were analysed separately to reveal their short-term deformation dynamics. Figure 5 shows a fragment of the shear strain distribution diagram at the moment when the entire fault is activated (see Fig. 4J, J'). Numerous conjugated plastic microruptures of two strikes are present in the fault wing. Linearly localized shear strain maxima were detected. By analogy with the active segments, the number and lengths of plastic microruptures were determined, then the total and average lengths and information entropy were estimated (Table 1). In the discussion below, we compare graphs showing changes in parameters of active segments and plastic microshears with time.

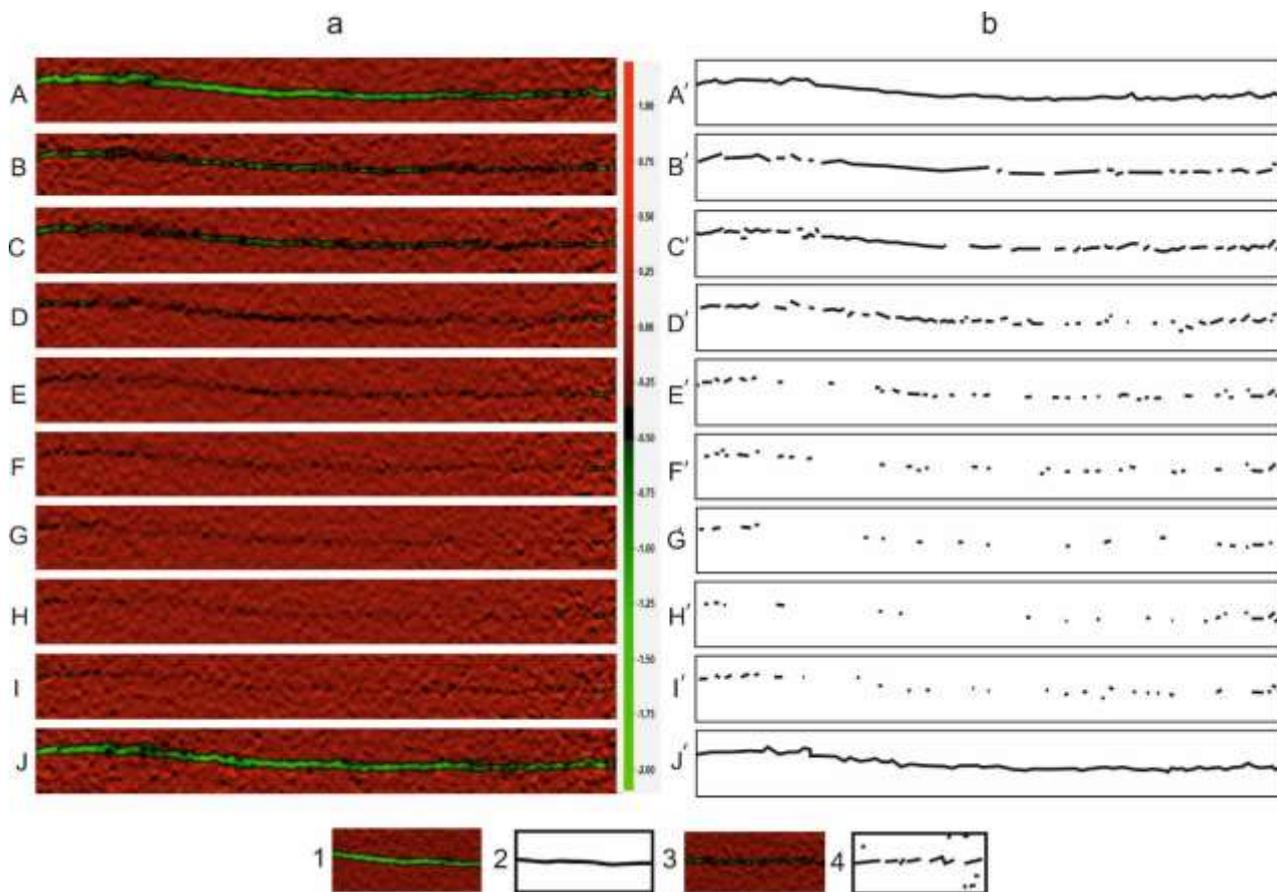


Fig. 4. Shear strain distribution diagram illustrating the structural evolution between two reactivations of the model fault (*a*) structural scheme of activated fault and its active segments (*b*). 1 – active fault according to DIC data processing data (A and J); 2 – active fault in structural schemes (A' and J'); 3 – active fault segments according to DIC data processing data (B–I); 4 – active fault segments in schemes B'–I'.

Рис. 4. Диаграмма распределения деформации сдвига, иллюстрирующая структурную эволюцию между двумя активациями модельного разлома (*a*) и структурная схема активированного разлома и его активных участков (*b*). 1 – активный разлом по данным обработки данных DIC (A и J); 2 – активный разлом в структурных схемах (A' и J'); 3 – участки активных разломов по данным обработки данных DIC (B–I); 4 – участки активных разломов на схемах B'–I'.

Short-term deformation dynamics in the model fault wing

Active plastic microruptures in the model fault wing were analysed separately to reveal their short-term deformation dynamics. Figure 5 shows a fragment of the shear strain distribution diagram at the moment when the entire fault is activated (see Fig. 4J, J'). Numerous conjugated plastic microruptures of two strikes are present

in the fault wing. Linearly localized shear strain maxima were detected. By analogy with the active segments, the number and lengths of plastic microruptures were determined, then the total and average lengths and information entropy were estimated (Table 1). In the discussion below, we compare graphs showing changes in parameters of active segments and plastic microshears with time.

Table 1

Parameters of the model fault segments and plastic microruptures, and their changes between two full reactivations

Time, s	Number of segments	Total length of segments, mm	Average length of segments, mm	Information entropy of the segments lengths
Parameters of active segments				
0 (FA)*	1	180	180	-
1	24	164	3.1	0.11
2	36	109	1.1	0.16
3	36	128	1.2	0.38
4	34	78	0.7	0.52
5	28	48	0.35	1.39
6	18	30	0.3	1.11
7	18	29	0.35	1.54
8	27	49	0.4	0.87
9 (FA)*	1	180	180	-
Parameters of active plastic microruptures in the fault wing				
0 (FA)*	210	1100	10.48	2.245
1	162	745	9.2	2.180
2	202	995	9.85	2.240
3	255	1307	10.26	2.325
4	260	1300	10.0	2.234
5	272	1347	9.91	2.237
6	235	1140	9.7	2.229
7	231	1200	10.39	2.227
8	279	1450	10.39	2.238
9 (FA)*	268	1173	8.75	2.236
0 (FA)*	210	1100	10.48	-

*Note: FA – full activation.

Discussion and findings based on the modeling results

It is known from laboratory experiments with geologic materials (Brace and Byerlee, 1966), and our experiments confirm that in elastic-viscoplastic models, displacements along the existing fault develop non-uniformly even under constant loading and evolve according to the stick-slip mechanism. At the moments of activation impulses, displacements occur along the entire fault or along its major part. Between the activation impulses, activity concentrates in individual segments of the fault (Fig. 4).

Considering the stick-slip process developing in the model in terms of repeated self-organized criticality (Bak and Tang, 1989), one should expect that immediately before the complete activation of the fault, as soon as the criti-

cal stress level on the fault plane is reached, the system of active segments transforms to the state of self-organization (Ma et al., 2012, 2014). The self-organization process is preceded by the transition stage when the system reaches its current equilibrium or a metastable state with an increase in the degree of disorder (Kondepudi and Prigogine, 1998). An indicator of the degree of disorder in open systems is thermodynamic entropy or its statistical analogue, information entropy S_i (Brillouin, 1964; Zubarev et al., 2002; Gudmundsson and Mohajeri, 2013). Our experiments show that changes in S_i with time are consistent with the above conclusions (Fig. 3). The moments, when the entire fault is activated, correspond to the maximum values of ΣL and correlate with the maximum values of information entropy (76 %).

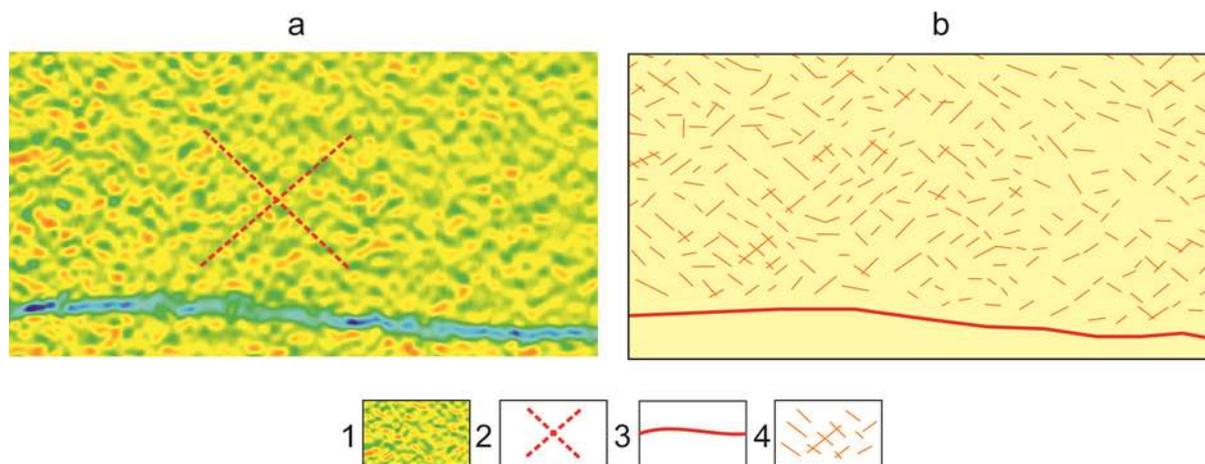


Fig. 5. Plastic microruptures in the model fault wing (blue line – fault) (a) and structural diagram (b). Legend: 1 – shear strain maximums corresponding to plastic microruptures; 2 – two main strikes of microruptures; 3 – model fault; 4 – plastic microruptures in the structural scheme.

Рис. 5. Пластические микроразрывы в модельном крыле разлома (синяя линия – разлом) (а) и структурная схема (б). Условные обозначения: 1 – максимумы сдвиговых деформаций, соответствующие пластическим микроразрывам; 2 – два основных простирания микроразрывов; 3 – модельный разлом; 4 – пластические микроразрывы в конструктивной схеме.

The evolution of active segments and plastic microshears can be traced in detail from one activation of the fault to another by changes in their parameters, as shown in Table 1 and Figure 5. With respect to these changes, we distinguish two trends of the model fault segmentation: regressive (0s–7s), and progressive (7s–9s) (see Table 1). The progressive segmentation period is significantly shorter than the regressive one. Furthermore, the shorter is progressive segmentation, the more intense is fault activation, and almost the entire fault is activated. Vice versa, with an increase in the duration of the progressive segmentation, activation of the fault is less intense, and some segments of the fault are most likely to remain inactive.

We constructed graphs showing changes in parameters of active segments and plastic microshears (N , ΣL , L average and S_i) with time (Fig. 6). By comparing these graphs, we reveal that the deformation dynamics is different at the fault itself and in its wings. This difference is clearly reflected in the behavior of parameters ΣL and L average. After the first full activation, the number, total and average lengths of plastic microshears decrease for a short time, while the values of S_i increase. Later on, up to the next full activation, the values of N , ΣL , L average and S_i generally increase, with slight variations.

Considering the segments and plastic microshears, changes in their parameters ΣL and L average are almost anti-phased in time.

The regressive segmentation leads to gradual fragmentation of large segments into smaller ones and their degeneration as some of them become passive. This trend is reflected in a decrease in the number of large segments and a decrease in their total and average lengths (Fig. 6a, b, c). Information entropy increases during the regressive segmentation, which means an increasing degree of chaos in the distribution of fault segments by their lengths (Fig. 6d). By the end of the regressive segmentation period, stresses reach their maximum values, but the fault is still meta-stable, which means that only its individual short segments are active. Such segments are evenly distributed along the fault strike.

The fault becomes newly activated when the progressive segmentation begins in the early meta-unstable sub-stage (MIS-I). Its activity is manifested by an increase in the number of active segments and plastic microshears to a certain critical density, while their spatial patterns become more chaotic. In MIS-II, the number of segments decreases as they rapidly grow and join with each other to form larger segments, up to full activation of the entire fault.

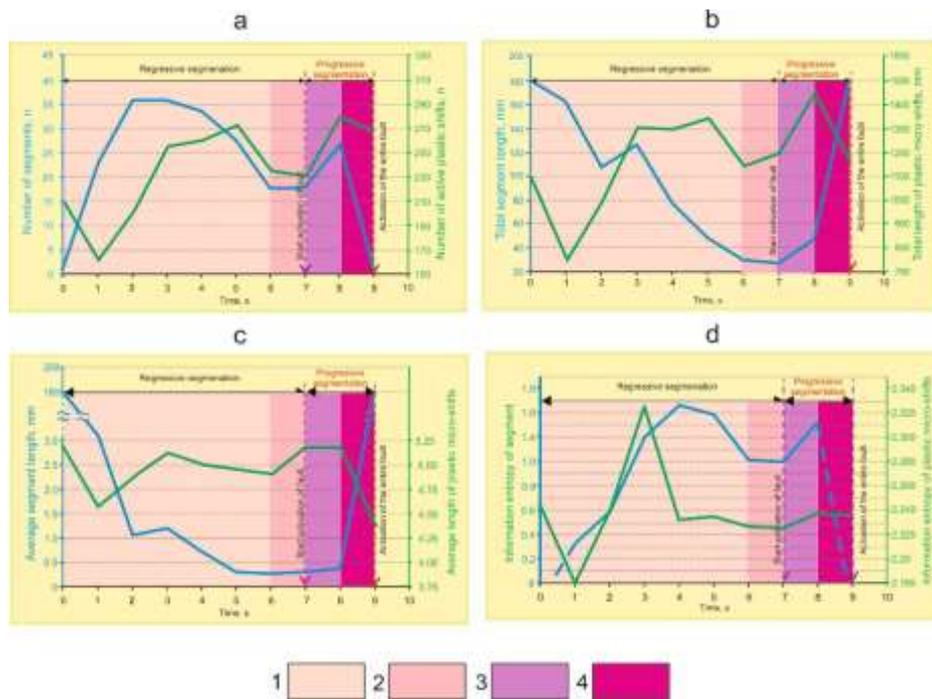


Fig. 6. Changes in parameters N , ΣL , L average and S_i with time. (a) Number of segments, N ; (b) total length, ΣL ; (c) and average length, L_{average} ; (d) informational entropy, S_i . Stages of the stick-slip preparation at the model fault: 1 – stable; 2 – meta-stable; 3, 4 – early (3) and late (4) meta-unstable (MIS-I and MIS-II, respectively).

Рис. 6. Изменение параметров N , ΣL , L в среднем и S_i во времени. Количество сегментов N (а), общая длина ΣL (б), средняя длина, $L_{\text{средняя}}$ (с) и информационная энтропия S_i (д). Стадии прерывистой подготовки на модельном разломе: 1 – стабильная; 2 – метастабильный; 3, 4 – ранняя (3) и поздняя (4) метанестабильность (МИС-I и МИС-II соответственно).

The above-described dynamics of the structural evolution of active fault segments in the elastic-viscousplastic model during the meta-unstable stage, including MIS-I and MIS-II, agrees well with the dynamics described by Ma et al. (2012, 2014) and Guo et al. (2020) who performed stick-slip modeling experiments using granodiorite specimens.

After stresses decrease in the fault wing, active plastic microshears reduce in number, and their total and average lengths are also reduced, while their spatial patterns become less chaotic, as reflected in a decrease in S_i values (Fig. 6d).

Our key findings are summarized as follows:

- Activation of a fault is preceded by its transition to the meta-stable state;
- The fault is periodically activated due to the segmentation mechanism;
- Progressive segmentation of the fault takes place during the early and late meta-unstable sub-stages (MIS-I and MIS-II);

- The short-term deformation dynamics differs in the model fault wing and at the entire fault;

- During the MIS, the deformation process accelerates, and a localized deformation front occurs in the fault wing before the occurrence of dynamic stick-slip along the fault, and this front propagates towards a location of future seismic displacements.

These findings should be taken into account when processing and analysing strain monitoring data from a fault zone with potential seismic hazard – data analyses should be conducted separately for the fault itself and its wings.

Our modeling results can be useful for developing seismic forecasting techniques and improving earthquake prediction. For instance, when monitoring a seismically active fault, it is possible to detect its meta-stable state from autowave phenomena in time series of various geophysical parameters, which are indirectly re-

flected in high values of information entropy. In the areas of potential earthquake foci, the progressive segmentation during the meta-instable stage can be diagnosed instrumentally by broadband seismic stations launched within or near a source area. In an earthquake-prone area, a network of deformation monitoring stations can detect the formation of a localized deformation front and contribute to providing a better prediction of earthquake foci locations.

Natural seismic event as a case for verification of the model results

To verify the stages of preparation of dynamic stick-slip along the model fault, we analysed deformation monitoring data related to preparation of the Bystrinsky earthquake (M_w 5.4) occurred September 21, 2020 at 18:04 UTC or September 22, 2020 at 02:04 AM Irkutsk time) in the southern Baikal region, Russia ($51^\circ 77'$, $103^\circ 43'$ according to the data from the Talaya Seismic Station owned by the Baikal Branch of UGS RAS). Its epicenter was located at a distance of 18 km from the station. This

seismic event is reported in detail in (Bornyakov et al., 2021) (Fig. 7).

Preparation of the Bystrinsky earthquake is reflected in rock deformation monitoring data from the Talaya deformation monitoring site (part of the Talaya Station area, Fig. 8). The strain records were taken by a permanently installed monitoring unit of the author's design; its technical characteristics are described in (Salko and Bornyakov, 2014).

Six days before the earthquake, eight sensors out of ten registered changes in the rate of rock deformation accumulation. The most distinct anomalous changes in the deformation process were recorded by rod sensors 1, 4 and 8 – they were oriented towards the future focal area of the earthquake. Figure 9 (a) illustrates a time series of strain records taken by sensor 8 from September 05, 2020 to October 02, 2020. The rock deformation decreased from September 5 to September 16, and then began to increase. Closer to the day of the earthquake occurrence, the deformation accelerated, as evidenced by the graph showing daily strain increments (Fig. 9b). After the earthquake, the rock deformation began to decrease again, and gradually reduced to the background values (Fig. 9).

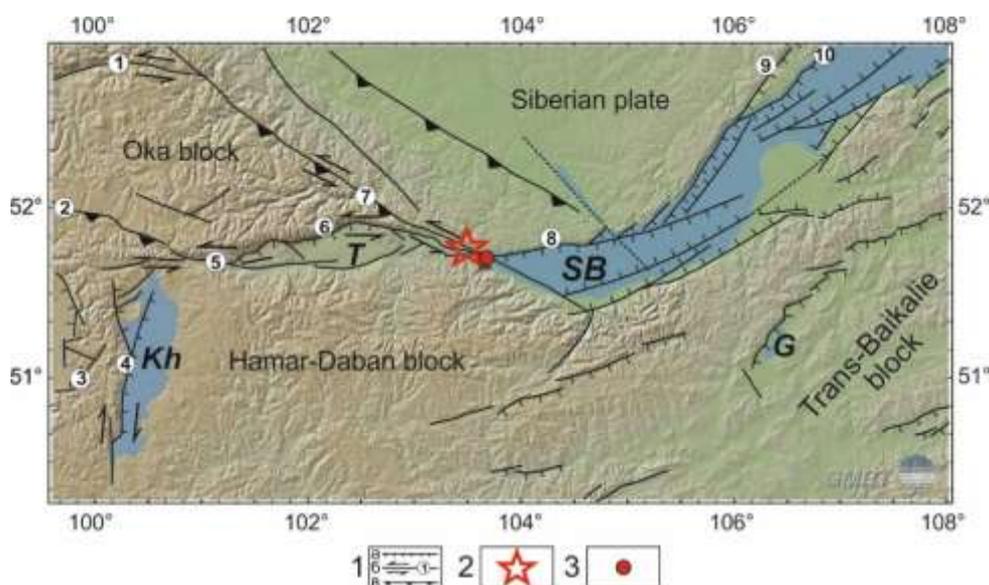


Fig. 7. Neotectonic structures in the southern Baikal region. Legend: 1 – active faults: *a* – normal, *b* – strike-slip, *v* – reverse; 2 – epicenter of the Bystraya earthquake; 3 – Talaya deformation monitoring site. Rift basins (letters): SB – South Baikal. Kh – Khubsugul, G – Gusinoozersk. Main active faults (numbers in circles): 1 – Zhombolok, 2 – South Oka, 3 – Darkhat, 4 – Khubsugul, 5 – Baikal-Mondy, 6 – Tunka, 7 – Main Sayan, 8 – Obruchev, 9 – Primorsky, 10 – Morskoj.

Рис. 7. Неотектонические структуры Южного Прибайкалья. Условные обозначения: 1 – активные разломы: *a* – сброс, *b* – сдвиг, *v* – взброс; 2 – эпицентр Быстринского землетрясения; 3 – площадка мониторинга деформаций Талая. Рифтовые бассейны (буквы): SB – Южный Байкал. Kh – Хубсугул, G – Гусиноозерск. Основные действующие разломы (цифры в кружках): 1 – Жомболковский, 2 – Юж-

но-Окинский, 3 – Дархатский, 4 – Хубсугульский, 5 – Байкало-Мондинский, 6 – Тункинский, 7 – Главный Саянский, 8 – Обручевский, 9 – Приморский, 10 – Морской.

The deformation behavior during the preparation of the Bystrinsky earthquake is a good example in support of the meta-stable and meta-unstable stages of stick-slip preparation in the modeling experiments described in (Ma et al., 2012, 2014) and this paper. The MIS began at the moment when the maximum load value was reached (at point O on the load-time curve in Fig. 1). Transition to meta-instability started when isolated segments of the local fault became active. The MIS included MIS-I and MIS-2 (A–B1, and B1– B2, respectively, in Fig. 1). In MIS-I (September 16 to 20), stresses slowly and gradually decreased due to a gradual increase in the number of fault segments, i.e. slowly accelerated deformation took place. During MIS-I, tremor-like slip occurred (Fig. 9c). In MIS-II (September 20), synergism is observed – the deformation process was considerably accelerated, and then a dynamic slip impulse took place along the fault. According to (Ma et al., 2012, 2014), synergistic effects occur when the quasi-static state is transformed

into a quasi-dynamic one via cooperative interaction of the active segments, their rapid growth in length and linkage with each other. In MIS-II, short-term deceleration occurred right before the main seismic shock of September 22, 2020. Thus, the deformation dynamics recorded at the Talaya site six days before the earthquake is fully consistent with our concept of the early and late meta-instability sub-stages.

Considering the same earthquake, an additional argument in favour of this concept can be found in specific variations of the information entropy calculated from the time series of strain records in a 1-day window with a 1-day shift (Fig. 9d). In the graph, a sharp decrease in the information entropy begins on September 13, i.e. two to three days before deformation starts increasing. This means that during these two or three days, there was a change in the dynamic state of the fault-block medium in the source area, as well as a transition from meta-stability to meta-instability of the deformation process.

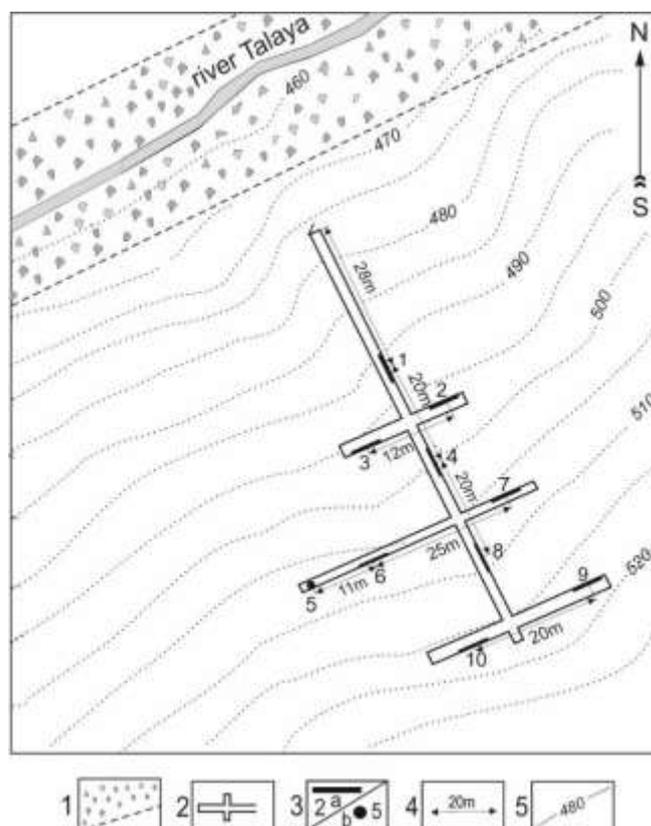


Fig. 8. Sketch of the Talaya deformation monitoring site. 1 – fault zone; 2 – contours of a mine shaft; 3 – rod sensors installed in horizontal (a) and vertical (b) positions in the mine shaft, and their numbers (1–10); 4 – distance between rod sensors; 5 – topography line and elevation.

Рис. 8. Схема участка деформационного мониторинга Талая. 1 – зона разлома; 2 – контуры шахтного ствола; 3 – стержневые датчики, установленные в горизонтальном (а) и вертикальном (b) положениях в стволе шахты, и их номера (1–10); 4 – расстояние между стержневыми датчиками; 5 – линия рельефа и высота.

Thus, the deformation monitoring data allow us to clearly determine the final stage, during which the Bystrinsky earthquake was prepared. This stage agrees well with the meta-instable stage (including MIS-I and MIS-II) in our stick-slip modeling experiments. Having compared

the model and natural data, we suggest that meta-instability of a fault, manifested by specific anomalous deformation dynamics at the fault itself and in its wings, can be considered as a short-term precursor of earthquakes.

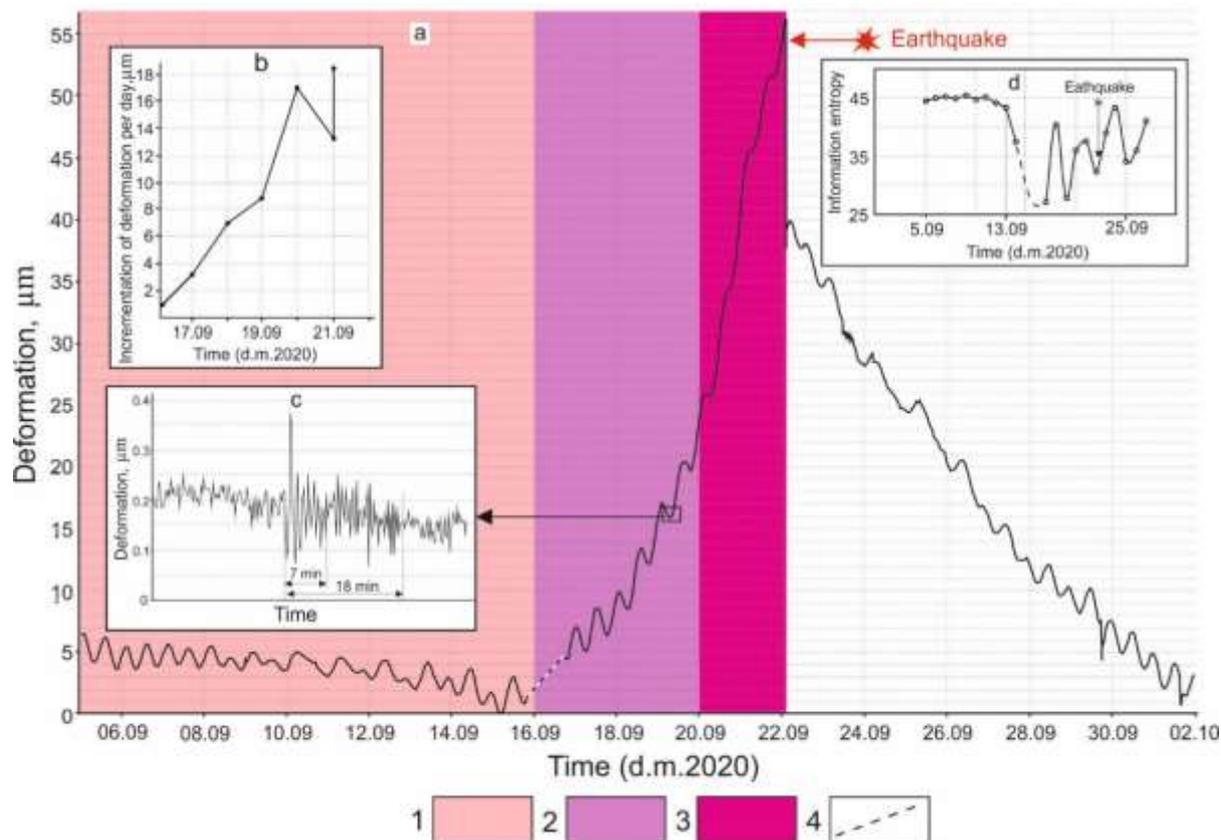


Fig. 9. Rock deformation at the Talaya monitoring site before the Bystraya earthquake (a), graph of daily strain increment (b), reflection of tremor-like slip in the strain data (c), and information entropy graph (d). Stages of earthquake preparation: 1 – meta-stable; 2, 3 – early (3) and late (4) meta-unstable (MIS-I and MIS-II, respectively); 4 – no data.

Рис. 9. Деформация горных пород на полигоне Талая перед Быстринским землетрясением (а), график суточного прироста деформации (b), отражение тремороподобной подвижки в данных деформации (c) и график информационной энтропии (d). Стадии подготовки землетрясений: 1 – метастабильная; 2, 3 – ранняя (3) и поздняя (4) метанестабильная (МИС-I и МИС-II соответственно); 4 – нет данных.

Conclusions

In the experiments aimed at physical modeling of stick-slip along the pre-cut large fault, we have discovered a mechanism responsible for the preparation and occurrence of periodic full activations of the fault. According to the modeling results, the major mechanism is segmenta-

tion that differentiates the fault along its strike into a series of alternating active and passive segments. The segmentation pattern is regular in time, and two trends are distinguished – regressive and progressive segmentation of active segments. In the period of regressive segmentation, stick-slip occurs locally along several relatively large segments of the fault, which subse-

quently break up into a series of smaller ones, and most of them gradually become passive. The progressive segmentation develops in the opposite direction: the existing and newly formed small segments join with each other to form larger ones, and finally the entire fault becomes active. Our experiment results clearly show that the progressive segmentation of the fault in the elastic-viscoplastic model agrees well with the segmentation during the meta-instability stage identified from the stick-slip models using granodiorite specimens (Ma et al., 2012, 2014; Guo et al., 2020).

Variations in activity of the fault segments are closely related to stress variations in the area around the fault, wherein the plastic microshears are observed. Our experiments show that the deformation dynamics is considerably different in the active segments and the plastic microshears in the fault wings. Furthermore, there are significant differences in the deformation dynamics within different time intervals. Therefore, it should be emphasised that proper statistical estimates for seismic forecasting can yield only from a methodologically correct approach – it is critical to ensure that considering a fault zone of potential seismic hazard, strain and seismic data are analysed separately for the fault itself and its wings.

We have compared the laboratory modeling results and our interpretation of the rock deformation monitoring data from the South Baikal geodynamic test site. Based on the analysis of the strain records taken six days before the Bystrinsky earthquake of September 22, 2020, we conclude that specific features of the anomalous rock deformation recorded in nature are fully similar to the features of deformation along the model fault during the meta-instable stage. There are thus grounds to suggest that the meta-instable stage can be considered as a short-term precursor of an earthquake. An important consequence of our stick-slip modeling experiments is a confirmed possibility of using strain monitoring records from fault zones and detailed analyses of their deformation dynamics for predicting the occurrence of seismic events.

Acknowledgments

The study was carried out under the project "Modern geodynamics, mechanisms of destruction of the lithosphere and dangerous geological

processes in Central Asia", No FWEF-2021-0009. This work involved the South Baikal instrumental complex for monitoring hazardous geodynamic processes in frame of the Centre of Geodynamics and Geochronology at the Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

References

- Aki K. Maximum likelihood estimate of bin the formula $\log N = a - bm$ and its confidence limits // Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo. 1965. Vol. 43. P. 237–238.
- Bak P., Tang C. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon // Journal of Geophysical Research. 1989. Vol. 94, No. B11. P. 15635–15637. doi.org/10.1029/JB094iB11p15635
- Bornyakov, S. A., Dobrynina, A. A., Seminsky, K. Zh., Sankov, V. A., Radziminovich, N. A., Salko, D. V., Shagun, A. N. Bystrinsky earthquake in the Southern Pribaikalye (21.09.2020, MW = 5.4): general characteristic, basic parameters and deformation signs of the transition of the fosi to the meta-unstable state // Doklady Earth Sciences. 2021. Vol. 498, No. 1. P. 84–88. doi.org/10.31857/S2686739721050042
- Bornyakov S.A., Semenova N.V. Dissipative processes in fault zones (based on physical modeling results) // Russian Geology and Geophysics. 2011. Vol. 52, No. 6. P. 676–683. doi.org/10.1016/j.rgg.2011.05.010
- Bornyakov S.A., Seminsky K.Z., Buddo V.Y., Miroshnichenko A.I., Cheremnykh A.V., Cheremnykh A.S., Tarasova A.A. Main regularities of faulting in lithosphere and their application (based on physical modeling results) // Geodynamics and Tectonophysics. 2014. Vol. 5, No. 4. P. 823–861 (in Russian). doi.org/10.5800/GT-2014-5-4-0159.
- Bornyakov S.A., Panteleev I.A. The segmentation mechanism of periodic reactivation of a fault: results of physical modeling // Doklady Earth Sciences. 2018. Vol. 482, No. 1. P. 1178–1181. doi.org/10.1134/S1028334X18090039
- Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as a mechanism for earthquake // Science. 1966. Vol. 153. P. 990–992.
- Brillouin L. Science and Information Theory. Acad. Press Publ., New York, 1964. 164 pp.
- Brown J.R., Beroza G.C., Ide S., Ohta K., Shelly D.R., Schwartz S.Y., Rabbel W., Thorwart M., Kao H. Deep low-frequency earthquakes in tremor local-

ize to the plate interface in multiple subduction zones // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 36, No. L19306. doi:10.1029/2009GL040027

Bruhat L., Barbot S., Avouac J.-P. Evidence for postseismic deformation of the lower crust following the 2004 Mw6.0 Parkfield earthquake // *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116, No. B08401. doi:10.1029/2010JB008073.

Bürgmann R., Dresen G. Rheology of the lower crust and upper mantle: Evidence from rock mechanics, geodesy, and field observations // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2008. Vol. 36. P. 531–567. doi:10.1146/annurev.earth.36.031207.124326.

Caniven Y., Dominguez S., Soliva R., Cattin R., Peyret M., Marchandon M., Romano C., Strak V. A new multilayered visco-elasto-plastic experimental model to study strike-slip fault seismic cycle // *Tectonics*. 2015. Vol. 34, No. 2. P. 232–264. doi:10.1002/2014TC003701.

Ciliberto S., Laroche C. Experimental evidence of self-organization in the stick-slip dynamics of two rough elastic surface // *Journal de Physique*. , 1994. Vol. 4, P. 223–236. doi:10.1051/jp1:1994134

Corbi F., Funicello F., Moroni M., van Dinther Y., Mai P.M., Dalguer L.A., Faccenna C. The seismic cycle at subduction thrusts: 1. Insights from laboratory models // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2013. Vol. 118. P. 1483–1501. doi:10.1029/2012JB009481.

Feder J. *Fractals*. Plenum Press, New York, 1988. doi.org/10.1007/978-1-4899-2124-6.

Feder J.S., Feder J. Self-organized criticality in stick-slip process // *Physical Review Letters*. 1991. Vol. 66, No. 20. P. 2669–2672. doi.org/10.1103/PhysRevLett.66.2669.

Haken H. *Synergetics. An Introduction*. Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg–New York, 1977. 325 pp.

Hirata T. Fractal dimension of fault systems in Japan: Fractal structure in rock fracture geometry at various scales // *Pure Applied Geophysics*. 1989. Vol. 131. P. 157–170. doi:10.1007/BF00874485.

Hubbert M.K. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures // *Geological Society of America Bulletin*. 1937. Vol. 48. P. 1459–152.

Geller R.J. Earthquake prediction: a critical review // *Geophysical Journal International*. 2007. Vol. 131, No. 3. P. 425–450. doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb06588.x

Golitsyn G.S. Earthquakes from the standpoint of similarity theory // *Doklady Earth Sciences*. 1996. Vol. 346, No. 4. P. 563–539.

Gomberg J., Rubinstein J.L., Peng, Z.G., Creager K.C., Vidale J.E., Bodin P. Widespread triggering of nonvolcanic tremor in California // *Science*. 2008. Vol. 319, No. 5860. P. 173. doi.org/10.1126/science.1149164.

Gudmundsson A., Mohajeri N. Relations between the scaling exponents, entropies, and energies of fracture networks // *Bulletin de la Societe Geologique de France*. 2013. Vol. 184, No. 4–5. P. 373–382. doi.org/10.2113/gssgfbull.184.4-5.373.

Guo Y., Zhuo Y., Liu P., Chen S., Ma J. Experimental study of observable deformation process in fault meta-instability state before earthquake generation // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2020. Vol. 11, No. 2. P. 417–430. doi.org/10.5800/GT-2020-11-2-0483.

Gzovsky M.V. *Fundamentals of tectonophysics*. Nauka, Moscow, 1975. 536 pp. [Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.]

Idehara K., Yabe S., Ide S. Regional and global variations in the temporal clustering of tectonic tremor activity // *Earth Planets Space*. 2014. Vol. 66, No. 66. doi.org/10.1186/1880-5981-66-66.

Kagan Y.Y. Are earthquakes predictable? // *Geophysical Journal International*. 1997. Vol. 131. P. 505–525. doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb06595.x.

Katsumata A., Kamaya N. Low-frequency continuous tremor around the Moho discontinuity away from volcanoes in the southwest Japan // *Geophysical Research Letters*. 2003. Vol. 30, No. 1. P. 1020. doi:10.1029/2002GL0159812.

Kondepudi, D., Prigogine, I., 1998. *Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures: Second Edition*. John Wiley and Sons, Oxford, 506 pp.

Ma J., Guo Y, Sherman S. I. Accelerated synergism along a fault: A possible indicator for an impending major earthquake // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2014. Vol. 5, No. 2. P. 387–399. doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0134.

Ma J., Sherman S.I., Guo Y.S. Identification of meta-instable stress state based on experimental study of evolution of the temperature field during stick-slip instability on a bending fault // *Science China Earth Sciences*. 2012. Vol. 55. P. 869–881. doi.org/10.1007/s11430-012-4423-2.

- Myachkin V.I., Kostrov B.V., Sobolev G.A., Shamina O.G. Fundamentals of the physics of earthquake foci and fore-runners. In M.A. Sadovsky (Ed.), *Physics of Earthquake Focus*. Nauka, Moscow, 1975. P. 6–29 [Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Основы физики очага и предвестники землетрясений // Физика очага землетрясения. М.: Наука. 1975. С. 6–29.].
- Nadeau R.M., Dolenc D. Nonvolcanic tremors deep beneath the San Andreas Fault // *Science*. 2005. Vol. 307, No. 389. doi.org/10.1126/science.1107142.
- Obara K., Hirose H. Non-volcanic deep low frequency tremors accompanying slow slips in the southwest Japan subduction zone // *Tectonophysics*. 2006. Vol. 417, No. 1–2. P. 33–51. doi.org/10.1016/j.tecto.2005.04.013.
- Olami Z, Feder H.J.S, Christensen K. Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automaton modeling earthquakes // *Physical Review Letters*. 1992. Vol. 68. P. 1244–1247. doi.org/10.1103/PhysRevLett.68.1244.
- Panteleev I., Plekhov O., Pankov I., Evseev A., Naimark O., Asanov V. Experimental investigation of the spatio-temporal localization of deformation and damage in sylvinite specimens under uniaxial tension // *Engineering Fracture Mechanics*. 2014. Vol. 129. P. 38–44. doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.08.004.
- Peng Z., Gombert J. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena // *Nature Geoscience*. 2010. Vol. 3, No. 9. P. 599–607. doi.org/10.1038/ngeo940.
- Pushcharovsky Yu.M. Non-linear geodynamics (author's credo) // *Geotectonics*. 1993. Vol. 1. P. 3–7.
- Rogers G., Dragert H. Episodic tremor and slip on the Cascadia subduction zone: The chatter of silent slip // *Science*. 2003. Vol. 300, No. 5627. P. 1942–1943. doi.org/10.1126/science.1084783.
- Rosenau M., Lohrmann J., Oncken O. Shocks in a box: An analogue model of subduction earthquake cycles with application to seismotectonic forearc evolution // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114, No. B01409. doi.org/10.1029/2008JB005665.
- Rosenau M., Corbi F., Dominguez S. Analogue earthquakes and seismic cycles: experimental modelling across timescales // *Solid Earth*. 2017. Vol. 8, 597–635. doi.org/10.5194/se-8-597-2017.
- Sadovsky M.A., Balhovitinov L.G., Pisarenko V.F. Seismic processes in geophysical media // *Izvestiya Physics of the Earth*. 1982. Vol. 12. P. 3–18.
- Sekine S., Hirose H., Obara K. Along-strike variations in short-term slow slip events in the southwest Japan subduction zone // *Journal of Geophysical Research*. 2010. Vol. 115. P. B00A27. doi.org/10.1029/2008JB006059.
- Shelly D.R., Beroza G.C., Ide S. Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms // *Nature*. 2007. Vol. 446, No. 7133. P. 305–307. doi.org/10.1038/nature05666.
- Seminsky K.Zh. Structural and Mechanical Properties of Clayey Pastes as Model Material in Tectonic Experiments. Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, Irkutsk, 1986. 130 pp. VINITI 13.08.86. 5762–B86 [Семинский К.Ж. Структурно-механические свойства глинистых паст как модельного материала в тектонических экспериментах. Иркутск: ВИНТИ, 1986. № 5762 (В 86). 130 с.].
- Seminsky K.Zh. The Internal Structure of Continental Fault Zones. Tectonophysical Aspect. GEO, Novosibirsk, 2003. 244 pp. [Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектоно-физический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2003. 244 с.].
- Seminsky K.Zh. Hierarchy of the zone-block structure of the lithosphere of Central and East Asia: the ratio between the size of fault zones and blocks at different levels of the hierarchy // *Russian Geology and Geophysics*. 2008. Vol. 49, No. 10. P. 1018–1030. doi.org/10.1016/j.rgg.2007.11.017.
- Sherman S.I. Physical experiment in tectonics and the theory of similarity // *Russian Geology and Geophysics*. 1984. Vol. 3. P. 8–18. [Шерман С.И. Физический эксперимент в тектонике и теория подобия // Геология и геофизика. 1984. № 3. С. 8–18.].
- Sherman S.I., Seminsky K.Zh., Borneyakov S.A., et al. *Faulting in the Lithosphere. Shear Zones*. Nauka, Novosibirsk, 1991. 261 pp. [Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др. Разломобразование в литосфере: зоны сдвига. Новосибирск: Наука, 1991. 260 с.].
- Sutton M.A., Ortu J.J., Schreier H.W. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*. Springer, 2009. 316 pp.
- Stoyanov S.S. *Fault Zone Formation Mechanisms*. Nedra, Moscow, 1977. 114 pp. [Стоянов

C.C. Механизм формирования разрывных зон. М.: Недра, 1977. 143 с.]

Tchalenko J.S. Similarities between shear zones of different magnitudes // Geological Society of America Bulletin. 1970. Vol. 81, No. 6. P. 1625–1640. doi.org/10.1130/0016-7606(1970)81[1625:SBSZOD]2.0.CO;2.

Tocher D. Earthquake energy and ground breakage // Bulletin of the Seismological Society of America. 1958. Vol. 48, No. 2. P. 147–153. doi.org/10.1785/BSSA0480020147.

Turcotte D.L. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K., 1997. 410 pp. doi.org/10.1017/CBO9781139174695.

Wei M., Kaneko Y., Liu Y., McGuire J.J. Episodic fault creep events in California controlled by shallow frictional heterogeneity // Nature Geoscience. 2013. Vol. 6, 1–5. doi.org/10.1038/ngeo1835.

Weijermars R., Schmeling H. Scaling of Newtonian and non-Newtonian fluid dynamics without in-

ertia for quantitative modelling of rock flow due to gravity (including the concept of rheological similarity) // Phys. Earth Planet. Inter. 1986. Vol. 43, No. 4. P. 316–330. doi.org/10.1016/0031-9201(86)90021-X.

Wilcox R.E., Harding T.P., Seely D.R. Basic wrench tectonics // AAPG Bulletin. 1973. Vol. 57. P. 74–96.

Zubarev D.N., Morozov V.G., Repke G. Statistical mechanics of non-equilibrium processes. Fizmatlit, Moscow, 2002. 431 pp. [Зубарев Д.Н., Морозов В.Г., Репке Г. Статистическая механика неравновесных процессов. Физматлит, Москва, 2002. 431 с.]

Zhuo, Y. Q., Guo, Y. S., Ji, Y. T., et al. Slip synergism of planar strike-slip fault during meta-instable state: Experimental research based on digital image correlation analysis // Science China Earth Sciences. 2013. Vol. 56. P. 1881–1887. doi.org/10.1007/s11430-013-4623-4.

email: pia@icmm.ru.

Panteleev Ivan Alexeevich,
candidate of geological and mineralogical sciences,
Institute of Continuous Media Mechanics, Ural
Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm,
Russia,
Senior Researcher,
email: pia@icmm.ru.

Жуо Ян-Цун,
доктор наук,
Институт геологии Сейсмологического бюро
Китая, Пекин, Китай,
научный сотрудник,
email: zhuoyq@ies.ac.cn.

Zhuo Yan-Qun,
Doctor of science,
Institute of Geology, China Earthquake Administration,
Beijing, China,
Researcher,
email: zhuoyq@ies.ac.cn.

Добрынина Анна Александровна,
кандидат геолого-минералогических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН, Иркутск,
Ученый секретарь,
Геологический институт им. Н.Л. Добрецова
СО РАН, Улан-Удэ,
тел.: 83952426900, 89501200270,
email: scisecretary@crust.irk.ru.
Dobrynina Anna Alexandrovna,

Борняков Сергей Александрович,
кандидат геолого-минералогических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
ведущий научный сотрудник,
email: bornyak@crust.irk.ru.

Bornnyakov Sergey Alexandrovich,
candidate of geological and mineralogical sciences,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Leading Researcher,
email: bornyak@crust.irk.ru.

Го Яншун,
доктор наук,
Институт геологии Китайского управления по
землетрясениям, Пекин, Китай,
научный сотрудник,
email: guoysh@ies.ac.cn.

Guo Yanshuang,
Doctor of science,
Institute of Geology, China Earthquake Administration,
Beijing, China,
Researcher,
email: guoysh@ies.ac.cn.

Пантелеев Иван Алексеевич,
кандидат геолого-минералогических наук,
Институт механики сплошных сред УрО РАН,
Пермь, Россия,
старший научный сотрудник,

*candidate of geological and mineralogical sciences,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Scientific secretary,
email: scisecretary@crust.irk.ru.*

Саньков Владимир Анатольевич,
*кандидат геолого-минералогических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН, Иркутск,
заместитель директора по науке,
664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет, гео-
логический факультет,
доцент,
email: sankov@crust.irk.ru.*

Sankov Vladimir Anatolevich,
*candidate of geological and mineralogical sciences,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Deputy Director for Science,
664003 Irkutsk, Lenin str., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Assistent Professor,
email: sankov@crust.irk.ru.*

Салко Денис Владимирович,
*664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН, Иркутск,
инженер,
email: salko@crust.irk.ru.*

Salko Denis Vladimirovich,
*664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,*

*Engineer,
email: salko@crust.irk.ru*

Шагун Артем Николаевич,
*кандидат геолого-минералогических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН, Иркутск,
ведущий инженер,
email: shagun@crust.irk.ru.*

Shagun Artem Nikolaevich,
*candidate of geological and mineralogical sciences,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Lead Engineer,
email: shagun@crust.irk.ru.*

Каримова Анастасия Алексеевна,
*кандидат геолого-минералогических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН, Иркутск,
младший научный сотрудник,
Иркутский государственный университет, Ир-
кутск,
ст. преподаватель,
email: geowomen_nasty@mail.ru.*

Karimova Anastasia Alekseevna,
*candidate of geological and mineralogical sciences
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Junior Researcher,
664003 Irkutsk, Lenin str., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Senior Lecturer,
email: geowomen_nasty@mail.ru.*

Косейсмические временные вариации термофильного элемента Si подземных вод западного побережья оз. Байкал в 2012–2022 гг.

А.М. Ильясова¹, С.В. Снопков^{2,3}

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

²*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*

³*Сибирская школа геонаук, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

Аннотация. Приводятся результаты мониторинга концентрации термофильного элемента Si в пресных субтермальных и холодных подземных водах Култукского полигона с температурным диапазоном на выходе от значений температуры, близких к 0 °С, до 20 °С. Выявляется последовательное зональное возрастание концентрации Si в резервуаре подземных вод полигона с центром на ст. 40. В подземных водах этой станции по кремниевому (халцедоновому) геотермометру получается минимальная температура 25 °С 17 сентября 2014 г. (перед землетрясениями 2014–2015 гг.) и максимальная температура 60 °С 23 января 2021 г. (через 11 дней после сильнейшего Хубсугульского землетрясения, $M_w=6.8$). Предполагается, что подземные воды поступали из области резервуара с повышенной температурой во время сильной Култукской сейсмической активизации (27 августа 2008 г. – 04 января 2011 г.) и сменялись подземными водами с меньшей температурой во время слабой Толбазихинской активизации (24 июня 2011 г. – 11 октября 2012 г.) при достижении температурного минимума к 2014 г. Затем поступление подземных вод с повышенной температурой вновь возрождалось при подготовке и реализации Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации, обозначившейся сильными землетрясениями 2020–2022 гг.

Ключевые слова: подземные воды, мониторинг, землетрясения, Байкал.

Coseismic temporal variations of thermophilic element Si in groundwaters from the SW coast of Lake Baikal in 2012–2022

A.M. Ilyasova¹, S.V. Snopkov^{2,3}

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

²*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

³*Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University, Leading Researcher, Irkutsk, Russia*

Abstract. The results of monitoring concentrations of the thermophilic element Si in fresh subthermal and cold groundwaters from the Kultuk polygon with a temperature range at the output from ca. 0 to 20 °C are presented. A stepwise zonal increase in the Si concentration is recognized in groundwaters of the polygon centered at station 40. In this center of the Kultuk hydrothermal reservoir, the minimum temperature of 25 °C on September 17, 2014 (before the earthquakes of 2014–2015) and the maximum temperature of 60 °C on January 23, 2021 (11 days after the strongest Khubsugul earthquake $M_w=6.8$) is obtained using the chalcedony geothermometer. It is proposed that groundwater came from the deep Kultuk reservoir with elevated temperature during the strong Kultuk seismic reactivation (August 27, 2008 – January 04, 2011) and changed to those with a lower temperature during the weak Tolbazikha one (June 24, 2011 – October 11, 2012) reaching a temperature minimum by 2014. Then the inflow of groundwaters with elevated temperature was revived again during the preparation and implementation of the Baikal-Khubsugul seismic reactivation that was marked by strong earthquakes in 2020–2022.

Keywords: groundwater, monitoring, earthquakes, Baikal.

Введение

Континентальные рифтовые системы характеризуются сейсмичностью, повышенным тепловым потоком и вулканизмом (Милановский, 1976; Levitte, Eckstein, 1977; Kilty, Chapman, 1980; Kilty et al., 1979; Friedrichsen, 1981; Ehlers, Chapman, 1999). Сейсмические толчки, в сущности, обозначают переход в земной коре механической энергии в тепловую, нередко сопровождающуюся генерацией псевдотахилитов (Sibson, 1973, 1975, 1977; Cowan, 1999; Кочарян, 2016; Ружич и др., 2018; Rasskazov et al., 2021). При изучении природы геотермических аномалий предпринимались попытки связать их с конкретными сейсмическими событиями или региональной сейсмичностью (Пшенников, 1965).

В Байкальской рифтовой системе, объединяющей рифтовые впадины и вулканические поля позднего кайнозоя (Рассказов, 1993), термальная эволюция прослеживается в меняющейся роли вулканизма при развитии трансенсии в литосфере: в последние 30 млн лет в ее юго-западной части и в последние 16 млн лет – в северо-восточной (Рассказов, Чувашова, 2018). Повышенный тепловой поток в коре Байкальской рифтовой зоны – плиоцен-четвертичной полосы осевых поднятий и впадин (Логачев, 1977) – отражается в проявлении подземных термальных вод в структурах ее центральной части, в Баргузинской, Тункинской рифтовых долинах и на дне оз. Байкал (Пиннекер и др., 1968; Ломоносов, 1974; Голубев, 2007).

Сопоставления наблюдаемых величин теплового потока с региональной сейсмичностью Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий, выполненные в 1970-х годах (Лысак, Зорин, 1976; Лысак, Шерман, 1978; Лысак и др., 1978), дали коэффициенты корреляции тепловых потоков и сейсмической активности от 0.48 до 0.57, а при нелинейной связи – до 0.67. Позже обращалось внимание на то, что полученные результаты по совокупности пар значений теплового потока и сейсмичности в рифтовой зоне и вне ее не отражают степень корреляции параметров внутри рифтовой зоны.

При рассмотрении однородной совокупности данных внутри нее в качестве меры сейсмичности использовалась сейсмическая активность A_{10} (число землетрясений 10-го энергетического класса в расчете на 1000 км²/год) и средние значения этого параметра и теплового потока (q), рассчитывались для элементарных площадок размером 0.2° по широте и 0.3° по долготе. Для центральной части БРЗ коэффициенты корреляции между A_{10} и q , а также между $\lg A_{10}$ и q составили, соответственно, 0.20 и 0.23 (Голенецкий, Голубев, 1985; Голубев, 2007).

Несмотря на отсутствие корреляционной зависимости между тепловым потоком и сейсмической активностью, допускалось прямое влияние сейсмичности на тепловой режим земной коры в виде выделения тепла в самой очаговой зоне землетрясения при нарушении сплошности среды и предполагалось косвенное влияние сейсмичности на возникновение зон повышенной проницаемости, которые перераспределяют тепловой поток, идущий из глубин земли. Подчеркивалось, что «непосредственное воздействие энергии сейсмических событий на тепловой режим земной коры незначительно даже в самых сейсмоактивных регионах Земли» (Голубев, 2007, стр. 191–192). Отсутствие пространственной корреляции между этими процессами, по сути, свидетельствовало о существовании факторов, усложняющих взаимодействие между ними.

Земная кора испытывает всестороннее сжатие. Проникновение флюидов и термальных вод через земную кору в условиях сжатия затруднено и усиливается в условиях растяжения, что может благоприятно сказываться на рождении новых гидротермальных полей. Следовательно, в оценке сейсмической опасности территории определяющая роль должна отводиться изучению не только пространственных, но и временных вариаций температуры подземных вод. Гидротермальные аномалии, очевидно, генерируются в ограниченном временном интервале и первоначально могут возникать в результате рифтогенных тектонических движений холодной коры, а, следовательно, зависеть от активности разломов. В связи с этим пред-

ставляет интерес обнаружение косвенных (гидрогеохимических) и прямых признаков существенных вариаций температуры в подземных водах активных разломов в районе пос. Култук, на побережье западной оконечности оз. Байкал.

Эта территория была выбрана как область структурного сочленения Южно-Байкальской впадины и Тункинской долины в качестве основного мониторингового полигона для оценки сейсмической опасности в центральной части Байкальской рифтовой системы. При первоначальном определении станций мониторинга на полигоне анализировались временные вариации отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (ОА4/8) и концентрации U в подземных водах (Рассказов и др., 2015; Чебыкин и др., 2015). Затем в анализ временных рядов гидрогеохимических данных включались вариации активности ^{234}U (А4), концентраций Hg и Li, окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) (Рассказов и др., 2022; Чебыкин и др., 2022). Развитие деформаций коры в центральной части Байкальской сейсмической зоны рассматривалось в рамках полного сейсмогеодинамического цикла, проявившегося от Култукской до Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации. Первая началась с сильного Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. и продолжалась до 04 января 2011 г., вторая началась с сильного Быстринского землетрясения в ночь с 21 на 22 сентября 2020 г. и продолжается в настоящее время. При мониторинге подземных вод на Култукском полигоне в 2012–2022 гг. установлено снижение ОА4/8 и А4, свидетельствующее об относительном закрытии микротрещин (возрастании фактора сжатия коры), а затем – повышение этих параметров, отражающее открытие микротрещин (возрастании фактора растяжения коры). Сжатие реконструировано в середине сейсмогеодинамического цикла (в 2014–2015 г.), растяжение – при развитии Байкало-Хубсугульской активизации (в 2020–2022 гг.) (Чебыкин и др., 2022; Rasskazov et al., 2022).

В подземных водах Култукского полигона в настоящей работе проводится анализ временных вариаций термофильного эле-

мента Si подземных вод как гидрогеохимического показателя тепловых процессов в их резервуаре. Кремний широко использовался в предшествующих работах по оценке температурного состояния коры (Ломоносов, 1974; Голубев, 2007; и др.). Цель статьи – выяснить характер косейсмических вариаций термофильного элемента Si в ходе развития полного сейсмогеодинамического цикла.

Характеристика станций Култукского полигона

Полигон был организован в 2012–2015 гг. с первичным опробованием 43 водопунктов: родников, скважин, поверхностных водотоков и колодцев (Рассказов и др., 2015; Чебыкин и др., 2015). В последующие годы в опробование вовлекались дополнительные родники и скважины. К настоящему времени на полигоне насчитывается более 50 опробованных водопунктов.

Постоянный мониторинг подземных вод с частотой опробования в среднем один раз в 2 недели проводится более 10 лет на пяти основных станциях: на скважинах – станции 27 (Школа), 8 (Чертова Гора), 40 (Стрелка), 9 (Земляничный) и в роднике – ст. 14к (Ключ Тигунчиха). Основные мониторинговые станции занимают разное положение в активных разломах структурного сочленения Южно-Байкальской впадины и Тункинской долины и существенно расходятся между собой по гидрогеохимическим показателям подземных вод. Скважины имеют глубину от 60 до 120 м. Население пос. Култук ежедневно берет из них воду, обеспечивая эффективную прокачку. На выходе скважин, внутри помещений, установлены емкости. Например, на водокачке школы № 7 (ст. Школа) находятся 2 емкости по 1 м³. В течение дня вода этих емкостей многократно сменяется.

Параллельно со скважинами пос. Култук постоянно опробуются воды оз. Байкал из водозаборной трубы, опущенной на глубину 8 м на расстоянии 15 м от берега (ст. 11, 154 км КБЖД). Эта станция находится в зоне Обручевского разлома, в которой байкальская вода разбавляется подземными водами, просачивающимися в дне Байкала.

Часть станций полигона вовлекалась в повторное опробование подземных вод, но реже, чем на основных станциях. Частота опробования составляла один или два раза в год, иногда реже. Такие станции с общим трендом временных изменений компонентов подземных вод рассматриваются как вспомогательные. К ним относятся: ст. 38 (Вербное), 66 (Партизанское), 143 (Светофор КБЖД) и 29 (Медлянка).

Еще одна станция была вовлечена в опробование под номером 184 (ул. Школьная) в 2020–2022 гг. Она представляет собой 10-

метровую скважину, пройденную на месте бывшего родника. Ст. 184 располагается вместе с основными станциями 8 и 27 на Култукской тектонической ступени, наклоненной к востоку (в сторону Байкала). По частоте опробования и степени информативности ст. 184 приравнивается к основным мониторинговым станциям (Рассказов и др., 2022).

В целом временная информация о вариациях компонентов подземных вод на полигоне получается на 11 станциях (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения основных и вспомогательных станций гидрогеохимического опробования активных разломов на западном побережье оз. Байкал (Култукский полигон). Палеосейсмодислокации шовной зоны Главного Саянского разлома (ГСР) показаны по работе (Чипизубов, Смекалин, 1999).

Fig. 1. Scheme of the location of the main and supplementary stations for hydrogeochemical sampling of active faults on the western coast of Lake Baikal (Kultuk polygon). Paleoseismic dislocations of the suture zone of the Main Sayan Fault (ГСР) are shown after (Chipizubov, Smekalin, 1999).

Отбор, хранение и аналитические исследования природных вод

Для определения элементного состава проба воды 2 мл пропускается через фильтр 0.45 мкм и сразу фиксируется каплей

ультрачистой азотной кислоты. Для определения изотопов урана отдельно используется до 400 мл воды, из которой уран выделяется на ионно-обменной колонке. При отборе проб проводятся измерения атмосферного давления геодезическим аэрометром, темпе-

ратуры воды, ОВП и рН с использованием портативных приборов «Наппа» и «Эксперт».

Концентрация Si в воде может существенно снизиться в результате ее замораживания и оттаивания, поэтому замораживание исключается. Пробы хранятся в холодильнике при положительной температуре.

Для определения химического элементного состава образцы воды фильтруют через шприц-насадки с диаметром пор 0.45 мкм (Minisart 16555-K, ацетат целлюлозы, Sartorius Stedim Biotech GmbH, Германия) в предварительно взвешенные 2 мл полипропиленовые пробирки Эппендорфа (Axugen Scientific, Cat.-No. MST-200-C, США, Мексика), содержащие 40 мкл консерванта. В качестве консерванта используется концентрированная азотная кислота (70 %), дважды очищенная с помощью суббойлинговой системы перегонки кислот (Savillex DST-1000 sub-boiling distillation system, Япония), в которую добавляется индий (типично 1000 ppb) в качестве внутреннего стандарта. Аликвоты консерванта взвешиваются при добавлении в пробирки. Пробирки с отобранными образцами воды взвешивают и рассчитывают точное содержание азотной кислоты (типично 2 %) и индия (типично 30 ppb). В подготовленных растворах определяют содержание 72 химических элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСПР-МС) на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 (Чебыкин и др., 2012).

Изотопы урана определяются после его выделения на ионно-обменной колонке из отдельной пробы воды (до 400 мл). Детали методики приведены в работах (Чебыкин и др., 2007, 2015).

Si геотермометрия подземных вод

Полноценное применение геотермометров предполагает сохранение равновесия в системе вода–порода–газ, существующее в резервуаре подземных вод и сохраняющееся до их разгрузки на земной поверхности (Belhai et al., 2017). В природных подземных водах такие идеальные условия могут выполняться в исключительных случаях, кото-

рые нуждаются в соответствующей аргументации, поэтому изначально расчет температур с применением геотермометров представляет собой первое приближение к оценке температур резервуара.

По температурной зависимости концентрации растворенных веществ в подземных водах используются геотермометры катионной и кремниевой групп. Геотермометры катионной группы (например, Na–K–Ca) основаны на реакциях ионного обмена. Они применяются для температур более 100 °С. Кремниевые геотермометры используются для более широкого температурного диапазона. Они основаны на экспериментально определенных температурных изменениях растворимости в воде различных полиморфных модификаций кремнезема (кварца, халцедона, альфа-кристоболита, бета-кристоболита и аморфного кремнезема). В многочисленных публикациях обсуждаются различные варианты использования уравнений для разнотемпературных интервалов глубинного резервуара подземных вод. Считается, что кварцевый геотермометр может применяться для подземных вод с температурой 150–250 °С. Ниже этого температурного интервала содержание растворенного кремнезема, предположительно, контролируется халцедоном, но тоже ограничивается по температуре, выше него – геотермометр не калиброван (Karingithi, 2009; и др.).

В целом на результаты расчета температуры по растворимости кремния в воде влияет:

- неопределенность температурного диапазона, в котором применяются уравнения температур по содержанию кремния,
- эффект отделения пара,
- возможное осаждение кремния перед отбором пробы (из-за перенасыщения кремнием во время поднятия воды к поверхности) или после ее отбора (из-за ненадлежащего хранения образца),
- изменение рН,
- возможное разбавление горячей воды холодной до того, как термальная вода достигает поверхности.

В подземных водах Култукского полигона оценки температур по всем кремниевым геотермометрам не превышают 100 °С. При-

емлемые значения температуры получаются по халцедоновой модификации геотермометра (Arnorsson et al., 1983).

$$T = \frac{1112}{(4.91 - \log C)} - 273.15$$

где C – концентрация SiO_2 в мг/дм^3 ; T – температура в $^\circ\text{C}$. Учитывая фактор разбавления подземных вод слабо минерализованными (метеорными) водами, полученные значения рассматриваются как минимальные оценки температуры глубинного резервуара.

Диаграмма Si – Al

Подземные воды основных мониторинговых станций 40 и 14к, расположенных на палеосейсмодислокациях зоны ГСР, имеют перекрывающуюся концентрацию Si (около 7 мг/дм^3) при низкой концентрации Al (рис. 2а). От этого перекрытия составов концентрация Si в водах ст. 40 возрастает, а концентрация Si в водах ст. 14к, наоборот, снижается. При этом концентрация Al в подземных водах обеих станций повышается.

Подземные воды из палеосейсмодислокаций зоны ГСР могут иметь общий источник и различаться между собой по дополнительным компонентам. Один из них (на ст. 40) имеет повышенную температуру (более $25 \text{ }^\circ\text{C}$) и субтермальный характер, другой (ст. 14к) – пониженную (менее $25 \text{ }^\circ\text{C}$) и в целом представляет собой холодные подземные воды. Используя формулу определения глубины гидротермы

$$h = t_h / \text{grad}t = t_h / \gamma,$$

где γ – региональный геотермический градиент $25 \text{ }^\circ\text{C/км}$ (Голубев, 2007), получаем

оценку глубины перехода между компонентами субтермальных и холодных подземных вод (ст. 40 и 14к), равную 1 км. Такую глубину имеет оз. Байкал в западной части Южно-Байкальской впадины. В глубине образования подземных вод может проявляться фактор бокового отпора свободной поверхности пород земной коры, перекрытой водой озера. Максимальная температура, полученная для подземных вод ст. 40, составляет $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Она дает минимальную оценку глубины подземных вод глубинного резервуара 2.4 км.

Подземные воды ст. 184, включенной в опробование в 2020–2022 гг., дают тренд фигуративных точек возрастания Si от состава воды оз. Байкал при узком диапазоне Al малой концентрации. Точки расходятся в виде веера при концентрации Si более 9 мг/дм^3 (рис. 2б).

Подземные воды двух других основных станций Култукской тектонической ступени (27 и 8) имеют общий тренд возрастания Si от $\sim 5 \text{ мг/дм}^3$ при узком диапазоне Al, расходящийся при концентрации Si более 7.36 мг/дм^3 (рис. 2в).

Подземные воды основной ст. 9, расположенной в зоне Обручевского разлома, характеризуются в общем таким же трендом, а вспомогательной ст. 38, расположенной на ЮЗ Бортовом разломе, – только трендом Si в узком диапазоне низкой концентрации Al (рис. 2г).

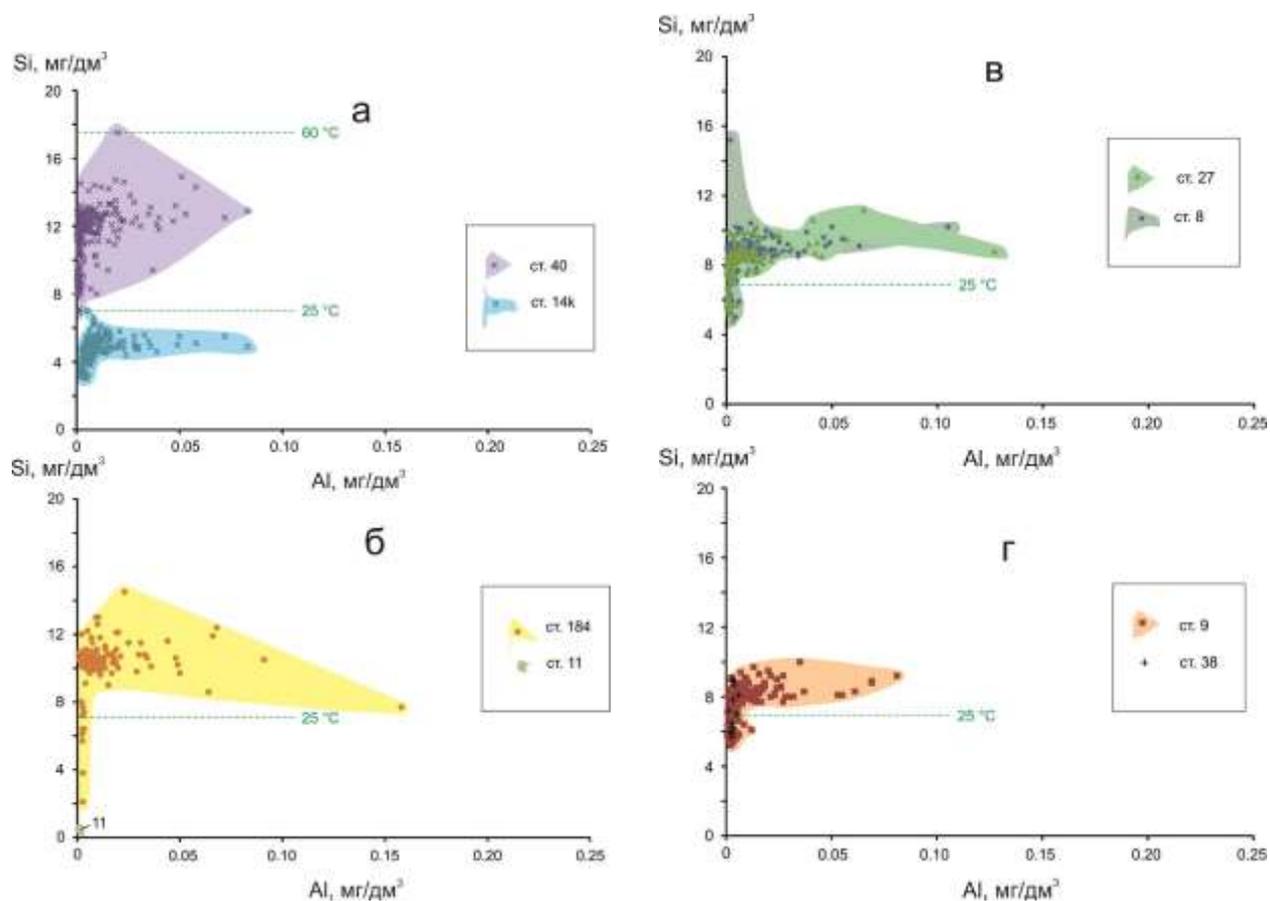


Рис. 2. Диаграммы Si – Al для подземных вод основных станций Култукского полигона: а – 40 и 14к зоны ГСР, б – ст. 184 Култукской тектонической ступени, наклоненной к востоку, и ст. 11 оз. Байкал, в – ст. 27 и 8 Култукской тектонической ступени и г – станций западных окончаний зон краевых разломов Южно-Байкальской впадины (Обручевского (ст. 9) и ЮЗ Бортового (ст. 38)). На этих и последующих диаграммах для подземных вод показаны температуры (°С) глубинного резервуара, рассчитанные по кремниевому (халцедоновому) геотермометру (Arnorsson et al., 1983).

Fig. 2. Diagrams of Si vs Al for groundwaters from the main stations of the Kultuk polygon: а – 40 and 14k of the ГСР zone, б – station 184 of the Kultuk tectonic step inclined to the east and station 11 of Lake Baikal, в – stations 27 and 8 of the Kultuk tectonic step, and г – stations of the western ends of the marginal fault zones of the South Baikal Basin (Obruchev (station 9) and SW Bortovoy (station 38)). These and subsequent diagrams for groundwaters show calculated temperatures (°C) using the silica (chalcedony) geothermometer (Arnorsson et al., 1983).

Соотношение температур в резервуаре и на выходе подземных вод

В подземных водах Култукского полигона определяется интервал измеренных температур на выходе от 0 до 20 °С. Таким образом, они относятся к холодным и субтермальным. На глубине их формирования по концентрации Si получают оценки температур, соответствующие термальным водам. Возникает вопрос, регистрируются ли в ходе мониторинга температуры, которые непо-

средственно отражают поднятие горячих порций вод с их выходом на земную поверхность до, во время и после землетрясений?

По измерениям в скважинах 8, 9 и 27 в 2020–2022 гг. регистрируется возрастание температуры подземных вод на выходе летом и снижение – зимой. Максимумы разбавления «горячим компонентом» обозначаются относительно минимальных сезонных температур. Не нарушен разбавлением «горячим компонентом» тренд со слабой дисперсией фигуративных точек ст. 9, полученный весной, летом и осенью 2021 г. Зи-

мой этого же и следующего температура возрастает с превышением предельно низких (зимних) значений в основном на 8–10 °С. В особых случаях температура повышается на 15 °С и более (рис. 3).

Максимальная температура (19–20 °С) получена на ст. 9 для трех эпизодов Байкало-Хубсугульской активизации: 13–31 марта 2021 г., 16 ноября 2021 г. и 09 марта 2022 г. Эти осенние и весенние максимумы значительно превышают летние температуры на выходе подземных вод этой станции. Начало и конец первого 19–20-градусного эпизода (13–31 марта 2021 г.) совпадает по времени, соответственно, с афтершоком умеренной силы ($K=12.6$) и более сильным афтершоком

($K=14.1$) Хубсугульского эпицентрального поля. Третий 19–20-градусный эпизод (09 марта 2022 г.) совпадает по времени с афтершоком Хубсугульского эпицентрального поля 07 марта 2022 г. ($K=11.8$). Более слабые температурные максимумы проявляются в эти же эпизоды на ст. 8 и 27. Следовательно, можно говорить о косейсмическом возрастании температуры на выходе этих скважин. Второй 19–20-градусный эпизод (16 ноября 2021 г.) ст. 9, однако, не сопоставляется с каким-либо землетрясением.

Один из невысоких максимумов температуры на выходе подземных вод ст. 9 (11.6 °С) совпадает с Кударинским землетрясением 10 декабря 2020 г. (рис. 3б). Но на выходе подземных вод ст. 8 и 27 это землетрясение, наоборот, обозначается относительным снижением температуры на фоне ее общего зимнего возрастания (рис. 3а,в). Таким образом, станции могут одновременно давать отклики на землетрясения не только с возрастанием, но и со снижением температуры на выходе подземных вод.

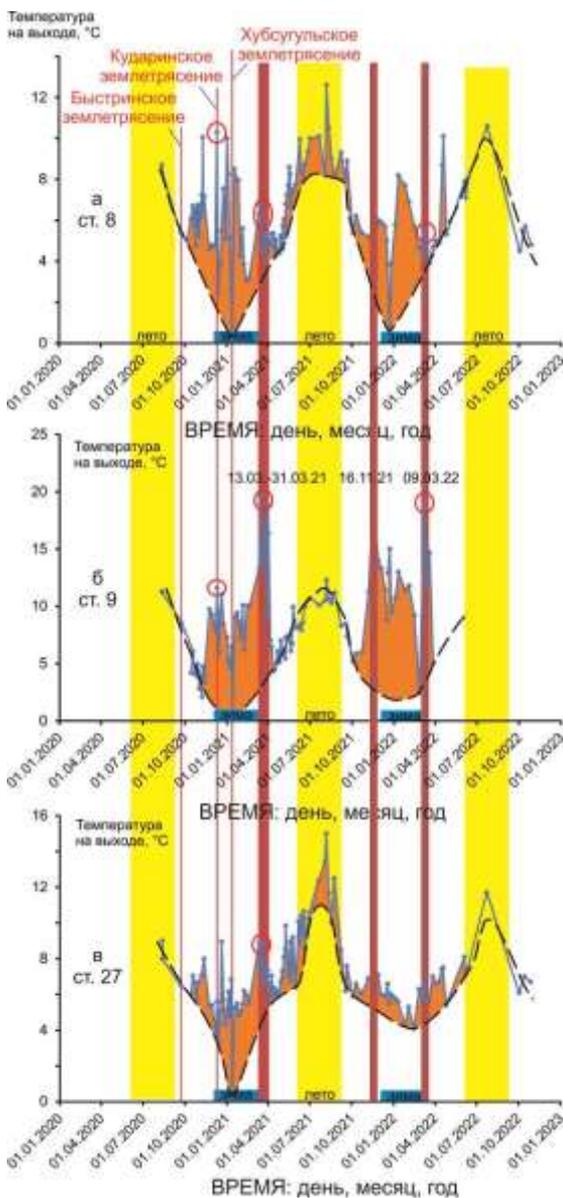


Рис. 3. Диаграмма временных вариаций измеренных температур на выходе подземных вод из скважин: а – ст. 8 (Чертובה гора); б – ст. 9 (Земляничный); в – ст. 27 (Школа). Вертикальные желтые полосы обозначают летние месяцы. Черная штриховая линия описывает сезонные минимальные температуры, относительно которых оранжевым цветом выделяется относительное возрастание температуры, связанное частично – с температурой поверхности земли (воздуха), частично – с разбавлением подземных вод «горячим глубинным компонентом». Красные овалы показывают повышенные температуры подземных вод, совпадающие по времени с землетрясениями, выбранными для анализа. Здесь и далее землетрясения приводятся по каталогу (Карта..., 2023).

Fig. 3. Diagram of temporal variations of measured temperatures at the output of groundwater from wells: а – station 8 (Devil's Mountain); б – station 9 (Strawberry); в – station 27 (School). Vertical yellow bars represent the summer months. The black dashed lines mark seasonal minimum temperatures, against which the relative increase in temperature is highlighted in orange. The red ovals show elevated groundwater temperatures that coincided in time with selected earthquakes. Here and afterwards, earthquakes are given after the catalog (Map..., 2023).

Три высоких максимума температуры на выходе ст. 9 (19–20 °С) имеют отклик в вариациях концентрации Si подземных вод ст. 8: в первом интервале средняя концентрация Si (9.0–9.5 мг/дм³) сменяется 05 апреля 2021 г. (через 5 дней) ее резким возрастанием до 10.1 мг/дм³ и 08 апреля (еще через 3 дня) снижением до 8.7 мг/дм³. Во втором эпизоде средняя концентрация Si (8.8 мг/дм³) сменяется 27 ноября 2021 г. (через 11 дней) резким снижением концентрации Si до 7.1 мг/дм³ (промежуточная проба, через 5 дней, не отбиралась). В третьем эпизоде средняя концентрация Si (8.5 мг/дм³) сменяется 12–19 марта 2022 г. (через 3 дня) снижением концентрации Si до 8.2 мг/дм³.

В косейсмическом температурном возмущении подземных вод ст. 8 и 9 в марте-апреле 2021 г. регистрируются фазы повы-

шения и снижения Si. На ст. 8 наблюдаются (рис. 4а): 1) фаза фоновой концентрации Si 20 марта 2021 г. (температура в резервуаре 33.2 °С), 2) фаза слабого нарушения фона с возрастанием Si 27 марта (возрастание температуры в резервуаре до 34.4 °С), 3) фаза снижения Si до фона одновременно с землетрясением, 4) фаза существенного возрастания Si после землетрясения (возрастание температуры в резервуаре до 37.9 °С), 5) фаза существенного снижения Si (снижение температуры в резервуаре до 32.4 °С), 6) фаза возрастания Si к новому фоновому уровню (температура в резервуаре до 36 °С). Температура на выходе ст. 8 меняется в пределах 4–6 °С, т.е. на протяжении марта-апреля 2021 г. воды остаются холодными (рис. 4б).

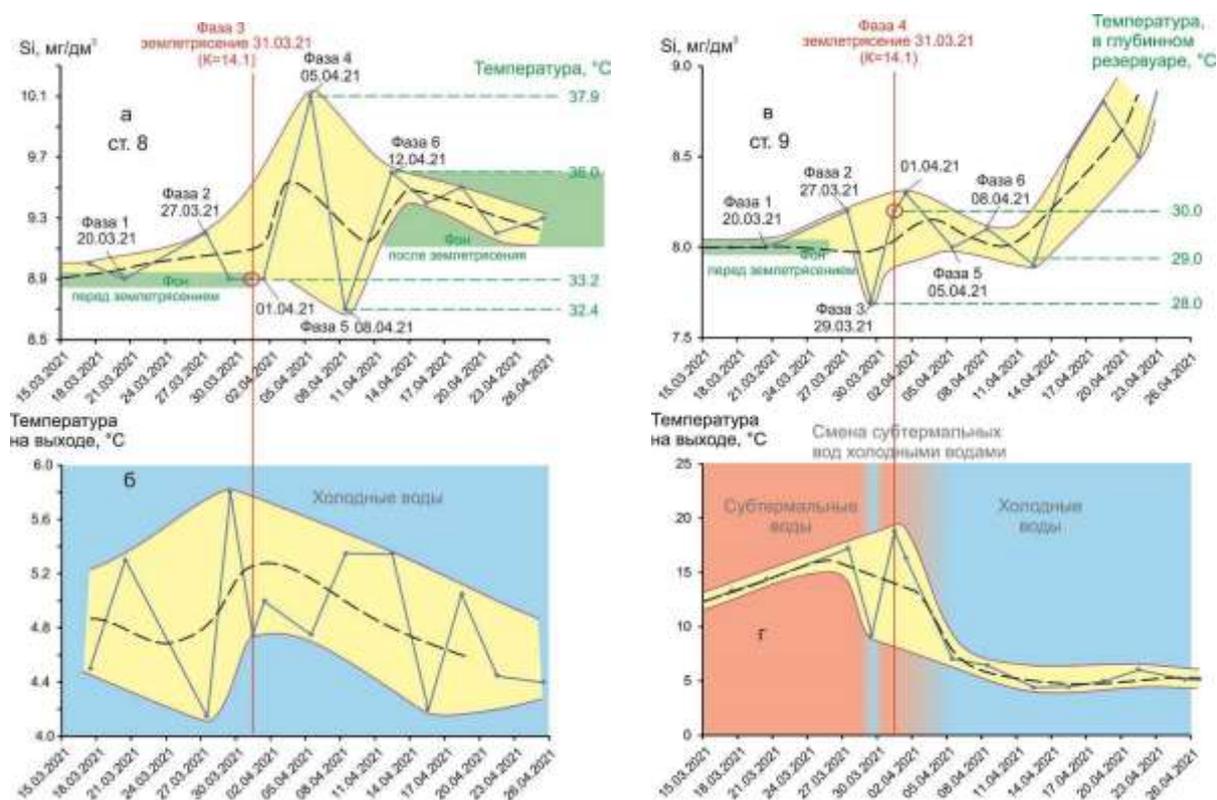


Рис. 4. Диаграмма временных вариаций концентрации Si (а, в) и измеренной температуры на выходе (б, г) в подземных водах из скважин ст. 8 и 9 в интервале от 15 марта до 26 апреля 2021 г. Вариации связаны с землетрясением 31 марта 2021 г. (K=14.1) в Хубсугульском эпицентральной поле (объяснение в тексте). Средние тренды временных вариаций концентрации Si и температуры на выходе аппроксимируются черными штриховыми линиями.

Fig. 4. Diagram of temporal variations in Si concentrations (а, в) and measured output temperatures (б, г) in groundwaters from wells (stations 8 and 9) in the interval from March 15 to April 26, 2021. Variations are associated with the earthquake on March 31, 2021 (K=14.1) in the Khubsugul epicentral field (explanation in the text). Average trends of temporal variations of Si concentrations and output temperatures are approximated by black dashed lines.

На ст. 9 наблюдаются (рис. 4в): 1) фаза фоновой концентрации Si 20 марта 2021 г. (температура в резервуаре около 29 °С), 2) фаза слабого нарушения фона с возрастанием Si 27 марта (температура в резервуаре 30 °С), 3) фаза заметного снижения Si 29 марта перед землетрясением (температура в резервуаре 28 °С), 4) фаза возрастания Si 31 марта (в день землетрясения) до уровня 27 марта (температура в резервуаре 30 °С), 5) фаза снижения Si к уровню, предшествовавшего землетрясению (к температуре в резервуаре около 29 °С), 6) фаза слабого возрастания Si, затухание возмущения. В дальнейшем наблюдается возрастание Si (до 8.8 мг/дм³), возможно, не связанное с возмущением землетрясения 31 марта. Температура на выходе ст. 9 перед землетрясением и во время его меняется в соответствии с фазами 1–4 вариаций Si, но уже на следующий день после землетрясения (01 апреля) начинает снижаться и из категории субтермальных вод переходит в категорию холодных вод (рис. 4г).

При сравнении результатов, полученных для ст. 8 и 9, можно видеть в обоих случаях нарушение фонового состояния гидротерм перед землетрясением 31 марта 2021 г. Ст. 9 получает порцию «горячего компонента» и в резервуаре, и на выходе подземных вод (перед землетрясением и во время его). Ст. 8 имеет более широкий диапазон вариаций температур глубинного резервуара (5.5 °С). Слабое возрастание концентрации Si фазы 2 соответствует возрастанию температуры выше фона на 1.2 °С, что сопоставляется с таким же синхронным возрастанием температуры в резервуаре ст. 9.

Синхронизация гидрогеохимических откликов концентрации U и ОА4/8 на разных станциях перед землетрясениями отмечалась прежде для случая реализации слабых сейсмических толчков вблизи Култукского полигона в 2014 г. (Расказов и др., 2015). В марте 2021 г. тепловые процессы ст. 8 и 9 синхронизируются перед сильным землетрясением ($K=14.1$), эпицентр которого располагался в 200 км западнее полигона, в Хубсугульском эпицентральной поле. Это свидетельствует о реализации сильного землетрясения в коре единой Байкало-Хубсугульской области.

Между тем, непосредственно перед землетрясением и во время него (29–31 марта) на ст. 8 и 9 уже намечается различие в поведении концентрации Si: на ст. 8 Si выходит на фоновый уровень (подпитка «горячим компонентом» отсутствует), а на ст. 9 падает ниже фона (29 марта), а при землетрясении (31 марта) вновь возрастает (получается порция «горячего компонента»). В дальнейшем различие между подземными водами станций усиливается. На ст. 8 развиваются контрастные вариации Si. На 5-й день после землетрясения получается порция подземных вод с существенным повышением концентрации Si (температура в резервуаре ст. 8 возрастает до максимального значения 37.9 °С), на 8-й день получается обратный эффект с понижением концентрации Si (температура в резервуаре снижается до минимального значения 32.4 °С) и только на 12-й день (12 апреля) температурные контрасты нивелируются, но при более высокой температуре относительно фона, предшествовавшего землетрясению. После 12 апреля температура в резервуаре ст. 8 начинает монотонно снижаться. В отличие от ст. 8, на ст. 9 контрасты концентрации Si нивелируются почти сразу после землетрясения одновременно со сменой подземных вод субтермального типа на выходе этой станции холодными водами.

На ст. 8 аппроксимирующая линия среднего временного тренда Si обозначает возрастание его концентрации, начавшееся до землетрясения от фонового значения 8.9 мг/дм³. Тренд проходит через всплеск гидротермального возмущения на повышенное значение около 9.4 мг/дм³ (рис. 4а). На ст. 9 аппроксимирующая линия среднего временного тренда Si проходит через всплеск гидротермального возмущения фактически на одном уровне и только через 12 дней после землетрясения идет на повышение (рис. 4в).

Наконец, нужно отметить весьма существенные вариации температуры на выходе подземных вод ст. 9 (общий диапазон 15 °С), тогда как в резервуаре они были на порядок меньше (не превышали 2 °С). Гидротермальный режим этой станции был чувствительным на выходе подземных вод, тогда как гидротермальный режим на выходе подземных вод ст. 8 фактически не претерпел

изменений. Подземные воды в марте и апреле 2021 г. оставались холодными.

В подземных водах ст. 184 (скважина на ул. Школьная) максимальная температура на выходе (9.35 °С) подземных вод 17 мая 2021 г. не сопровождается землетрясением, минимальная температура (0.34 °С) 12 января этого же года совпадает с сильнейшим Хубсугульским землетрясением. Максимумы концентрации Si соответствуют осенне-зимнему снижению температуры на выходе подземных вод.

К 2020 г. концентрация Si подземных вод этой станции достигает среднего (фоновая) уровня 10.5 ± 0.5 мг/дм³. В первой половине 2020 г. наблюдается концентрация на нижнем пределе фона и слабое возрастание Si к его среднему значению (от 10 до 10.5

мг/дм³). В конце 2020 г. и в начале 2021 г. выявляются два последовательных всплеска концентрации Si: первый – до 12.5 мг/дм³, второй – до 14.5 мг/дм³. Всплески Si охватывают временной интервал с 28 декабря 2020 г. до 02 февраля 2021 г., в котором происходит сильнейшее Хубсугульское землетрясение Байкало-Хубсугульской активизации. После временного интервала снижения концентрации Si до фоновых значений (07 февраля – 29 февраля 2021 г.) следует интервал чередующихся повышенных и пониженных значений в расширенном (по сравнению с фоном) диапазоне (31 марта – 19 мая 2021 г.), сменяющийся узким трендом снижения концентрации (25 мая – 27 июня 2021 г.). Затем концентрация Si скачкообразно поднимается до верхнего предела фоновых значений (21 июля – 11 августа 2021 г.) и резко падает (21 июля – 11 августа 2021 г.). В конце 2021 г. намечается максимум, переходящий в 2022 г. в минимум.

Температура в резервуаре ст. 184 по халцедоновому геотермометру составляет в основном около 40 °С и несколько ниже этого значения с отклонениями в верхнем пределе до 52.2 °С 04 февраля 2021 г. и в нижнем пределе – до 28 °С 04 июня 2022 г. Высокая температура в резервуаре определяется также 28 декабря 2020 г. – 1 января 2021 г. (47.7 °С) и во время Хубсугульского землетрясения 12 января 2021 г. (46.5 °С).

Для подземных вод ст. 184 примечательны две особенности: эпизод частых инверсий Si (max–min) в апреле – первой половине мая 2021 г. и последовательное снижение концентрации Si в течение 2020–2022 гг. (рис. 5).

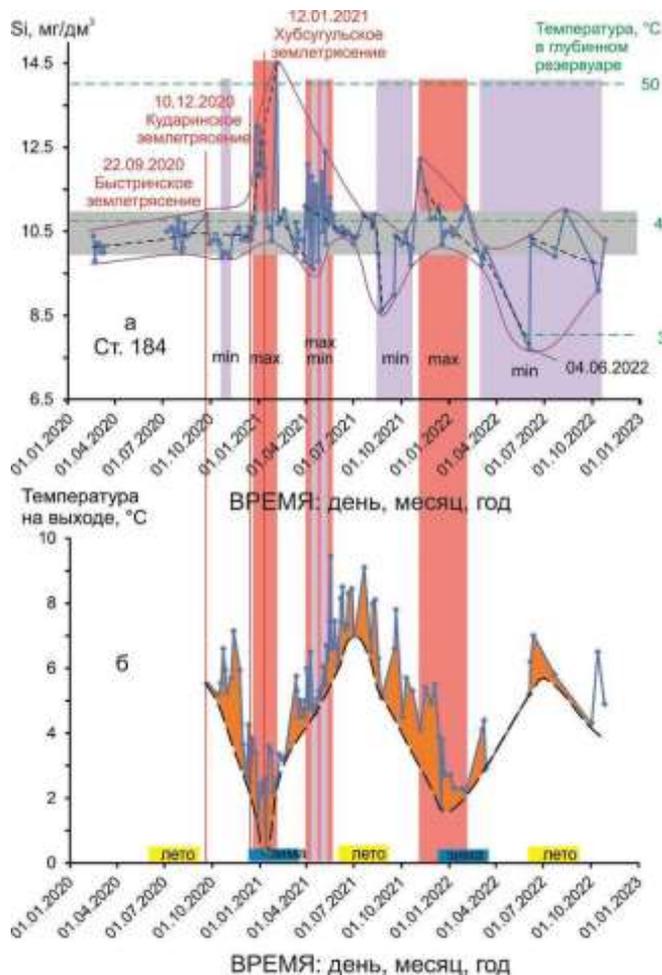


Рис. 5. Диаграмма временных вариаций Si в подземных водах ст. 184 (ул. Школьная) в 2020–2022 гг. (а) и измеренных температур на выходе подземных вод из скважины (б). Условные обозначения см. на рис. 3. На панели а средняя (фоновая) концентрация Si в подзем-

ных водах составляет 10.5 ± 0.5 мг/дм³. Сиреневая вертикальная полоса (min) обозначает интервал концентрации Si ниже фона, розовая вертикальная полоса (max) – интервал концентрации Si выше фона, чередование разноцветных полос (max–min) – интервал перемежающихся повышенных и пониженных значений в расширенном (по сравнению с фоном) диапазоне. На панели б показано сезонное возрастание и снижение температуры на выходе подземных вод. Меженные максимумы концентрации Si панели а соответствуют минимумам температуры на панели б.

Fig. 5. Diagram of temporal variations of Si in groundwaters of station 184 (Station Shkolnaya) in 2020–2022 (a) and measured temperatures at the groundwater output from this well (б). Symbols are as in Fig. 3. In panel a, the average (background) concentration of Si in groundwater is $10.5 \pm 0.5 \text{ mg/dm}^3$. Lilac vertical stripe (min) indicates interval of Si concentration below the background, pink vertical stripe (max) indicates interval of Si concentration above the background, the alternation of multi-colored stripes (max–min) indicates interval of alternating increased and decreased values in an extended (compared to the background) range. Panel б shows seasonal increase and decrease in temperature at output of groundwater. The low-water maxima of the Si concentration in panel a correspond to the temperature minima in panel б.

В подземных водах ст. 14к (Ключ Тигунчиха) весьма отчетливо выражены сезонные вариации температуры. Максимальная температура на излив 18–20 июня 2021 г. превышает $8 \text{ }^\circ\text{C}$, а минимальная температура на

изливе 02 января и 22 декабря 2021 г. составляет $0.1\text{--}0.2 \text{ }^\circ\text{C}$. Максимумы Si соответствуют и минимумам, и максимумам температуры на изливе (рис. 6).

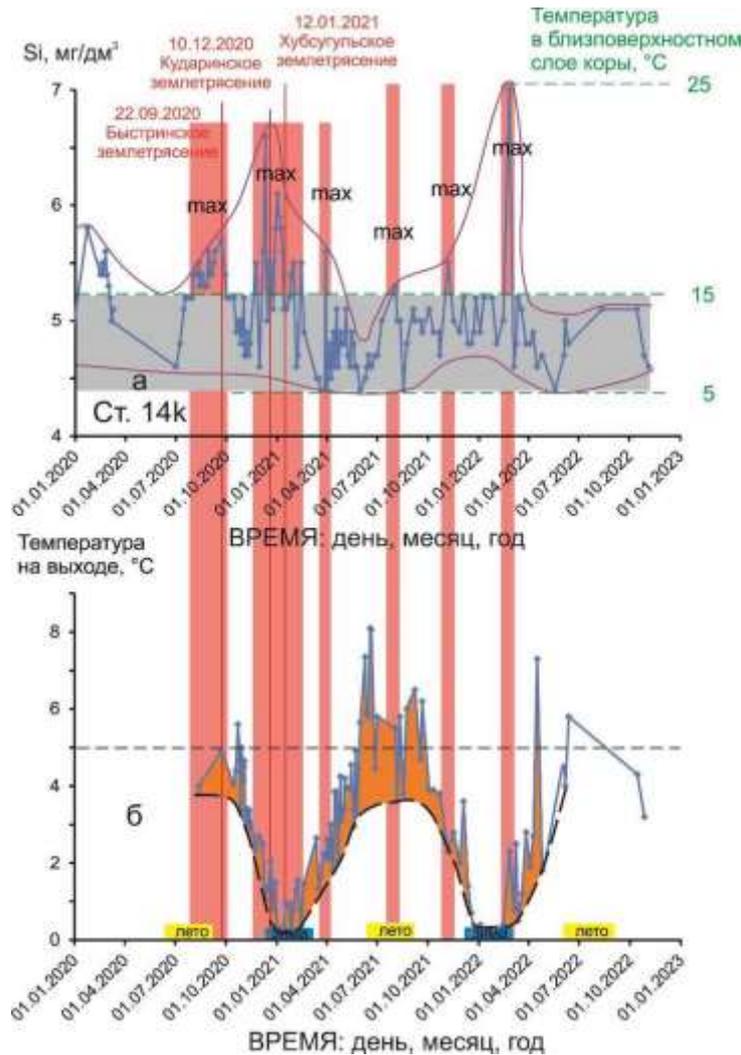


Рис. 6. Диаграмма временных вариаций Si в близповерхностных подземных водах ст. 14к (Ключ Тигунчиха) в 2020–2022 гг. (а) и измеренных температур на излив (б). Условные обозначения см. на рис. 3. На панели а преобладающая (фоновая) концентрация Si в подземных водах составляет $4.4\text{--}5.2 \text{ mg/dm}^3$. Розовыми полосами выделяются меженные максимумы Si (max): симметричный 02 августа 2020 – 29 марта 2021 г. и ассиметричный 06 ноября 2021 г. – 25 февраля 2022 г. На панели б наблюдаются сезонные вариации измеренных температур на излив родниковых вод: снижение – зимой и возрастание – летом.

Fig. 6. Diagram of temporal variations of Si in groundwater from station 14k (Spring Tigunchikha) in 2020–2022 (a) and measured temperatures at this groundwater output (б). Symbols are as in Fig. 3. In panel a, the

predominant (background) concentration of Si in groundwater is 4.4–5.2 mg/dm³. Low-water maxima Si (max) are highlighted by pink stripes: symmetrical on August 02, 2020 – March 29, 2021 and asymmetric on November 06, 2021 – February 25, 2022. Panel б shows seasonal variations in measured temperatures at output of spring waters: a decrease in winter and an increase in summer.

На ст. 40 (Стрелка) максимальная температура на выходе подземных вод 17 августа 2021 г. составляет 17.3 °С, минимальная температура 12 января 2021 г. – около 0.3 °С. (совпадает с Хубсугульским землетрясением). Такая же низкая температура определяется 02 января 2022 г. Температурный минимум 12 января 2021 г. сдвигается относительно единственного ярко выраженного

максимума Si=17.5 мг/дм³ (23 января 2021 г.). Во время температурного минимума 02 января 2022 г. преобладает тенденция к снижению концентрации Si (рис. 7). Частые инверсии Si (min–max) в подземных водах ст. 40 с 01 апреля до 15 мая 2021 г. совпадают по времени с такими же частыми инверсиями Si в подземных водах ст. 184, продолжающимися с 31 марта до 19 мая 2021 г.

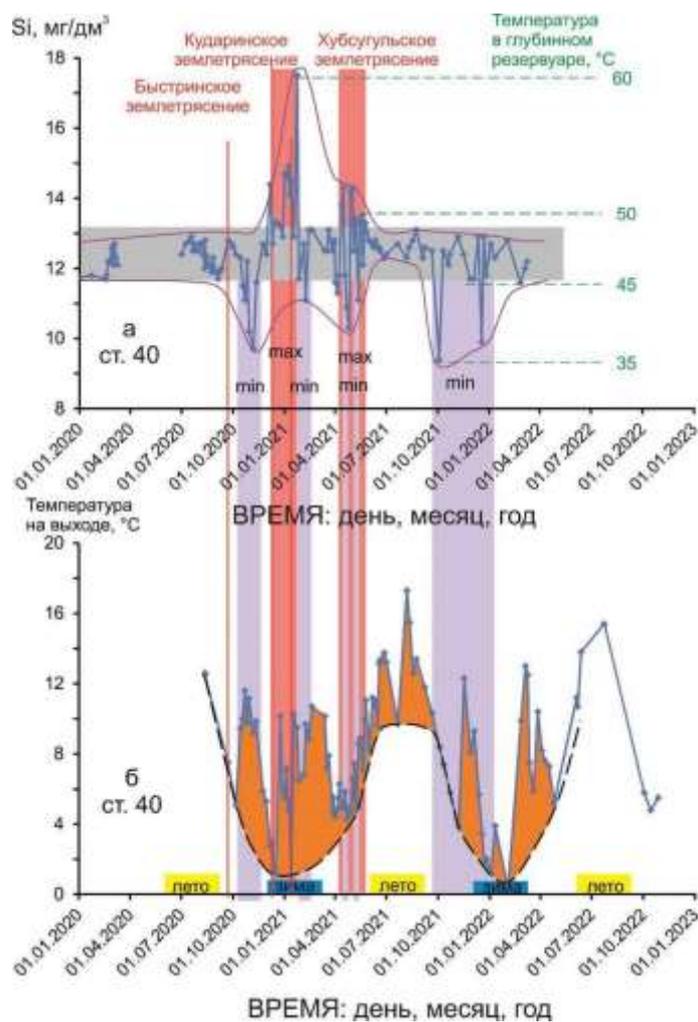


Рис. 7. Диаграмма временных вариаций Si в подземных водах ст. 40 (Стрелка) в 2020–2022 гг. (а) и измеренных температур на выходе подземных вод (б). Условные обозначения см. на рис. 3.

Fig. 7. Diagram of temporal variations of Si in groundwaters from station 40 (Strelka) in 2020–2022 (a) and measured groundwater output temperatures (б). Symbols are as in Fig. 3.

Временные вариации Si в 2012–2022 гг.

На диаграммах рис. 8 выявляется временное возрастание Si на шести основных мо-

нитринговых станциях Култукского полигона. Содержание Si подземных вод повышается ступенчато с подразделением на ранний, средний и поздний временные интервалы. Наиболее низкие ступени реги-

стрируются в раннем временном интервале (2012–2015 гг.), наиболее высокие – в позднем (2019–2022 гг.), промежуточные ступени – в среднем временном интервале (2015–2019 гг.). Скачок концентрации Si от раннего к среднему интервалу происходит после Голоустного землетрясения (5 сентября 2015 г.). Резкие повышения концентрации Si в среднем временном интервале на основных станциях (23 июня – 10 сентября 2016 г. и 20 июня – 02 июля 2019 г.) не имеют конкретной привязки к сейсмическим событиям. В

подземных водах ст. 40 намечаются промежуточные слабо выраженные ступени (например, 19 марта – 18 июня 2017 г.) (рис. 8г). Поздний временной интервал соответствует Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации, в начале которой произошли Быстринское, Кударинское и Хубсугульское землетрясения 2020–2021 гг. Во время активизации регистрируется расширение диапазона вариаций Si с импульсным возрастанием и снижением концентрации этого элемента.

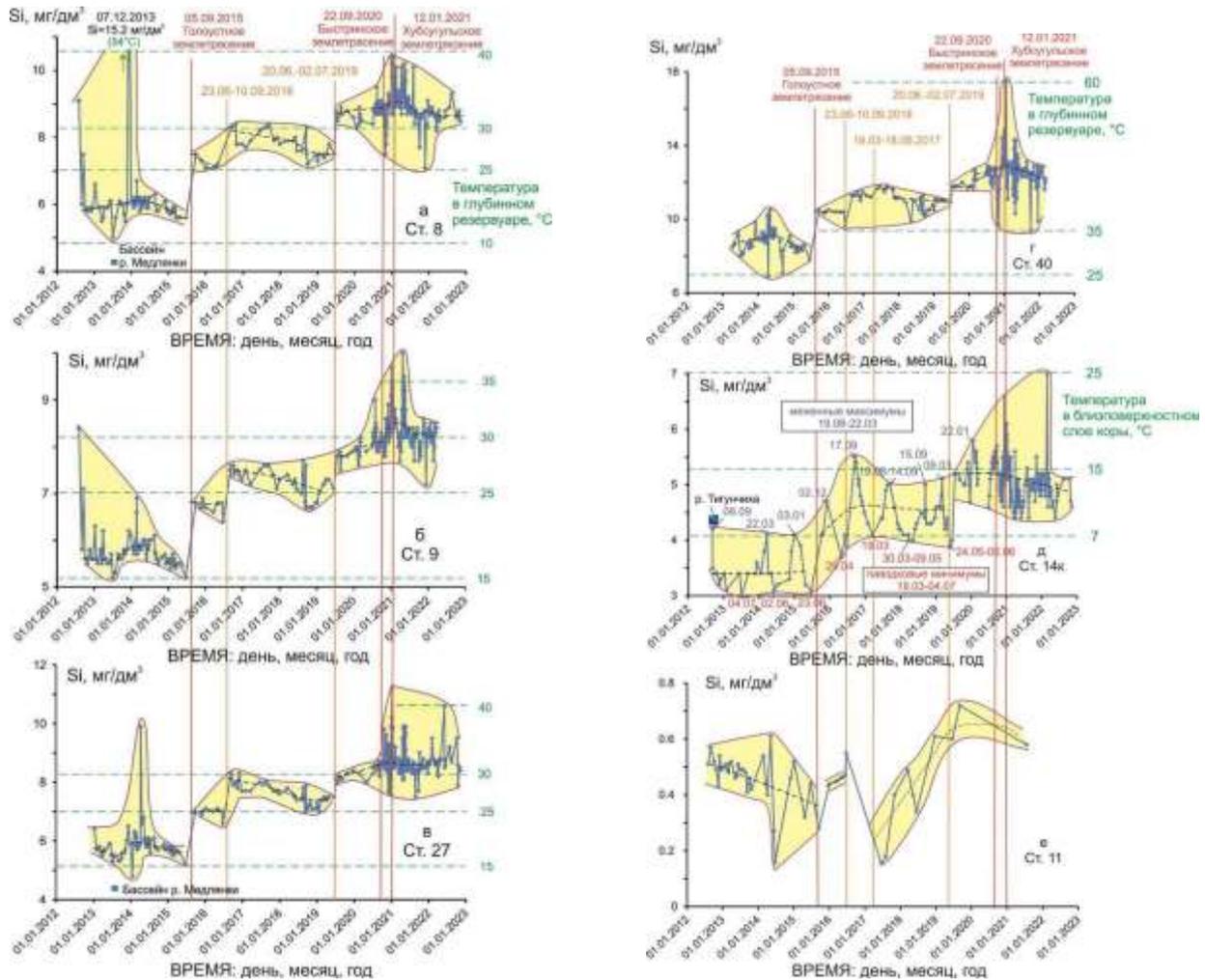


Рис. 8. Диаграммы временных вариаций Si в подземных водах основных мониторинговых станций Култукского полигона: а – ст. 8 (Чертова Гора), б – ст. 9 (Земляничный), в – ст. 27 (Школа), г – ст. 40 (Стрелка), д – ст. 14к (Ключ Тигунчиха) и е – ст. 11 (154 км КБЖД).

Fig. 8. Diagrams of temporal variations of Si in groundwaters from the main monitoring stations of the Kul-tuk polygon: а – station 8 (Devil's Mountain), б – station 9 (Strawberry), в – station 27 (School), г – station 40 (Strelka), д – station 14k (Spring Tigunchikha) and е – station 11 (154 km of the Circum-Baikal Railway).

В пределах обозначенных ступеней преобладающие концентрации Si часто выдерживаются на одном уровне или плавно меняются без предпочтительного снижения или возрастания. Такие ступени характерны

для подземных вод ст. 40, имеющих наиболее высокую концентрацию Si: на самой низкой ступени 2013–2015 гг. – около 9 мг/дм³, на самой высокой ступени 2020–2022 гг. – около 12 мг/дм³ (рис. 8г). В под-

земных водах других станций наблюдается сочетание ступеней единого уровня Si и скачкообразного возрастания концентрации, сменяющегося ее плавным снижением. В подземных водах станций 8, 9 и 27 (рис. 8а–в) ступени первого типа регистрируются в начале и в конце наблюдений (в 2012–2015 и 2019–2022 гг.), а ступени второго типа – в середине наблюдений (в 2015–2019 гг.). На финальных ступенях подземных вод ст. 9 и 27 намечается слабая тенденция возрастания концентрации Si.

В подземных водах ст. 14к (Ключ Тигунчиха) определена сравнительно низкая концентрация Si. Подобно подземным водам других станций, в них отчетливо выделяют-

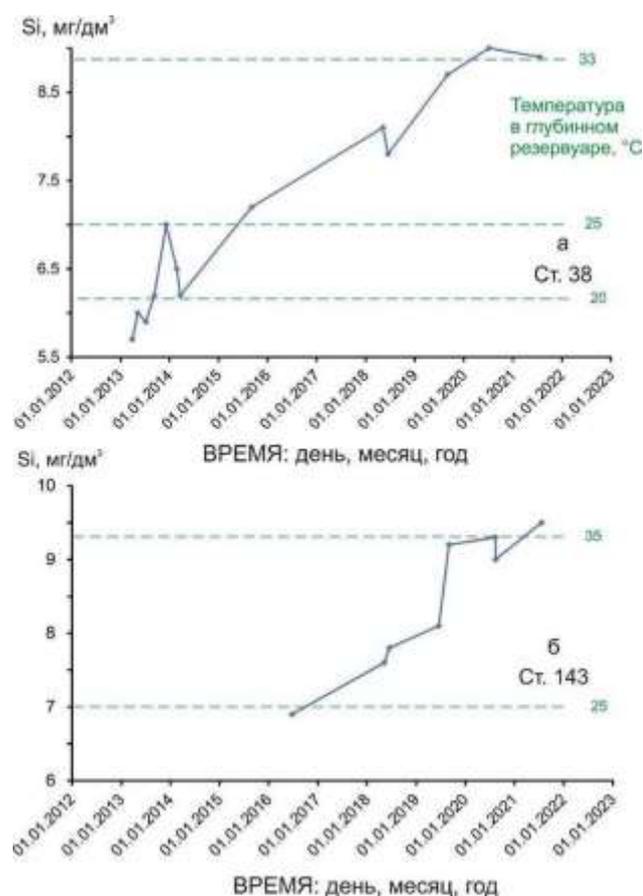


Fig. 9. Diagrams of temporal variations of Si in groundwaters from supplementary stations of the Kultuk polygon: а – station 38 (Willow), б – station 143 (Traffic Light of the Circum-Baikal Railway).

Обсуждение результатов

Компоненты подземных и поверхностных вод

Соотношения компонентов подземных и поверхностных вод рассматривались по концентрации и изотопному составу урана в 2012–2015 гг. и позже при оценке участия в

составе подземных вод побережья оз. Байкал компонента Южно-Байкальского резервуара (ЮБР) (Рассказов и др., 2015, 2020). Мониторинговый полигон находится в однородных милонитах шовной зоны ГСР. Компонентный состав подземных вод полигона описывается моделью смешения компонента NE с сильно неравновесным изотопным составом U (nonequilibrium U ст. 27: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ =

три уровня последовательного возрастания концентрации этого элемента. Компоненты подземных родниковых вод этой станции испытывают сезонные циклические вариации (Ильясова и др., 2022). Концентрация Si в этом отношении не является исключением. Наиболее отчетливые сезонные вариации Si проявляются с начала 2014 г. до начала 2019 г. В дальнейшем, на высокой финальной ступени, сезонные циклические вариации Si затушевываются эффектами, порожденными Байкало-Хубсугульской сейсмической активизацией (рис. 8д).

В байкальской воде ст. 11 концентрация кремния существенно ниже его концентрации в подземных водах. Она в целом меняется во времени в соответствии с принятым делением на ранний, средний и поздний интервалы наблюдений (рис. 8е). В рядах разреженных данных, полученных для подземных вод двух вспомогательных станций (ст. 38 и 143), подтверждается общее возрастание концентрации Si во времени, что, с одной стороны, согласуется с данными подземных вод основных станций, с другой стороны, обеспечивает грубую оценку степени обогащения кремнием подземных вод с расширением информации о поведении Si в подземных водах полигона. Наклон тренда возрастания Si в подземных водах ст. 38 от 5.55 мг/дм³ в 2013 г. до 9 мг/дм³ в 2021 г. слегка превышает наклон тренда основной ст. 9 и подобен наклону трендов основных станций 8 и 27. Наклон тренда возрастания Si в подземных водах ст. 143 от 7 мг/дм³ в 2016 г. до 9 мг/дм³ в 2020–2021 гг. также соответствует наклону трендов Si подземных вод основных станций 8 и 27 (рис. 9, а,б).

Рис. 9. Диаграммы временных вариаций Si в подземных водах вспомогательных станций Култукского полигона: а – ст. 38 (Вербное), б – ст. 143 (Светофор КБЖД).

составе подземных вод побережья оз. Байкал компонента Южно-Байкальского резервуара (ЮБР) (Рассказов и др., 2015, 2020). Мониторинговый полигон находится в однородных милонитах шовной зоны ГСР. Компонентный состав подземных вод полигона описывается моделью смешения компонента NE с сильно неравновесным изотопным составом U (nonequilibrium U ст. 27: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ =

0.70534, $OA4/8 = 3.3$) и компонента Е с равновесным изотопным составом U (equilibrium U: $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.7205$, $OA4/8 = 1.0$) (Рассказов и др., 2015).

Модель смешения получает дополнительную аргументацию по вариациям Si (рис. 10).

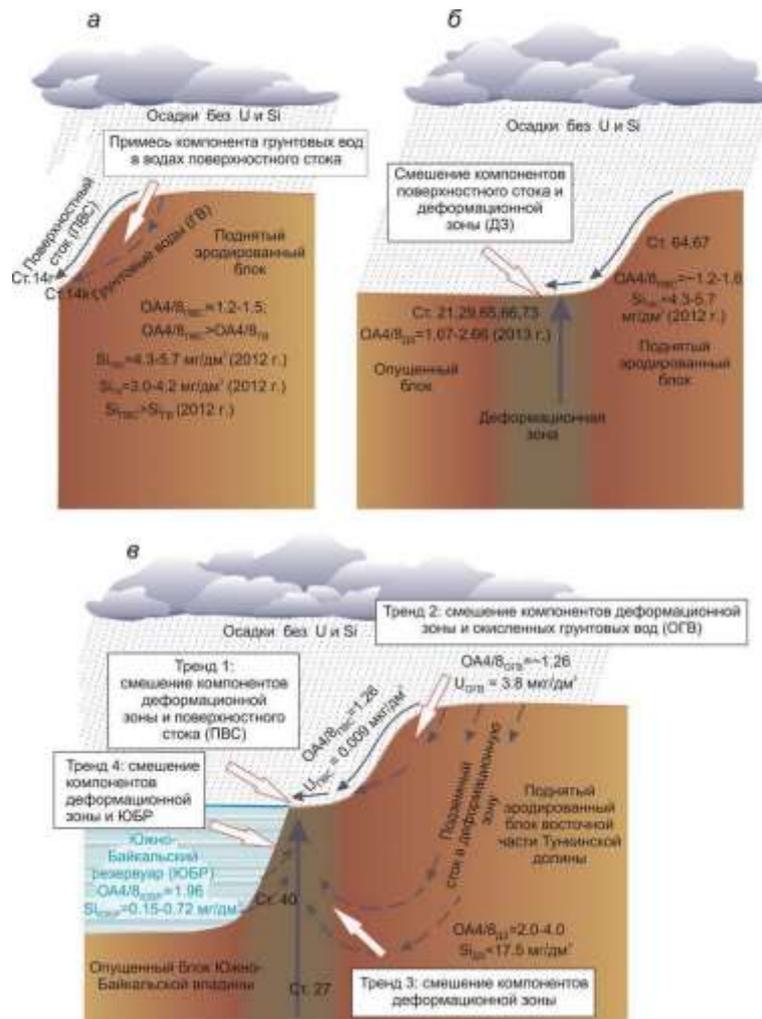


Рис. 10. Соотношения компонентов поверхностных и глубинных подземных вод на Култукском полигоне по концентрации и изотопному отношению U в сочетании с концентрацией Si: а – близповерхностные подземные воды (ст. 14к, Ключ Тигунчиха); б – ручьи бассейна р. Медлянки и ее питающие родники; в – глубинные подземные трещинные воды из деформационной зоны в смешениями с водами иного происхождения всего полигона. Обоснование трендов смешения приведено в работах (Рассказов и др., 2015, 2020).

Fig. 10. Correlation between components of shallow and deep groundwaters from the Kultuk polygon in terms of concentration and isotopic ratio of U in combination with the concentration of Si: а – shallow groundwaters (station 14k, Spring Tigunchikha); б – tributaries of the Medlyanka river and its feeding springs; в – deep fissure waters from a deformation zone mixed with those of a different origin in the entire polygon. The mixing trends were substantiated by Rasskazov et al. (2015, 2020).

В случае а рис. 10 сочетаются компоненты близповерхностных (грунтовых) вод и вод поверхностного стока речного бассейна. В поверхностных водах всего Култукского полигона определены варьирующие содержания Si. Общий измеренный диапазон содержания Si в поверхностных водах Култукского полигона в 2012–2013 гг. составляет 4.3–5.7 мг/дм³. Его минимальное содержа-

ние получено в слабо минерализованных ручьях бассейна р. Медлянка (4.3 мг/дм³, в двух ручьях пробы отбирались 09 июля 2013 г.). В р. Тигунчиха и безымянном ручье участка Вербное содержание Si слегка повышено (4.6–4.9 мг/дм³, 4 определения проб Тигунчихи с 06 сентября до 14 ноября 2012 г. и одно определение пробы ст. Вербное 09 июля 2013 г.). С повышением общей мине-

рализации в воде более крупной р. Култучной содержание Si в ее верхнем течении увеличивается до 5.7 мг/дм³ (определение пробы 11 ноября 2012 г.).

В качестве примера соотношений компонентов близповерхностных (грунтовых) вод и вод поверхностного стока служит ст. 14к (Ключ Тигунчиха). Полученный ряд наблюдений 2012–2022 г. показывает ступенчатое возрастание концентрации Si, подобное возрастанию концентрации этого компонента на других станциях полигона. На рис. 11д в подземных водах трех временных интерва-

лов этой станции (01.06.2012–23.06.2015; 26.09.2015–20.06.2019 и 02.07.2019–12.09.2020) наблюдаются тренды снижения А4 при возрастании концентрации Si. Эти тренды обозначают сезонные вариации компонентов подземных вод от паводковых минимумов Si, установленных в разные годы в весенне-летний период (с 19 марта до 17 июля) к межнным максимумам Si, зарегистрированным в осенне-зимний период (с 19 августа до 22 марта).

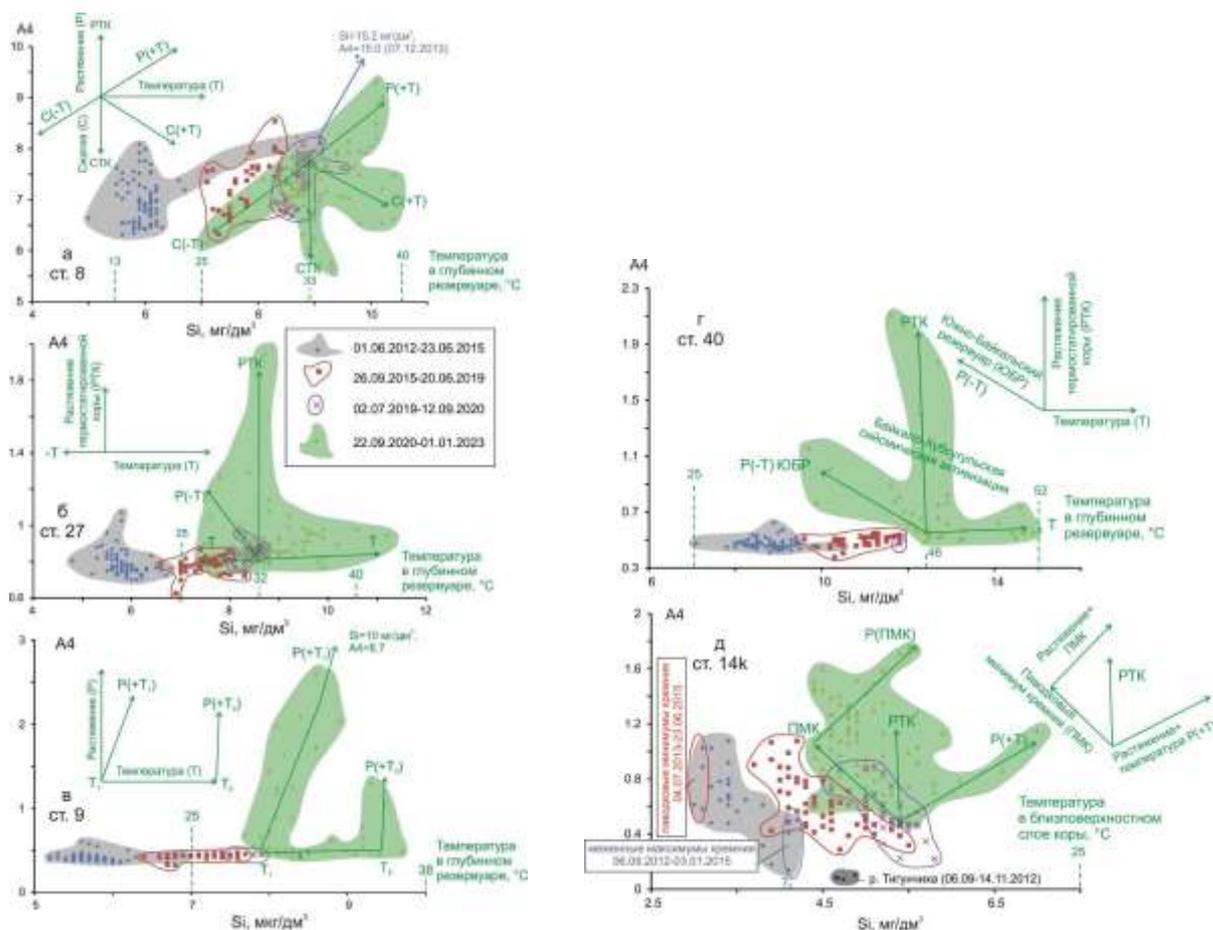


Рис. 11. Диаграммы А4 – Si для четырех временных интервалов подземных вод станций 8 (а), 27 (б), 9 (в), 40 (г) и 14к (д). Во время Байкало-Хубсугульской активизации прогрессирующее развитие Култукского резервуара маркируется компонентами РТК (растягивающейся термостатированной коры) на станциях 40, 27 и 9, регрессирующее – компонентами СТК (сжимающейся термостатированной коры) на ст. 8. Хотя на ст. 14к доминируют паводково-межненные вариации А4 – Si, фигуративное поле подземных вод четвертого (сейсмического) интервала этой станции в целом смещается относительно фигуративного поля подземных вод третьего (предсейсмического) интервала с возрастанием А4 подобно тренду РТК, что свидетельствует о прогрессирующем термостатировании близповерхностных подземных вод.

Fig. 11. Diagrams A4 vs Si for four time intervals of groundwaters from stations 8 (a), 27 (б), 9 (в), 40 (г), and 14k (д). During the Baikal-Khubsugul reactivation, the progressive development of the Kultuk reservoir is marked by the ETC component (Extending Thermo-static Crust) at stations 40, 27, and 9, while the regressive development is designated by the CTC one (Compressing Thermo-static Crust) at st. 8. Although flood-

low-water variations dominate at st. 14k, the data field of groundwaters of the fourth (seismic) interval generally shifts relative to the one of the third (preseismic) interval with an increase in A4, similar to the ETC trend that is indicative for progressive temperature control of shallow groundwaters.

Четыре пробы вод из р. Тигунчиха, отобранные с 06 сентября до 14 ноября 2012 г., показали высокую концентрацию Si (4.6–4.9 мг/дм³) при низких значениях A4 (0.06–0.11). Фигуративные точки вод р. Тигунчиха попали на продолжение тренда меженных максимумов Si. Речная вода фактически дала более выразительное обогащение Si со снижением A4, чем меженный максимум осенне-зимнего сезона. Дальнейших гидрогеохимических исследований вод р. Тигунчихи не проводилось, поэтому вопрос о связи временных вариаций Si и A4 на ст. 14k и в речной воде остается неясным.

С началом сильных землетрясений Байкало-Хубсугульской активизации тренд паводковых минимумов – меженных максимумов (тренд паводкового минимума кремния, ПМК) осложняется смещением фигуративных точек по двум другим трендам, стартующим от фигуративного поля предшествующего (предсейсмического) временного интервала. Один из них показывает возрастание значений A4 при возрастании концентрации Si (растяжение коры с возрастанием температуры подземных вод, P+T). Другой тренд обозначает возрастание A4 (растяжение термостатированной коры, РТК). Точки рассеяны в результате наложения тренда РТК на тренд ПМК. При общем доминировании паводково-меженных вариаций A4 – Si, однако, фигуративное поле подземных вод четвертого (сейсмического) интервала ст. 14k в целом смещается относительно фигуративного поля подземных вод третьего (предсейсмического) интервала с возрастанием A4 подобно тренду РТК, что свидетельствует о проявлении на этой станции прогрессирующего режима близповерхностного термостатирования подземных вод.

В случае б рис. 10 наблюдается смешение компонентов вод поверхностного стока и глубинной деформационной зоны. Пример – станции 29, 66 и др. в бассейне р. Медлянка-1. При подледном опробовании речной воды в нижнем течении этой реки 11 ноября 2012 г. (ст. 21) измерено значение $OA4/8 = 1.90 \pm 0.03$ при содержании $U = 0.045$ мкг/дм³. В русле этой речки находятся два родника, расположенные в 100 м один от другого (ст. 29 и 73). В одном из них (ст. 29) 02 февраля 2013 г. определено $OA4/8 = 2.09 \pm 0.02$ при содержании $U = 0.046$ мкг/дм³, 07 декабря 2013 г. – $OA4/8 = 2.03 \pm 0.02$ при содержа-

нии $U = 0.045$ мкг/дм³, 17 января 2014 г. – $OA4/8 = 2.02 \pm 0.02$ при содержании $U = 0.040$ мкг/дм³ и 28 января 2014 г. – $OA4/8 = 2.09 \pm 0.02$ при содержании $U = 0.044$ мкг/дм³. В другом (ст. 73) 07 декабря 2013 г. определено $OA4/8 = 2.11 \pm 0.02$ при содержании $U = 0.072$ мкг/дм³.

Повышенные значения $OA4/8$ в воде р. Медлянка-1, близкие к значениям в воде обоих родников, свидетельствуют о значительном вкладе подземных вод в её водный баланс в зимнее время. Основной поток подземных вод сфокусирован в основании уступа Обручевского разлома, зону которого дренирует эта короткая (около 1 км) речка. В бассейне р. Медлянка-2 доля подземных вод в поверхностном стоке резко снижается. В речке правого распадка бассейна (ст. 64) измерено низкое $OA4/8 = 1.26 \pm 0.05$ при самом низком (для всего полигона) содержании U (0.0087 мкг/дм³). В левом распадке бассейна (ст. 67) $OA4/8$ и концентрации U в воде поверхностного стока возрастают и составляют, соответственно, 1.57 ± 0.05 и 0.022 мкг/дм³.

Повторное опробование родниковых вод ст. 29 во время Байкало-Хубсугульской активизации в 2020 г. (три пробы отбирались в интервале с 14 октября до 22 октября) показало низкие значения $OA4/8$ (2.03), соответствующие уровню значений 2013–2014 гг., но повышенную концентрацию U (0.10–0.12 мкг/дм³).

В более общем варианте в рис. 10 на всем Култукском полигоне регистрируются тренды смешения компонентов: 1) деформационной зоны и поверхностного стока, 2) разных компонентов деформационной зоны и окисленных грунтовых вод, 3) компонентов деформационной зоны и 4) компонентов деформационной зоны и ЮБР. На участках без постоянных водотоков происходит смешение компонентов деформационной зоны и близповерхностных грунтовых вод (пример – ст. 27, Школа) или смешение разных компонентов деформационной зоны (пример – ст. 9, Земляничный).

Для интерпретации полученных данных о концентрации Si в подземных водах Култукского полигона ключевую роль играет ст. 40, в которой наблюдается максимальное обогащение Si. В модели смешения изотопных компонентов Sr и U компонент ЮБР содержит около 10 % компонента NE, а подзем-

ные воды ст. 40 могут образоваться в результате смешения глубинной воды ЮБР и конечного компонента NE приблизительно в равных пропорциях (Расказов и др., 2015). Три первых временных интервала дают последовательное возрастание концентрации Si от интервала 7.1–10.2 мг/дм³ до 11.8 мг/дм³. В четвертом временном интервале (во время Байкало-Хубсугульской активизации) наблюдаются три тренда, стартующих из общего центра: Т (температурный), РТК (растяжения термостатированной коры) и Р–Т (ЮБР) (растяжение коры со снижением температуры). Тренд Т возрастания концентрации Si без повышения А4 продолжает общую тенденцию возрастания температуры подземных вод станции, сложившуюся в предшествующие годы. Тренд РТК повышения А4 без изменения концентрации Si маркирует термостатированное усиление растяжения в коре. Тренд Р–Т (ЮБР) повышения А4 с относительным снижением концентрации Si указывает на снижение температуры при смешении подземных вод местного источника с водой ЮБР. Последний тренд подобен по своему характеру тренду ПМК близповерхностных вод ст. 14к (см. рис. 11д), но при более высокой концентрации Si, свидетельствующей о повышенной температуре в подземных водах ст. 40.

Обращаясь к подземным водам ст. 8, отметим их особенность – содержание урана в среднем на порядок выше, чем в подземных водах других основных станций полигона. В первые три временных интервала концентрация U в основном составляет 2.8–3.5 мкг/дм³ и эпизодически снижается (до 2.5 мкг/дм³) во время четвертого интервала (в Байкало-Хубсугульскую активизацию). Соответственно, значения А4 резко превышают этот показатель в подземных водах других станций и выдерживаются преимущественно в интервале 6.5–8.0 в течение всех четырех временных интервалов мониторинга. Концентрация Si составляет в первом временном интервале (2013–2015 гг.) 5.5–6.2 мг/дм³, образуя расширение с преобладающими значениями А4=6.5–8.0. Через это расширение проходит тренд, начинающийся от минимального (единичного) значения концентрации Si=5 мг/дм³ при А4=6.6 (04 июля 2013 г.) до значения концентрации Si=9.1 мг/дм³ при А4=8.1–8.3 (29 июля–05 августа 2012 г.). Этот тренд, полученный в самом начале наблюдений (с 29 июля 2012 г. до 10 января 2013 г.), может рассматриваться как тренд остаточных процессов сильной Култукской

сейсмической активизации. В первом временном интервале происходит выброс Si (15.2 мг/дм³) при высоком значении А4 (15.0) 07 декабря 2013 г. В тренд первого временного интервала станции входит также значение Si=6.7 мг/дм³ при А4=7.2 в пробе, отобранной 23 февраля 2014 г.

Второй временной интервал устанавливается с 26 сентября 2015 г. до 20 июня 2019 г. в верхней части тренда первого временного интервала с повышенной концентрацией Si (7.1–8.4 мг/дм³). Третий временной интервал с 2 июля 2019 г. до 12 сентября 2020 г. (предсейсмический, т.е. до Быстринского землетрясения Байкало-Хубсугульской активизации) вновь обозначается возрастанием концентрации Si (до интервала 8.3–9.0 мг/дм³).

Во время Байкало-Хубсугульской активизации образуется веер четырех трендов (Р+Т, С–Т, СТК и С+Т), расходящихся из общего центра, в качестве которого служит центр фигуративного поля подземных вод третьего (предсейсмического) временного интервала (рис. 11а). Тренды Р+Т и С–Т обозначают противоположное смещение фигуративных точек, соответственно, с возрастанием растяжения коры и температуры подземных вод и с усилением сжатия и снижением температуры. Фактор сжатия проявляется и в двух других трендах: в тренде СТК реализуется сжатие термостатированной коры, в тренде С(+Т) – сжатие коры сопровождается возрастанием температуры подземных вод.

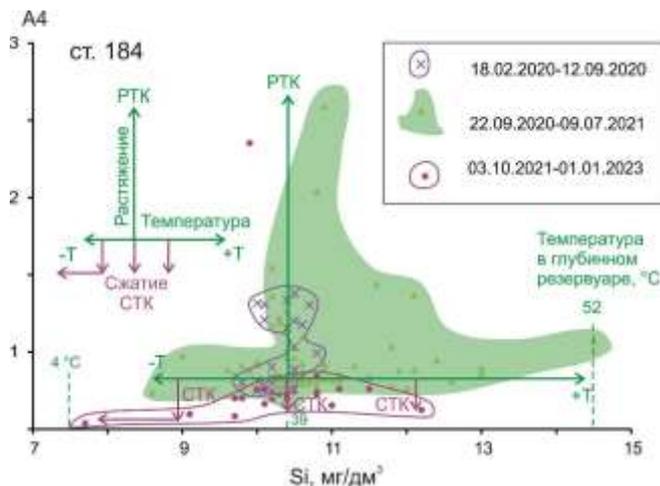
Подземные воды ст. 27 характеризуют конечный компонент NE подземных вод из милонитов ГСР (Расказов и др., 2015). Они показывают последовательное возрастание концентрации Si от интервала 5–7 мг/дм³ в 2012–2015 гг. через интервал 6.5–8.3 мг/дм³ в 2015–2019 гг. и интервал 8.0–8.9 мг/дм³ в 2019–2020 гг. (перед Байкало-Хубсугульской сейсмической активизацией) до интервала 7.4–11 мг/дм³ в 2020–2022 гг. (во время Байкало-Хубсугульской активизации). Значения А4 в основном не превышают 1. Тренды четвертого (сейсмического) временного интервала: Т, –Т, РТК и Р(–Т) стартуют от компактного фигуративного поля подземных вод предшествующего (предсейсмического) временного интервала (рис. 11б). Тренд Т возрастания концентрации Si продолжает общую тенденцию нарастания температуры подземных вод, сложившуюся за предшествующие годы, а тренд –Т снижения концентрации Si – проявление проти-

воположного процесса снижения температуры. Слабое повышение A_4 в тренде T указывает на ограниченное действие фактора растяжения. Более существенное продвижение фигуративных точек выше тренда $P(-T)$ вдоль тренда РТК повышения A_4 без изменения концентрации Si маркирует заметное усиление растяжения в почти термостатированной коре. Относительное возрастание растяжения со снижением температуры подземных вод может интерпретироваться, подобно тренду подземных вод ст. 40, как возможный результат проникновения вод ЮБР, разбавляющих подземные воды местного происхождения. Хотя во временном интервале 2020–2022 гг. тренд $(-T)$ ст. 27 слабо выражен, сохранение тенденции снижения температуры в подземных водах может привести их к состоянию 2012–2015 гг.

Подземные воды ст. 9 имеют минимальную концентрацию U среди подземных вод основных станций полигона. Значения A_4 в подземных водах первых трех временных интервалов в основном не превышают 0.5. От фигуративного поля третьего (предсейсмического) временного интервала этой станции стартуют два тренда: T и $P(+T_1)$. В первом тренде температура меняется от зна-

чения T_1 до значения T_2 , от которого намечается тренд $P(+T_2)$. Тренд $P(+T_1)$ направлен к максимальному измеренному значению $Si=10$ мг/дм³ при $A_4=8.7$. Он имеет нестационарный характер. Концентрация Si в исходной точке T_2 тренда РТК(T_2) не достигает $Si=10$ мг/дм³. Следовательно, тренд $P(+T_2)$ также не термостатирован и может получить развитие с некоторым наклоном до максимальной концентрации Si при усилении растяжения (при возрастании A_4).

Подземные воды ст. 184 показывают субвертикальный тренд РТК фигуративных точек предсейсмического интервала 18 февраля – 12 сентября 2020 г. Этот тренд наследуется и продолжается фигуративными точками сейсмического интервала 22 сентября 2020 г. – 09 июля 2021 г. Кроме тренда РТК, в этом сейсмическом интервале наблюдаются тренды нарастания и снижения температуры. На фоне продолжающейся сейсмичности с 03 октября 2021 г. до конца 2022 г. наблюдается тенденция снижения A_4 с некоторым уменьшением концентрации Si . Этот тренд воспринимается как показатель закрытия микротрещин (сжатия коры) (рис. 12).



characteristic of st. 8.

Мы видим, что в подземных водах основных станций Култукского полигона (кроме ст. 14к) преобладают глубинные компоненты. Концентрация Si обычно превышает концентрацию этого элемента в поверхностных водах. Например, в 2013 г. в ручьях бассейна р. Медлянки содержится 4.3 мг/дм³, тогда как в подземных водах ст. 8 и ст. 27 составляет 5 мг/дм³ и более (см. рис. 9а,в). Возрастание концентрации Si в подземных водах всех станций с течением времени при

Рис. 12. Диаграмма $A_4 - Si$ для третьего (предсейсмического) и четвертого (сейсмического) временных интервалов подземных вод ст. 184. Во время Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации на этой станции наблюдается тренд РТК, характерный для станций 40, 27, 9 и 14, сменяющийся с течением времени трендом СТК, проявленным на ст. 8.

Fig. 12. Diagram A_4 vs Si for the third (pre-seismic) and fourth (seismic) time intervals of groundwater from station 184. During the Baikal-Khubsugul seismic reactivation, this station shows the ETC trend, which is typical of stations 40, 27, 9, and 14, followed by the CTC trend, which is

наблюдениях 2012–2022 гг. свидетельствует о направленном действии глубинного фактора (или нескольких глубинных факторов). В глубинном источнике подземных вод деформационной зоны могли проявляться компоненты четырех трендов смещения: 1) деформационной зоны и поверхностного стока, 2) деформационной зоны и грунтовых вод, 3) разных компонентов деформационной зоны и 4) деформационной зоны и ЮБР (см. рис. 10).

Вода оз. Байкал на ст. 11 имеет низкую концентрацию Si. Во втором временном интервале значения A4 в пробах байкальской воды на этой станции возрастают. Единственное определение, выполненное в третьем временном интервале, показывает относительное повышение Si (рис. 13). Байкальская вода ст. 11, предположительно, разбавляется потоком подземных вод, поступающих из зоны Обручевского разлома.

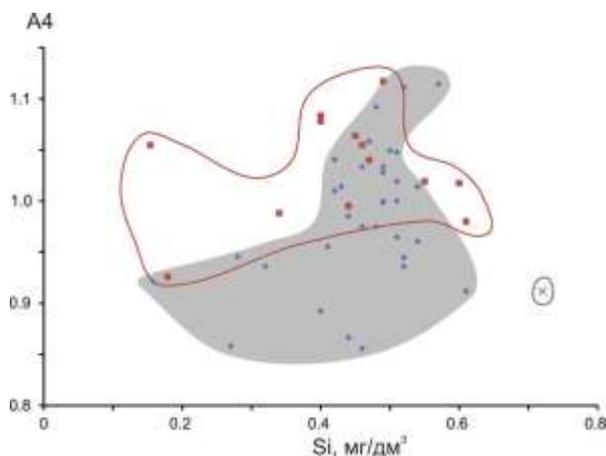


Рис. 13. Диаграмма A4 – Si для двух временных интервалов и одной пробы третьего интервала прибрежной байкальской воды из зоны Обручевского разлома (ст. 11). Усл. обозн. см. рис. 11.

Fig. 13. Diagram A4 vs Si for two time intervals and one sample of the third one of near-coastal Baikal water from the Obruchev fault zone (station 11). Symbols are as in Fig. 11.

Температура подземных вод в режиме термостатирования при растяжении

По результатам изучения теплового потока во впадинах Байкальской рифтовой зоны и их горном обрамлении предполагается, что глубинное тепло существенно подвержено влиянию теплопереноса подземными водами. «Ниже базиса циркуляции этих вод на глубине нескольких километров тепловой поток под указанными основными рифтовыми структурами нивелируется. Следовательно, больших различий в значениях температур на одних и тех же глубинах под этими структурами ожидать не следует.» (Голубев, 2007, с. 61). В цитированной рабо-

те в акватории Байкала в районе пос. Култук у северного берега Байкала определен средний тепловой поток 82 мВт/м^2 , у южного берега – 170 мВт/м^2 (время измерений не указано).

В подземных водах Култукского полигона четвертого (сейсмического) временного интервала устанавливается режим термостатирования. По тренду РТК ст. 40 на диаграмме A4 – Si третьего (предсейсмического) временного интервала определяется компонент с концентрацией $\text{Si}=12.4 \text{ мг/дм}^3$, соответствующей наиболее высокотемпературному стационарному режиму (температура $46 \text{ }^\circ\text{C}$) в условиях растяжения коры.

На других станциях полигона концентрация Si термостатированных подземных вод (с трендом РТК) ниже. В условиях растяжения коры на ст. 184 определяется концентрация $\text{Si}=10.5 \text{ мг/дм}^3$ (температура $39 \text{ }^\circ\text{C}$), на ст. 27 – концентрация $\text{Si}=8.6 \text{ мг/дм}^3$ (температура $32 \text{ }^\circ\text{C}$). В подземных водах ст. 9 режим термостатирования устанавливается в условиях растяжения по концентрации Si не менее 10 мг/дм^3 (температура не менее $38 \text{ }^\circ\text{C}$). Во время Байкало-Хубсугульской активизации в подземных водах станции этот режим, однако, не достигается.

По концентрации Si как косейсмической характеристики подземных вод обозначается латеральное изменение их термостатированного режима при растяжении коры, акцентированном на ст. 40 зоны ГСР (рис. 14). На ст. 8 режим термостатирования устанавливается в условиях сжатия коры по концентрации $\text{Si}=8.9 \text{ мг/дм}^3$ (температура $33 \text{ }^\circ\text{C}$), близкой к концентрации Si предельно низкотемпературных условий термостатирования на ст. 27. При переходе от растяжения к сжатию в подземных водах ст. 184 режим термостатирования нарушается с проявлением тенденции к относительному снижению температуры. Станции 8 и 184 обозначают участок, от которого начинается снижение температур подземных вод Култукского резервуара, сгенерированного во время Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации.

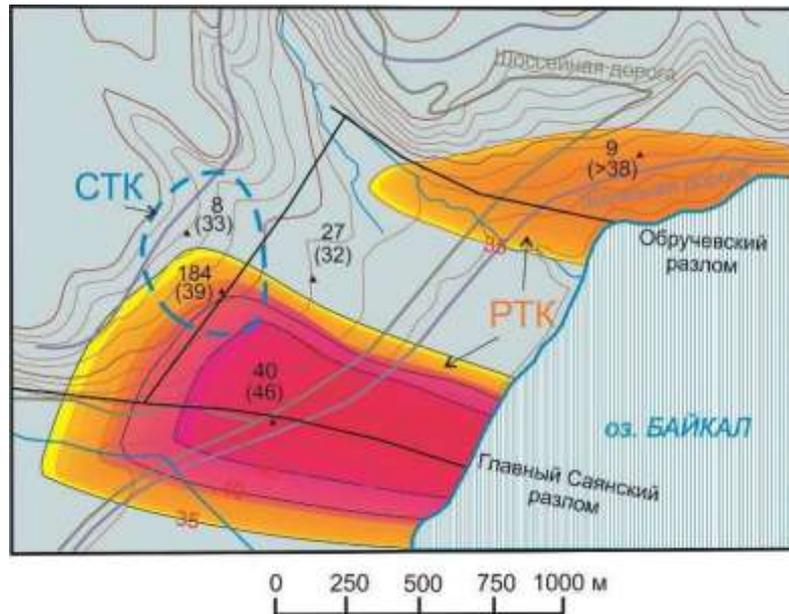


Рис. 14. Предполагаемый контроль разломами температурных аномалий в подземных водах при растяжении и сжатии коры (компонентов РТК и СТК) во время Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2022 гг. Ниже номеров основных мониторинговых станций в скобках приводится температура компонента РТК или СТК в °С (см. рис. 11, 13). На общем фоне температуры ниже 35 °С в подземных водах территории наблюдается ее возрастание в виде компонента РТК в активизированных частях зон Главного Саянского и Обручевского разломов (ст. 40, 184 и 9) и ее снижение между разломами (ст. 8 и 27). РТК характеристики обнаруживаются в подземных водах вблизи Байкала, а также на ст. 14к, расположенной за западной рамкой территории Синим штриховым овалом объединены ст. 8 и 184: на первой из них проявлен режим СТК, на второй – режим СТК с течением времени сменяет режим РТК.

Fig. 14. Proposed control of temperature anomalies in groundwaters by faults under crustal extension and compression (ETC and CTC component) during the Baikal-Khubsugul reactivation in 2020–2022. Below numbers of the main monitoring stations, temperature of ETC and CTC components (in °C) is shown in parentheses (see Figs 11, 13). Observed is increasing temperatures of the ETC component in activated parts of the Main Sayan and Obruchev fault zones (stations 40, 184, and 9) and decreasing ones between the faults (stations 8 and 27). The ETC signatures are found in groundwaters near the Baikal, as well as at st. 14k, located beyond the western frame of this area. The ETC mode, the latter has the ETC mode followed by the CTC one.

Косейсмическое пространственно-временное изменение температуры подземных вод

Разрабатываются два варианта пространственно-временных изменений Култукского резервуара подземных вод: 1) по преобладающей концентрации Si (рис. 15) и 2) по

максимумам Si (рис. 16). Третий возможный вариант пространственно-временных изменений активной части резервуара по минимумам Si приобретет особый смысл после завершения Байкало-Хубсугульской активизации. Переход от прогрессивного развития к регрессивному уже обозначился в смене режима РТК режимом СТК на ст. 184.

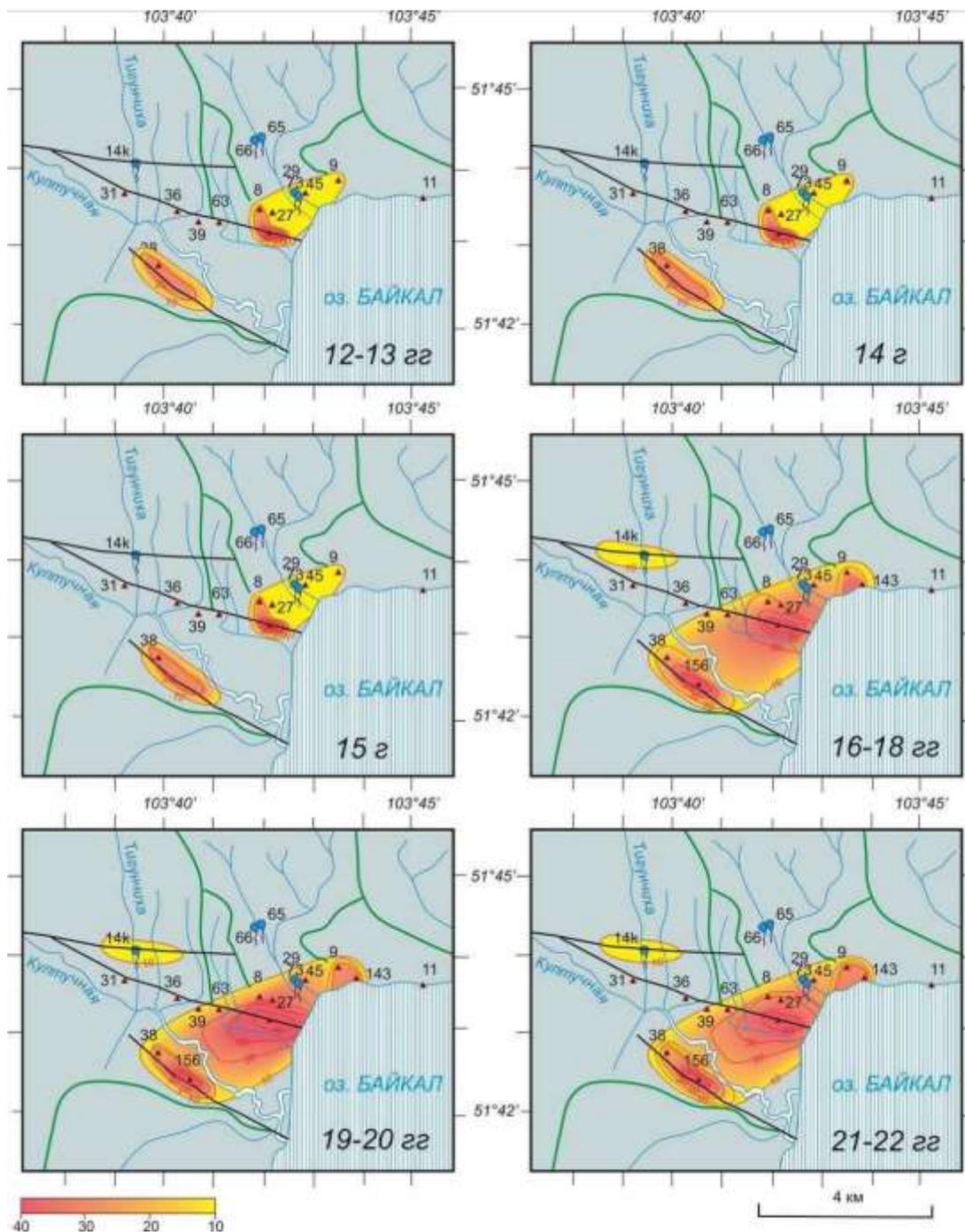


Рис. 15. Иллюстрация косейсмического изменения средних температур в Култукском резервуаре. Температуры рассчитаны с использованием халцедонового геотермометра по средней концентрации Si в подземных водах мониторинговых рядов и дополнительным данным единичных проб.

Fig. 15. Illustration of coseismic change in mean temperatures in the Kultuk deep reservoir. Temperatures were calculated using a chalcedony geothermometer from the average concentration of Si in groundwater monitoring series and additional data from single samples.

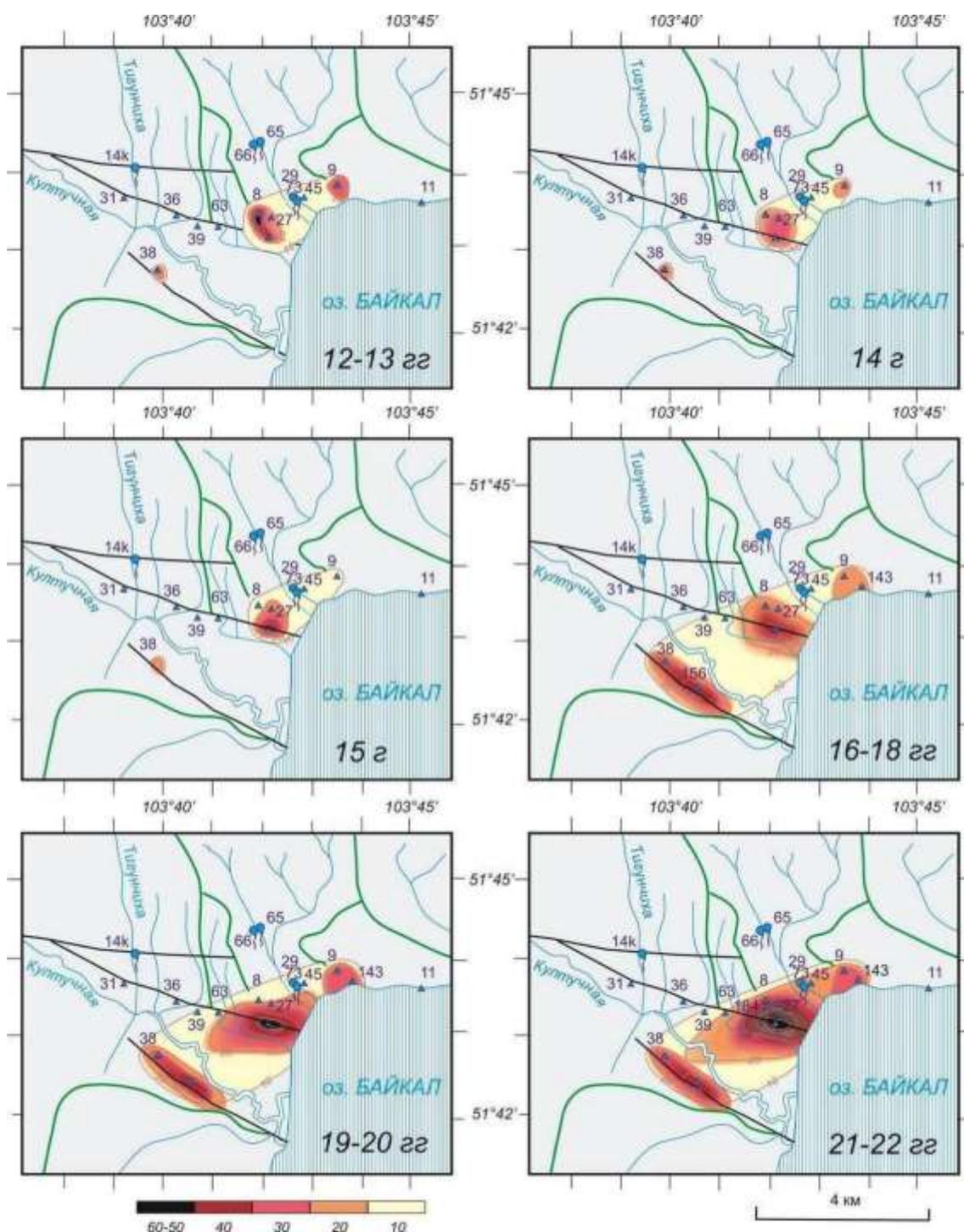


Рис. 16. Иллюстрация косейсмического изменения максимальных температур в Култукском резервуаре. Температуры рассчитывались с использованием халцедонового геотермометра по максимальной концентрации Si в подземных водах мониторинговых рядов и дополнительным данным единичных проб.

Fig. 16. Illustration of coseismic change in mean temperatures in the Kultuk deep reservoir. Temperatures were calculated using a chalcedony geothermometer from the maximal concentration of Si in groundwater monitoring series and additional data from single samples.

В вариантах реконструкций рис. 15 и 16 Култукский резервуар представляется в виде полосы северо-восточного простирания, в которой температуры подземных вод в целом повышены и последовательно возраст-

тают в 2015–2022 гг., при подготовке и реализации Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации.

Сопоставления

Предшествующие результаты гидрогеохимического мониторинга в Байкальской рифтовой зоне

В работе (Пиннекер и др., 1984) изучались гидрогеотермические предвестники землетрясений в районе Северо-Муйского хребта северо-восточной части Байкальской рифтовой зоны режимными наблюдениями температуры на изливе термальных и холодных вод. В Окусиканском источнике 35 восьми толчкам за 2–9 суток предшествовало увеличение или уменьшение температуры на 0.4–0.6 °С (1.0–1.5 σ). В скв. 124 большинство землетрясений сопровождалось положительными и отрицательными отклонени-

ями температуры подземных вод за 2–10 суток до события. Величина отклонения достигала 3.5 °С. Наблюдения на Итыкитском источнике показали увеличение температуры на 0.5–2.0 °С за 2–7 суток перед землетрясением в двух случаях и в трех – на 1 °С за 1–2 суток. Подготовка остальных землетрясений не отразилась на изменении температуры Итыкитского источника. Холодные воды источника 99 также отозвались слабыми колебаниями температуры на подготовку шести землетрясений.

На рис. 17 а, б приводятся графики наблюдений вариаций кремниевой кислоты, соответственно, в Окусиканском источнике 35 термальных вод и в роднике 99 холодных вод. Показаны землетрясения, произошедшие во время мониторинга.

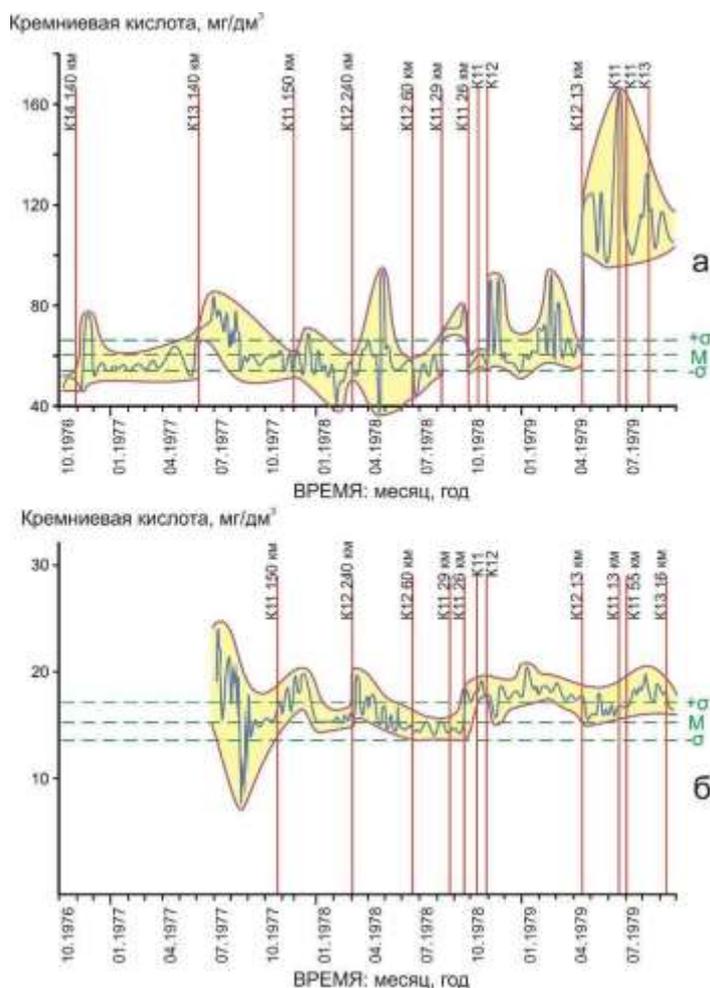


Рис. 17. Графики режимных наблюдений содержания кремниевой кислоты в термальном источнике 35 (а) и холодном источнике 99 (б). Штриховыми зелеными линиями, параллельными оси абсцисс, показаны значения: М – медиана и отклонения от нее – $+\sigma$ и $-\sigma$. Красными линиями, параллельными оси ординат, показаны: землетрясения 11–14 класса (K11–K14) и расстояние от эпицентра до объекта наблюдений, в км. Представлены модифицированные графики рис. 53 и 54 из монографии (Пиннекер и др., 1984).

Fig. 17. Graphs of regime observations of the content of silicic acid in thermal spring 35 (a) and cold spring 99 (b). Dashed green lines parallel to the abscissa axis show the values: M – median and deviations from it – $+σ$ and $-σ$. The red lines parallel to the ordinate-axis show: earthquakes of 11–14 classes (K11–K14) and distances from epicenters to the object of observation, in km. Presented are modified graphs of Figs 53 and 54 from the monograph (Pinnecker et al., 1984).

С октября 1976 г. до апреля 1979 г. колебания H_4SiO_4 в термальных водах выдерживаются на одном уровне. В этом временном интервале землетрясения 11–14 класса происходили на расстоянии 26–240 км от термального источника 35. В середине апреля 1979 г. землетрясение средней силы ($K = 12$) случилось в 13 км от этого источника. Оно сопровождалось скачкообразным подъемом концентрации кремниевой кислоты, а последующие землетрясения 1979 г. ($K = 11–13$) отозвались ее локальными максимумами. В данном случае Окусиканский источник термальных вод дал отчетливый отклик H_4SiO_4 только на близкий сейсмический толчок. Образовалась местная сейсмическая нестабильность коры, в связи с чем возросла гидрогеохимическая чувствительность подземных вод и к дальним землетрясениям. В целом Окусиканский источник 35 не был чувствительным к сейсмическим событиям северо-восточной части Байкальской рифтовой зоны. Подобные локальные центры местной чувствительности к сейсмогенным деформациям коры, по-видимому, в целом характерны для этой части рифтовой структуры и по мере ее развития сменяются другими центрами. В конце 1979 г. мониторинг Окусиканского источника 35 прекратился, поэтому продолжительность сейсмической нестабильности территории этого источника осталась неясной.

Резкое возрастание Si окусиканских подземных вод в середине апреля 1979 г. одновременно с землетрясением сопоставляется с подобными скачкообразными повышениями Si в подземных водах всех станций Култукского полигона при Голоустном землетрясении 05 сентября 2015 г. и при перестройке 20 июня – 02 июля 2019 г., не сопровождавшейся землетрясениями, но определившей настрой последующей Байкало-Хубсугульской активизации (см. рис. 8). Эти отклики Si подчеркивают значение перестройки сейсмогенерирующих процессов в масштабе всей центральной части Байкальской рифтовой системы, от Байкала до Хубсугула.

График холодных подземных вод родника 99 (рис. 17б) показывает временные вариации кремнекислоты, отличающиеся от вре-

менных вариаций кремнекислоты в термальных водах источника 35. На нем отсутствует отклик на землетрясение середины апреля 1979 г. Минимумы и максимумы не имеют однозначной связи с сейсмическими событиями. График в целом демонстрирует низкую чувствительность к землетрясениям концентрации кремнекислоты холодных подземных вод родника.

Данные режимных наблюдений, представленные в работе (Пиннекер и др., 1984), охватывают двухлетний временной интервал, явно недостаточный для суждения о фундаментальных закономерностях гидрогеохимических откликов на землетрясения.

Другие результаты определений Si в подземных водах

Геотермометрические оценки резервуаров термальных вод (Ломоносов, 1974; Борисенко, Замана, 1978; Волкова, Афанасенко, 1980) обобщены В.А. Голубевым (1982) с представлением общего расчета температур по кварцевому геотермометру (Fournier, Rowe, 1966). Позже, в работах (Писарский, 1987; Козловцева, Хуторской, 1990; Голубев, Платонов, 1990; Плюсин и др., 2008; Бадинов и др., 2011; Шестакова, Гусева, 2018), температуры также рассчитывались в основном по кварцевым геотермометрам (Fournier, Rowe, 1966; Fournier, Potter, 1982). Для термальных вод Восточного Саяна получались температуры от 19 до 149 °С (Шестакова, Гусева, 2018), для районов Байкальской рифтовой зоны – от 62 до 137 °С (Голубев, 2007).

Между тем, при температурах менее 150 °С подземные воды, скорее всего, находятся в равновесии с халцедоном, а не с кварцем. Результаты расчетов с использованием кварцевых геотермометров имеют расхождения с результатами расчетов с использованием халцедонового геотермометра (Arnorsson et al., 1983) в десятки °С. При малой концентрации Si по кварцевым геотермометрам для култукских подземных вод получаются отрицательные значения температуры.

На территориях распространения термальных вод Байкальской рифтовой системы, как правило, находятся источники хо-

лодных вод, обнаруживающих, по характеру минерализации, связь с водами, имеющими высокую температуру выхода на поверхность. Так, для подземных вод, отобранных авторами настоящей работы в Баргузинской долине с 05 до 10 октября 2019 г., по кварцевому геотермометру (Fournier, Potter, 1982) получается широкий разброс температурных оценок. Часть температур находится в диапазоне 150–250 °С, рекомендованном для этого геотермометра, вторая часть имеет более низкие температуры, которые требуют расчета температур по халцедоновому геотермометру, третья выходит в область более высоких температур, не имеющих надежных калибровок.

Из общих сопоставлений концентрации Si в полученных мониторинговых рядах станций Култукского полигона с опубликованными данными вытекает необходимость рассмотрения вод, подобных подземным водам Култукского полигона, как субтермальных и холодных вод особой категории, отличающихся от подземных вод выходов термальных источников с более высокими температурами глубинных резервуаров.

Родники субтермальных вод, подобных култукским подземным водам (с температурой на изливе 7–15 °С), трассировались вдоль разломов у подножия Баргузинского хребта по его юго-западному окончанию и в прибортовой части Усть-Баргузинской впадины (Замана, 1968). Опробовались большедебитные родники трещинно-жильных вод с температурой на изливе в интервале от 5.5 до 13.8 °С в центральной и северо-восточной частях Байкальской рифтовой зоны – в Гололондинском хребте, на западном склоне хр. Улан-Бургасы, на Икатском и Баргузинском хребтах, в районе нижнего течения р. Баргузин и в Муйской впадине (Борисенко, Замана, 1978). Эти родники связаны с активными разломами. Общая минерализация трещинно-жильных вод оказалась в 2–3 раза выше общей минерализации вод из родников поверхностного дренирования, а концентрация Si достигала в среднем 20 мг/дм³ (температура в резервуаре соответствует 66 °С). Более высокая концентрация Si (до 28 мг/дм³, температура в резервуаре до 82 °С) отмечалась в холодных родниках Юго-Восточного Забайкалья (Замана, Гладкая, 1991). Диапазон концентрации Si в субтермальных водах и водах поверхностного дренирования на указанных территориях Байкальской рифтовой зоны и в сопредельном Юго-Восточном Забайкалье сопостави-

мы с диапазоном концентрации Si глубинных и близповерхностных вод Култукского полигона.

Заключение

На Култукском полигоне проводится мониторинг подземных вод верхнего слоя коры, в котором наблюдаются гидрогеохимические отклики на сейсмогенные деформации. В 2012–2022 гг. определена минимальная концентрация термофильного элемента Si (3 мг/дм³) 4 июля 2013 г. в родниковой воде станции 14к близповерхностных вод и его максимальная концентрация (17.5 мг/дм³) 23 января 2021 г. в воде из скважины ст. 40 субтермальных подземных вод. Обе мониторинговые станции расположены на палеосейсмодислокациях зоны ГСР. В процессе мониторинга выявлено последовательное зональное возрастание концентрации Si в подземных водах полигона с центром на ст. 40. Показан контроль концентрации Si в подземных водах из зон других активных разломов: Обручевского и ЮЗ Бортового. Предложено объяснение косейсмической природы возрастания концентрации Si в подземных водах полигона при существенном влиянии их разбавления слабо минерализованными водами (метеорными и ЮБР).

Предполагается, что Култукский резервуар проявился во время сильной Култукской сейсмической активизации (27 августа 2008 г. – 04 января 2011 г.) с максимальной температурой ст. 8. Гидротермы частично вырождались во время слабой Толбазихинской активизации (24 июня 2011 г. – 11 октября 2012 г.) и имели минимальную температуру в 2014–2015 гг. Затем температура гидротерм увеличивалась при подготовке и реализации Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации, обозначившейся сильными землетрясениями 2020–2022 гг.

Термальное состояние подземных вод полигона, по данным Si термометрии, отражает развитие полного сейсмогеодинамического цикла сжатия и растяжения коры, установленного, соответственно, по снижению и возрастанию отношения активностей ²³⁴U/²³⁸U и активности ²³⁴U в подземных водах. Усиление сжатия коры с вырождением гидротерм Култукского резервуара сопровождается землетрясениями умеренной силы: Северо-Хубсугульским 5 декабря 2014 г. и Голоустным 05 сентября 2015 г., проявление растяжения коры с генерацией гидротерм обозначается сильными землетрясени-

ями Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2022 гг.

В ядре гидротермального резервуара ГСР (ст. 40) по кремниевому (халцедоновому) геотермометру подземных вод получается минимальная температура 25 °С 17 сентября 2014 г. (перед землетрясениями 2014–2015 гг.) и максимальная температура 60 °С 23 января 2021 г. (через 11 дней после сильнейшего Хубсугульского землетрясения). От состояния сжатия коры 2014–2015 г. к состоянию ее растяжения в 2020–2022 гг. в ходе развития полного сейсмогеодинамического цикла температура в ядре Култукского резервуара возрастает почти в 2.5 раза. Смена подземных вод объясняется действием механизма бокового отпора блока верхней части коры, сопредельной с оз. Байкал. В эпизодическом снижении температур подземных вод на фоне афтершоков Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2022 гг. выявляются признаки начинающейся деградации резервуара подземных вод. Механизм контроля его глубины боковым отпором блоков верхней коры, по-видимому, должен действовать и в других районах, сопредельных с оз. Байкал, в которых распространены субтермальные и холодные подземные воды. По приведенным в настоящей работе расчетам с использованием халцедонового геотермометра принимается граница субтермальных (глубинных) и холодных (близповерхностных) подземных вод рифтовых структур на глубине около 1 км.

Вариации термофильного элемента Si в подземных водах Култукского резервуара воспринимаются как чувствительные индикаторы косейсмических изменений, происходящих в центральной части Байкальской рифтовой системы. При подготовке и реализации землетрясений на разных станциях регистрируются фазы нарушения фонового режима с синхронизацией температурных изменений подземных вод. В ходе развития сейсмогенных деформаций наблюдаются фазы возрастания и снижения температуры в резервуаре и на выходе подземных вод и фазы их возвращения к фоновому состоянию. Такие вариации могут учитываться при разработке подходов к определению времени приближающегося землетрясения.

Благодарности

Состав воды анализировался на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500se в ЦКП «Ультрамикроанализ» (ЛИН СО РАН, г. Иркутск). Методические подходы к анали-

зу подземных вод 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). 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».

Литература

- Бадминов П.С., Ганчимэг Д., Оргильянов А.И., Крюкова И.Г., Оюунцэцэг Д. Оценка глубинных температур термальных источников Хангая и Восточного Саяна с помощью гидрохимических геотермометров // Вестник БГУ. Химия, физика. 2011. Вып. 3. С. 90–94.
- Борисенко И.М., Замана Л.В. Минеральные воды Бурятской АССР. Улан-Удэ: Бурят, кн. изд-во, 1978. 162 с.
- Волкова В.П., Афанасенко В.Е. Термоминеральные воды зоны освоения БАМ и возможности их эффективного использования // Мерзлотные исследования. Вып. XIX. М.: Изд-во МГУ, 1980. С. 154–163.
- Голенецкий С.И., Голубев В.А. О связи сейсмичности с тепловым потоком в районе впадины озера Байкал // Геология и геофизика. 1985. № 6. С. 87–96.
- Голубев В.А. Тепловые и химические характеристики гидротермальных систем Байкальской рифтовой зоны // Советская геология. 1982. № 10. С. 100–108.
- Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО», 2007. 222 с.
- Голубев В.А., Платонов Л.М. Опыт применения кремниевое геотермометра для оценки теплового потока на юге Восточной Сибири // Геология и геофизика. 1990. № 6. С. 155–159.
- Замана Л.В. Новые данные о некоторых термальных источниках Баргузинского района Бурятской АССР // Вопросы геологии Прибайкалья и Забайкалья. Вып. 5. Чита: Изд-во Забайкал. фил. Геогр. о-ва СССР, 1968. С. 173–174.
- Замана Л.В., Гладкая Н.М. Новые данные по геохимии природных вод района Уровской эн-

демии в Сибири // Докл. РАН. 1991. Т. 321, № 3. С. 593–595.

Ильин В.А., Кононов В.И., Поляк Б.Г., Козловцева С.В. Оценка глубинных температур с помощью гидрогеохимических показателей // Геохимия. 1979. № 6. С. 888–901.

Ильясова А.М., Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Борняков С.А., Снопков С.В., Чувашова И.С., Тубанов Ц.А., Герман Е.И., Бартанова С.В. Тестирование эффекта Чердынцева–Чалова с использованием сейсмодвижителя ЦВО-100 и мониторинг подобных U-гидроизотопных откликов на подготовку землетрясений на Култукском полигоне, Южный Байкал // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 4. С. 7–25. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.7

Карта эпицентров землетрясений. Иркутск: Байкальский филиал Федерального исследовательского центра Единая геофизическая служба РАН, 2023. <http://www.seis-bykl.ru>

Козловцева С.В., Хуторской М.Д. Опыт применения гидрохимических индикаторов для оценки геотермических условий недр Монголии // Литология и полезные ископаемые. 2002. №4. С. 110–120.

Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. Российская академия наук; Институт динамики геосфер; Российский научный фонд. М.: ГЕОС, 2016. 424 с.

Логачев Н.А. Вулканогенные и осадочные формации рифтовых зон Восточной Африки. М.: Наука, 1977. 183 с.

Ломоносов И.С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1974. 164 с.

Лысак С.В., Зорин Ю.А. Геотермическое поле Байкальской рифтовой зоны. М.: Наука, 1976. 90 с.

Лысак С.В., Шерман С.И. Глубинный тепловой поток и сейсмическая активность Прибайкалья // Сейсмичность и глубинное строение Прибайкалья. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. С. 56–68.

Лысак С.В., Шерман С.И., Дорофеева Р.П. О связи теплового потока Байкальской рифтовой зоны с сейсмической активностью // Результаты комплексных геофизических исследований в сейсмоопасных зонах. М.: Наука, 1978. С. 126–131.

Милановский Е.Е. Рифтовые зоны континентов. М.: Недра, 1976. 279 с.

Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Ломоносов И.С., Колдышева Р.Я., Диденко А.А., Шерман С.И. Гидрогеология Прибайкалья. Москва: изд-во Наука, 1968. 170 с.

Пиннекер Е.В., Шабынин Л.Л., Ясько В.Г. и др. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Гидрогеология. Новосибирск: Наука, 1984. 167 с.

Писарский Б.И. Закономерности формирования подземного стока бассейна озера Байкал. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1987. 154 с.

Плюснин А.М., Чернявский М.К., Посохов В.Ф. Условия формирования гидротерм Баргузинского Прибайкалья по данным микроэлементного и изотопного состава // Геохимия. 2008. № 10. С. 1063–1072.

Пшенников К.В. Об энергетическом балансе в области очага сильного землетрясения // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1965. № 10. С. 23–29.

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

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

Рассказов С.В., Ильясова А.М., Борняков С.А., Снопков С.В., Чувашова И.С., Чебыкин Е.П. Гидрогеохимические отклики подземных вод ст. 184 в 2020–2021 гг. на сейсмогенные деформации Байкало-Хубсугульской активизации // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 4. С. 26–52. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.26

Рассказов С.В., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Оргильянов А.И., Коваленко С.Н., Семинский А.К., Попов Е.П., Чебыкин Е.П. Гидрогеохимическая зональность изотопов урана ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) на юге Сибирского палеоконтинента: роль резервуара Южного Байкала в формировании подземных вод // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11, № 3. С. 632–650. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496>

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А. Разработка Култукского сейсмопрогностического полигона: вариации ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала

// Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, № 4. С. 519–553.

Ружич В.В., Кочарян Г.Г., Савельева В.Б., Травин А.В. О формировании очагов землетрясений в разломах на приповерхностном и глубинном уровне земной коры. Часть II. Глубинный уровень // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 1039–1061. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0383.

Чебыкин Е.П., Гольдберг Е.Л., Куликова Н.С., Жученко Н.А., Степанова О.Г., Малопевная Ю.А. Метод определения изотопного состава аутигенного урана в донных отложениях озера Байкал // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 6. С. 604–616.

Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Снопков С.В., Рассказов С.В. Сигналы ртути подземных вод Култукского полигона во время подготовки и реализации Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации 2020–2021 гг. // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 1. С. 7–9. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2022.1.7>

Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В. Первые результаты мониторинга $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // Доклады академии наук. 2015. Т. 460, № 4. С. 464–467.

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

Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 6. С. 936–937.

Шестакова А.В., Гусева Н.В. Применение геотермометров для оценки глубинных температур циркуляции термальных вод на примере Восточной Тувы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 1. С. 25–36.

Arnorsson S. The use of mixing models and chemical geothermometers for estimating underground temperatures in geothermal systems // J. Volcan. Geoth. Res. 1985. V. 23. P. 209–335.

Arnorsson S., Gunnlaugsson E., Svavarsson H. The chemistry of geothermal waters in Iceland-II. Mineral equilibria and independent variables controlling water compositions // Geochim. Cosmochim. Acta. 1983. V. 47. P. 547–566.

Belhai M., Fujimitsu Y., Bouchareb Haouchine F.Z., Haouchine A., Nishijima J. A hydrochemical study of the Hammam Righa geothermal waters in northcentral Algeria // Acta Geochim. 2016. V. 35. P. 271–287. DOI: 10.1007/s11631-016-0092-8

Cowan D. S. Do faults preserve a record of seismic slip? A field geologist's opinion. Journal of Structural Geology. 1999. V. 21, No. 8-9. P. 995–1001.

Dolgorjav O. Geochemical characterization of thermal fluids from the Khangay area, Central Mongolia // Geothermal training programme. 2009. V. 10. P. 125–150.

Gülic N. Applications of geothermometry. <https://studylib.net/doc/8327695/1-applications-of-geothermometry-nilg%C3%BCn-g%C3%BCle%C3%A7-middle>

Ehlers T.A., Chapman D.S. Normal fault thermal regimes: conductive and hydrothermal heat transfer surrounding the Wasatch fault, Utah // Tectonophysics. 1999. V. 312, No. 2–4. P. 217–234.

Fournier R.O. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. Geothermics. 1977. V. 5. P. 41–50.

Fournier R.O., Potter R.W. II A revised and expanded silica (quartz) geothermometer. Geotherm. Resour. Counc. Bull. 1982. V. 11. P. 3–12.

Fournier R.O., Rowe J.J. Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells // Amer. J. Sci. 1966. V. 264, No. 9. P. 685–697.

Friedrichsen H. Geothermal systems in the Upper Rhine graben und Northern Black Forest: A chemical and stable isotope study//Tectonophysics. 1981. V. 73, No. 1–3. P. 125–140.

Karingithi C.W. Chemical geothermometers for geothermal exploration // Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources, organized by UNU-GTP, KenGen and GDC, at Lake Naivasha, Kenya, 2009. P. 1–12.

Kilty K., Chapman D.S., Mase C.W. Forced convective hot transfer in the Monroe hot springs geothermal system// J. Volcanol. Geotherm. Res. 1979. V. 6, No.3/4. P. 257-277.

Kilty K., Chapman D.S. Convective heat transfer in selected geologic situations // *Ground-water*. 1980. V. 18, No. 4. P. 386–395.

Levitte D., Eckstein J. Correlation between the silica concentration and the orifice temperature in the Wann springs along the Jordan-Ded Sea rift wally // *Geothermics*. 1977. V. 7, NLP. P. 1–8.

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Bornyakov S.A., Chuvashova I.S. Change of seismic hazard levels in complete 12-year seismogeodynamic cycle of the South Baikal Basin: Results of hydroisotopic ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) monitoring // *Geology and Environment*. 2022. V. 2, No. 2. P. 7–21. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.7

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

Sibson R.H. Interactions between temperature and pore fluid pressure during an earthquake faulting and a mechanism for partial or total stress relief // *Nature*. 1973. V. 243. P. 66–68.

Sibson, R.H. (1975). Generation of pseudotachylyte by ancient seismic faulting. *Geophysical Journal International*, 43(3), P. 775–794.

Sibson R.H. Fault rocks and fault mechanisms // *J. Geol. Soc. London*. 1977. 133, p. 191–213.

Uzelli T., Baba A., Mungan G.G. et al. Conceptual model of the Gulbahce geothermal system, Western Anatolia, Turkey: Based on structural and hydrogeochemical data // *Geothermics*. 2017. V. 68. P. 67–85.

References

Badminov P.S., Ganchimeg D., Orgil'yanov A.I., Kryukova I.G., Oyuuntsetseg D. Estimation of deep temperatures of Khangai and Eastern Sayan thermal springs using hydrochemical geothermometers // *Bulletin of BSU. Chemistry, physics*. 2011. Issue 3. P. 90–94. (in Russian)

Borisenko I.M., Zamana L.V. Mineral waters of the Buryat ASSR. Ulan-Ude: Buryat, book publishing house, 1978. 162 p. (in Russian)

Volkova V.P., Afanasenko V.E. Thermal mineral waters of the BAM development zone and the possibility of their effective use // *Permafrost research*. Issue. XIX. M.: Publishing House of Moscow State University, 1980. P. 154–163. (in Russian)

Golenetsky S.I., Golubev V.A. On the connection between seismicity and heat flow in the region of the Baikal basin // *Geology and Geophysics*. 1985. No. 6. P. 87–96. (in Russian)

Chebykin E.P., Goldberg E.L., Kulikova N.S., Zhuchenko N.A., Stepanova O.G., Malopevnaya Yu.A. Method for determining the isotopic composition of authigenic uranium in the bottom sediments of Lake Baikal // *Geology and Geophysics*. 2007. V. 48, No. 6. C. 604–616. (in Russian)

Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Rasskazov S.V. Groundwater mercury signals from the Kultuk polygon during the preparation and implementation of the Baikal-Khubsugul seismic activation in 2020–2021 // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 1. P. 7–9. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2022.1.7> (in Russian)

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

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

Chipizubov A.V., Smekalin O.P. Paleoseis-modislocations and related paleoearthquakes at the Main Sayan Fault zone // *Russian Geology and Geophysics*. 1999. V. 40, No. 6. P. 936–937. (in Russian)

Golubev V.A. Thermal and chemical characteristics of hydrothermal systems of the Baikal rift zone // *Soviet Geology*. 1982. No. 10. P. 100–108. (in Russian)

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

Golubev V.A., Platonov L.M. Experience in the use of a silicon geothermometer to assess the heat flow in the south of Eastern Siberia // *Geology and Geophysics*. 1990. No. 6. P. 155–159. (in Russian)

Ilyin V.A., Kononov V.I., Polyak B.G., Kozlov-tseva S.V. Assessment of deep temperatures using

- hydrogeochemical indicators // *Geochemistry*. 1979. No. 6. P. 888–901. (in Russian)
- Ilyasova A.M., Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Borneyakov S.A., Snopkov S.V., Chuvashova I.S., Tubanov Ts.A., German E.I., Bartanova S.V. Testing the Cherdyntsev–Chalov effect using the TsVO-100 seismic vibrator and monitoring similar U-hydroisotope responses to earthquake preparation at the Kultuk polygon, Southern Baikal // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 4. P. 7–25. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.7 (in Russian)
- Kozlovtsseva S.V., Khutorskoy M.D. Experience in the use of hydrochemical indicators to assess the geothermal conditions of earth interior in Mongolia // *Lithology and Mineral Deposits*. 2002. No. 4. P. 110–120. (in Russian)
- Kocharyan G.G. *Geomechanics of faults*. The Russian Academy of Sciences; Institute of Geosphere Dynamics; Russian Science Foundation. M.: GEOS, 2016. 424 p. (in Russian)
- Logatchev N.A. *Volcanogenic and sedimentary formations of rift zones in East Africa*. M.: Nauka, 1977. 183 p. (in Russian)
- Lomonosov I.S. *Geochemistry and formation of modern hydrotherms of the Baikal rift zone*. Novosibirsk: Science. Sib. branch, 1974. 164 p. (in Russian)
- Lysak S.V., Zorin Yu.A. *Geothermal field of the Baikal rift zone*. M.: Nauka, 1976. 90 p. (in Russian)
- Lysak S.V., Sherman S.I. *Deep heat flow and seismic activity of the Baikal region* // *Seismicity and deep structure of the Baikal region*. Novosibirsk: Science. Sib. branch, 1978. P. 56–68. (in Russian)
- Lysak S.V., Sherman S.I., Dorofeeva R.P. *On the connection of the heat flow of the Baikal rift zone with seismic activity* // *Results of integrated geophysical studies in seismically hazardous zones*. M.: Nauka, 1978. P. 126–131. (in Russian)
- Map of earthquake epicenters. Irkutsk: Baikal Branch of the Federal Research Center Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, 2023. <http://www.seis-bykl.ru> (in Russian)
- Milanovsky E.E. *Rift zones of continents*. M.: Nedra, 1976. 279 p. (in Russian)
- Pinneker E.V., Pisarsky B.I., Lomonosov I.S., Koldysheva R.Ya., Didenko A.A., Sherman S.I. *Hydrogeology of the Baikal region*. Moscow: Science Publishing House, 1968. 170 p. (in Russian)
- Pinneker E.V., Shabynin L.L., Yasko V.G. et al. *Geology and seismicity of the BAM zone*. Hydrogeology. Novosibirsk: Nauka, 1984. 167 p. (in Russian)
- Pisarsky B.I. *Regularities of groundwater runoff formation in the Baikal basin*. Novosibirsk: Science. Siberian Branch, 1987. 154 p. (in Russian)
- Plyusnin A.M., Chernyavsky M.K., Posokhov V.F. *Conditions of the formation of hydrothermal springs in the Barguzin-Sis-Baikal region from trace element and isotope compositions* // *Geochemistry*. 2008. No. 10. P. 1063–1072.
- Pshennikov K.V. *On the energy balance in region of a strong earthquake source* // *Bulletin of Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Earth*. 1965. No. 10. P. 23–29.
- Rasskazov S.V. *Magmatism of the Baikal rift system*. Novosibirsk: Nauka. Siberian publishing company, 1993. 288 p.
- Rasskazov S.V., Chuvashova I.S. *Volcanism and transtension in the northeast of the Baikal rift system*. Novosibirsk: Academic publishing house "Geo", 2018. 383 p.
- Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Vodneva E.N., Chuvashova I.S., Borneyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V., Chechelnytsky V.V., Gileva N.A. *Development of the Kultuk seismic prognostic polygon: (²³⁴U/²³⁸U) and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr variations in groundwater from active faults on the western coast of the Baikal* // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2015. V. 6, No. 4. P. 519–553.
- Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Borneyakov S.A., Snopkov S.V., Chuvashova I.S., Chebykin E.P. *Hydrogeochemical responses of groundwater station 184 in 2020–2021 on seismogenic deformations of the Baikal-Khubsugul reactivation* // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 4. P. 26–52. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.26
- Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Borneyakov S.A., Orgilyanov A.I., Kovalenko S.N., Seminsky A.K., Popov E.P., Chebykin E.P. *Hydrogeochemical zoning of uranium isotopes (²³⁴U/²³⁸U) in the Southern Siberian paleocontinent: the role of the South Baikal reservoir in the groundwater formation* // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2020. V. 11, No. 3. P. 632–650. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496>
- Ruzhich V.V., Kocharyan G.G., Savelyeva V.B., Travin A.V. *On the formation of earthquake sources in faults at the near-surface and deep levels of the earth's crust. Part II. Deep level* // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018. V. 9. No. 3. P. 1039–1061. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0383.

- Shestakova A.V., Guseva N.V. The use of geothermometers to assess the deep temperatures of thermal water circulation on the example of Eastern Tuva // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. 2018. V. 329. No. 1. P. 25–36.
- Zamana L.V. New data on some thermal springs of the Barguzin area of the Buryat ASSR // *Questions of Geology of the Baikal and Transbaikalia*. Issue 5. Chita: Transbaikal Publishing House. Branch of Geogr. Society of the USSR, 1968. P. 173–174. (in Russian)
- Zamana L.V., Gladkaya N.M. New data on the geochemistry of natural waters in the region of the Urov endemia in Siberia, Reports of RAS. 1991. V. 321, No. 3. P. 593–595. (in Russian)
- Arnorsson S. The use of mixing models and chemical geothermometers for estimating underground temperatures in geothermal systems // *J. Volcan. Geoth. Res.* 1985. V. 23. P. 209–335.
- Arnorsson S., Gunnlaugsson E., Svavarsson H. The chemistry of geothermal waters in Iceland-II. Mineral equilibria and independent variables controlling water compositions // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1983. V. 47. P. 547–566.
- Belhai M., Fujimitsu Y., Bouchareb Haouchine F.Z., Haouchine A., Nishijima J. A hydrochemical study of the Hammam Righa geothermal waters in northcentral Algeria // *Acta Geochim.* 2016. V. 35. P. 271–287. DOI: 10.1007/s11631-016-0092-8
- Cowan D. S. Do faults preserve a record of seismic slip? A field geologist's opinion. *Journal of Structural Geology*. 1999. V. 21, No. 8–9. P. 995–1001.
- Dolgorjav O. Geochemical characterization of thermal fluids from the Khangay area, Central Mongolia // *Geothermal training programme*. 2009. V. 10. P. 125–150.
- Gülic N. Applications of geothermometry. <https://studylib.net/doc/8327695/1-applications-of-geothermometry-nilg%C3%BCn-g%C3%BCle%C3%A7-middle>
- Ehlers T.A., Chapman D.S. Normal fault thermal regimes: conductive and hydrothermal heat transfer surrounding the Wasatch fault, Utah // *Tectonophysics*. 1999. V. 312, No. 2–4. P. 217–234.
- Fournier R.O. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*. 1977. V. 5. P. 41–50.
- Fournier R.O., Potter R.W. II A revised and expanded silica (quartz) geothermometer. *Geotherm. Resour. Counc. Bull.* 1982. V. 11. P. 3–12.
- Fournier R.O., Rowe J.J. Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells // *Amer. J. Sci.* 1966. V. 264, No. 9. P. 685–697.
- Friedrichsen H. Geothermal systems in the Upper Rhine graben und Northern Black Forest: A chemical and stable isotope study//*Tectonophysics*. 1981. V. 73, No. 1–3. P. 125–140.
- Karingithi C.W. Chemical geothermometers for geothermal exploration // *Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources*, organized by UNU-GTP, KenGen and GDC, at Lake Naivasha, Kenya, 2009. P. 1–12.
- Kilty K., Chapman D.S., Mase C.W. Forced convective hot transfer in the Monroe hot springs geothermal system// *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1979. V. 6, No. 3/4. P. 257–277.
- Kilty K., Chapman D.S. Convective heat transfer in selected geologic situations // *Ground-water*. 1980. V. 18, No. 4. P. 386–395.
- Levitte D., Eckstein J. Correlation between the silica concentration and the orifice temperature in the Wann springs along the Jordan-Ded Sea rift valley // *Geothermics*. 1977. V. 7, NLP. P. 1–8.
- Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Bornyakov S.A., Chuvashova I.S. Change of seismic hazard levels in complete 12-year seismogeodynamic cycle of the South Baikal Basin: Results of hydroisotopic ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) monitoring // *Geology and Environment*. 2022. V. 2, No. 2. P. 7–21. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.7
- Rasskazov S., Chuvashova I., Yasnygina T., Saranina E., Gerasimov N., Ailow Y., Sun Y.-M. Tectonic generation of pseudotachylytes and volcanic rocks: Deep-seated magma sources of crust-mantle transition in the Baikal Rift System, Southern Siberia // *Minerals*. 2021. V. 11, No. 5. P. 487.
- Sibson R.H. Interactions between temperature and pore fluid pressure during an earthquake faulting and a mechanism for partial or total stress relief // *Nature*. 1973. V. 243. P. 66–68.
- Sibson, R.H. (1975). Generation of pseudotachylyte by ancient seismic faulting. *Geophysical Journal International*, 43(3), 775–794.
- Sibson R.H. Fault rocks and fault mechanisms // *J. Geol. Soc. London*. 1977. 133, p. 191–213.

Uzelli T., Baba A., Mungan G.G. et al. Conceptual model of the Gulbahce geothermal system, Western Anatolia, Turkey: Based on structural and hydrogeochemical data // Geothermics. 2017. V. 68. P. 67–85.

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.

Pyasova Aigul Maratovna,

candidate of geological and mineralogical sciences,
664033 Irkutsk, Lermontov str., d. 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Leading Engineer,
email: ila@crust.irk.ru.

Снопков Сергей Викторович,

кандидат геолого-минералогических наук,
664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет, геологический факультет,
доцент,

664074, г. Иркутск, ул. Курчатова, 3,

Сибирская школа геонаук, Иркутский национальный исследовательский технический университет,

ведущий научный сотрудник,

email: snopkov_serg@mail.ru.

Snopkov Sergey Viktorovich,

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,

664003 Irkutsk, Lenin str., 3, Irkutsk State University, Faculty of Geology,

Assistant Professor,

664074, Irkutsk, Kurchatov str., 3, Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University,

Leading Researcher,

email: snopkov_serg@mail.ru.

Косейсмические вариации Li в подземных водах станции 27 Култукского полигона

И.С. Чувашова^{1,2}, А.М. Ильясова¹

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

² *Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*

Аннотация. Приводятся результаты мониторинга термофильного микроэлемента Li и связанных с ним макрокомпонентов Cl и S в подземных водах ст. 27 Култукского полигона. Устанавливается зависимость их вариаций от землетрясений и афтершоков Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2022 гг. По Na/Li геотермометрии, отношению активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ и активности ^{234}U обозначаются источники подземных вод в резервуаре с температурой до 100 °С и более при растяжении коры и источники с температурой до 8 °С при ее сжатии. В ходе развития полного сейсмогеодинамического цикла сжатия и растяжения коры расшифровываются фазы стабилизации, а также фазы возрастания и снижения температуры подземных вод.

Ключевые слова: подземные воды, мониторинг, Na/Li, землетрясения, Байкал.

Coseismic variations of Li in groundwaters from station 27 of the Kultuk polygon

I.S. Chuvashova^{1,2}, A.M. Ilyasova¹

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

² *Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

Abstract. Monitoring results of the thermophilic trace element element Li and related macrocomponents Cl and S in groundwaters from station 27 in the Kultuk polygon. The dependence of their variations on earthquakes and aftershocks of the 2020–2022 Baikal-Khubsugul reactivation is established. From Na/Li geothermometry, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio, and ^{234}U activity, groundwater sources in a deep reservoir with a temperature as high as 100 °C or more under crust stretching and those with a temperature as low as 8 °C under crust compression are designated. Phases of stabilization, increase and decrease in groundwater temperature are deciphered in the course of the development of a complete seismogeodynamic cycle of compression and extension of the crust.

Keywords: groundwater, monitoring, Na/Li, earthquake, Baikal.

Введение

При землетрясениях регистрируется действие различных геологических факторов, влияющих на распределение химических элементов в подземных водах. Связь таких элементов с сейсмогенными деформациями становится очевидной, если в подземных водах длительное время сохраняется их фоновая концентрация, а непосредственно перед землетрясением или при его реализации устанавливается их аномальное поведение.

В этом случае нужно выявлять характер связи между развитием сейсмичности и гидрогеохимическими процессами, контролирующими распределение элементов между твердыми и жидкими средами.

В подземных водах Култукского полигона индикаторную роль косейсмических откликов выполняет Li. Деформационные эффекты этого элемента регистрируются в подземных водах ст. 27, которые характеризуются как конечный компонент Култукско-

го резервуара в шовной зоне Главного Саянского разлома (ГСР) с наиболее неравновесным U и наименее радиогенным Sr в двухкомпонентной U–Sr-изотопной модели смещения (Расказов и др., 2015). Li-деформационные эффекты устанавливаются в 2013–2015 гг., перед Северо-Хубсугульским и Голоустным землетрясениями

и произошедшими, соответственно, 05 декабря 2014 г. и 05 сентября 2015 г. После этих сейсмических событий, в 2015–2020 гг., концентрация Li находится в основном на уровне фона (около 0.2 мкг/дм³) и последовательно возрастает (до 1.15 мкг/дм³) во время Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2022 гг. (рис. 1).

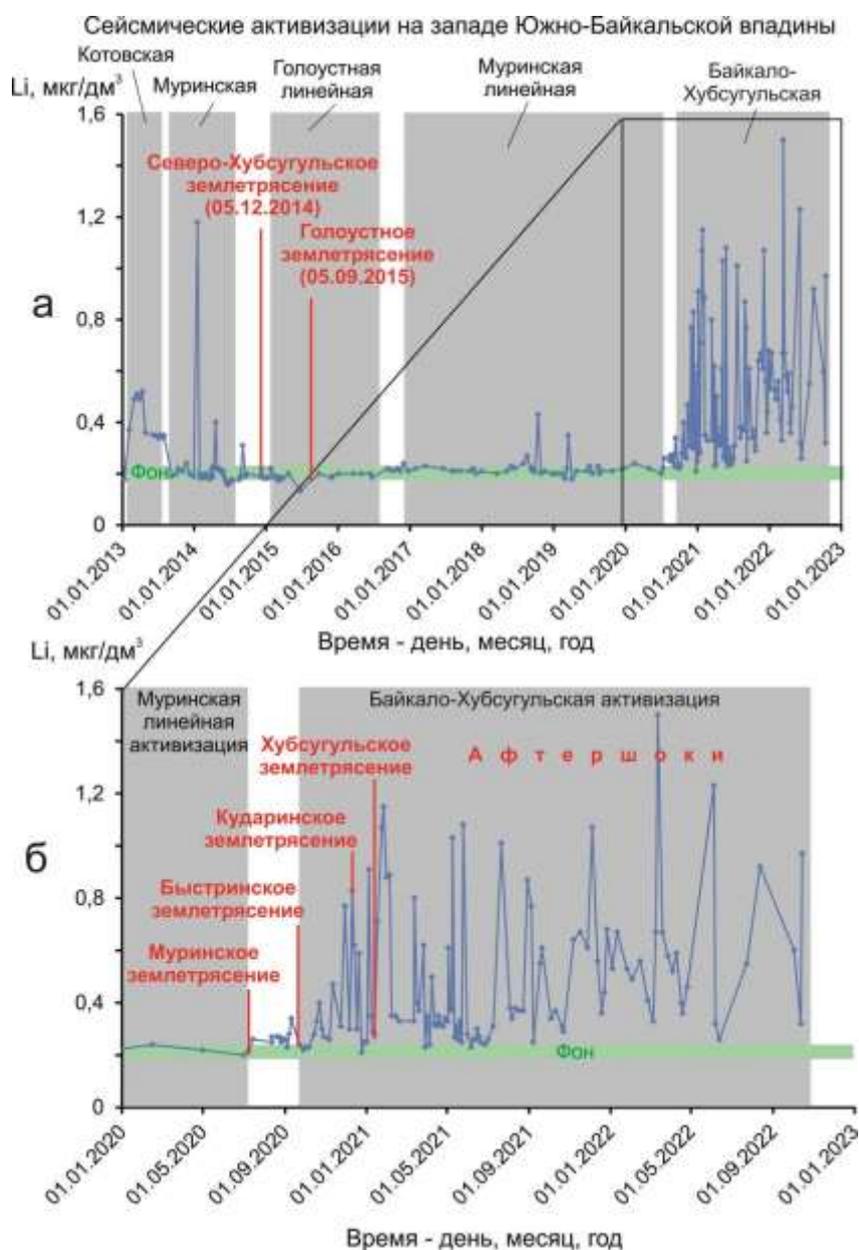


Рис. 1. Диаграммы вариаций концентрации Li в подземных водах ст. 27 Култукского полигона в течение всего временного интервала наблюдений 2013–2022 г. (а) и в течение последних трех лет (б).

Fig. 1. Diagrams of Li variations in groundwaters from station 27 of the Kultuk polygon during the entire observation time interval of 2013–2022 (a) and during the last three years (b).

Литий присутствует в подземных водах в микроколичествах в виде катиона Li⁺ и в соединениях с основными компонентами (Cl, S

и C) в виде: LiSO₄⁻, LiOH⁰, LiCl⁰, LiCH₃COO⁰, Li(CH₃COO)₂⁻ (Merkel, Planer-Friedrich, 2005). В настоящей работе прово-

дится анализ мониторингового ряда Li ст. 27 для выявления характера его косейсмического обогащения и обеднения подземных вод и установления его соотношений с основными компонентами, образующими соединения в ходе развития сейсмических активизаций.

Местоположение ст. 27 на Култукском полигоне, отбор, хранение и аналитические исследования природных вод

Постоянный мониторинг подземных вод проводится на Култукском полигоне с частотой опробования в среднем один раз в 2 недели более 10 лет на шести основных станциях: на скважинах – станции 27 (Школа), 184 (ул. Школьная), 8 (Чертова Гора), 40

(Стрелка), 9 (Земляничный) и в роднике – ст. 14к (Ключ Тигунчиха). Основные мониторинговые станции занимают разное положение в активных разломах структурного сочленения Южно-Байкальской впадины и Тункинской долины и существенно расходятся между собой по гидрогеохимическим показателям подземных вод. Скважины имеют глубину от 60 до 120 м. Население пос. Култук ежедневно берет из них воду, обеспечивая эффективную прокачку. Менее часто, но регулярно, опробуются вспомогательные станции. Ст. 27 находится в центре полигона, на Култукской тектонической ступени, наклоненной к востоку, в сторону Байкала (рис. 2).

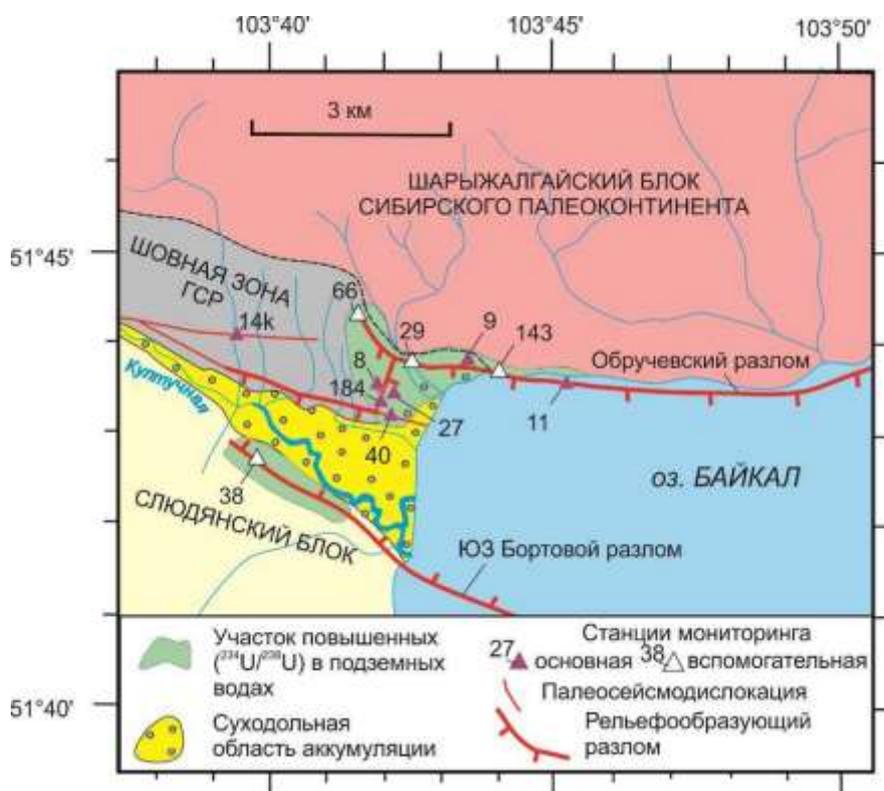


Рис. 2. Схема расположения ст. 27 и других основных и вспомогательных станций гидрогеохимического опробования активных разломов на западном побережье оз. Байкал (Култукский полигон). Палеосейсмодислокации в шовной зоне Главного Саянского разлома (ГСР) показаны по работе (Чипизубов, Смекалин, 1999).

Fig. 2. Location scheme of station 27 and other main and supplementary stations for hydrogeochemical sampling of active faults on the western coast of Lake Baikal (Kultuk polygon). Paleoseismic dislocations in the suture zone of the Main Sayan Fault (ГСР) are shown after (Chipizubov, Smekalin, 1999).

Для определения химического элементного состава образцы воды фильтруют через шприц-насадки с диаметром пор 0.45 мкм (Minisart 16555-К, ацетат целлюлозы, Sarto-

rius Stedim Biotech GmbH, Германия) в предварительно взвешенные 2 мл полипропиленовые пробирки Эппендорфа (Axugen Scientific, Cat.-No. MCT-200-C, США, Мексика), содержащие 40 мкл консерванта. В качестве консерванта используется концентрированная азотная кислота (70%), дважды очищенная с помощью суббойлинговой системы перегонки кислот (Savillex DST-1000 sub-boiling distillation system, Япония), в которую добавляется индий (типично 1000 ppb) в качестве внутреннего стандарта. Аликвоты консерванта взвешиваются при добавлении в пробирки. Пробирки с отобранными образцами воды взвешиваются и рассчитывается точное содержание азотной кислоты (типично 2 %) и индия (типично 30 ppb). Пробы хранятся в холодильнике при положительной температуре. В подготовленных растворах определяются содержание 72 химических элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСПР-МС) на квадрупольном

масс-спектрометре Agilent 7500 (Чебыкин и др., 2012). Вместе с Li анализируются основные компоненты Cl и S. Определение углерода методом ИСП-МС встречает ряд трудностей из-за периодической контаминации газа аргона, используемого для генерации плазмы.

Изотопы урана определяются после его выделения на ионно-обменной колонке из отдельной пробы воды (до 400 мл). Детали методики приведены в работах (Чебыкин и др., 2007, 2015).

Сейсмические активизации

По каталогу (Карта..., 2023) в пространственно-временном распределении эпицентров землетрясений западной части акватории Южного Байкала в 2008–2022 гг. определяется 7 сейсмических активизаций, разделенных между собой перестройками (табл. 1).

Таблица 1

Временные интервалы сейсмических активизаций и перестроек эпицентров землетрясений в 2008–2022 гг. (от сильной Култукской активизации до сильной Байкало–Хубсугульской)

Table 1

Time intervals of seismic reactivations and reorganizations of earthquake epicenters in 2008–2022 (from strong Kultuk reactivation to strong Baikal-Khubsugul one)

Сейсмическая активизация	Интервал активизации (продолжительность, месяцы)	Интервал перестройки (продолжительность, месяцы)
Култукская	27.08.2008–04.01.2011 (27)	04.01.2011–24.06.2011 (5)
Толбазихинская	24.06.2011–11.10.2012 (15)	11.10.2012–08.01.2013 (2)
Котовская	0.8.01.2013–21.07.2013 (6)	21.07.2013–11.08.2013 (<1)
Муринская	11.08.2013–20.07.2014 (11)	20.07.2014–13.01.2015 (5)
Голоустная линейная	13.01.2015–29.08.2016 (20)	29.08.2016–14.12.2016 (2.5)
Муринская линейная	14.12.2016–06.07.2020 (43)	06.07.2020–22.09.2020 (2.5)
Байкало–Хубсугульская	22.09.2020–(продолжается более 30 месяцев)	

Примечание: Обоснование интервалов приведено в работе (Rasskazov et al., 2020). Дополнительно обозначается окончание активности Муринской эпицентральной линии Муринским землетрясением 06 июля 2020 г. и перестройка 06 июля 2020 г. – 22 сентября 2020 г., обозначившая начало Байкало–Хубсугульской активизации.

До сильного Южно-Байкальского землетрясения, произошедшего в западной части Южно-Байкальской впадины 25 февраля 1999 г. ($K=14.6$), во временном интервале от 22 марта до 10 февраля 1999 г., пространственно-временное распределение эпицентров землетрясений этой территории сочеталось с активизацией Саянской сейсмической ветви, которая протягивалась цепочкой эпи-

центров от Южно-Байкальской впадины в Тункинскую долину. После Южно-Байкальского землетрясения сейсмогенные деформации перестроились и в едином режиме латерального распределения эпицентров привели к Култукскому землетрясению 2008 г. Эпицентры мигрировали в пределах этой структуры без распространения в Тункинскую долину. Сильное Култукское зем-

летрясение повлекло за собой многочисленные афтершоки, охватившие не только акваторию оз. Байкал, но и сопредельное южное побережье. Временному интервалу до и после Култукской сейсмической активизации, происходившей в 2008–2011 гг., было свойственно в целом латеральное распределение эпицентров относительно Южно-Байкальской впадины (Rasskazov et al., 2020).

После Култукского землетрясения латеральный режим распределения эпицентров землетрясений поддерживался до 2013 г. В 2014–2015 гг. произошли сейсмические события, объединившие Хубсугульскую и Южно-Байкальскую впадины и связующую эти структуры Тункинскую долину в об-

ширную Байкало-Хубсугульскую сейсмогенерирующую область (рис. 3). 05 декабря 2014 г. произошло сильное Северо-Хубсугульское землетрясение ($K=13.9$) в северной части Хубсугульской впадины, за которым 05 сентября 2015 г. последовало Голоустное землетрясение умеренной силы ($K=12.3$) в Южно-Байкальской впадине. В это время Байкало-Хубсугульская сейсмогенерирующая область настроилась на режим переключки сейсмическими событиями между Хубсугульским эпицентральной полем и эпицентральной полями Южно-Байкальской впадины. В 2020–2022 гг. такой режим в целом характеризовал Байкало-Хубсугульскую сейсмическую активизацию.



Рис. 3. Схема распределения сильных и умеренных землетрясений Байкало-Хубсугульской сейсмической области в 2014–2022 гг. Афтершоки не показаны. Землетрясения 2014–2015 гг.: X – Северо-Хубсугульское, Гл – Голоустное. Землетрясения 2020–2021 гг.: Кр – умеренное Кыренское в Тункинской долине, М – умеренное Муринское в Южно-Байкальской впадине, Б – сильное Быстринское, Кд – сильное Кударинское, X – сильное Хубсугульское. Использован каталог (Карта..., 2023).

Fig. 3. Scheme of distribution of strong and moderate earthquakes in the Baikal-Khubsugul seismic region in 2014–2022. Aftershocks are not shown. Earthquakes of 2014–2015: X – North-Khubsugul, Гл – Goloustnoe. Earthquakes in 2020–2021: Кр – moderate Kyren in the Tunka Valley, М – moderate Murin in the South Baikal Basin, Б – strong Bystraya, Кд – strong Kudara, X – strong Khubsugul. The catalog (Map..., 2023) is used.

Развитие деформаций коры в центральной части Байкальской сейсмической зоны рассматривается в рамках полного сейсмогеодинамического цикла, проявившегося от Култукской до Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации. При мониторинге подземных вод на Култукском полигоне в

2012–2022 гг. установлено снижение отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ и активности ^{234}U , свидетельствующее об относительном закрытии микротрещин (возрастании фактора сжатия коры), а затем – возрастание этих параметров, отражающее открытие микротрещин (возрастание фактора растяжения

коры). Сжатие реконструировано в середине сейсмогеодинамического цикла (в 2014–2015 г.), растяжение – в его конце, при развитии Байкало-Хубсугульской активизации (в 2020–2022 гг.) (Чебыкин и др., 2022; Ras-skazov et al., 2022).

Временные вариации концентрации Li в подземных водах и землетрясения

Землетрясения 2013–2015 гг.: Котовская и Муринская активизации, переход к Голоустной линейной активизации

Котовская сейсмическая активизация начинается с наиболее сильного (главного) землетрясения 08 января 2013 г. ($K=11.2$). Она продолжается 6 месяцев (до 21 июля 2013 г.). Середине этой активизации (01

марта – 12 апреля 2013 г.) соответствует плоский максимум Li из четырех точек $0.49–0.52$ мкг/дм³. В конце Котовской активизации концентрация Li ступенчато снижается до интервала $0.34–0.36$ мкг/дм³. Это снижение сопровождается слабыми землетрясениями 24 апреля и 07 июня, эпицентры которых находятся рядом с пос. Култук. Степень Li длится от землетрясения 24 апреля до 30 июля и захватывает начало структурной перестройки эпицентральных полей между Котовской и Муринской активизациями. 09 сентября концентрация Li выходит на фоновое значение (0.19 мкг/дм³) со слабым подъемом на низкий максимум (0.24 мкг/дм³) 22 ноября с последующим возвращением к фону 29 декабря 2013 г. (рис. 4).



Рис. 4. Диаграмма сопоставления Li-фаз в подземных водах ст. 27 с сейсмическими событиями 2013–2015 гг. в Байкало-Хубсугульской сейсмогенерирующей области. Желтыми полосами выделены стабильные (S, stable) фазы Li, белыми полосами между ними – фазы возрастающей (I, increasing) и снижающейся (D, decreasing) концентрации Li.

Fig. 4. Comparison diagram of Li-phases in groundwaters from station 27 with seismic events of 2013–2015 in the Baikal-Khubsugul seismogenerating region. The yellow stripes indicate stable (S) Li-phases, the white stripes between them show those of increasing (I) and decreasing (D) Li concentrations.

С 11 августа 2013 г. до 20 июля 2014 г. следует Муринская активизация в основном при фоновой концентрации Li. В середине этой активизации (19 апреля 2014 г.) выделяется одиночный максимум Li (0.4

мкг/дм³). Во время перестройки между Муринской и Голоустной линейной активизациями (20.07.2014–13.01.2015) 04 сентября 2014 г. опять выделяется одиночный максимум Li (0.31 мкг/дм³). На фоне преобладаю-

щих значений 0.18 мкг/дм^3 появляется низкий максимум (0.22 мкг/дм^3) 07 декабря, близкий по времени Северо-Хубсугульскому землетрясению (05 декабря 2014 г.). За снижением концентрации Li (до 0.13 мкг/дм^3) 23 июня 2015 г. следует Голоустное землетрясение (05 сентября 2015 г.).

В 2013–2015 гг. фазы повышенной концентрации Li в целом объединяются в два асимметричных максимума. С первым из них связаны слабые (приближенные к полигону) землетрясения в акватории Байкала: Листвянское (08 января 2013 г.) и Култукские (24 апреля и 07 июня 2013 г.). В конце второго интервала реализуются сильное (Северо-Хубсугульское) и умеренное (Голоустное) землетрясения. Первое из них происходит при перестройке от Муринской к Голоустной (линейной) активизации, второе – проявляется как главное землетрясение Голоустной линейной активизации. При более поздней концентрации эпицентров землетрясений вдоль Муринской линии (с 14 де-

кабря 2016 г. до 06 июля 2020 г.) выдерживается в основном фоновая концентрация Li с двумя небольшими максимумами в конце 2018 – начале 2019 гг. (см. рис. 1).

Землетрясения, запускающие сильную Байкало-Хубсугульскую активизацию в 2020–2021 гг.

В западной части Южно-Байкальской впадины в 2017–2020 гг. землетрясения отсутствуют 2.5 года. Тункинская долина и Южно-Байкальская впадина вовлекаются в сейсмогенные деформации в июне–июле 2020 г. 06 июля 2020 г. происходит Муринское ($K=12.3$) событие в акватории оз. Байкал. 13 июня 2020 г. ему предшествует Кыренское землетрясение в центральной части Тункинской долины ($K=11.7$).

В это время в подземных водах ст. 27 регистрируется фоновая концентрация Li (рис. 5).

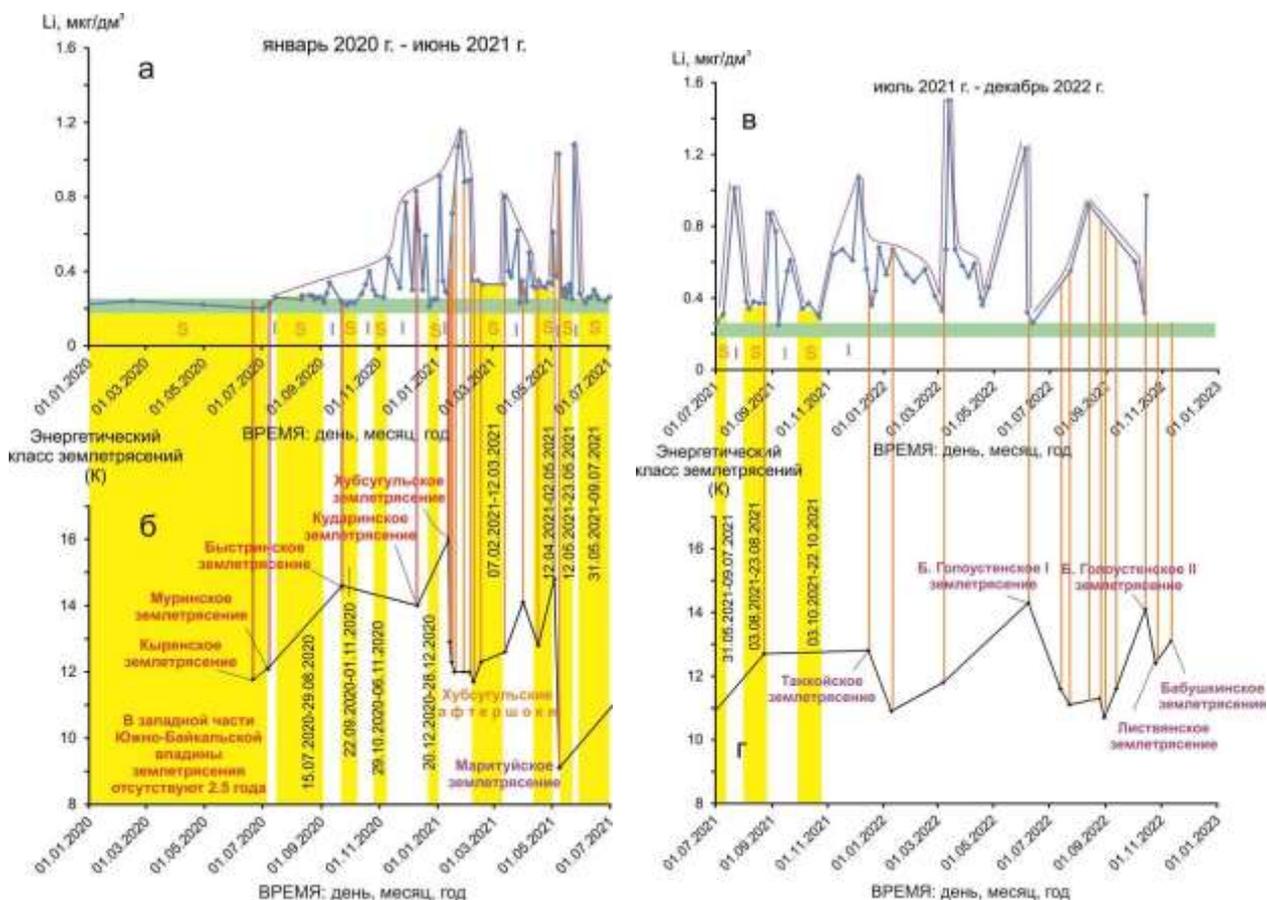


Рис. 5. Диаграммы сопоставления временных вариаций концентрации Li в подземных водах ст. 27 (а, в) с сейсмическими событиями 2020–2022 гг. в Байкало-Хубсугульской сейсмогенерирующей области (б, г). Временной интервал 2020–2022 гг. разделяется на 2 отрезка: январь 2020 г. – июнь 2021 г. и июль 2021 г. – декабрь 2022 г. Условные обозн. см. на рис. 3.

Fig. 5. Comparison diagrams of temporal variations in Li concentration in groundwaters from station 27 (a, b) with seismic events of 2020–2022. in the Baikal-Khubsugul seismogenic region (b, r). Timing of 2020–2022 is subdivided into 2 segments: January 2020 – June 2021 and July 2021 – December 2022. Symbols are as in Fig. 3.

Три пробы, отобранные 01, 07 и 15 июля 2020 г., дают слабый подъем концентрации Li от 0.20 мкг/дм³ до 0.26 мкг/дм³ с выходом за верхний предел фона. В дальнейшем наблюдаются: подобная концентрация Li (0.25–0.26 мкг/дм³) до 29 августа, снижение концентрации (до 0.23 мкг/дм³) 04 сентября, подъем (до 0.34 мкг/дм³) 10 сентября и падение (до 0.24 мкг/дм³) через 10 часов после Быстринского землетрясения (22 сентября). Стабильная концентрация на этом же уровне поддерживается до 1 ноября. К 22 октября концентрация поднимается до 0.4 мкг/дм³, снижается до 0.26 мкг/дм³ 29 октября, остается на том же уровне 06 октября, но уже 11 ноября поднимается до 0.47 мкг/дм³, вновь снижается 23 ноября до 0.31 мкг/дм³, поднимается 29 ноября до 0.77 мкг/дм³, снижается 06 декабря до 0.30 мкг/дм³, поднимается 10 декабря до 0.83 мкг/дм³ (происходит Кударинское землетрясение), снижается 17 декабря до 0.30 мкг/дм³, поднимается 20 декабря до 0.59 мкг/дм³, снижается 24 декабря до фона (0.21 мкг/дм³) и остается до 28 декабря на низком уровне (не выше 0.25 мкг/дм³).

04 января 2021 г. концентрация Li снова поднимается (до 0.91 мкг/дм³), снижается к 10 января до 0.29 мкг/дм³ и 12 января (в день самого сильного Хубсугульского землетрясения Байкало-Хубсугульской активизации) остается почти на том же уровне (0.28 мкг/дм³). В дальнейшем, в течение двух недель, идет последовательный подъем концентрации Li до самого высокого значения (1.15 мкг/дм³) 26 января. Затем концентрация Li снижается (до интервала 0.33–0.35 мкг/дм³) с ее стабилизацией с 7 февраля до 12 марта. Максимальный подъем концентрации Li после Хубсугульского землетрясения 12 января 2021 г. до стабилизации 7–12 февраля совпадает с самым сильным (Хубсугульским) землетрясением и сближен-

ными с ним афтершоками в Хубсугульском эпицентральной поле. Нарастание концентрации Li с июня–июля 2020 г. к январю 2021 г. от фоновых значений до 1.15 мкг/дм³ имеет направленный характер как отклик на нарастающие сейсмогенные деформации коры.

Афтершоки Байкало-Хубсугульской активизации

В ходе афтершоков Байкало-Хубсугульской активизации, с 12 января 2021 г. (время Хубсугульского землетрясения) до 22 октября 2021 г., продолжается чередование пиков Li и интервалов его стабильной концентрации. Интервалы стабилизации (07.02.2021–12.03.2021, 12.04.2021–02.05.2021, 12.05.2021–23.05.2021, 31.05.2021–09.07.2021, 03.08.2021–23.08.2021 и 03.10.2021–22.10.2021) сначала сопровождаются частыми хубсугульскими афтершоками, завершающиеся небольшим (близким к Култукскому полигону) Маритуйским землетрясением в акватории Южного Байкала, и продолжаются с афтершоком в Хубсугульском эпицентральной поле. При переходе к Танхойскому землетрясению, случившемуся 15 января 2021 г. ($K=12.8$), и последующим сейсмическим событиям интервалы стабильной концентрации Li больше не регистрируются (рис. 5б).

Временные вариации общей минерализации, концентраций Cl и S в подземных водах

Общая минерализация (ОМ) подземных вод ст. 27 с течением времени возрастает от интервала значений 210–240 мг/дм³ в 2012–2015 гг. до интервала преобладающих значений 260–270 мг/дм³ в 2019–2022 гг. (рис. 6). На фоне этого подъема выделяются отдельные минимумы и максимумы.

В 2012–2015 гг. минимальное значение ОМ (120 мг/дм³) наблюдается 17 января

2014 г., максимальное (270 мг/дм^3) – 09 апреля этого же года. Минимум ОМ (180 мг/дм^3) образуется 29 ноября 2015 г., после Голоустного землетрясения. После этого минимума значения ОМ выходят в 2016–2019 гг. на более высокий уровень, по сравнению с уровнем ОМ в 2012–2015 гг. Новый переход на более высокий уровень ОМ наблюдается 20 июня – 02 июля 2019 г. Перед Быстринским землетрясением устанавливается уровень преобладающих значений ОМ 2019–2022 гг. В течение этого времени неоднократно возникают минимумы и максимумы. Самый существенный максимум (ОМ= 360 мг/дм^3) образуется 04 июня 2022 г., самый существенный минимум (ОМ= 170 мг/дм^3) – 02–14 октября 2022 г.

В отличие от ОМ, концентрация микрокомпонента Li поддерживается в течение длительных временных интервалов 2012–2020 гг. на одном (фоновом) уровне (см. рис. 1). Иными словами, поведение Li не зависит от последовательного ступенчатого возрастания ОМ. Возникает вопрос: связаны ли макрокомпоненты, образующие в подземных водах химические соединения с Li (Cl и S), с последовательным ступенчатым возрастанием ОМ или имеют поинтервальные вариации, подобные вариациям Li?

Временные изменения концентрации макрокомпонента Cl характеризуются генеральным фоновым уровнем (около $5\text{--}6 \text{ мг/дм}^3$), выдержанным в течение 10 лет (рис. 6б). В интервале 2012–2015 гг. фоновый уровень сужается на нижнем пределе значений генерального уровня. В первой половине 2013 г. концентрация Cl уходит ниже фона, в 2014–2015 гг. – поднимается выше него. Самый большой выброс Cl (09 апреля 2014 г.) совпадает с максимумом ОМ. После

Голоустного землетрясения концентрация Cl стабилизируется на фоновых значениях. Первый небольшой выброс Cl (до 7.2 мг/дм^3) происходит 20–23 августа 2020 г. между Муринским землетрясением (6 июля 2020 г.) и Быстринским (22 сентября 2022 г.). В дальнейшем наблюдаются максимумы возрастающих концентраций Cl: 12.3 мг/дм^3 (Быстринское землетрясение 22 сентября 2020 г.), 18.2 мг/дм^3 и 29 мг/дм^3 (04 июня 2022 г.). Переход от фоновой концентрации Cl к максимумам подобен переходу концентрации Li в 2020–2022 гг. (см. рис. 1). Следовательно, косейсмическая гидрогеохимическая специфика микрокомпонента Li в подземных водах ст. 27 может иметь связь с концентрацией макрокомпонента Cl.

Временные вариации концентрации макрокомпонента S также отличаются от вариаций ОМ выдержанными во времени фоновыми значениями. Подобно концентрации макрокомпонента Cl, концентрация S дает фон (около $4\text{--}6 \text{ мг/дм}^3$) в 2015–2022 гг., но имеет широкий разброс значений в 2012–2015 гг. В середине 2013 г. (04–27 июля) концентрация S уходит на минимум, в 2014 г. (25 февраля–09 апреля) – на максимум, после которого снижается к фону, устанавливаемому в 2015 г. после Голоустного землетрясения (рис. 6в). Во время Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации наблюдаются отдельные максимумы S выше фоновых значений. Наиболее выразительный максимум S (04 июня 2022 г.) совпадает с максимумом ОМ и максимумом Cl. Такое согласованное поведение разных гидрогеохимических показателей связано с подготовкой одного из сильнейших афтершоков (Б. Голоуспенского–2) с $K=14.3$, произошедшего 08 июня 2022 г.

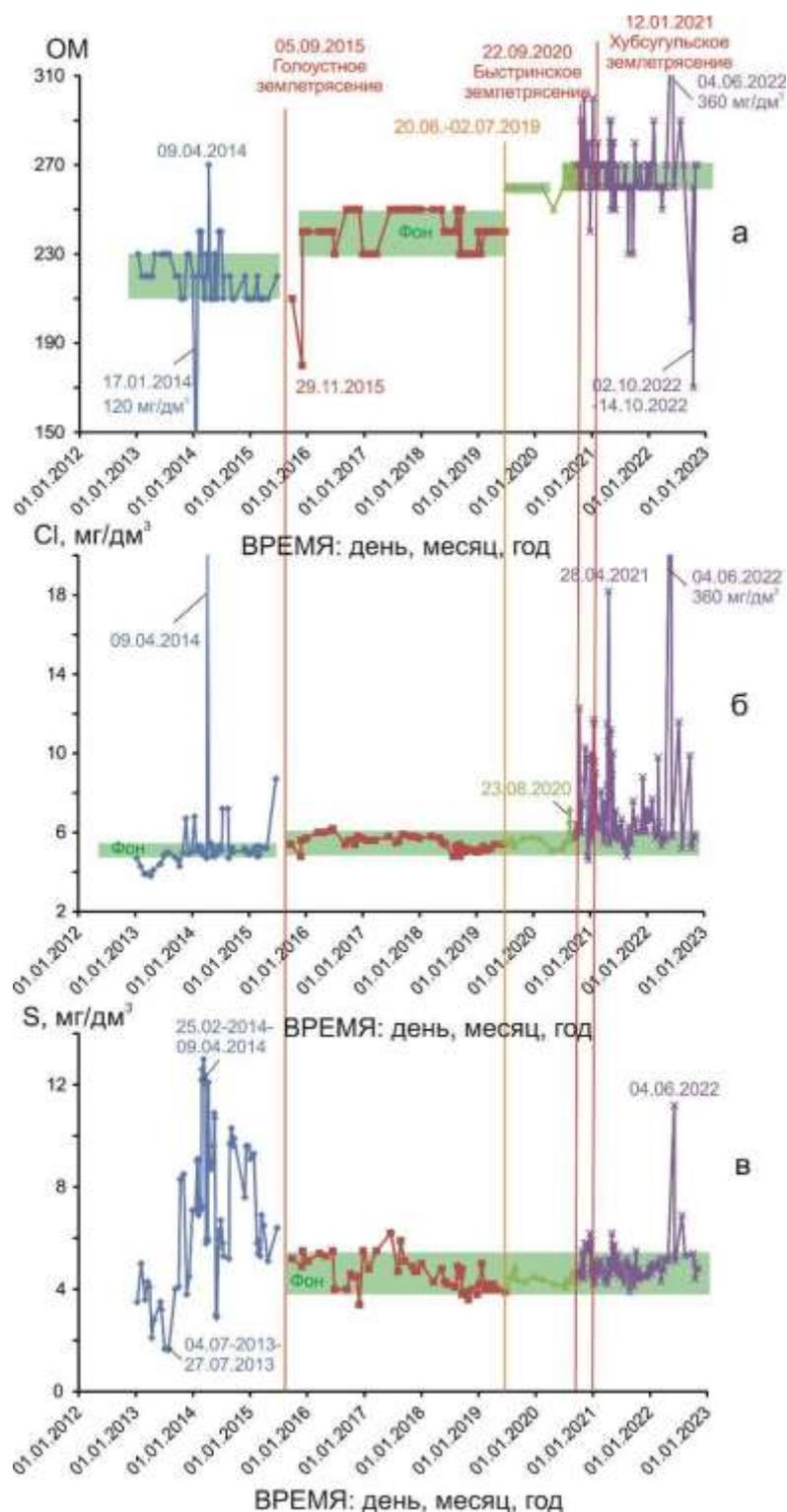


Рис. 6. Диаграммы временных вариаций общей минерализации (ОМ) (а), концентраций макрокомпонентов Cl (б) и S (в) в подземных водах ст. 27.

Fig. 6. Diagrams of temporal variations of total mineralization (TM) (а), concentrations of macrocomponents Cl (б) and S (в) in groundwaters from station 27.

Соотношения вариаций Cl и S с вариациями Li

Временные изменения микрокомпонента Li в подземных водах по-разному соотносятся с временными изменениями содержаний макрокомпонентов Cl и S.

На диаграмме Cl – Li (рис. 7а) фоновой концентрации Li (около 0.2 мкг/дм³) (см. рис. 1) соответствует фоновое содержание Cl (5–6 мг/дм³) (см. рис. 6б). Фон обозначается обособленной группой фигуративных точек подземных вод временного интервала 2012–2015 гг. В этом же временном интервале и в последующие три интервала от фонового состава протягиваются фигуративные поля точек подземных вод, попадающих ниже и выше фона. В 2012–2015 гг. обозначается временной тренд возрастания концентрации Cl со снижением концентрации Li от значений ниже фона к значениям выше фо-

на. От тренда отрицательной корреляции Cl и Li отрываются отдельные фигуративные точки с относительным возрастанием Li (до 1.2 мкг/дм³) или Cl (до 27 мг/дм³). Во временном интервале 2020–2022 гг. обозначаются тренды относительного возрастания Li и Cl в виде полосовидных сгущений фигуративных точек подземных вод. Одна полоса протягивается субпараллельно оси абсцисс, другая – субпараллельно оси ординат. Часть точек подземных вод временного интервала 2020–2022 гг. показывает обогащение обоими элементами (Li и Cl).

Следовательно, в интервале 2012–2015 гг. проявляются фоновые соотношения Cl и Li, обратная корреляция между этими элементами и отдельные выбросы их ураганных концентраций, которые в целом характеризуют сейсмический интервал 2020–2022 гг.

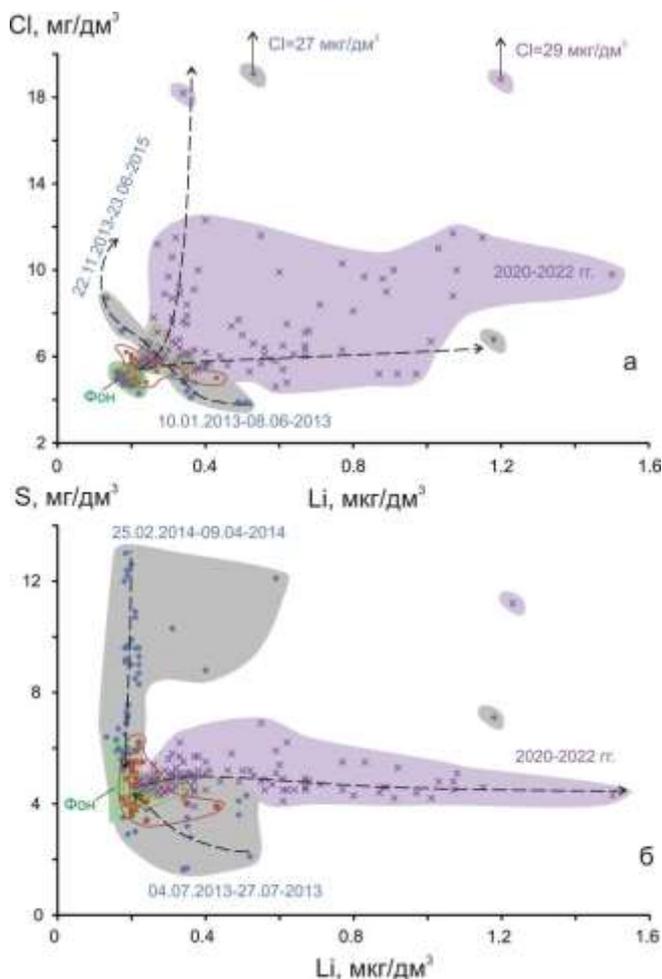


Рис. 7. Диаграммы ковариаций макрокомпонентов (а – Cl, б – S) и микроэлемента Li в подземных водах ст. 27. Условные обозн. см. рис. 6. Штриховыми линиями со стрелками обозначаются тренды по сгущениям фигуративных точек.

Fig. 7. Diagrams of covariations of the macrocomponents (a – Cl, б – S) and the trace element Li in groundwaters from station 27. Symbols are as in Fig. 6. Dashed lines with arrows show trends extended along dense areas of data points.

На диаграмме S – Li (рис. 7б) отчетливо различаются соотношения этих элементов в 2012–2015 гг. (до Голоустного землетрясения), в 2015–2020 гг. (между Голоустным и Быстринским землетрясениями) и в 2020–2022 гг. (во время Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации). Обозначается перекрытие фоновой концентрации Li (около 0.2 мкг/дм³) (см. рис. 1), соответствующее фоновому содержанию S (4–6 мг/дм³), проявляющемуся в подземных водах в 2015–2020 гг. (рис. 6в). Относительно фона резко обособляются фигуративные поля точек подземных вод 2012–2015 и 2020–2022 гг. В первом интервале наблюдается тренд, субпараллельный оси ординат, показываю-

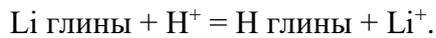
щий возрастание S при концентрации Li , близкой к фоновой. На верхнем окончании тренда и ниже фонового фигуративного поля точки смещаются правее тренда с относительным возрастанием Li . Во втором (сейсмическом) интервале образуется тренд, протягивающийся от фонового фигуративного поля субпараллельно оси абсцисс.

Обсуждение результатов

Со ступенчатым возрастанием OM (см. рис. 6а) согласуется последовательное повышение термофильного макрокомпонента Si (Ильясова, Снопков, 2023). Между тем, ряды мониторинговых данных Li и макрокомпонентов, образующих с ним соединения (Cl и S), не вписываются в эти ступени и интерпретируются в связи с термофильностью Li в подземных водах с выходом на косейсмические процессы в резервуаре подземных вод.

Косейсмическое маркирование подземных вод термофильным элементом Li

Концентрация Li в подземных водах зависит от температуры. Эмпирический Na/Li геотермометр (Fouillac et al. 1981) основан на температурной зависимости реакции катионного обмена вод с глинами и цеолитами:



Геотермометр дает оценку температуры резервуара подземных вод по элементному отношению без учета относительных вариаций концентрации Na и Li . В природных термальных подземных водах образуются температурные тренды. Они описываются двумя уравнениями: одно используется для вод, содержащих <11 г/кг Cl ($Cl < 0.3$ моль/кг), другое – для вод, содержащих >11 г/кг Cl ($Cl > 0.3$ моль/кг).

Уравнение

$$T^{\circ}C = \frac{1000}{0.389 + \log(mNa / mLi)} - 273.15$$

действительно для концентраций $Cl > 0.3$ моль/кг. Уравнение

$$T^{\circ}C = \frac{1195}{0.130 + \log(mNa / mLi)} - 273.15$$

действительно для концентраций $Cl < 0.3$ моль/кг). В обоих уравнениях концентрации элементов даются в молях (mNa и mLi).

При подъеме воды из Култукского резервуара на поверхность отношение Na/Li не должно меняться. Для оценки температур в резервуаре под ст. 27 используется первое уравнение. Получается общий температурный диапазон в резервуаре 8–116 °С. Высокие температуры (около 116 и 99 °С) регистрируются, соответственно, 17 января 2014 г. и 12 марта 2022 г. (рис. 8). Повышенная температура (50 °С) отмечается также 14 октября 2018 г. Это повышение служит предтечей более сильного возрастания температуры в 2020–2022 гг.

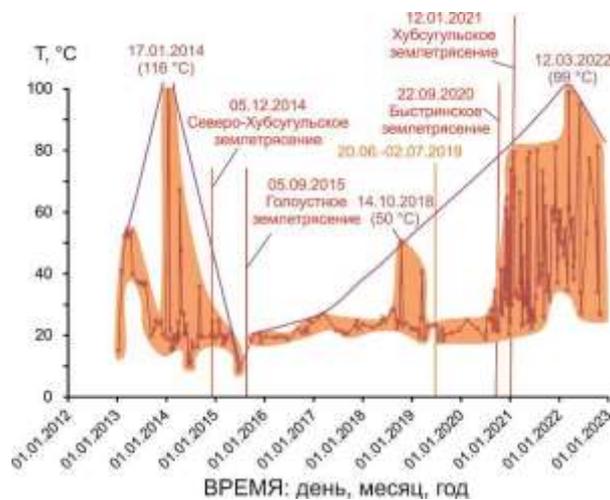


Рис. 8. Диаграмма временных вариаций температуры резервуара подземных вод ст. 27 по Na/Li геотермометрии (объяснения в тексте).

Fig. 8. Diagram of temporal variations in a temperature of a deep groundwater reservoir station 27 from Na/Li geothermometry (explanations in the text).

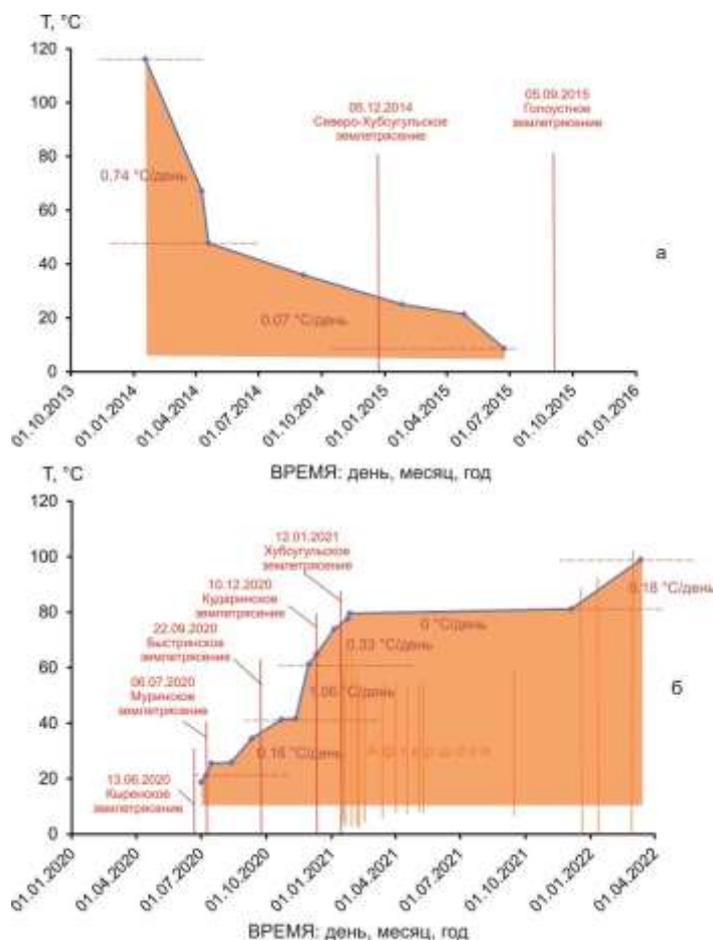


Рис. 9. Диаграммы неравномерного снижения максимальных значений температуры резервуара подземных вод ст. 27 при уменьшении растяжения (нарастании сжатия) коры в 2014–2015 гг. (а) и неравномерного возрастания максимальных значений температуры при повышении растяжения в 2020–2022 гг. (б) (объяснения в тексте).

Fig. 9. Diagrams of uneven temperature decrease of maximal values in a deep reservoir of groundwaters from station 27 under decreasing extension (increasing compression) of the crust in 2014–2015 (a) and its uneven increase under growing extension in 2020–2022 (б) (explanations in the text).

В развитии резервуара подземных вод главную роль играет снижение температуры в 2014–2015 гг. и ее возрастание в 2020–2021 гг. На рис. 9 приводится детальная расшивка максимальных значений температуры этих временных интервалов.

В 2014–2015 гг., с 17 января до 19 апреля 2014 г., максимальные значения температуры резервуара снижаются в интервале от 116 °C до 48 °C быстро, в среднем на 0.74 °C в день (или 5.2 °C в неделю). С 19 апреля 2014 г. до 25 апреля 2015 г. снижение максимальных значений температуры от 48 °C до 21 °C замедляется и составляет в среднем 0.07 °C в день (или 0.51 °C в неделю).

В 2020–2021 гг., с 06 июля до 11 ноября 2020 г., максимальные значения температу-

ры резервуара возрастают в интервале от 21 °C до 42 °C медленно, в среднем на 0.16 °C в день (или 1.16 °C в неделю). С 11 до 29 ноября температура резко увеличивается с 42 до 61°C, на 1.06 °C в день (или 7.4 °C в неделю). С 29 ноября 2020 г. до 26 января 2021 г. температура продолжает увеличиваться до 80 °C несколько медленнее, в среднем на 0.33 °C в день (или 2.3 °C в неделю). Однако в дальнейшем, на протяжении более 10 месяцев, максимальные значения температуры не повышаются. Затем, с 04 декабря 2021 г. до 12 марта 2022 г., они еще возрастают в интервале от 81 °C до 99 °C, в среднем на 0.18 °C в день (или 1.3 °C в неделю). После максимума 99 °C 12 марта 2022 г. наблюдается тенденция к снижению максимальных

значений температуры (см. рис. 8). В температурном интервале 81–99 °С с 12 марта до 14 октября 2022 г. температура снижается в среднем на 0.08 °С в день (или 0.58 °С в неделю).

В 2014–2015 гг. происходит Северо-Хубсугульское землетрясение на фоне структурной перестройки эпицентральных полей Муринской и Голоустной (линейной) активизаций (см. рис. 1а и 4). Температура резервуара на Култукском полигоне последовательно снижается. Голоустное землетрясение обозначает достижение самой нижней критической температурной отметки 8 °С, после которой глубинный резервуар подземных вод приобретает новую направленность термальной эволюции, восходящей к максимуму 50 °С 14 октября 2018 г. (см. рис. 8).

По отношению к температурной эволюции резервуара 2014–2015 гг., его температурная эволюция в Байкало-Хубсугульскую активизацию 2020–2022 гг. имеет противоположную направленность, от низких температур к высоким. Сначала температура растет медленно (0.16 °С в день). Критическое состояние обозначается ускоренным (1.06 °С в день) возрастанием температуры резервуара подземных вод 11–29 ноября 2020 г. Новая критическая точка достигается 26 января 2021 г., после которой температура не увеличивается. Перед этой критической точкой реализуется самое сильное Хубсугульское землетрясение. Интервал нового возрастания температуры с 04 декабря 2021 г. до 12 марта 2022 г. примечателен тремя афтершоками: Танхойским, $K=12.8$ (15.12.2021), Б. Голоустенским-1, $K=10.9$ (09.01.22) и Хубсугульским, $K=11.8$ (07.03.2022). Во временном интервале самой высокой возрастающей температуры (81–99 °С) проявляются южно-байкальские сейсмические события и хубсугульское (см. рис. 5 в,г).

Отметим общую закономерность для максимальных значений снижающихся и поднимающихся температур резервуара: температура меняется быстрее при ее средних значениях (40–80 °С) и медленнее – при низких и высоких. Косейсмический рост температуры подземных вод инициируется и прекращается в связи с уменьшением растя-

жения (сжатием) и усилением растяжения коры в ходе развития полного сейсмогеодинамического цикла, реконструированного по вариациям отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ и активности ^{234}U (Чебыкин и др., 2022; Ras-skazov et al., 2022).

Косейсмическое возрастание концентрации термофильного элемента Li связывается с развитием глинки трения в активном разломе в условиях повышенной температуры. Чем больше образуется глинистых минералов при движении в плоскости разлома, тем выше температура. В данном случае, очевидно, что концентрация Li (Na/Li геотермометрия) подземных вод отражает возрастание температуры вследствие усиления взаимодействия вода–порода в активном разломе по принципу механического размешивания твердых глинистых частиц в жидкости.

Развитие резервуара подземных вод

В 2013–2015 гг., в условиях Котовской и Муринской сейсмических активизаций, подземные воды ст. 27 проявляются из резервуара с максимальной Na/Li температурой 116 °С. Во временном интервале 2015–2020 гг. Na/Li температура подземных вод ст. 27, за исключением двух коротких максимумов 2018–2019 гг., находится в диапазоне 20–30 °С (см. рис. 9). Преобладание низких температур в течение 5-ти лет при слабой сейсмичности (и при ее отсутствии) отражает состояние коры, близкое к стабильному.

Проявление сейсмических процессов Байкало-Хубсугульской активизации сопровождается возрастанием Na/Li температурных характеристик резервуара. Повышенные температуры, однако, чередуются с температурами, близкими к фоновым, т.е. резервуар активизируется импульсно на фоне стабильных литиевых фаз.

Наблюдаются протяженные по температуре тренды 2013–2015 и 2020–2022 гг. и сокращенные по температуре тренды 2015–2019 и 2019–2020 гг. Протяженный тренд 2013–2015 гг. смещен относительно протяженного тренда 2019–2020 гг. в высокотемпературной части диаграммы T – Li с относительным снижением концентрации Li (рис. 10). Такое смещение на одной и той же станции 27 можно связать с относительно

слабой сейсмичностью 2013–2015 гг. и ее существенным усилением в 2019–2020 гг. Другая особенность трендов заключается в представительности фигуративных точек в высокотемпературной части этой диаграммы; в 2013–2015 гг. точки единичны, в 2019–

2020 гг. – точки многочисленны. Представительность точек по температуре и смещение концентрации Li может быть косвенным показателем силы сейсмических активизаций, происходящих в центральной части Байкальской рифтовой системы.

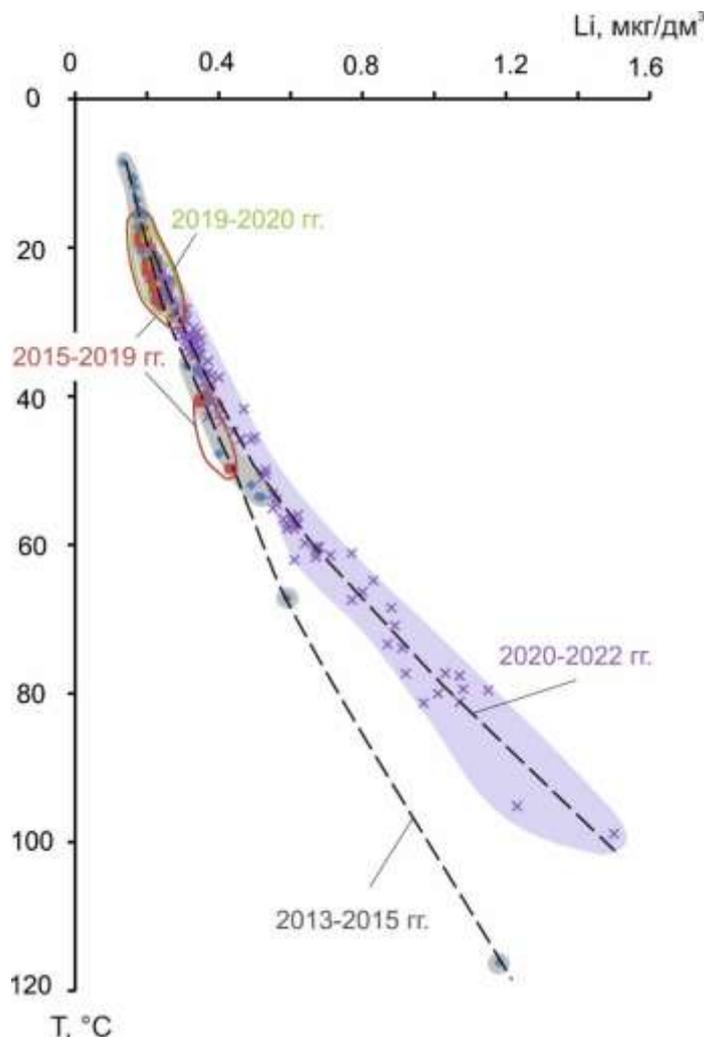


Рис. 10. Расходящиеся тренды подземных вод ст. 27 2013–2015 и 2020–2022 гг. на диаграмме T – Li. Условные обозначения см. на рис. 6.

Fig. 10. Divergent 2013–2015 and 2020–2022 groundwater trends of st. 27 on the T vs Li diagram. Symbols are as in Fig. 6.

В работе (Рассказов и др., 2022) было показано чередование стабильных и нестабильных Li-фаз на ст. 184 после фазы S (stable) и проявление всплесков фаз D и I (соответственно, возрастающей и снижающейся концентрации Li). Смена режима чередования фаз S, D и I крупноамплитудными максимумами и минимумами, произошедшая 01 июля 2021 г., интерпретировалась как следствие перехода от эпизодического внешнего

воздействия – деформационных Li-эффектов, распространяющихся от очагов сейсмических толчков с интервалами стабилизации – к автоколебательным процессам на полигоне, в которых интервалы стабилизации отсутствуют.

В стабильных и нестабильных Li-фазах ст. 27 (см. рис. 4 и 5) также включается механизм эпизодического внешнего воздействия на полигон. С нарастанием активиза-

ции Na/Li температура резервуара возрастает. При достижении $T = 99\text{ }^{\circ}\text{C}$ развиваются автоколебания: сначала (01 июля 2021 г.) на ст. 184, а через 2 месяца и 22 дня (22 октября 2021 г.) – на ст. 27.

В контексте настоящей работы, микрокомпонент Li воспринимается как главный

индикатор температурных косейсмических изменений в резервуаре подземных вод, участвующий в соединениях с макрокомпонентами Cl и S. В 2013–2015 гг. основную маркирующую роль играют Cl и S, позже – Cl (рис. 11).

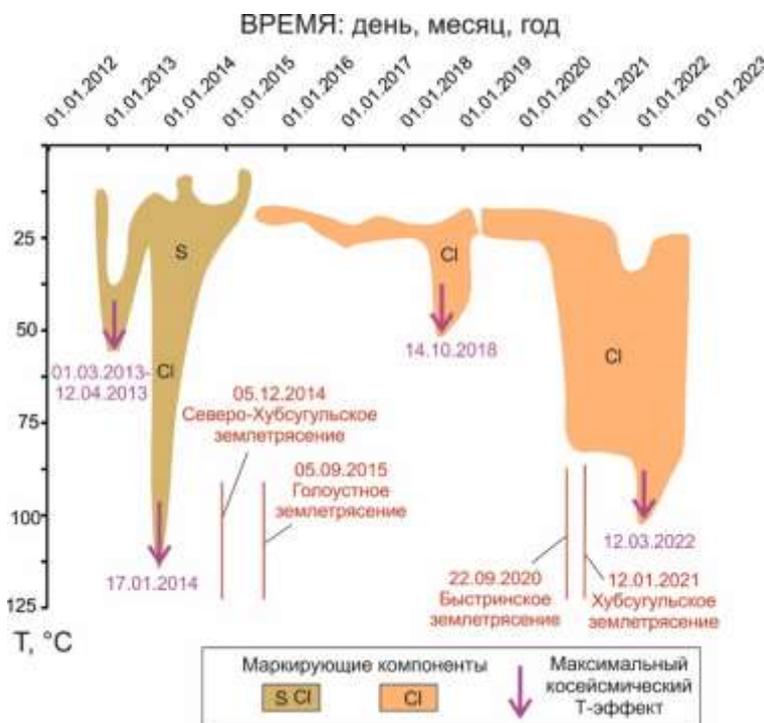


Рис. 11. Схема временного проявления максимальных косейсмических эффектов температуры (Na/Li геотермометр) под ст. 27 Култукского резервуара и маркирующих компонентов, геохимически связанных с Li.

Fig. 11. Scheme of temporal displaying of maximal coseismic temperature effects (Na/Li geothermometer) beneath station 27 of the Kultuk reservoir and marking, geochemically Li-related components.

Заключение

По Na/Li геотермометрии подземных вод ст. 27 Култукского полигона получен широкий температурный интервал от 8 до $116\text{ }^{\circ}\text{C}$. Возрастание температуры рассматривается как результат косейсмического усиления взаимодействия вода–порода в активном разломе при механическом размещивании твердых глинистых частиц в жидкости. Мониторинговые ряды концентрации микрокомпонента Li и геохимически связанных с ним макрокомпонентов (Cl и S), полученные в 2013–2022 гг. для подземных вод ст. 27, интерпретированы в связи с косейсмической эволюцией их резервуара. В 2013–2015 гг., при Котовской и Муринской сейсмических

активизациях на западе Южно-Байкальской впадины, установлен отклик Na/Li температуры до $116\text{ }^{\circ}\text{C}$ в подземных водах, обогащенных серой и хлором. В 2015–2020 гг., при активизации Голоуустенской и Муринской эпицентральных линий землетрясений, обозначено состояние, близкое к стабильному. В это время основную роль играет Cl. В 2020–2022 гг., во время Байкало-Хубсугульской активизации Na/Li температура возрастает до $99\text{ }^{\circ}\text{C}$ и прослеживается переход от эпизодического внешнего воздействия на Култукский полигон сейсмогенных процессов к развитию автоколебаний.

Благодарности

Состав воды анализировался на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500се в ЦКП «Ультрамикроанализ» (ЛИН СО РАН, г. Иркутск). Методические подходы к анализу подземных вод 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). 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».

Литература

Карта эпицентров землетрясений. Иркутск: Байкальский филиал Федерального исследовательского центра Единая геофизическая служба РАН, 2023. <http://www.seis-bykl.ru>

Рассказов С.В., Ильясова А.М., Борняков С.А., Снопков С.В., Чувашова И.С., Чебыкин Е.П. Гидрогеохимические отклики подземных вод ст. 184 в 2020–2021 гг. на сейсмогенные деформации Байкало-Хубсугульской активизации // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 4. С. 26–52. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.26

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А. Разработка Култукского сейсмопрогностического полигона: вариации ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, № 4. С. 519–554. doi:10.5800/GT-2015-6-4-0192

Чебыкин Е.П., Гольдберг Е.Л., Куликова Н.С., Жученко Н.А., Степанова О.Г., Малопевная Ю.А. Метод определения изотопного состава аутигенного урана в донных отложениях озера Байкал // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 6. С. 604–616.

Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Снопков С.В., Рассказов С.В. Сигналы ртути подземных вод Култукского полигона во время подготовки и реализации Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации 2020–2021 гг. // Геология и

окружающая среда. 2022. Т. 2, № 1. С. 7–9. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2022.1.7>

Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В. Первые результаты мониторинга $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // Доклады академии наук. 2015. Т. 460, № 4. С. 464–467.

Чебыкин Е.П., Сороковикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В., Грачев М.А. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20. С. 613–631.

Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 6. С. 936–937.

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

Merkel B.J., Planer-Friedrich B. Groundwater geochemistry. A practical guide to modeling of natural and contaminated aquatic systems. Springer Berlin Heidelberg New York, 2005. 200 p.

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Piyasova A.M., Snopkov S.V., Bornyakov S.A., Chuvashova I.S. Change of seismic hazard levels in complete 12-year seismogeodynamic cycle of the South Baikal Basin: Results of hydroisotopic ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) monitoring // Geology and Environment. 2022. V. 2, No. 2. P. 7–21. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.7)

Rasskazov S., Piyasova A., Bornyakov S., Chuvashova I., Chebykin E. Responses of a $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio in groundwater to earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia // Front. Earth Sci. 2020. V. 14, No. 4. P. 711–737; doi.org/10.1007/s11707-020-0821-5

References

Chebykin E.P., Goldberg E.L., Kulikova N.S., Zhuchenko N.A., Stepanova O.G., Malopevnaya Yu.A. Method for determining the isotopic composition of authigenic uranium in the bottom sediments of Lake Baikal // Geology and Geophysics. 2007. V. 48, No. 6. P. 604–616. (in Russian)

Chebykin E.P., Piyasova A.M., Snopkov S.V., Rasskazov S.V. Groundwater mercury signals from the Kultuk polygon during the preparation and im-

plementation of the Baikal-Khubsugul seismic activation in 2020–2021 // *Geology and Environment*. 2022. V. 2, No. 1. P. 7–9. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2022.1.7> (in Russian)

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

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

Chipizubov A.V., Smekalin O.P., 1999. Paleoseismodislocations and related paleoearthquakes at the Main Sayan Fault zone // *Russian Geology and Geophysics*. V. 40, No. 6. P. 936–937. (in Russian)

Map of earthquake epicenters. Irkutsk: Baikal Branch of the Federal Research Center Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, 2023. <http://www.seis-bykl.ru> (in Russian)

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Vodneva E.N., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V., Chechel'nitsky V.V., Gileva N.A. Creating the Kultuk polygon for earthquake prediction: variations of ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in groundwater from active faults at the

Чувашова Ирина Сергеевна,
кандидат геолого-минералогических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
старший научный сотрудник,
664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет,
геологический факультет,
доцент,
email: chuvashova@crust.irk.ru.
Chuvashova Irina Sergeevna,
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Senior Researcher,
664003 Irkutsk, Lenin str., 3,

western shore of Lake Baikal // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2015. V. 6, No. 4. P. 519–553. doi:10.5800/GT-2015-6-4-0192.] (in Russian)

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Bornyakov S.A., Snopkov S.V., Chuvashova I.S., Chebykin E.P. Hydrogeochemical responses of groundwater station 184 in 2020–2021 on seismogenic deformations of the Baikal-Khubsugul reactivation // *Geology and Environment*. 2022. V. 2, No. 4. P. 26–52. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.26 (in Russian)

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

Merkel B.J., Planer-Friedrich B. Groundwater geochemistry. A practical guide to modeling of natural and contaminated aquatic systems. Springer Berlin Heidelberg New York, 2005. 200 p.

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Bornyakov S.A., Chuvashova I.S. Change of seismic hazard levels in complete 12-year seismogeodynamic cycle of the South Baikal Basin: Results of hydroisotopic ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) monitoring // *Geology and Environment*. 2022. V. 2, No. 2. P. 7–21. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.7)

Rasskazov S., Ilyasova A., Bornyakov S., Chuvashova I., Chebykin E. Responses of a $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio in groundwater to earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia // *Front. Earth Sci*. 2020. V. 14, No. 4. P. 711–737; doi.org/10.1007/s11707-020-0821-5

Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Assistant Professor,
email: chuvashova@crust.irk.ru.

Ильясова Айгуль Маратовна,
кандидат геолого-минералогических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
ведущий инженер,
email: ila@crust.irk.ru.

Ilyasova Aigul Maratovna,
candidate of geological and mineralogical sciences,
664033 Irkutsk, Lermontova str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Leading Engineer,
email: ila@crust.irk.ru.

Сравнительные исследования косейсмических изменений концентраций термофильных элементов Si, Na и Li в подземных водах ст. 27 на Култукском полигоне, оз. Байкал

Е.П. Чебыкин^{1,2}, С.В. Рассказов^{1,3}

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

²Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

³Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Мониторинговый ряд термофильного отношения Na/Li в подземных водах ст. 27 Култукского полигона, полученный в 2012–2022 гг., сопоставляется с мониторинговым рядом концентрации термофильного элемента Si. Расхождения во временных вариациях рассчитанных температур используются для идентификации компонентов подземных вод резервуара, образующихся в гидрогеодинамическом центре, подверженном косейсмической генерации глинки трения.

Ключевые слова: подземные воды, мониторинг, Na/Li, Si, геотермометр, землетрясения, глина трения, Байкал.

Comparative study of coseismic changes in thermophilic elements Si, Na, and Li in groundwaters from station 27 in the Kultuk polygon, Lake Baikal

E.P. Chebykin^{1,2}, S.V. Rasskazov^{1,3}

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

²Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

³Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Abstract. Monitoring series of the Na/Li thermophilic ratio in groundwater obtained at the station 27 of the Kultuk polygon in 2012–2022 is compared with those of the Si thermophilic element concentrations. Discrepancies in time variations of calculated temperatures are used to identify reservoir groundwater components that exhibit a hydrogeodynamic center subjected to coseismic generation of friction clay.

Keywords: groundwater, monitoring, Na/Li, Si, geothermometer, earthquakes, friction clay, Baikal.

Введение

В практике отслеживания признаков приближающихся землетрясений обычно находят разнообразные предвестники, которым в ретроспективе присваивается прогностическая роль (Solonenko, 1974; Sadovsky et al., 1977; Sadovsky, 1978; Пиннекер и др., 1984; Varshal et al., 1985; Sobolev, 1993; King et al., 1995; Tsunogai, Wakita, 1995; Claesson et al., 2004; Chia et al., 2008; Борняков, 2010; Бор-

няков и др., 2016, 2017; Sukhija et al., 2010; Plastino et al., 2011; Matsumoto, Koizumi, 2013; Shi et al., 2015; Boldina, Kopylova, 2017; Семинский и др., 2021, 2022). Однако последующее использование предвестников, выделенных таким образом, ведет к объявлениям ошибочных сигналов сейсмической опасности. Предвестники оказываются ложными, а землетрясения случаются без предвестников. Очевидно, что необходима разработка каких-то иных подходов, которые

могли бы обеспечить регистрацию развития доступного для изучения явления в земной коре, протекающего синхронно и в целом аналогично процессу подготовки и реализации землетрясения. В случае обнаружения такого явления, констатация совпадений–несовпадений землетрясений и их предвестников, может перерасти в более надежную оценку угрозы землетрясений на основе анализа развития парагенетических (сейсмического и сопутствующего ему) процессов.

В подземных водах Култукского полигона установлены существенные временные вариации термофильного отношения Na/Li и концентрации термофильного элемента Si (Ильясова, Снопков, 2023; Чебыкин, Чувашова, 2023; Чувашова, Ильясова, 2023). В 2012–2022 гг. эти вариации вписываются в ход развития полного сейсмогеодинамического цикла центральной части Байкальской рифтовой системы, охватывающего временной интервал от сильной Култукской активизации (землетрясения от 27 августа 2008 г. до 04 января 2011 г.) до Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации (землетрясения, начавшиеся 22 сентября 2020 г. и продолжающиеся в 2023 г.). Цикл начинается и завершается высокими значениями отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (ОА4/8) и активности ^{234}U (А4) при низких значениях обоих показателей в его середине (в 2015 г.), что свидетельствует об открытии микротрещин, способствующем циркуляции подземных вод в условиях растяжения коры, и об их закрытии, снижающем циркуляцию при сжатии (Чебыкин и др., 2022; Rasskazov et al., 2022).

Разные гидрогеохимические геотермометры в пробах подземных вод одной и той же станции должны давать сопоставимые оценки температуры в резервуаре, если геотермометры надежно калиброваны по одинаковым принципам и подземные воды под-

нимаются из резервуара без задержки и разбавления. Однако, если геотермометры основаны на разных принципах, может возникнуть несоответствия температурных оценок подземных вод термофильных компонентов разного происхождения. Цель настоящей работы – использовать изменения температурных характеристик подземных вод ст. 27 Култукского резервуара по вариациям отношения Na/Li в сопоставлении с температурными характеристиками по вариациям Si для идентификации косейсмических компонентов подземных вод.

Местоположение ст. 27 на Култукском полигоне, отбор, хранение и аналитические исследования природных вод

Постоянный мониторинг подземных вод проводится на Култукском полигоне с частотой опробования в среднем один раз в 2 недели более 10 лет на шести основных станциях: на скважинах – станции 27 (Школа), 184 (ул. Школьная), 8 (Чертова Гора), 40 (Стрелка), 9 (Земляничный) и в роднике – ст. 14к (Ключ Тигунчиха). Скважины имеют глубину от 60 до 120 м. Население пос. Култук ежедневно берет из них воду, обеспечивая эффективную прокачку. Менее часто, но регулярно, опробуются вспомогательные станции полигона (рис. 1).

Мониторинговые станции занимают разное положение в активных разломах структурного сочленения Южно-Байкальской впадины и Тункинской долины и существенно расходятся между собой по гидрогеохимическим показателям подземных вод. Ст. 27 находится в центре полигона, на Култукской тектонической ступени, наклоненной к востоку, в сторону Байкала. Кроме этой станции, на тектонической ступени находятся ст. 184, 8 и 40.

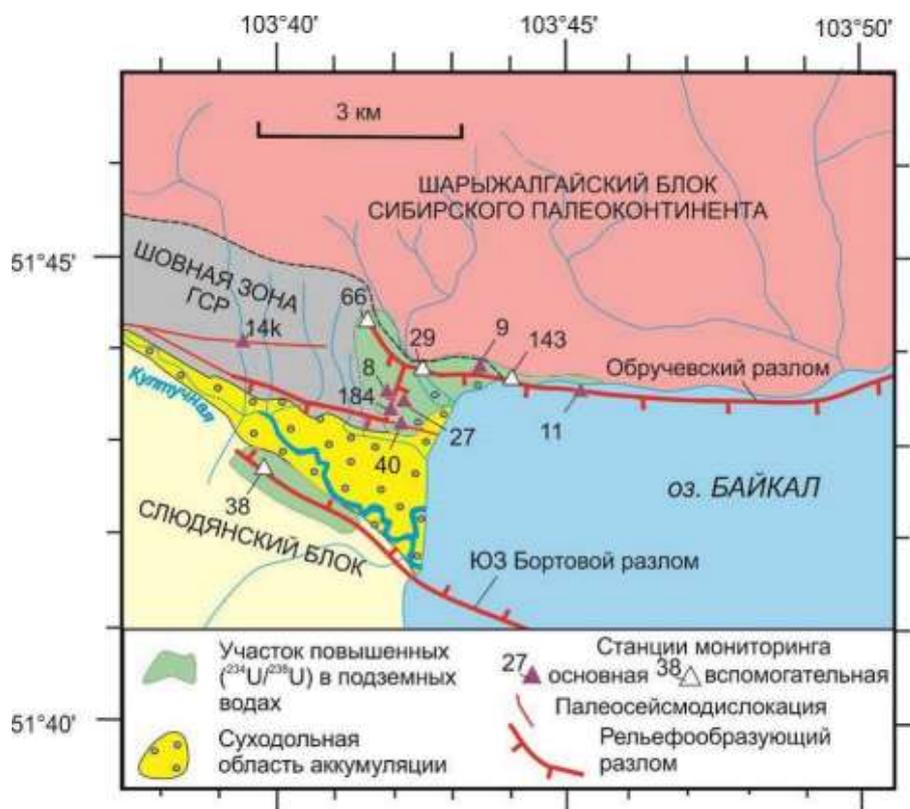


Рис. 1. Схема расположения ст. 27 и других основных станций гидрогеохимического опробования активных разломов на западном побережье оз. Байкал (Култукский полигон). Показаны палеосейсмодислокации в шовной зоне Главного Саянского разлома (ГСР) (Чипизубов, Смекалин, 1999).

Fig. 1. Location scheme of station 27 and other main stations for hydrogeochemical sampling of active faults on the western coast of Lake Baikal (Kultuk polygon). Paleoseismic dislocations in the suture zone of the Main Sayan Fault (ГСР) are shown after (Chipizubov, Smekalin, 1999).

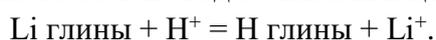
Для определения химического элементного состава образцы воды фильтруются через шприц-насадки с диаметром пор 0.45 мкм (Minisart 16555-K, ацетат целлюлозы, Sartorius Stedim Biotech GmbH, Германия) в предварительно взвешенные 2 мл полипропиленовые пробирки Эппендорфа (Axugen Scientific, Cat.-No. МСТ-200-С, США, Мексика), содержащие 40 мкл консерванта. В качестве консерванта используется концентрированная азотная кислота (70 %), дважды очищенная с помощью суббуйлинговой системы перегонки кислот (Savillex DST-1000 sub-boiling distillation system, Япония), в которую добавляется индий (типично 1000 ppb) в качестве внутреннего стандарта. Аликвоты консерванта взвешиваются при добавлении в пробирки. Пробирки с отобранными образцами воды взвешиваются и рассчитывается

точное содержание азотной кислоты (типично 2 %) и индия (типично 30 ppb). Пробы хранятся в холодильнике при положительной температуре. В подготовленных растворах определяются содержание 72 химических элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСПР-МС) на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 (Чебыкин и др., 2012). Вместе с Li анализируются основные компоненты Cl и S. Определение углерода методом ИСП-МС встречает трудности из-за периодической контаминации газа аргона, используемого для генерации плазмы.

Si и Na/Li геотермометрия

Si и Na/Li геотермометрия основана на принципиально разных подходах. В расчете

Si температур учитывается количество кремния растворенного в воде (кремниевой кислоты). Если подземная вода разбавляется слабо минерализованной порцией поверхностной воды или водным компонентом Южно-Байкальского резервуара (ЮБР) (Расказов и др., 2020), концентрация Si снижается. Можно сделать вывод только об эффекте разбавления подземных вод резервуара. Стартовая температура подземных вод в резервуаре не определяется. В расчете Na/Li температур учитывается эмпирически установленная температурная зависимость катионного обмена вод с глинами и цеолитами:



Оценки температур подземных вод Култукского полигона по разным кремниевым геотермометрам не превышают 100 °С. Температуры в резервуаре рассчитываются по халцедоновой модификации геотермометра (Arnorsson et al., 1983).

$$T = \frac{1112}{(4.91 - \log C)} - 273.15$$

где C – концентрация SiO_2 в мг/дм^3 ; T – температура в °С.

Натрий–литиевые температуры рассчитываются по геотермометру (Fouillac, Michard, 1981), в котором применяются уравнения для вод, содержащих <11 г/кг Cl ($\text{Cl} < 0.3$ моль/кг) и >11 г/кг Cl ($\text{Cl} > 0.3$ моль/кг).

Уравнение

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1195}{0.130 + \log(m\text{Na} / m\text{Li})} - 273.15$$

действительно для концентраций Cl > 0.3 моль/кг. Уравнение

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1000}{0.389 + \log(m\text{Na} / m\text{Li})} - 273.15$$

действительно для концентраций Cl $< 0,3$ моль/кг). В обоих уравнениях используются концентрации элементов в молях ($m\text{Na}$ и $m\text{Li}$).

Соотношение температурных оценок подземных вод по Si и Na/Li геотермометрам в Култукском резервуаре под ст. 27

На ст. 27 наблюдаются три временных интервала (2013–2015 гг., 2018–2019 гг. и 2020–2023 гг.), в которые $T(\text{Na/Li})$ существенно меняется от значений в 2 раза ниже значений $T(\text{Si})$ до значений, в 2–3 и более раз превышающих $T(\text{Si})$. В промежутках между этими интервалами (в 2015–2018 гг. и в 2019–2020 гг.) значения $T(\text{Si})$ устойчиво превышают значения $T(\text{Na/Li})$ (рис. 2,3).

Мы предполагаем, что в подземных водах активного разлома Na/Li геотермометр отражает их взаимодействие с образующейся глиной трения. Расчет основан на вариациях Na/Li отношения. Интервалы с повышенными значениями $T(\text{Na/Li})$ обозначают импульсы эффективного образования глины трения в активной плоскости разлома под ст. 27. Низкие значения $T(\text{Na/Li})$ отражают снижение роли этого фактора. Интервалы 2013–2015 гг., 2018–2019 гг. и 2020–2023 гг. характеризуют синкинематические изменения в плоскости разлома под ст. 27, а интервалы 2015–2018 и 2019–2020 гг. – относительную стабилизацию. Вариации $T(\text{Si})$ не зависят от импульсов $T(\text{Na/Li})$. Мы предполагаем, что вариации $T(\text{Si})$ являются первичными, а вариации $T(\text{Na/Li})$ – наложенными на вариации $T(\text{Si})$.

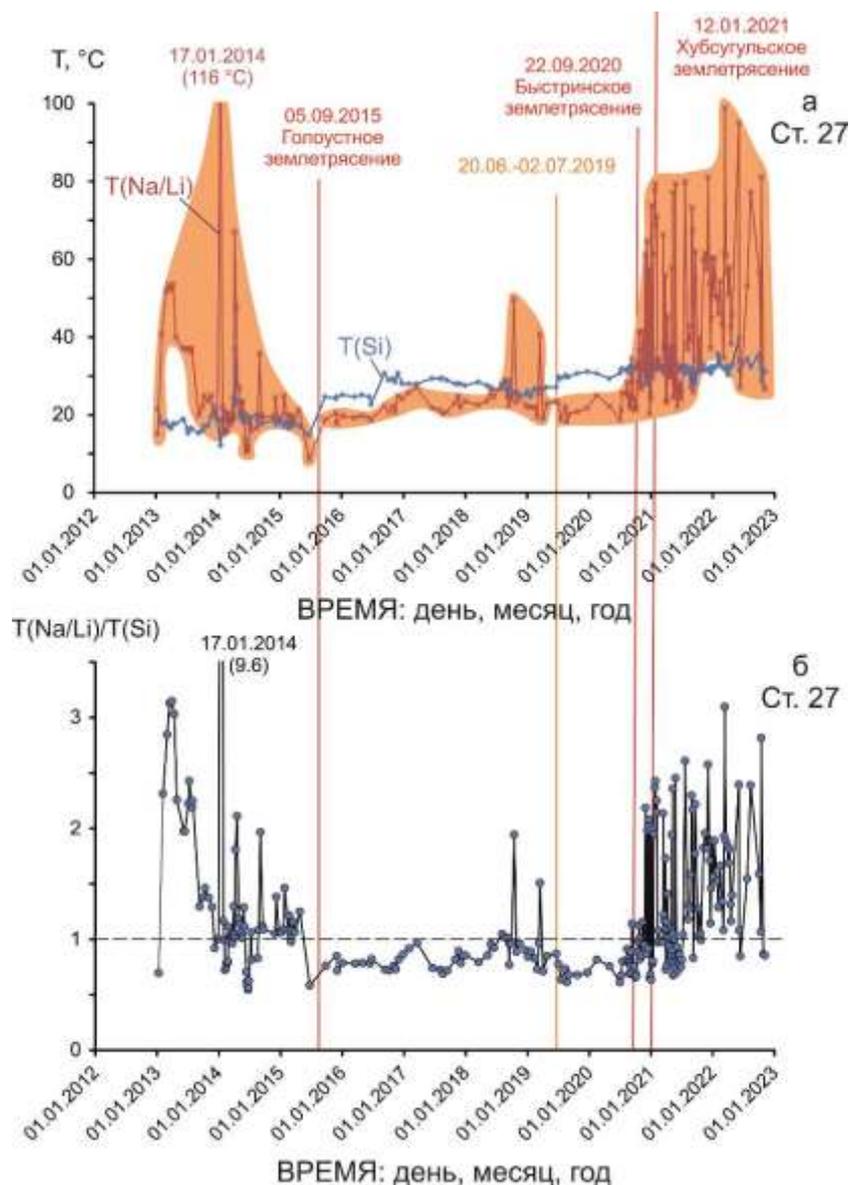


Рис. 2. Временные вариации температуры резервуара подземных вод под ст. 27 по халцедоновому [T(Si)] и Na/Li [T(Na/Li)] геотермометрам (а) и [T(Si)] / [T(Na/Li)] отношений (б). Красными вертикальными линиями показано время ключевых землетрясений (Карта..., 2023), оранжевой линией – эпизод резкого подъема концентрации Si в подземных водах всех станций Култукского полигона в 2019 г. с переходом к предсейсмическому режиму (Ильясова, Снопков, 2023).

Fig. 2. Temporal variations in temperature of a groundwater reservoir under station 27 from chalcedony [T(Si)] and Na/Li [T(Na/Li)] geothermometers (a) and [T(Si)] / [T(Na/Li)] ratios (б). Red vertical lines show timing of key earthquakes (Map..., 2023), the orange line shows an episode of a sharp increase in the Si concentration in groundwater at all stations of the Kultuk polygon in 2019 with transition to a preseismic regime (Plyasova, 2023).

Компоненты подземных вод на диаграммах Li – Si и Na – Si

В 2012–2022 гг. концентрация термфильного элемента Si в подземных водах всех станций Култукского полигона последовательно возрастает (Ильясова, Снопков,

2023). Прослеживание временных изменений температур резервуара требует анализа компонентного состава подземных вод. В подземных водах Култукского полигона компонентный состав выявляется через соотношение элементов с температурными трендами и трендами смешения.

Для прослеживания трендов ряды наблюдений разделяются на 4 временных интервала: 1) 2012–2015 гг. (до Голоустного землетрясения 5 сентября 2015 г.), 2) 2015–2019 гг. (от Голоустного землетрясения до 20 июня 2019 г.), 3) 2019–2020 гг. (предсейсмический интервал от 02 июля 2019 г. до Быстринского землетрясения 22 сентября 2020 г.) и 4) 2020–2022 гг. (сейсмический интервал от 22 сентября 2020 г. до конца 2022 г.).

Во временном интервале 2012–2015 гг. концентрация Si подземных вод ст. 27 находится в основном в интервале 5–7 мг/дм³. Преобладающая концентрация Li составляет около 0.2 мкг/дм³. В отдельных пробах его концентрация возрастает до 0.4 мкг/дм³, а в пробе, отобранной 17 января 2014 г., увеличивается до 1.2 мкг/дм³. После Голоустного землетрясения, в 2015–2019 гг., концентра-

ция Si возрастает до интервала 6.5–8.5 мг/дм³, а концентрация Li по-прежнему в основном составляет около 0.2 мкг/дм³. Концентрация Li слегка повышается (до интервала 0.27–0.43 мкг/дм³) только в трех пробах, отобранных 19 августа и 14 октября 2018 г., а также 15 марта 2019 г. В следующем временном интервале 2019–2020 гг., Si снова растет (до интервала 8.0–8.7 мг/дм³) при концентрации Li 0.20–0.28 мкг/дм³. Только одна проба, отобранная 10 сентября 2020 г., показывает повышенную концентрацию Li (0.34 мкг/дм³). В последнем временном интервале 2020–2022 гг. содержание Si составляет в основном 8.4–8.7 мг/дм³ при концентрации Li 0.2–0.4 мкг/дм³. На диаграмме Li – Si фигуративные точки рассеиваются с возрастанием Si и Li (рис. 3а).

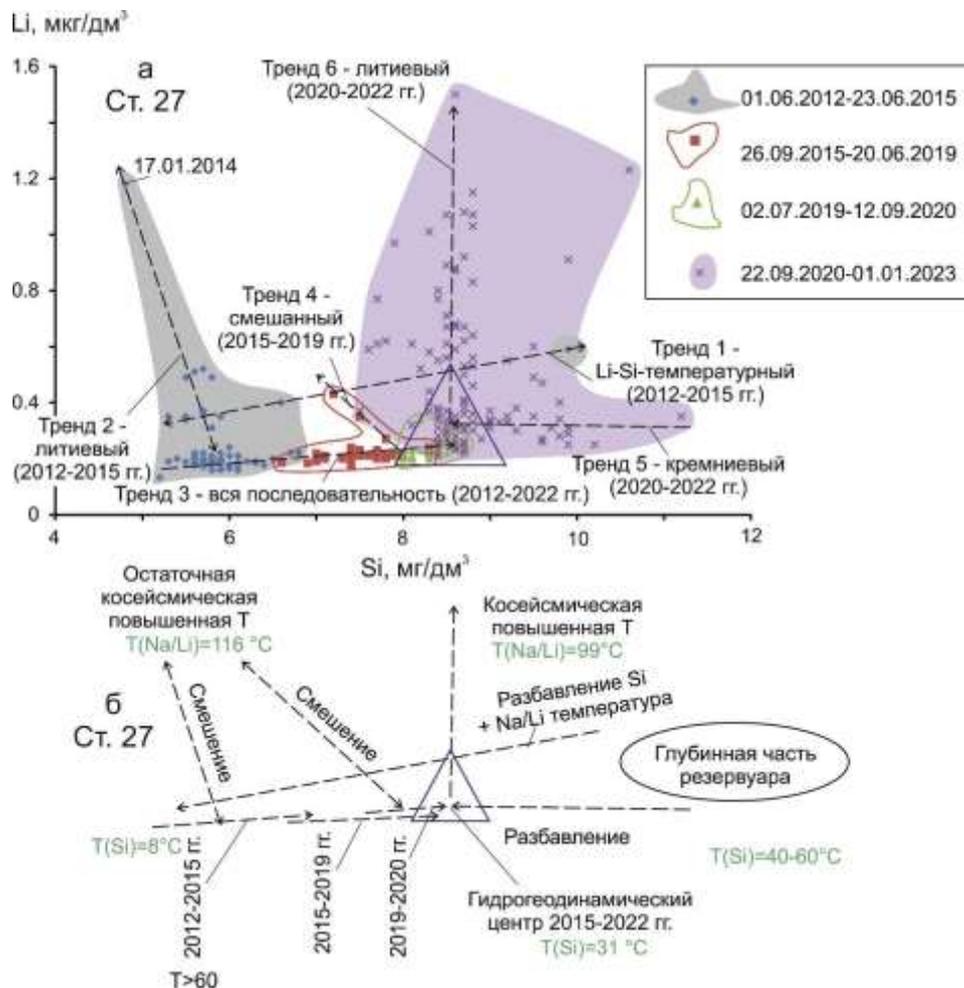


Рис. 3. Диаграмма Li – Si (а) и ее интерпретация (б) для подземных вод ст. 27.

Fig. 3. Diagram Li vs Si (a) and its interpretation (б) for groundwaters from station 27.

Разновременные тренды, выделенные на рис. 3а, интерпретируются на рис. 3б. В интервале 2012–2015 гг. различаются 2 тренда: тренд 1 – Li–Si температурный, характеризует широкие вариации Si при повышенной концентрации Li; тренд 2 – литиевый, обозначает широкие вариации Li при относительно низкой концентрации Si. Тренд 2 характеризует смешение косейсмического компонента с повышенной Na/Li температурой (до 116 °С) в плоскости разлома под ст. 27 с относительно холодными подземными водами тренда 2 в 2012–2015 гг. Косейсмический высокотемпературный Li компонент характеризует первую половину временного интервала между Култукской и Байкало-Хубсугульской активизациями и рассматривается как выражение остаточных процессов, фактически связанных с завершением сейсмогенных деформаций сильной Култукской активизации.

Основной тренд всей мониторинговой последовательности (тренд 3) включает фигуративные поля подземных вод 2012–2022 гг., показывающие возрастание температуры по Si геотермометру от 10–15 °С до Голоустного землетрясения 2015 г. до 31 °С в гидрогеодинамическом центре 2015–2022 гг. Вдоль основного тренда 3 последовательно возрастает роль подземных вод с повышенной T(Si), поступающих из глубинной части резервуара. Тренд 4 показывает Li компонент, связанный с общим гидрогеохимическим центром в 2015–2019 гг.

Тренды 5 и 6 2020–2022 гг., направленные, соответственно, вдоль абсциссы и ординаты, обозначаются как кремниевый и литиевый тренды. Кремниевый тренд 5 свидетельствует о глубинной подпитке гидрогеодинамического центра, в котором определяется температура около 31 °С. С одной стороны, гидрогеодинамический центр образуется в результате разбавления

подземных вод, поднимающихся из глубинной части резервуара, слабо минерализованными водами с образованием тренда 5, с другой стороны, этот центр дает исходные составы для развития тренда 6 косейсмического возрастания температуры по Na/Li геотермометру до 99 °С. Следовательно, Na/Li температура повышается непосредственно в гидрогеодинамическом центре.

Из регионального геотермического градиента 25 °С/км (Голубев, 2007), по Si геотермометру получаем оценку глубины гидрогеодинамического центра 2015–2022 гг. около 1.2 км.

Концентрация Na в подземных водах ст. 27 находится в основном в интервале 5.4–6.4 мг/дм³ и снижается 17 января 2014 г. до 3.4 мг/дм³ при содержании Si 4.8 мг/дм³. В этом соотношении Na и Si тренды подземных вод 2012–2015 и 2015–2022 гг. сходятся между собой. Фактически, тренд 2015–2022 гг. начинает выстраиваться от общего состава, проявившегося 17 января 2014 г., концентрированной группой трех фигуративных точек 19 апреля – 09 мая этого же года. Более отчетливо тренд оформляется после Голоустного землетрясения, в интервале с 26 сентября 2015 г. до 20 июня 2019 г. В начале этого интервала (во второй половине 2015 г.) и в первой половине 2016 г., четыре фигуративные точки смещаются к тренду 2012–2015 гг. Образуется основа тренда А. Следующий временной интервал (02 июля 2019 г. – 12 сентября 2020 г.), предшествующий Быстринскому землетрясению 22 сентября 2020 г., обозначается концентрированной совокупностью точек. Образуется основа тренда Б с более крутым возрастанием Na и Si, чем в тренде А. С 22 сентября 2020 г. до конца 2022 г. фигуративные точки концентрируются вдоль трендов А и Б с частичным рассеиванием в их окружении (рис. 4).

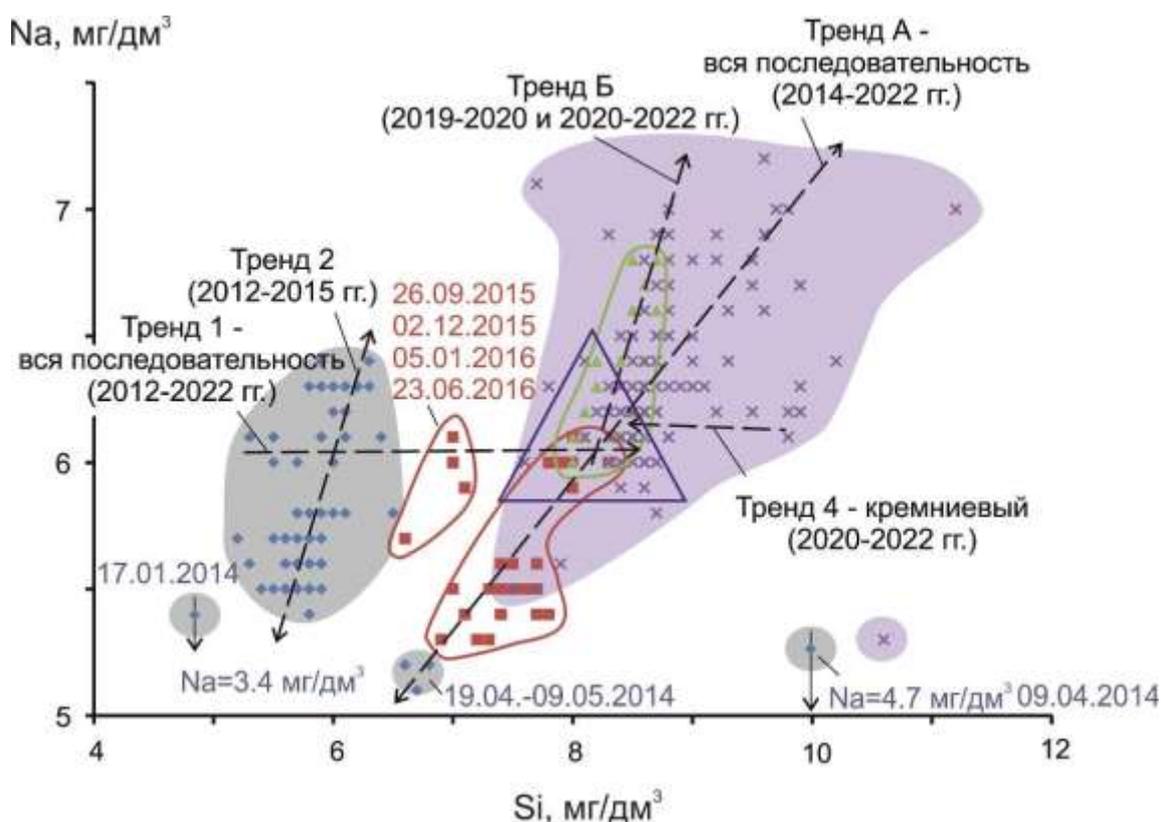


Рис. 4. Диаграмма Na –Si подземных вод ст. 27. Условные обозначения см. на рис. 3а.

Fig. 4. Diagram of Na vs Si for groundwaters from station 27. Symbols are as in Fig. 3a.

Из анализа диаграмм рис. 3 и 4 следует вывод о существенном различии поведения Li относительно Si и поведения Na относительно Si. Поведение Li отчетливо контролируется косейсмическим эффектом возрастания температуры с образованием глинки трения в плоскости разлома. Хотя группирование точек Na относительно Si в общем соответствует группированию Li относительно Si, тренды отражают зависимость поведения Na не только от температуры, но и других гидрогеохимических параметров подземных вод Култукского полигона, которые в настоящей работе не рассматриваются.

Обсуждение результатов

Схема развития резервуара подземных вод под ст. 27

В кремниевом (халцедоновом) и Na/Li геотермометрах заложены разные принципы

расчета температуры резервуара подземных вод. Первый основан на зависимости растворимости Si от температуры и отражает фактор разбавления термальных вод, поднимающихся из резервуара. По кремниевому термометру определяется температура растворения–разбавления (ТРР). Второй служит показателем косейсмических деформаций в плоскости активного разлома Култукского полигона, сопровождающихся возрастанием температуры с образованием глинки трения. По Na/Li геотермометру определяется температура трения (ТТ). Благодаря различию принципов фиксации температуры подземных вод развитие резервуара расшифровывается в терминах ТТ и ТРР (рис. 5, 6).

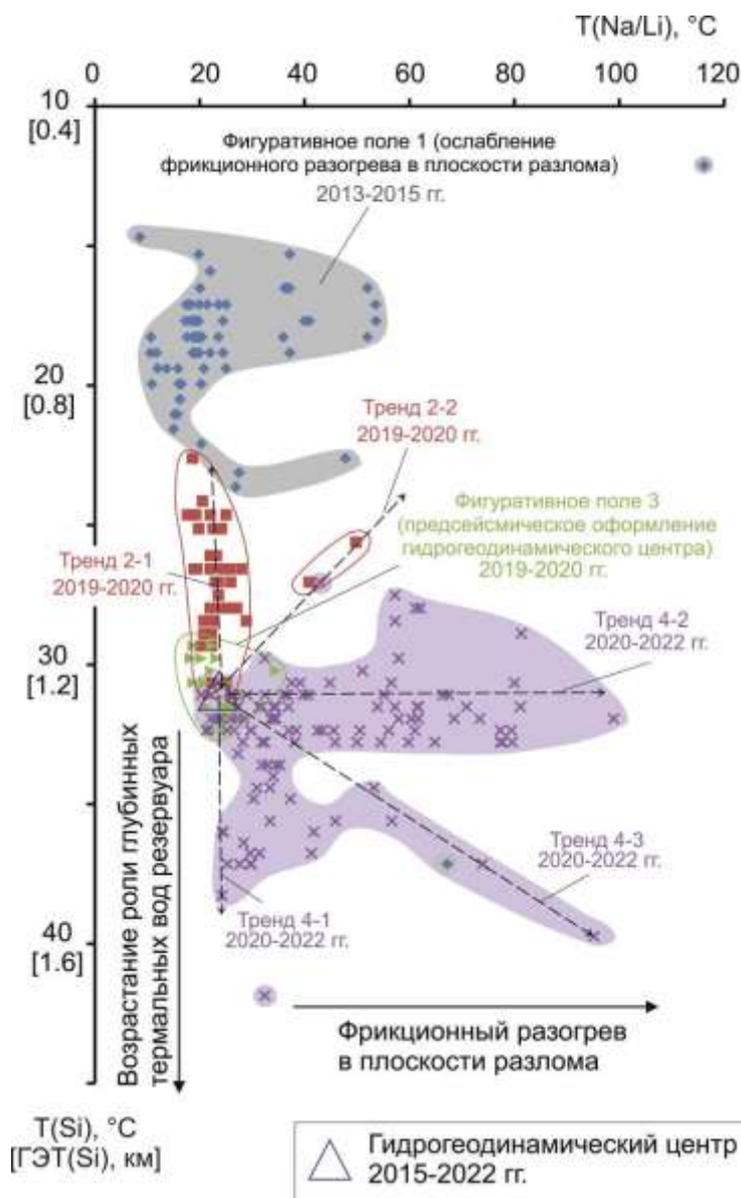


Рис. 5. Диаграмма $T(\text{Si}) - T(\text{Na/Li})$ подземных вод ст. 27. Условные обозн. см. на рис. 3а. ГЭТ(Si) – глубинный эквивалент температуры.

Fig. 5. Diagram $T(\text{Si}) - T(\text{Na/Li})$ of groundwaters from st. 27. Symbols are as in Fig. 3a. ГЭТ(Si) is deep equivalent of temperature.

В подземных водах 2013–2015 гг. наблюдаются относительно низкие ТРР резервуара. Подземные воды либо поступают из неглубокого (менее 1 км) источника или существенно разбавляются слабо минерализованными водами. Между тем, косейсмические движения коры приводят к возрастанию ТТ с образованием глинки трения в плоскости активного разлома, в связи с чем $T(\text{Na/Li})$ подземных вод варьируется от 8 до 53 °С. Отдельный эпизод $T(\text{Na/Li}) = 116$ °С проявляется при низком значении $T(\text{Si})$

(12 °С), другой эпизод $T(\text{Na/Li}) = 67$ °С – при повышенном значении $T(\text{Si})$ (37 °С). По отсутствию ярко выраженных трендов ТТ и/или ТРР активность 2013–2015 гг. рассматривается как остаточная от развития предшествующей сильной Култукской сейсмической активизации 2008–2011 гг. (фигуративное поле 1 на рис. 5).

5 сентября 2015 г. Голоустное землетрясение маркирует кардинальную перестройку сейсмогенных деформаций коры от сильной Култукской активизации к сильной Байкало-

Хубсугульской. В 2015–2019 гг. в резервуаре оформляется новый гидрогеодинамический центр на глубине около 1.2 км. В этом временном интервале компоненты подземных вод формирующегося гидрогеодинамического центра продолжают смешиваться с косейсмическим компонентом 2013–2015 гг. От гидрогеодинамического центра ($T(\text{Na/Li}) = 20$ °С, $T(\text{Si}) = 31$ °С) отходят два тренда: тренд ТРР (тренд 2–1), субпараллельный оси ординат, и тренд ТРР+ТТ (тренд 2–2) возрастания $T(\text{Na/Li})$ до 50 °С одновременно со снижением $T(\text{Si})$ до 25 °С.

В 2019–2020 гг. гидрогеодинамический центр оформляется в виде изометричного фигуративного поля точек 3. Заметное косейсмическое возрастание $T(\text{Na/Li})$ подземных вод в нем отсутствует. Это состояние резервуара оценивается как предсейсмическое.

С началом Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2022 гг. от компонента гидрогеодинамического центра образуются новые тренды 4–1, 4–2 и 4–3. В тренде ТРР (тренд 4–1) проявляется роль глубинного компонента при предельно-низком $T(\text{Na/Li})$, на уровне значения гидрогеодинамического центра (см. рис. 3а). В преобладающем тренде ТТ (тренд 4–2) резко отражаются косейсмические движения с образованием глинки трения в плоскости разлома на глубине гидрогеодинамического центра (около 1.2 км) с возрастанием $T(\text{Na/Li})$ до 99 °С. В менее представительном тренде ТРР+ТТ (тренд 4–3) проявляется фактор такого же возрастания температуры трения одновременно с проявлением фактора растворения–разбавления кремния.

Соотношение трендов ТТ и ТРР во временном интервале вступления Байкало-Хубсугульской активизации

В интервале 22 сентября 2020 г. – 18 февраля 2021 гг. различается 12 эпизодов меняющихся соотношений $T(\text{Si}) - T(\text{Na/Li})$ (рис. 7). Землетрясения происходят в ходе изме-

нений температурного режима резервуара подземных вод в терминах ТРР и ТТ.

В предсейсмический интервал 2019–2020 гг. и во время Быстринского землетрясения (22 сентября 2020 г.) подземные воды поступают из гидрогеодинамического центра, а в течение последующих двух месяцев образуется тренд возрастания $T(\text{Si})$ от 31 до 37 °С одновременно с возрастанием $T(\text{Na/Li})$ от 21 до 42 °С (эпизод 1). Быстринскому землетрясению предшествует интервал подземных вод гидрогеодинамического центра, соответствующий подготовке землетрясения продолжительностью 13 месяцев и 20 дней (с 02 июля 2019 г. до 22 сентября 2020 г.). После землетрясения следует 2-х месячный интервал режима ТРР+ТТ, соответствующий релаксации тектонических напряжений в коре после сейсмического толчка.

29 ноября 2020 г. скачкообразно возрастает $T(\text{Na/Li})$ до 61 °С одновременно со снижением $T(\text{Si})$ до 28 °С (эпизод 2), но 06 декабря температуры возвращаются в пределы фигуративного поля эпизода 1 при значениях $T(\text{Si}) = 35$ и $T(\text{Na/Li}) = 30$ (эпизод 3). 10 декабря происходит Кударинское землетрясение, во время которого и 3 дня после него наблюдаются высокие значения $T(\text{Na/Li})$ (57–65 °С) при пониженных значениях $T(\text{Si})$ (28–33 °С) (эпизод 4), но уже 17 декабря значения температур вновь возвращаются в пределы фигуративного поля эпизода 1 ($T(\text{Si}) = 32$ °С и $T(\text{Na/Li}) = 29$ °С (эпизод 5). 20 декабря 2020 г. скачкообразно возрастает $T(\text{Na/Li})$ до 57 °С одновременно со снижением $T(\text{Si})$ до 28 °С (эпизод 6), но 24 декабря температуры возвращаются к значениям гидрогеодинамического центра ($T(\text{Si}) = 31$ и $T(\text{Na/Li}) = 20$) (эпизод 7). Соотношение температур приближается к их соотношению во время Быстринского землетрясения. В эпизодах 2–7 реализуется тренд ТТ. Вдоль этого тренда до и после Кударинского землетрясения насчитывается 11–12 дней.

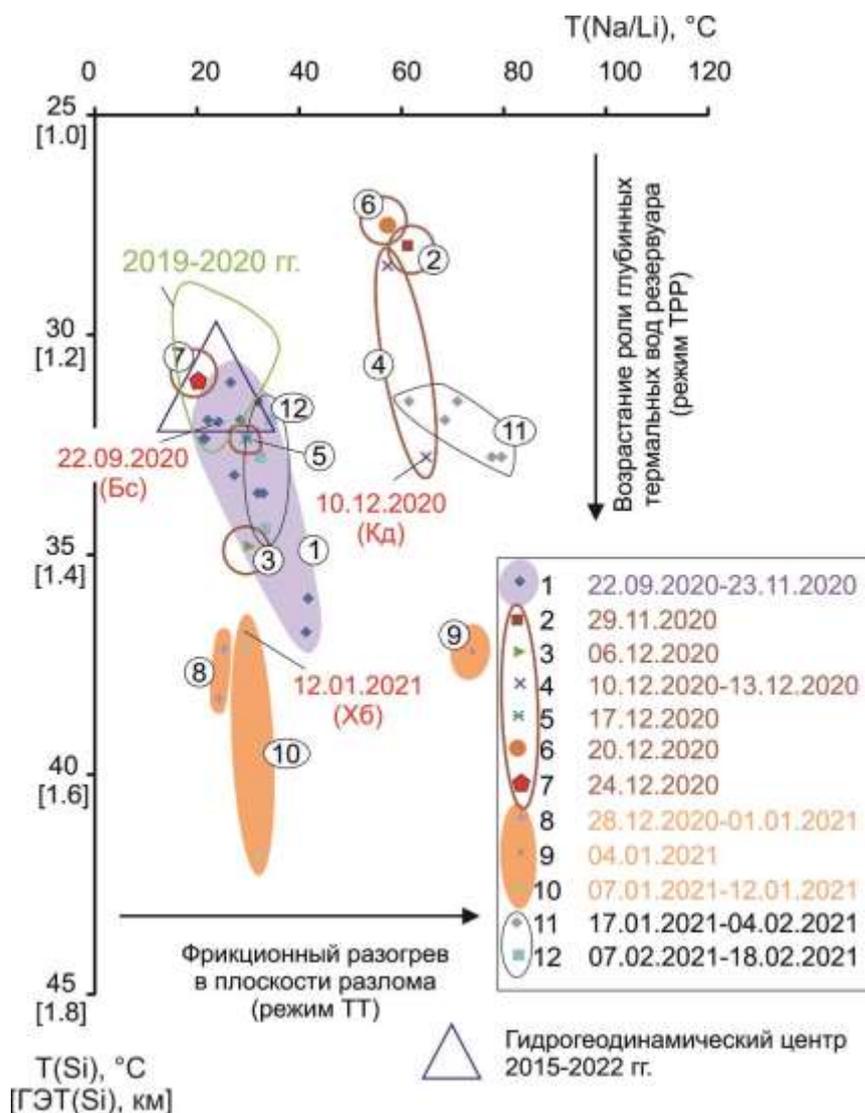


Рис. 7. Диаграмма $T(\text{Si}) - T(\text{Na/Li})$ подземных вод ст. 27 для временного интервала вступления Байкало-Хубсугульской активизации, от 22 сентября 2020 г. (Быстринское землетрясение) до 18 февраля 2021 г. Цветами выделены фигуративные поля и время вариаций температур подземных вод: от зеленого к сиреновому, связанных с Быстринским землетрясением (Бс), темно-коричневым цветом – связанных с Кударинским землетрясением (Кд), персиковым – связанных с Хубсугульским землетрясением (Хб), черным – связанных с афтершоками в Хубсугульском эпицентральной поле. Для сравнения показано фигуративное поле 3 подземных вод предсейсмического интервала 2019–2020 гг.

Fig. 7. Diagram $T(\text{Si}) - T(\text{Na/Li})$ of groundwaters from st. 27 for the time interval of the onset of the Baikal-Khubsugul reactivation, from September 22, 2020 (Bystraya earthquake) to February 18, 2021. Data fields and time of groundwater temperature variations are highlighted in colors: from green to lilac, associated with the Bystraya earthquake (Бс), dark-brown – associated with the Kudara earthquake (Кд), peach – associated with the Khubsugul earthquake (Хб), black – associated with aftershocks in the Khubsugul epicentral field. For comparison, a data groundwater field 3 of the pre-seismic interval 2019–2020 is shown.

В дальнейшем характер вариаций температур меняется. 28 декабря 2020 г. – 01 января 2021 г. заметно возрастает $T(\text{Si})$ (до интервала 37–38 °С) без существенного повышения $T(\text{Na/Li})$ (значения находятся в интервале 24–25 °С) (эпизод 8). 04 января

2021 г. скачкообразно возрастает $T(\text{Na/Li})$ до 74 °С при $T(\text{Si}) = 37$ °С (эпизод 9), но 07 – 12 января 2021 г. температуры возвращаются к значениям эпизода 8 ($T(\text{Si}) = 37\text{--}42$ °С и $T(\text{Na/Li}) = 30\text{--}32$ °С) (эпизод 10). В конце эпизода 10 происходит главное событие

Байкало-Хубсугульской активизации – Хубсугульское землетрясение. В эпизодах 8–10 реализуется тренд ТРР с боковым отклонением тренда ТТ. С Хубсугульским землетрясением связано только предшествующее ему состояние подземных вод в течение 15 дней.

17 января – 04 февраля 2021 г. скачкообразно возрастает $T(\text{Na/Li})$ до интервала 61–80 °С при $T(\text{Si}) = 31–33$ °С (эпизод 11). В этом интервале происходят афтершоки ($K = 12.0–12.9$) Хубсугульского эпицентрального поля: 13, 15, 18, 28 января и 03 февраля 2021 г. В этом эпизоде реализуется тренд ТТ (относительно гидрогеодинамического центра).

В интервале 07 – 18 февраля значения температур возвращаются в пределы фигуративного поля эпизода 1 ($T(\text{Si}) = 32–34$ °С и $T(\text{Na/Li}) = 32–34$ °С) (эпизод 12). Температуры $T(\text{Si})$ и $T(\text{Na/Li})$ уравниваются между собой. 07 февраля происходит Кударинский афтершок ($K = 11.7$) и 15 февраля – Хубсугульский афтершок ($K = 12.3$).

Дальнейшие соотношения температур подземных вод и землетрясений Байкало-Хубсугульской активизации в настоящей работе не рассматриваются. Уже из представленных данных можно сделать вывод о том, что каждое из трех землетрясений вступления Байкало-Хубсугульской активизации и ближайшие афтершоки характеризуются своим соотношением $T(\text{Si}) – T(\text{Na/Li})$ подземных вод ст. 27. Запускающее Быстринское землетрясение обозначается соотношением температур гидрогеодинамического центра. Промежуточное Кударинское землетрясение показывает возрастание роли движений в плоскости разлома с образованием глинки трения ($T(\text{Na/Li})$), а следующее за ним главное (Хубсугульское) землетрясение – показывает возрастание роли глубинных термальных вод резервуара ($T(\text{Si})$).

Различия между подземными водами гидрогеодинамического центра и производных от него ТТ и ТРР могут расшифровываться с построением схемы развития резервуара подземных вод как тектоно-термального аналога очага землетрясения. В сущности,

по выполненной реконструкции изменений в резервуаре подземных вод, можно судить об основных этапах изменений, происходящих в таком очаге.

Заключение

На Култукском полигоне прослежена термальная история резервуара подземных вод, развивавшегося аналогично процессам подготовки и реализации землетрясений. Ряды данных по концентрациям термофильных элементов Si, Na и Li, полученные для подземных вод ст. 27 в 2012–2022 гг., интерпретированы в связи с переходом от косейсмических Na/Li компонентов Култукской сейсмической активизации к косейсмическим Na/Li компонентам Байкало-Хубсугульской активизации с идентификацией гидрогеодинамического центра по кремниевому компоненту подземных вод на глубине около 1.2 км.

Во временном интервале вступления Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2022 гг. определены эпизоды менявшихся соотношений $T(\text{Si}) – T(\text{Na/Li})$ резервуара подземных вод в терминах ГЦ, ТРР и ТТ. Запускающую активизацию Быстринскому землетрясению предшествует интервал подземных вод гидрогеодинамического центра, соответствующий временному интервалу подготовки землетрясения продолжительностью 13 месяцев и 20 дней. За ним следует 2-х месячный интервал режима ТРР+ТТ, соответствующий релаксации тектонических напряжений после сейсмического толчка. До и после Кударинского землетрясения подземные воды характеризуются режимом ТТ в течение 11–12 дней. С Хубсугульским землетрясением связано только предшествующее ему состояние подземных вод в течение 15 дней, когда реализуется тренд ТРР с боковым отклонением тренда ТТ. После этого землетрясения (во время афтершоков) подземные воды возвращаются к режимам ТТ и ГЦ (рис. 8).

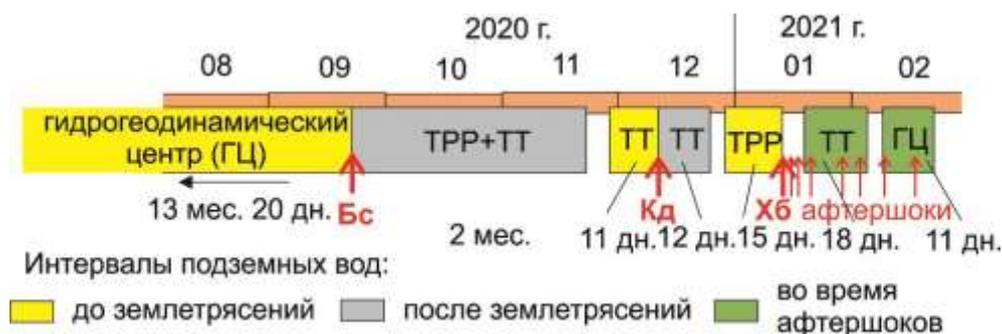


Рис. 8. Схема временных соотношений температурных интервалов Na/Li и Si компонентов подземных вод ст. 27(ГЦ, ТТ, ТРР и ТРР+ТТ) при вступлении Байкало-Хубсугульской активизации в конце 2020 г. и в начале 2021 г. Землетрясения: Бс – Быстринское, Кд – Кударинское, Хб – Хубсугульское.

Fig. 8. Scheme of temporal relationships between temperature intervals of Na/Li and Si components of groundwaters from st. 27 (ГЦ, ТТ, ТРР and ТРР+ТТ) and the entry of the Baikalo-Khubsugul reactivation in the fall of 2020 and in the early 2021. Earthquakes: Бс – Bystroe, Кд – Kudara, Хб – Khubsugul.

Установленные соотношения косейсмических компонентов ТРР и ТТ с компонентом гидрогеодинамического центра могут использоваться для распознавания обстановок подготовки и реализации землетрясений в центральной части Байкальской рифтовой системы.

Благодарности

Состав воды анализировался на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500се в ЦКП «Ультрамикрoанализ» (ЛИН СО РАН, г. Иркутск). Методические подходы к анализу подземных вод частично разработаны при выполнении темы ИЗК СО РАН на 2021–2025 гг. FWEF-2021-0009 и темы Минобрнауки ЛИН СО РАН № 0279-2021-0008 (121032300186-9). 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».

Литература

Борняков С.А. Деформационные предвестники Усть-Баргузинского землетрясения 20 мая 2008 г. // ДАН. 2010. Т. 431, № 3. С. 400–402.

Борняков С.А., Добрынина А.А., Семинский К.Ж., Саньков В.А., Радзиминович Н.А., Салко Д.В., Шагун А.Н. Быстринское землетрясение в южном Прибайкалье (21.09.2020 г., Mw = 5.4):

общая характеристика, основные параметры и деформационные признаки перехода очага в мета-нестабильное состояние // ДАН. Науки о Земле. 2021а. Т. 498, № 1. С. 84–88. DOI: 10.31857/S2686739721050042

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

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

Ильясова А.М., Снопков С.В. Временные вариации термофильного элемента Si подземных вод западного побережья оз. Байкал в 2012–2022 гг. //Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 72–105. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.72>

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

Пиннекер Е.В., Шабынин Л.Л., Ясько В.Г. и др. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Гидрогеология. Новосибирск: Наука, 1984. 167 с.

Рассказов С.В., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Оргильянов А.И., Коваленко С.Н., Семинский А.К., Попов Е.П., Чебыкин Е.П. Гидрогеохимическая зональность изотопов урана ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) на юге Сибирского палеоконтинента: роль резервуара Южного Байкала в формировании подземных вод // Геодинамика и тек-

тонофизика. 2020. Т. 11, № 3. С.:632–650. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496>

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

Семинский К.Ж., Добрынина А.А., Борняков С.А., Саньков В.А., Поспеев А.В., Рассказов С.В., Перевалова Н.П., Семинский И.К., Лухнев А.В., Бобров А.А., Чебыкин Е.П., Едемский И.К., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Король С.А. Комплексный мониторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: организация пилотной сети и первые результаты // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13, № 5. С. 0677.

Чебыкин Е.П., Чувашова И.С. Косейсмическая химическая гидрогеодинамика Култукского резервуара подземных вод в 2012–2022 гг.: индикаторные роли Na/Li, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ и ^{234}U // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 141–171. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.141>

Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Снопков С.В., Рассказов С.В. Сигналы ртути подземных вод Култукского полигона во время подготовки и реализации Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации 2020–2021 гг. // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 1. С. 7–9. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2022.1.7>

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

Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 6. С. 936–937.

Чувашова И.С., Ильясова А.М. Косейсмические вариации Li в подземных водах станции 27 Култукского полигона в 2012–2022 гг. // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 106–123 <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.106>

Arnorsson S., Gunnlaugsson E., Svavarsson H. The chemistry of geothermal waters in Iceland-II. Mineral equilibria and independent variables controlling water compositions // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1983. V. 47. P. 547–566.

Boldina S.V., Kopylova G.N. Effects of the January 30, 2016, Mw=7.2 Zhupanovsky earthquake on the water level variations in wells YuZ-5 and E-1 in Kamchatka // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2017. V. 8, No. 4. P. 863–880. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0321.

Chia Y., Chiu J.J., Chiang Y.-H., Lee T.-P., Liu C.-W. Spatial and temporal changes of groundwater level induced by thrust faulting // *Pure and Applied Geophysics*. 2008. V. 165, No. 1. P. 5–16. <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0293-5>.

Claesson L., Skelton A., Graham C., Dietl C., Mörth M., Torssander P., Kockum I. Hydrogeochemical changes before and after a major earthquake // *Geology*. 2004. V. 32, No. 8. P. 641–644. doi: 10.1130/G20542.1

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

King C.-Y., Koizumi N., Kitagawa Y. Hydrogeochemical anomalies and the 1995 Kobe Earthquake // *Science*. 1995. V. 269. P. 38–39.

Matsumoto N., Koizumi N. Recent hydrological and geochemical research for earthquake prediction in Japan // *Nat Hazards*. 2013. V. 69. P. 1247–1260. DOI 10.1007/s11069-011-9980-8

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

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Pyasova A.M., Snopkov S.V., Bornyakov S.A., Chuvashova I.S. Change of seismic hazard levels in complete 12-year seismogeodynamic cycle of the South Baikal Basin: Results of hydroisotopic ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) monitoring // *Geology and Environment*. 2022. V. 2, No. 2. P. 7–21. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.7

Sadovsky M.A. Prediction of earthquake time // *Earth and Universe*. 1978. No. 6.

Sadovsky M.A., Monakhov F.I., Semenov A.N. Hydrogeodynamic precursors of the South Kurile earthquakes // *Doklady AN USSR*. 1977. Vol. 236, No. 1.

Shi Z., Wang G., Manga M., Wang C.Y. Mechanism of co-seismic water level change following four great earthquakes – insights from co-seismic responses throughout the Chinese mainland // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. V. 430. P. 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.08.012>.

Sobolev G.A. Fundamentals of earthquake prediction. M: Nauka, 1993. 313 pp.

Solonenko V.P. Seismogeology and the problem of prediction of earthquakes // *Geology and Geophysics*. 1974. No. 5. P. 168–178.

Sukhija B.S., Reddy D.V., Nagabhushanam P., Kumar B. Significant temporal changes in ^{13}C in dissolved inorganic carbon of groundwater related to reservoir-triggered seismicity // *Seismological Research Letters*. 2010. V. 81, No. 2. P. 218–224. doi:10.1785/gssrl.81.2.218

Tsunogai U., Wakita H. Precursory chemical changes in ground water: Kobe Earthquake, Japan // *Science*. 1995. V. 269. P. 61–63.

Varshal G.M., Sobolev G.A., Barsukov V.L., Koltsov A.V., Kostin B.I., Kudinova T.F., Stakheyev Y.I., Tretyakova S.P. Separation of volatile components from rocks under mechanical loading as the source of hydrogeochemical anomalies preceding earthquakes // *Pure Appl. Geophys.*, 1985. V. 122. P. 463–477.

References

Bornyakov S.A. Deformational precursors of the Ust-Barguzin earthquake on May 20, 2008 // *Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*. 2010. V. 431, No. 3. P. 400–402. (in Russian)

Bornyakov S. A., Dobrynina A. A., Seminsky K. Zh., Sankov V. A., Radziminovich N. A., Salko D. V., Shagun A.N. Bystrinsky earthquake in the southern Baikal region (21.09.2020 g., Mw = 5.4): general characteristics, main parameters and deformation signs of the transition of the focus to a metastable state // *Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*. 2021a, V. 498, No. 1. P. 84–88. DOI: 10.31857/S2686739721050042 (in Russian)

Bornyakov S.A., Miroshnichenko A.I., Salko D.V. Diagnostics of the pre-seismogenic state of structurally inhomogeneous media according to deformation monitoring data // *Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*. 2016. Vol. 468, No. 1. P. 84–87. (in Russian)

Chebykin E.P., Chuvashova I.S. Coseismic chemical hydrogeodynamics of the Kultuk ground-

water reservoir in 2012–2022: indicator roles of the Na/Li, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, and ^{234}U // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 141–171. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.141> (in Russian)

Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Rasskazov S.V. Groundwater mercury signals from the Kultuk polygon during the preparation and implementation of the Baikal-Khubsugul seismic activation in 2020–2021. // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 1. P. 7–9. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2022.1.7> (in Russian)

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

Chipizubov A.V., Smekalin O.P. Paleoseis-modislocations and related paleoearthquakes at the Main Sayan Fault zone // *Russian Geology and Geophysics*. 1999. V. 40, No. 6. P. 936–937. (in Russian)

Chuvashova I.S., Ilyasova A.M. Coseismic variations of Li in groundwaters from station 27 of the Kultuk polygon in 2012–2022 // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 106–123. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.106> (in Russian)

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

Ilyasova A.M., Snopkov S.V. Temporal variations of thermophilic element Si in groundwaters from the SW coast of Lake Baikal in 2012–2022 // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 72–105. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.72> (in Russian)

Map of earthquake epicenters. Irkutsk: Baikal Branch of the Geophysical Survey, 2023. <http://www.seis-bykl.ru> (in Russian)

Pinneker E.V., Shabynin L.L., Yasko V.G. et al. Geology and seismicity of the BAM zone. Hydrogeology. Novosibirsk: Nauka, 1984. 167 p. (in Russian)

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Orgilyanov A.I., Kovalenko S.N., Seminsky A.K., Popov E.P., Chebykin E.P. Hydrogeochemical zoning of uranium isotopes

(234U/238U) in the Southern Siberian paleocontinent: the role of the South Baikal reservoir in the groundwater formation // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2020;11(3):632-650. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496> (in Russian)

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. Bystrinskoye earthquake in the Southern Baikal region (September 21, 2020, Mw=5.4): main parameters, signs of preparation and accompanying effects // *Russian Geology and Geophysics*. 2021. V. 62, No. 5. P. 727–743. (in Russian)

Seminsky K.Zh., Dobrynina A.A., Bornyakov S.A., Sankov V.A., Pospeev A.V., Rasskazov S.V., Perevalova N.P., Seminskiy I.K., Lukhnev A.V., Bobrov A.A., Chebykin E.P., Edemskiy I.K., Ilyasova A.M., Salko D.V., Sankov A.V., Korol S.A., 2022. Integrated monitoring of hazardous geological processes in Pribaikalye: Pilot network and first results // *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (5), 0677. doi:10.5800/GT-2022-13-5-0677 (in Russian)

Arnorsson S., Gunnlaugsson E., Svavarsson H. The chemistry of geothermal waters in Iceland-II. Mineral equilibria and independent variables controlling water compositions // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1983. V. 47. P. 547–566.

Boldina S.V., Kopylova G.N. Effects of the January 30, 2016, Mw=7.2 Zhupanovsky earthquake on the water level variations in wells YuZ-5 and E-1 in Kamchatka // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2017. V. 8, No. 4. P. 863–880. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0321.

Chia Y., Chiu J.J., Chiang Y.-H., Lee T.-P., Liu C.-W. Spatial and temporal changes of groundwater level induced by thrust faulting // *Pure and Applied Geophysics*. 2008. V. 165, No. 1. P. 5–16. <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0293-5>.

Claesson L., Skelton A., Graham C., Dietl C., Mörth M., Torssander P., Kockum I. Hydrogeochemical changes before and after a major earthquake // *Geology*. 2004. V. 32, No. 8. P. 641–644. doi: 10.1130/G20542.1

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

King C.-Y., Koizumi N., Kitagawa Y. Hydrogeochemical anomalies and the 1995 Kobe Earthquake // *Science*. 1995. V. 269. P. 38–39.

Matsumoto N., Koizumi N. Recent hydrological and geochemical research for earthquake prediction in Japan // *Nat Hazards*. 2013. V. 69. P. 1247–1260. DOI 10.1007/s11069-011-9980-8

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

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Bornyakov S.A., Chuvashova I.S. Change of seismic hazard levels in complete 12-year seismogeodynamic cycle of the South Baikal Basin: Results of hydroisotopic ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) monitoring // *Geology and Environment*. 2022. V. 2, No. 2. P. 7–21. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.7)

Sadovsky M.A. Prediction of earthquake time // *Earth and Universe*. 1978. No. 6.

Sadovsky M.A., Monakhov F.I., Semenov A.N. Hydrogeodynamic precursors of the South Kurile earthquakes // *Doklady AN USSR*. 1977. Vol. 236, No. 1.

Shi Z., Wang G., Manga M., Wang C.Y. Mechanism of co-seismic water level change following four great earthquakes – insights from co-seismic responses throughout the Chinese mainland // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. V. 430. P. 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.08.012>.

Sobolev G.A. Fundamentals of earthquake prediction. M: Nauka, 1993. 313 pp.

Solonenko V.P. Seismogeology and the problem of prediction of earthquakes // *Geology and Geophysics*. 1974. No. 5. P. 168–178.

Sukhija B.S., Reddy D.V., Nagabhushanam P., Kumar B. Significant temporal changes in ^{13}C in dissolved inorganic carbon of groundwater related to reservoir-triggered seismicity // *Seismological Research Letters*. 2010. V. 81, No. 2. P. 218–224. doi:10.1785/gssrl.81.2.218

Tsunogai U., Wakita H. Precursory chemical changes in ground water: Kobe Earthquake, Japan // *Science*. 1995. V. 269. P. 61–63.

Varshal G.M., Sobolev G.A., Barsukov V.L., Koltsov A.V., Kostin B.I., Kudinova T.F., Stakheyev Y.I., Tretyakova S.P. Separation of volatile components from rocks under mechanical loading as the source of hydrogeochemical anomalies preceding earthquakes // *Pure Appl. Geophys.*, 1985. V. 122. P. 463–477.

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, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
664033 Irkutsk, Ulaanbaatarskaya str., 3,
Limnological Institute SB RAS,
email: epcheb@yandex.ru.

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
зав. лабораторией,
664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет, геологический факультет,
зав. кафедрой,
email: rassk@crust.irk.ru.

Rasskazov Sergei Vasilyevich,

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, professor,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Head of Laboratory,
664003 Irkutsk, Lenin str., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Head of Chair,
email: rassk@crust.irk.ru.

Косейсмическая химическая гидрогеодинамика Култукского резервуара подземных вод: индикаторные роли Na/Li, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ и ^{234}U

Е.П. Чебыкин^{1,2}, И.С. Чувашова^{1,3}

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

²Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

³Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. В рамках полного сейсмогеодинамического цикла центральной части Байкальской рифтовой системы в рядах гидрогеохимических данных, полученных в 2012–2022 гг. на станциях Култукского полигона, прослеживаются вариации термофильных элементов Na и Li и Na/Li отношения в связи с изменениями отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ и активности ^{234}U , отражающих открытие и закрытие микротрещин для циркулирующих подземных вод. Косейсмическая химическая гидрогеодинамика Култукского резервуара подземных вод рассматривается в терминах температуры и растяжения–сжатия коры.

Ключевые слова: подземные воды, мониторинг, Na/Li, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, ^{234}U , землетрясение, глина трения, Байкал.

Coseismic chemical hydrogeodynamics of the Kultuk groundwater reservoir: indicator roles of the Na/Li, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, and ^{234}U

E.P. Chebykin^{1,2}, I.S. Chuvashova^{1,3}

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

²Limnological Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia

³Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Abstract. Within the framework of the complete seismogeodynamic cycle of the central part of the Baikal Rift System, in the series of hydrogeochemical data obtained in 2012–2022 at stations of the Kultuk polygon, variations of the thermophilic elements Na and Li and Na/Li ratios are traced in connection with changes in the $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratios and ^{234}U activity, reflecting the opening and closing of microcracks for circulating groundwaters. Coseismic chemical hydrogeodynamics of the Kultuk groundwater reservoir is considered in terms of temperature and extension–compression of the crust.

Keywords: groundwater, monitoring, Na/Li, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, ^{234}U , earthquake, friction clay, Baikal.

Введение

Изучение сейсмогенных деформаций коры предполагает считывание эффектов, происходящих в очаге подготавливающегося землетрясения. По приходу сейсмических волн восстанавливается эпицентр, гипоцентр и сила подвижки в очаге. Но реконструкция механизма землетрясения, как правило, получается уже после землетрясения. Для отслеживания его приближения необходим сбор информации, по которой можно опре-

делить время и место главного сейсмического толчка. В идеальном варианте должны проводиться наблюдения эффектов либо непосредственно в очаге землетрясения, либо на уровне максимальной концентрации гипоцентров. В Байкальской рифтовой системе такой уровень землетрясений разных энергетических классов определен в 1976–1983 гг. на глубине около 10 км (Голенецкий, 1990). Наиболее разрушительные землетрясения мира зарождаются на глубинах 5–7 и 35–40 км (Freund, 2013).

Во второй половине 20-го и в начале 21-го веков сейсмичность центральной части Байкальской рифтовой системы проявляется циклично. Последний полный сейсмогеодинамический цикл охватывает временной интервал от сильной Култукской активизации (землетрясения от 27 августа 2008 г. до 04 января 2011 г.) до Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации (землетрясения, начавшиеся 22 сентября 2020 г. и продолжающиеся в 2023 г.). Для изучения гидрогеохимических процессов, сопутствующих развитию сейсмогенных деформаций территории в 2012 г. был организован мониторинг подземных вод на Култукском полигоне. По наблюдениям вариаций отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (ОА4/8), активности ^{234}U (А4) и концентрации U в циркулирующих подземных водах было установлено косейсмическое закрытие и открытие микротрещин, отражающее пульсации сжатия и растяжения коры, а по результатам анализа пространственно-временных вариаций термфильного элемента Si в подземных водах полигон стал рассматриваться как отражение косейсмических процессов, происходящих в Култукском резервуаре подземных вод (Rasskazov et al., 2022; Чебыкин и др., 2022; Ильясова, Снопков, 2023).

Геотермометр кремния подземных вод территории показал повышенные температуры в резервуаре, искаженные разбавлением глубинной составляющей слабо минерализованными водами. Для изучения подземных вод станций 184 и 27 был привлечен также Na/Li геотермометр. Это элементное отношение в термальных подземных водах зависит не только от их температуры, но и от состава (Fouillac, Michard, 1981; Fouillac et al., 1989; Karingithi, 2009; Sanjuan, Millot, 2009; Sanjuan et al., 2010, 2014; Li et al., 2021; Лепокурова, Трифонов, 2022). Уравнения Na/Li геотермометра калиброваны эмпирически исходя из равновесия вода–порода по термальным подземным водам *in situ*. Мы предполагаем, что в сейсмоактивной области Na/Li геотермометрия подземных вод усложняется косейсмическим эффектом усиления взаимодействия вода–порода в активном разломе по механизму размешивания твердых глинистых частиц в жидкости. Тем-

пературы, полученные по Na/Li геотермометрии подземных вод ст. 27, дают информацию о косейсмической генерации тепла в плоскости активного разлома (Чебыкин, Рассказов, 2023; Чувашова, Ильясова, 2023). Цель настоящей работы – проследить косейсмические изменения Na/Li температурных характеристик подземных вод станций всего Култукского полигона в связи с вариациями ОА4/8 и А4.

Станции мониторинга

На Култукском полигоне мониторинг подземных вод проводится с частотой опробования в среднем один раз в 2 недели более 10 лет на пяти основных станциях: на скважинах – станции 27 (Школа), 8 (Чертова Гора), 40 (Стрелка), 9 (Земляничный) и в роднике – ст. 14к (Ключ Тигунчиха). Основные мониторинговые станции занимают разное положение в активных разломах структурного сочленения Южно-Байкальской впадины и Тункинской долины и существенно расходятся между собой по гидрогеохимическим показателям подземных вод. Скважины имеют глубину от 60 до 120 м. Население пос. Култук ежедневно берет из них воду, обеспечивая эффективную прокачку.

Подземные воды еще одной станции были вовлечены в опробование под номером 184 (ул. Школьная) в 2020–2022 гг. Она представляет собой 10-метровую скважину, пройденную на месте бывшего родника. Ст. 184 располагается вместе с основными станциями 8 и 27 на торцовой тектонической ступени Южно-Байкальской впадины, наклоненной к востоку (в сторону Байкала). По частоте опробования и степени информативности ст. 184 приравнивается к основным мониторинговым станциям (Рассказов и др., 2022).

Параллельно со скважинами пос. Култук проводится постоянное опробование воды оз. Байкал из водозаборной трубы, опущенной на глубину 8 м на расстоянии 15 м от берега (ст. 11, 154 км КБЖД). Эта станция находится в зоне Обручевского разлома, в которой байкальская вода разбавляется подземными водами, просачивающимися в дне Байкала.

Часть станций полигона опробовалась повторно, но реже, чем на основных станциях. Частота опробования составляла один или два раза в год, а иногда опробование было еще более редким. Такие станции дают общий тренд временных изменений компонентов подземных вод и рассматриваются как

вспомогательные. К ним относятся: ст. 38 (Вербное), 66 (Партизанское), 143 (Светофор КБЖД) и 29 (Медлянка).

В целом временная информация о вариациях компонентов подземных вод на полигоне получается на 11 станциях (рис. 1).

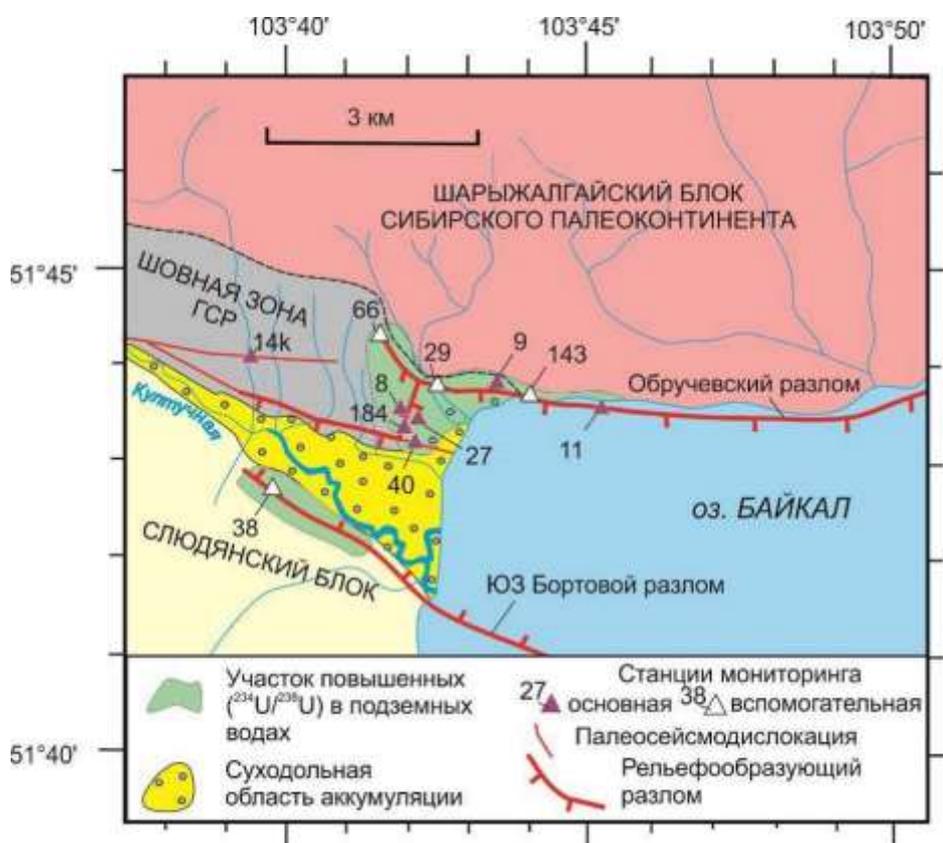


Рис. 1. Схема расположения основных и вспомогательных станций гидрогеохимического опробования активных разломов на западном побережье оз. Байкал (Култукский полигон). Палеосейсмодислокации шовной зоны Главного Саянского разлома (ГСР) показаны по работе (Чипизубов, Смекалин, 1999).

Fig. 1. Scheme of the location of the main and supplementary stations for hydrogeochemical sampling of active faults on the western coast of Lake Baikal (Kultuk polygon). Paleoseismic dislocations of the suture zone of the Main Sayan Fault (ГСР) are shown after (Chipizubov, Smekalin, 1999).

Отбор, хранение и аналитические исследования проб воды

При отборе проб для определения химического элементного состава образцы воды фильтруются через шприц-насадки с диаметром пор 0.45 мкм (Minisart 16555-K, ацетат целлюлозы, Sartorius Stedim Biotech GmbH, Германия) в предварительно взвешенные 2 мл полипропиленовые пробирки Эппендорфа (Axugen Scientific, Cat.-No. MST-200-C, США, Мексика), содержащие 40 мкл консерванта. В качестве консерванта

используется концентрированная азотная кислота (70%), дважды очищенная с помощью суббуйлинговой системы перегонки кислот (Savillex DST-1000 sub-boiling distillation system, Япония), в которую добавляется индий (типично 1000 ppb) в качестве внутреннего стандарта. Аликвоты консерванта взвешиваются при добавлении в пробирки. Пробирки с отобранными образцами воды взвешиваются и рассчитывается точное содержание азотной кислоты (типично 2 %) и индия (типично 30 ppb). Пробы хранятся в холодильнике при положитель-

ной температуре. В подготовленных растворах определяются содержание 72 химических элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСПР-МС) на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 (Чебыкин и др., 2012).

Изотопы урана определяются после его выделения на ионно-обменной колонке из отдельной пробы воды (до 400 мл). Применяется разработанная аналитическая методика (Чебыкин и др., 2007, 2015).

Na/Li геотермометрия

Натрий–литиевый геотермометр установлен эмпирически (Fouillac, Michard, 1981). Получены уравнения для подземных вод, содержащих <11 г/кг Cl (Cl < 0.3 моль/кг) и >11 г/кг Cl (Cl > 0.3 моль/кг).

Уравнение

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1195}{0.130 + \log(m\text{Na} / m\text{Li})} - 273.15$$

действительно для концентраций Cl > 0.3 моль/кг. Уравнение

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1000}{0.389 + \log(m\text{Na} / m\text{Li})} - 273.15$$

действительно для концентраций Cl < 0,3 моль/кг). В обоих уравнениях используются концентрации элементов в молях (*mNa* и *mLi*).

При расчете температуры природных подземных вод концентрации Na и Li в подземных водах не учитываются, а имеет значение только отношение этих элементов, которое проецируется из резервуара на поверхность.

Временные вариации отношения Na/Li

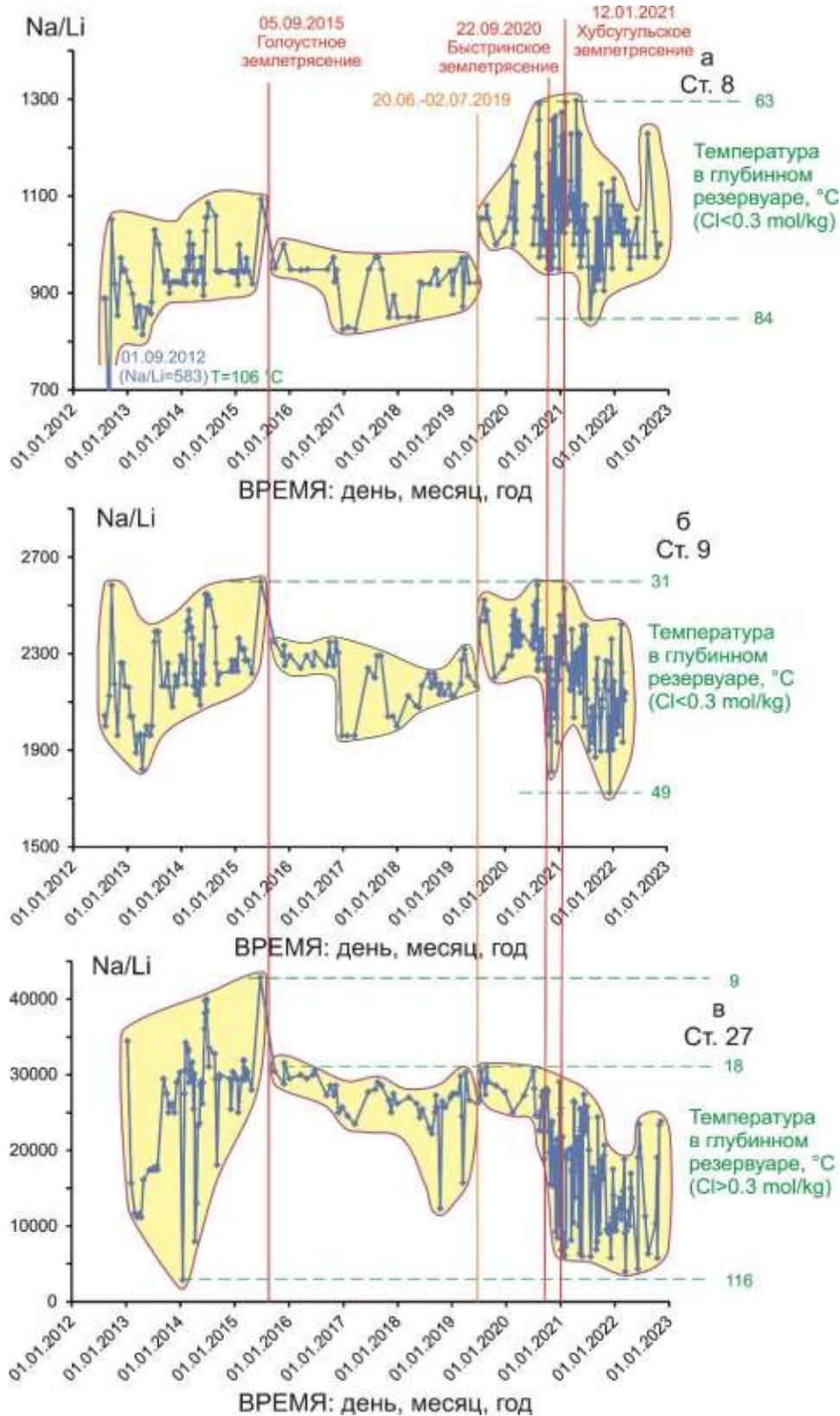
Временные вариации отношения Na/Li в подземных водах основных мониторинговых станций полигона в 2012–2022 гг. сопровождаются оценками температурных интервалов по уравнениям для подземных вод с содержанием Cl > 0.3 mol/kg (ст. 27 и 40) и с

содержанием Cl < 0.3 mol/kg (ст. 8, 9, 14к и 11) (рис. 2).

Первые две станции показывают сходные между собой вариации отношения Na/Li. В 2012–2015 гг. (до Голоустного землетрясения) на обеих станциях наблюдается возрастание Na/Li: на ст. 27 – от 2881 до 42857 (в ~15 раз), на ст. 40 – от 6067 до 11600 (в ~2 раза) (рис. 2 в, г). На первой станции температура подземных вод в этом диапазоне Na/Li снижается от 116 до 8 °С. При достижении минимальной температуры на ст. 27 происходит Голоустное землетрясение. На второй станции температура снижается от 79 до 50 °С. Минимальная температура достигается 25 июня 2014 г., почти за полгода до Северо-Хубсугульского землетрясения, произошедшего 5 декабря 2014 г. В конце 2014 и в 2015 гг. температура возрастает до 60 °С, а затем, перед Голоустным землетрясением, снижается до 55 °С. Поскольку непосредственно перед землетрясением пробы не отбирались, температура могла быть ниже.

В 2015–2019 гг. наблюдается слабое снижение отношения Na/Li: на ст. 27 – от 31579 до 12326 (почти в 3 раза), на ст. 40 – от 10000 до 7606. На первой станции температура подземных вод в резервуаре возрастает от 18 до 50 °С, на второй – от 60 до 69 °С.

Подобная тенденция снижения отношения Na/Li выявляется на обеих станциях в 2019–2022 гг., перед Байкало-Хубсугульской активизацией и в процессе ее реализации. Сначала (до Быстринского землетрясения) температура увеличивается незначительно: на ст. 27 – от 19 до 34 °С, на ст. 40 – от 60 до 70 °С (на последней станции наблюдается эпизодическое снижение температуры до 51 °С). После Быстринского землетрясения температура подземных вод в резервуаре существенно возрастает: активизируются резервуары подземных вод с температурными интервалами 50–99 °С (ст. 27) и 60–106 °С (ст. 40). Фактически, во время Байкало-Хубсугульской активизации из резервуара поступают подземные воды ст. 27 и 40 близкого температурного диапазона.



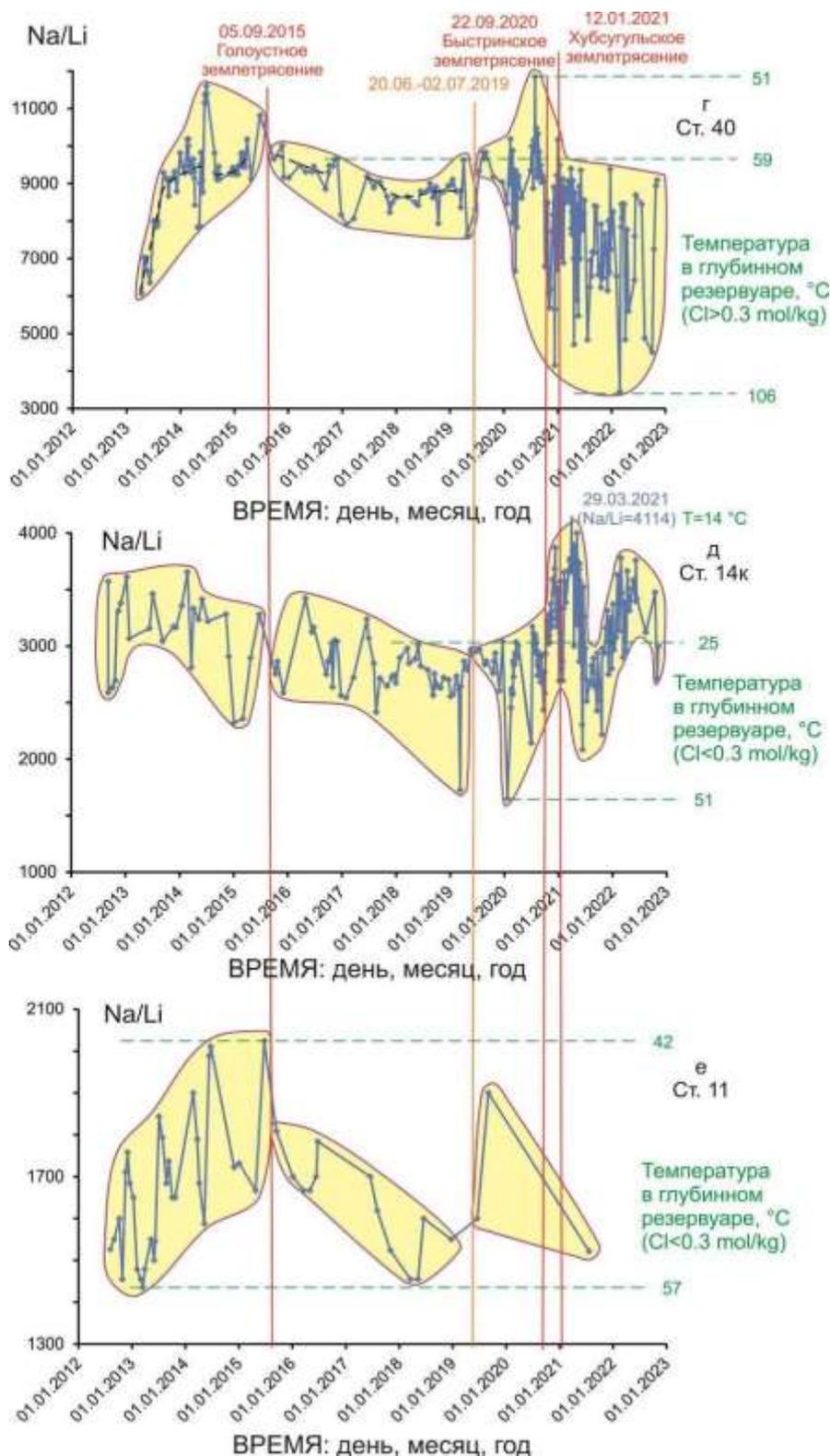


Рис. 2. Временные изменения отношения Na/Li (температурных характеристик) подземных вод станций Култукского полигона (а–д) и водозаборной станции 11 оз. Байкал (е). Здесь и далее землетрясения приводятся по каталогу (Карта..., 2023).

Fig. 2. Temporal changes in the Na/Li ratio (temperature characteristics) of groundwaters from stations of the Kultuk polygon (a–d) and water intake station 11 of Lake Baikal (e). Here and below, earthquakes are given from the catalog (Map..., 2023).

На ст. 8 отношение Na/Li подземных вод меняется во временных интервалах 2012–2015 гг. и 2015–2019 гг. подобно отношению Na/Li подземных вод ст. 27 и 40, хотя подземные воды каждой станции находятся в своем Na/Li диапазоне. В первом временном интервале температура ст. 8 снижается от 106 до 70 °С, во втором – возрастает от 75 до 85 °С. В отличие от станций 27 и 40, в третьем временном интервале (в 2019–2022 гг.), в подземных водах ст. 8 наблюдается относительное возрастание отношения Na/Li (рис. 2а). В резервуаре подземных вод под ней

устанавливаются меньшие температуры (от 63 до 84 °С), чем под ст. 27 и 40.

На сводных диаграммах Na/Li – время (рис. 3 а,б) обозначаются: высокие температуры подземных вод 50–116 °С (ст. 8 и 40), низкие температуры в основном 15–35 °С (ст. 14) и средние температуры 30–60 °С (ст. 9 и 11). На ст. 14к подземные воды относятся к интервалам низких и средних температур, на ст. 27 перекрывают весь температурный диапазон подземных вод Култукского полигона.

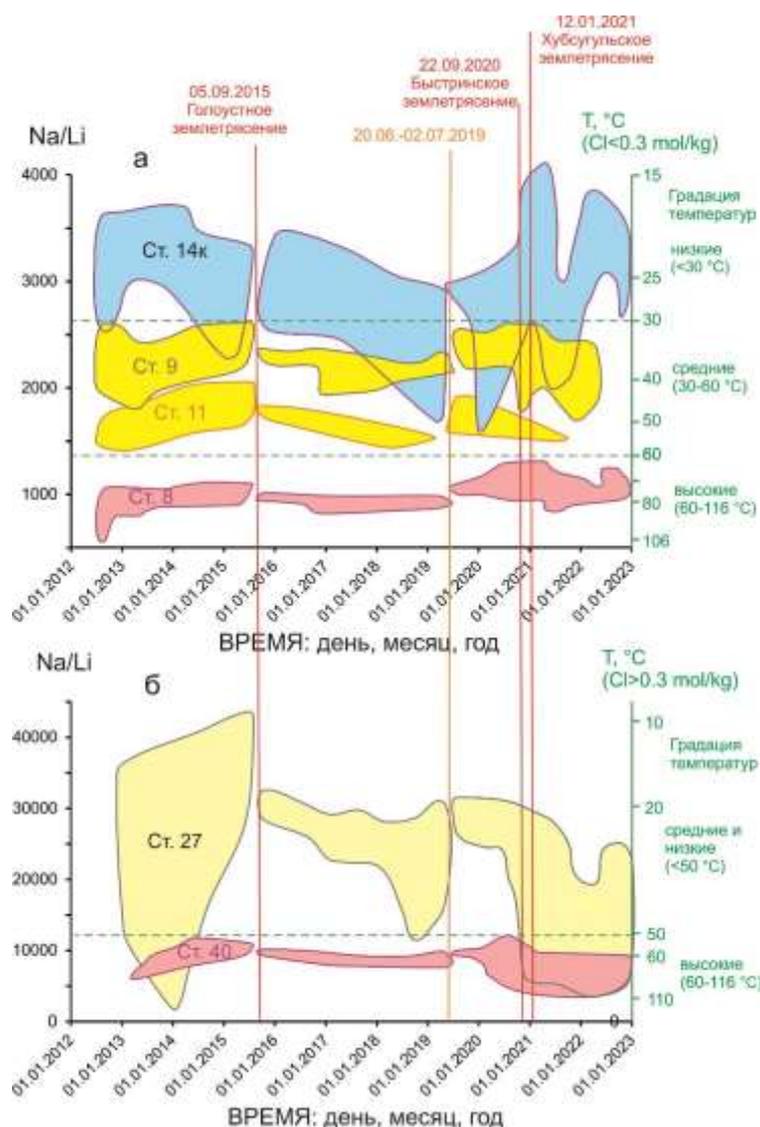


Рис. 3. Фигуративные поля подземных вод основных станций Култукского полигона на диаграмме Na/Li – время: а – расчет температуры с использованием уравнения пониженной концентрации Cl, б – то же, его повышенной концентрации. Фигуративные поля станций перенесены с рис. 2 а–е.

Fig. 3. Data fields of groundwaters from main stations of the Kultuk polygon on the Na/Li vs time diagram: а – temperature calculation using the equation of low Cl concentration, б – the same, of high Cl concentration. Data fields of stations are transferred from Fig. 2 а–е.

Разновременные тренды на диаграммах Li, Na – Na/Li

Итак, по Na/Li-температурным оценкам, подземные воды Култукского резервуара разделяются на: 1) высокотемпературные (50–125 °С), 2) среднетемпературные (25–50 °С) и 3) низкотемпературные (15–25 °С). Мониторинговые станции обеспечивают сквозную представительность от низких до высоких температур, частичную (средних и низких температур) и одноуровневую (высоких температур и средних температур).

Для прослеживания косейсмических трендов элементов и изотопов в подземных водах в рядах наблюдений различаются 4 временных интервала: 1) 2012–2015 гг. (до Голоустного землетрясения 5 сентября 2015 г.), 2) 2015–2019 гг. (от Голоустного землетрясения до 20 июня 2019 г.), 3) 2019–2020 гг. (предсейсмический интервал от 02 июля 2019 г. до Быстринского землетрясения 22 сентября 2020 г.) и 4) 2020–2022 гг. (сейсмический интервал от 22 сентября 2020 г. до конца 2022 г.).

Сквозная (по температурам) станция 27

Широкий диапазон отношения Na/Li, соответствующий температурному интервалу 8–116 °С, имеют подземные воды ст. 27. Они перекрывают диапазоны низких, средних и высоких температур (см. рис. 3б).

Во временном интервале 2012–2015 гг. концентрация Na меняется от 3.5 до 6.5 мг/дм³. На диаграмме Na – Na/Li (рис. 4а) фигуративные точки группируются в изолированные поля, образующие тренды при высоких и низких температурах и объединяющиеся в высокотемпературную и низкотемпературную совокупности с окончаниями низкого и повышенного содержания Na. Между этими совокупностями трендов существует температурный разрыв в интервале 28–36 °С. При высоких температурах (36–116 °С) образуется тренд в виде дуги с низким содержанием Na (3.5–5.5 мг/дм³). На отрезке 36–54 °С выстраивается тренд с повышенным содержанием Na (5.7–6.0 мг/дм³). При низких температурах (8–28 °С) образуется тренд в виде прерывистой дуги с пони-

женным содержанием Na (5.0–5.6 мг/дм³). На отрезке 11–16 °С выстраивается тренд с повышенным содержанием Na (6.2–6.5 мг/дм³).

Во временном интервале 2015–2019 гг. сохраняется тенденция образования трендов с низкой концентрацией Na (5.4–5.5 мг/дм³) при повышенной температуре (36–54 °С) и с повышенной концентрацией Na (5.4–6.1 мг/дм³) при пониженной температуре (18–29 °С). По сравнению с температурным диапазоном 8–116 °С подземных вод 2012–2015 гг., температурный диапазон подземных вод 2015–2019 гг. сокращается до 18–53 °С при сохранении температурного разрыва в интервале 28–36 °С. В низкотемпературных составах (18–29 °С) воспроизводится разделение на тренды с низким и повышенным содержанием Na (около 5.5 и 6.0 мг/дм³).

В следующем (предсейсмическом) временном интервале 2019–2020 гг. высокотемпературная часть фигуративных точек сокращается. Точки температурного интервала 18–29 °С смещаются от тренда 2: Na=6.0 мг/дм³ (2015–2019 гг.) с возрастанием Na до 6.9 мг/дм³ с охватом прежде существовавшего температурного разрыва 29–36 °С. Намечившаяся тенденция смещения точек прогрессирует в сейсмическом интервале 2020–2022 гг., во время которого образуется тренд 4, обозначающий возрастание температуры до 99 °С с относительным снижением концентрации Na в высокотемпературных составах до 5.3 мг/дм³.

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

смической активизации. Эти события обозначаются циркулирующими подземными водами, обогащенными натрием. После старта от температурного интервала 18–29 °С наблюдается относительное возрастание температуры. Переходное (стартовое для временного отрезка 2019–2022 гг.) содержание $Na=6.0$ мг/дм³ при 18–29 °С обозначает общий компонент подземных вод ст. 27 в развитии резервуара (рис. 4а).

Температурные вариации Li подземных вод ст. 27 также отчетливо разделяются на временные отрезки 2012–2019 гг. и 2019–2022 гг. Первый из них обозначается дугообразным трендом 1 (2012–2015 гг.), второй – дугообразным трендом 4 (2020–2022 гг.). Тренд Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2022 гг. расходится с трендом Котовской, Муринской и Голоустной активизаций 2012–2015 гг., смещаясь выше него. Тренды

переходных обстановок вписываются в эти вариации (рис. 4б). Во временном интервале 2012–2015 гг. концентрация Li составляет в основном около 0.2 мкг/дм³, в отдельных пробах возрастает до 0.4 мкг/дм³, а в пробе, отобранной 17 января 2014 г., увеличивается до 1.2 мкг/дм³. После Голоустного землетрясения, в 2015–2019 гг., концентрация Li по-прежнему в основном составляет около 0.2 мкг/дм³ и слегка повышается (до интервала $0.27–0.43$ мкг/дм³) только в трех пробах, отобранных 19 августа, 14 октября 2018 г. и 15 марта 2019 г. В следующем временном интервале 2019–2020 гг. концентрация Li составляет $0.20–0.28$ мкг/дм³. Только одна проба, отобранная 10 сентября 2020 г., показывает повышенную концентрацию Li (0.34 мкг/дм³). В 2020–2022 гг. концентрация Li находится в интервале $0.2–1.5$ мкг/дм³.

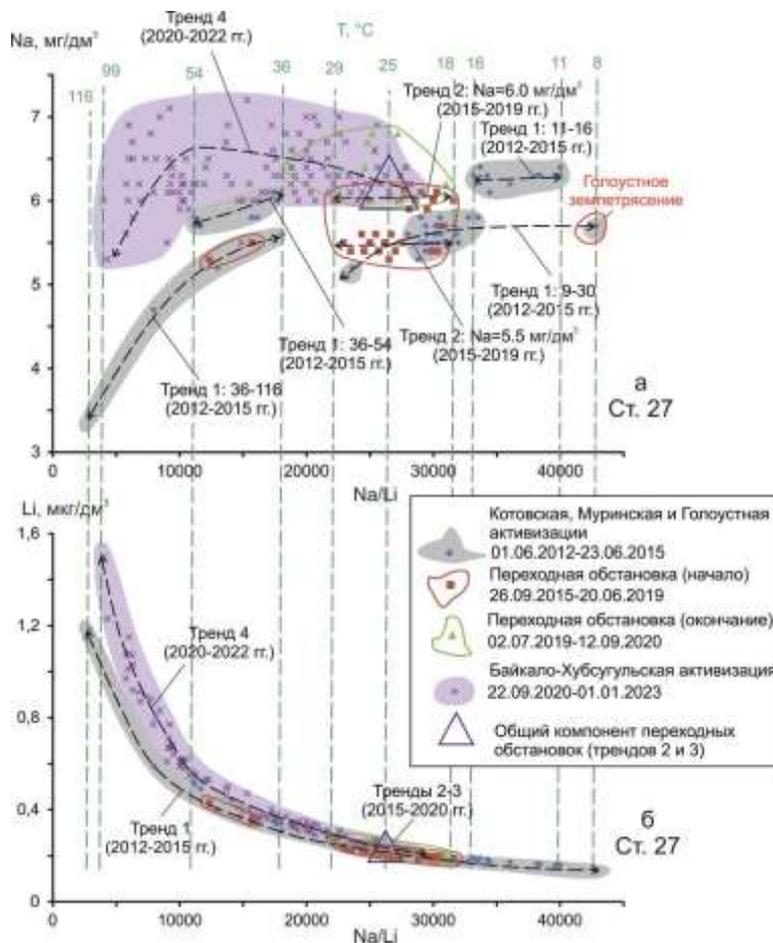


Рис. 4. Разновременные тренды подземных вод ст. 27 на диаграммах $Na - Na/Li$ (а) и $Li - Na/Li$ (б).

Fig. 4. Different time trends of groundwaters from st. 27 in the Na vs Na/Li (a) and Li vs Na/Li (б) diagrams.

Станции 40, 8 и 184
 $T(\text{Na/Li}) = 50\text{--}125\text{ }^\circ\text{C}$

Подземные воды станций 40, 8 и 184 характеризуются интервалами температур, соответственно, 51–106 °С, 62–106 °С и 77–123 °С.

На ст. 40 во временном интервале 2012–2015 гг. концентрация Na подземных вод меняется от 4.7 до 5.7 мг/дм³. На диаграмме Na – Na/Li (рис. 5а) фигуративные точки группируются в основном внутри поля 57–68 °С. Образуются тренды, слегка наклоненные относительно оси абсцисс, с пониженным и повышенным содержанием Na (около 5.0 и 5.5 мг/дм³): верхний – тренд 1 (2012–2015 гг.) и нижний – тренд 1-2 (2012–2019 гг.). Нижний тренд продолжается в менее температурную область (до 54 °С), верхний – в менее и более температурную области (до 52 и 79 °С). Тренды отражают гидрогеодинамическую активность ядра подземного резервуара (в интервале $T(\text{Na/Li}) = 55\text{--}68\text{ }^\circ\text{C}$), сочетающуюся с активностью сателлит-

ных участков ($T(\text{Na/Li}) = 50\text{--}53\text{ }^\circ\text{C}$ и $73\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}$). Кроме того, сателлитный участок ($T(\text{Na/Li}) = 73\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}$) характеризует ограниченный временной диапазон с 12 апреля до 13 июня 2013 г., в самом начале мониторинга ст. 40. Все последующие пробы временного интервала 2013–2015 гг. ст. 40 имеют пониженные значения температуры и относятся к гидрогеодинамическому ядру и другому сателлитному участку с меньшими температурами.

Во временном интервале 2015–2019 гг. гидрогеодинамическое ядро сохраняется, но сателлитные участки теряют активность. Затем, в предсейсмическом временном интервале 2019–2020 гг., подземные воды гидрогеодинамического ядра (преимущественно при $T(\text{Na/Li}) = 55\text{--}60\text{ }^\circ\text{C}$) обогащаются натрием. Генерируется тренд 3 (2019–2020 гг.) возрастания Na со снижением температуры от общего компонента гидрогеодинамического ядра. После тренда 3 характеристика изменившейся части гидрогеодинамического ядра транслируется на более высокие температуры, до $T(\text{Na/Li}) = 105\text{ }^\circ\text{C}$. Во время сейсмической активизации 2020–2022 гг. образуется тренд 4.

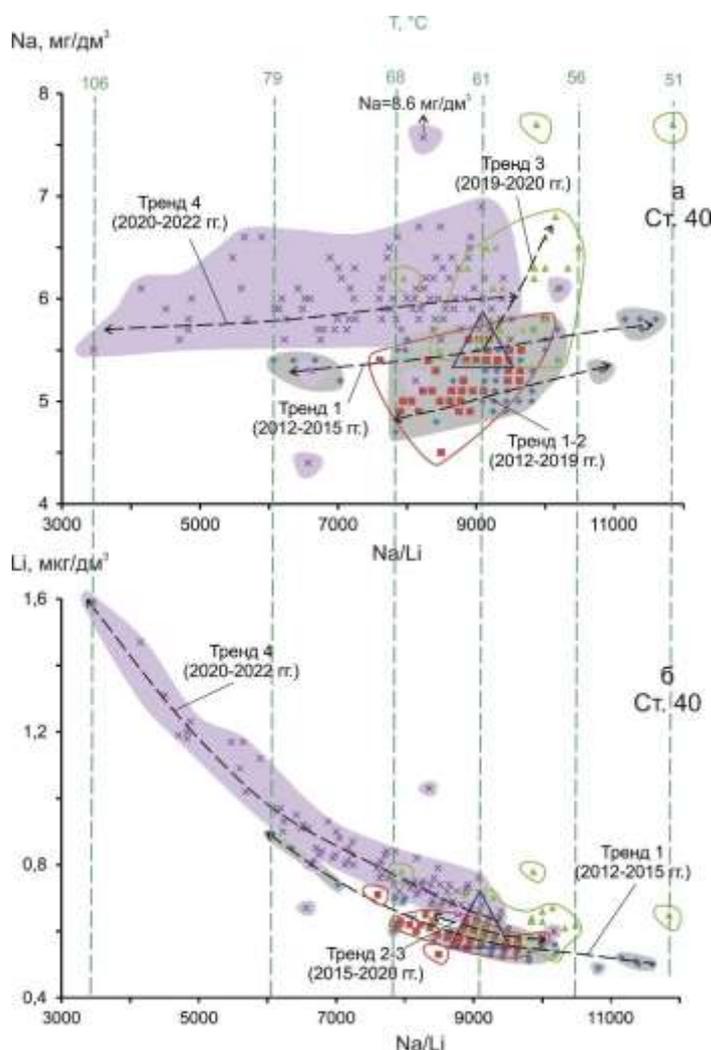
Температурные вариации Li подземных вод ст. 40 отчетливо разделяются на два временных отрезка: 2012–2015 и 2019–2022 гг. Образуются дугообразные тренды Котовской, Муринской и Голоустной активизаций (тренд 1 (2012–2015 гг.)) и Байкало-Хубсугульской активизации (тренд 4 (2020–2022 гг.)). Тренд 2020–2022 гг. расходится с трендом 2012–2015 гг., смещаясь выше него. Тренды переходных обстановок вписываются в эти вариации (рис. 5б).

Рис. 5. Разновременные тренды подземных вод ст. 40 на диаграммах Na – Na/Li (а) и Li – Na/Li (б). Условные обозначения см. рис. 4.

Fig. 5. Different time trends of groundwaters from st. 40 in the Na vs Na/Li (a) and Li vs Na/Li (б) diagrams. Symbols are as in Fig. 4.

На ст. 8 косейсмическая химическая гидрогеодинамика определяется ядром с центром температуры около 75 °С (рис. 6).

На диаграмме Na – Na/Li ст. 8 обозначается 4 тренда фигуративных полей разных временных интервалов: 1 – тренд интервала 2012–2015 гг., 2 – тренд 2015–



2019 гг. и 3 – тренд 2019–2020 гг. и 4 – тренд 2020–2022 гг. Последний тренд выделяется внутри фигуративного поля по сгущению точек. Первый и четвертый тренды протягиваются субпараллельно, обозначая снижение концентрации Na с возрастанием температуры. Тренды перекрываются по отношению Na/Li в интервале 900–1100 с относительным смещением вверх тренда 4 относительно тренда 1. Тренды 2 и 3 имеют более крутой наклон и взаимное перекрытие при значении Na/Li=1000 и концентрации Na=3.7 мг/дм³. Это взаимное перекрытие трендов характеризует общий компонент, соответствующий температуре 75 °С. При высокой температуре (более 75 °С) концентрация Na

в подземных водах в целом снижается, а при низкой температуре (менее 75 °С) концентрация Na возрастает (рис. 6а).

Подобные разновременные тренды обозначаются для ст. 8 на диаграмме Li – Na/Li (рис. 6б). Тренды 1 и 4 имеют более крутой наклон, чем тренды 2 и 3, которые в целом протягиваются субпараллельно оси абсцисс. На диаграммах рис. 6а,б отчетливо наблюдается унаследование трендов 2 от трендов 1 в области температур 75–105 °С и резкое смещение тренда 3 с уменьшением температур до интервала 62–75 °С и последующим преимущественным развитием тренда 4 в этом температурном интервале.

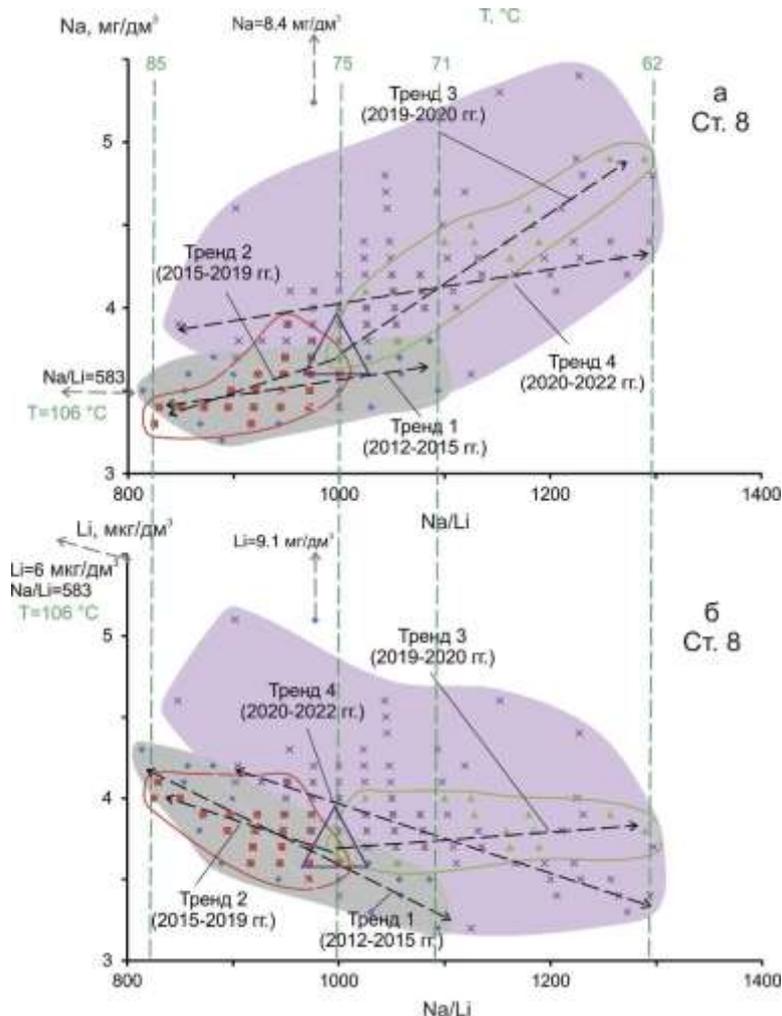


Рис. 6. Разновременные тренды подземных вод ст. 8 на диаграммах Na – Na/Li (а) и Li – Na/Li (б). Условные обозначения см. рис. 4.

Fig. 6. Different time trends of groundwaters from st. 8 in the Na vs Na/Li (a) and Li vs Na/Li (б) diagrams. Symbols are as in Fig. 4.

На ст. 184 косейсмическая химическая гидрогеодинамика определяется высоким

$T(\text{Na/Li}) = 78\text{--}122$ °С. Из-за отсутствия данных наблюдений 2012–2019 гг. точное опре-

деление гидрогеодинамического центра под скважиной невозможно. Ориентировочно, его положение определяется значением $T(\text{Na}/\text{Li}) = 90 \text{ } ^\circ\text{C}$, которому соответствует центральная часть фигуративного поля подземных вод временного интервала 2019–2020 гг. По этому фигуративному полю гидрогеодинамическое ядро обозначается в интервале $T(\text{Na}/\text{Li}) = 85\text{--}100 \text{ } ^\circ\text{C}$ (рис. 7).

На диаграмме $\text{Na} - \text{Na}/\text{Li}$ ст. 184 отчетливо трассируются: тренд 3 (2019–2020 гг.) и два тренда 4 (2020–2022 гг.). Тренд 3 получает дополнительные точки с повышенной концентрацией Na при значении $T(\text{Na}/\text{Li}) = 90 \text{ } ^\circ\text{C}$ (в гидрогеодинамическом центре) и при меньшем значении температуры ($82 \text{ } ^\circ\text{C}$). Один из трендов 4 (тренд 4–1) наследует основную совокупность точек тренда 3 и протягивается субпараллельно оси абсцисс через гидрогеодинамический центр в интервале температур от 82 до $112 \text{ } ^\circ\text{C}$. Другой тренд 4 (4–2) характеризует возрастание Na/Li отношения с повышением концентрации Na в более широком интервале температур (от 78

до $122 \text{ } ^\circ\text{C}$). Составы с максимальной концентрацией Na объединяются в тренд 4–3 с составами, имеющими минимальное отношение Na/Li (максимальное значение $T(\text{Na}/\text{Li}) = 122 \text{ } ^\circ\text{C}$). На этой диаграмме тренды 4–1, 4–2 и 4–3 сходятся между собой при максимальной температуре и с ее уменьшением расходятся (рис. 7а).

На диаграмме $\text{Li} - \text{Na}/\text{Li}$ ст. 184 фигуративные точки распределяются в тренды диаграммы $\text{Na} - \text{Na}/\text{Li}$ (рис. 7б). Все тренды имеют отрицательный наклон, свидетельствующий об основном вкладе Li в температурную характеристику подземных вод. Тренд 3 (2019–2020 гг.), с которым связывается гидрогеодинамический центр ст. 184, наследуется трендом 4–1. Тренд 4–2 протягивается выше тренда 4–1 субпараллельно ему с относительным расширением диапазона температур. Наконец, тренд 4–3 протягивается еще выше и субпараллельно другим трендам с относительным увеличением температур.

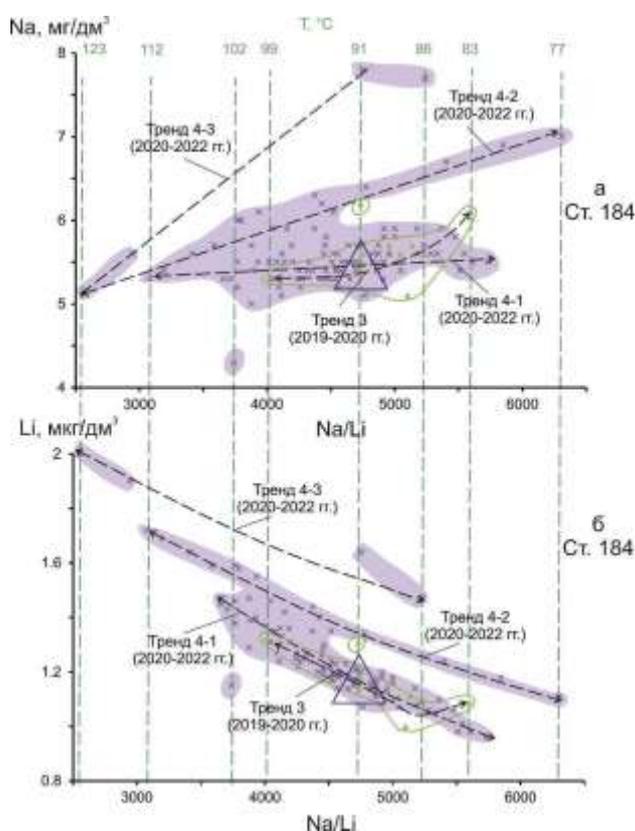


Рис. 7. Разновременные тренды подземных вод ст. 184 на диаграммах $\text{Na} - \text{Na}/\text{Li}$ (а) и $\text{Li} - \text{Na}/\text{Li}$ (б). Условные обозначения см. рис. 4.

Fig. 7. Different time trends of groundwaters from st. 184 in the Na vs Na/Li (a) and Li vs Na/Li (б) diagrams. Symbols are as in Fig. 4.

Станция 9 ($T(\text{Na/Li}) = 30\text{--}50\text{ }^\circ\text{C}$)

В подземных водах ст. 9 определяется температурный интервал $31\text{--}49\text{ }^\circ\text{C}$. На диаграмме $\text{Na} - \text{Na/Li}$ (рис. 8а) он полностью перекрывается трендами 1 (2012–2015 гг.) и 4 (2020–2022 гг.) подземных вод. Тренды подземных вод переходных обстановок имеют более узкие температурные диапазоны: тренд 2 (2015–2019 гг.) – от 38 до 42 $^\circ\text{C}$, тренд 3 (2019–2020 гг.) – от 38 до 30 $^\circ\text{C}$. Общий компонент показан в точке схождения трендов, соответствующей $T(\text{Na/Li}) = 35\text{ }^\circ\text{C}$, но поле составов гидрогеодинамического ядра резервуара протягивается вдоль перекрытия фигуративных полей подземных вод 2015–2019 и 2019–2020 гг. Это ядро составляет температурный интервал не менее 3 $^\circ\text{C}$ (рис. 8а).

В гидрогеохимических данных динамика ст. 9 повторяется в 2012–2015 и 2020–2022 гг. Гидрогеодинамическое ядро с течением времени не меняет температурный интервал. Тем не менее, даже в этом случае проявляется переход от менее натровых вод к более натровым, причем от общего компонента.

Подобно температурным вариациям Li подземных вод других станций полигона, температурные вариации Li подземных вод ст. 9 разделяются на два временных интервала, каждый из которых характеризуется своим трендом – 1 (2012–2015 гг.) и 4 (2020–2022 гг.). Тренд Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2022 гг. смещается выше тренда Котовской, Муринской и Голоустной активизаций 2012–2015 гг. Тренды переходных обстановок 2 (2015–2019 гг.) и 3 (2019–2020 гг.) вписываются в это смещение (рис. 8б).

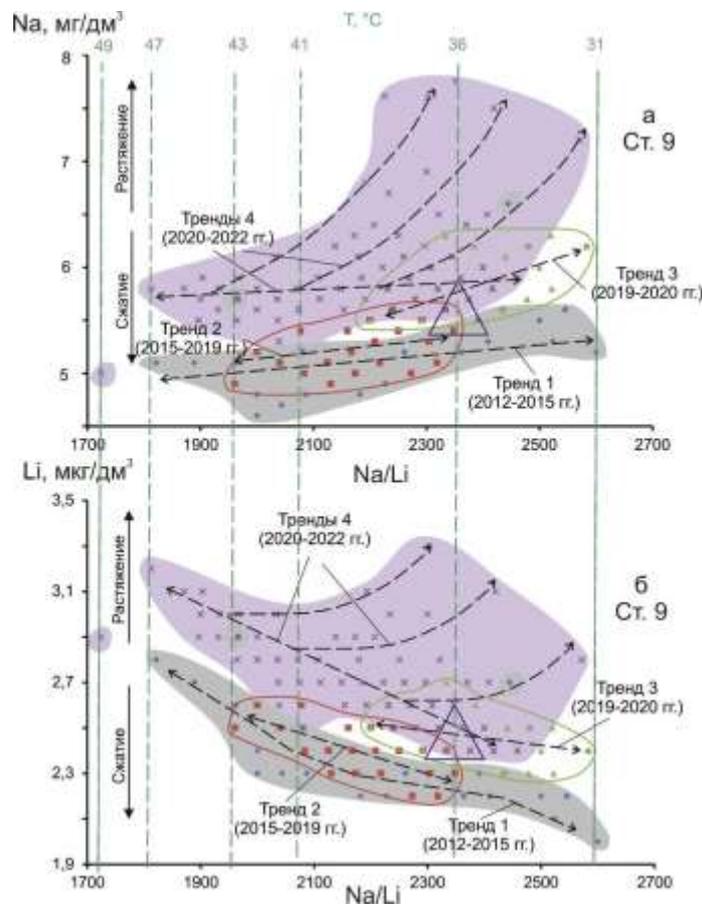


Рис. 8. Разновременные тренды подземных вод ст. 9 на диаграммах $\text{Na} - \text{Na/Li}$ (а) и $\text{Li} - \text{Na/Li}$ (б). Условные обозначения см. рис. 4.

Fig. 8. Different time trends of groundwaters from st. 9 in the Na vs Na/Li (а) and Li vs Na/Li (б) diagrams. Symbols are as in Fig. 4.

Станция 14к ($T(\text{Na}/\text{Li}) = 15\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$)

В подземных водах ст. 14к определяется температурный интервал 14–51 °С. На диаграмме Na – Na/Li (рис. 9а) фигуративные точки подземных вод образуют тренды повышения концентрации Na с возрастанием отношения Na/Li. Тренд 1 (2012–2015 гг.) занимает нижнюю часть диаграммы, переходные тренды 2 (2015–2019 гг.) и 3 (2019–2020 гг.) смещаются выше и тренды 4–1, 4–2 занимают верхнюю часть диаграммы. Тренды основной совокупности точек при низком отношении Na/Li (т. е. с возрастанием температуры) сменяются отдельными точками.

Подобным образом, в распределении фигуративных точек подземных вод наблюдается последовательное смещение трендов 1–4 из нижней в верхнюю часть диаграммы Li – Na/Li (рис. 9б). Однако, в подземных водах временного интервала 2012–2015 гг. проявляется две тенденции: повышения концентрации Li с возрастанием Na/Li отношения (тренд 1–1) и повышения концентрации Li с уменьшением Na/Li отношения (тренд 1–2). Последний из них получает выражение в переходных трендах 2 (2015–2019 гг.) и 3 (2019–2020 гг.). В трендах 4–1 и 4–2 эта тенденция сохраняется.

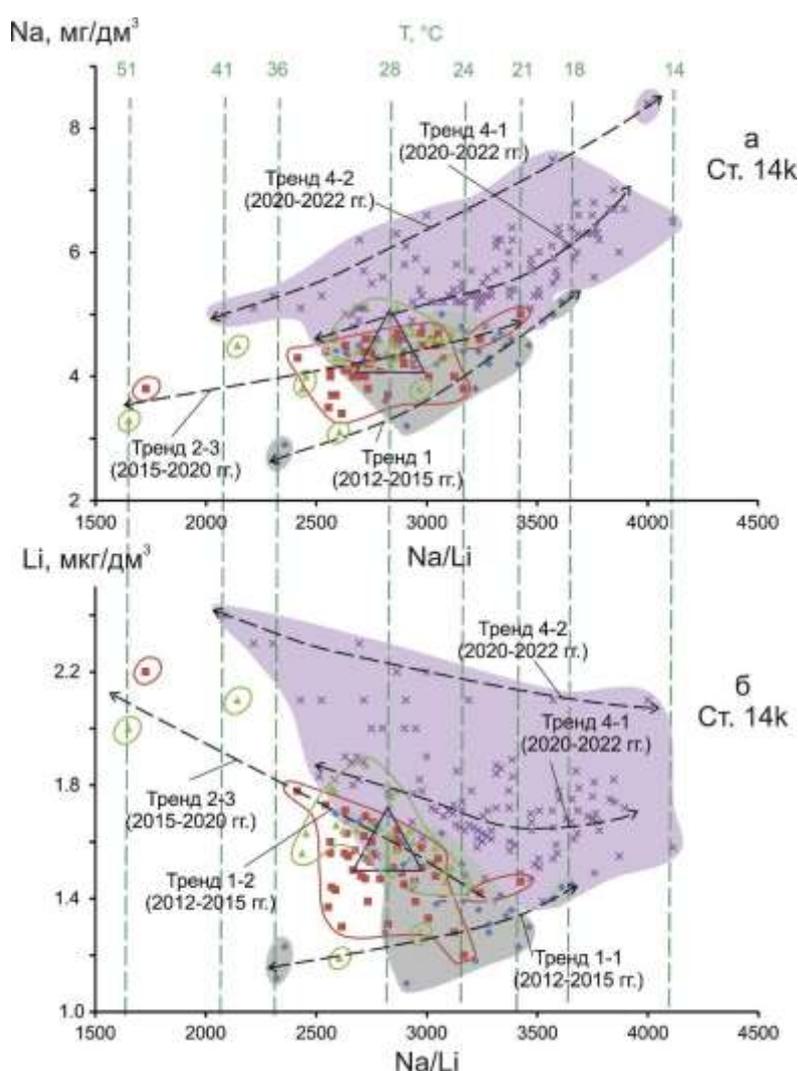


Рис. 9. Разновременные тренды подземных вод ст. 14к на диаграммах Na – Na/Li (а) и Li – Na/Li (б). Условные обозначения см. рис. 4.

Fig. 9. Different time trends of groundwaters from st. 14k in the Na vs Na/Li (a) and Li vs Na/Li (б) diagrams. Symbols are as in Fig. 4.

Разновременные тренды на диаграммах А4, ОА4/8 – Na/Li

Сквозная (по температуре) станция 27

Расщепленный характер трендов Na относительно температуры подземных вод ст. 27 (см. диаграмму рис. 4а) объясняется с позиций дифференцированного распределения закрытия и открытия микротрещин. Разрыв Na/Li температур этого временного интервала соответствует $T(\text{Na/Li}) = 30\text{--}35\text{ }^\circ\text{C}$.

На диаграмме ОА4/8 – Na/Li (рис. 10б) возрастание (или снижение) ОА4/8 интерпретируется как показатель открытия (или закрытия) микротрещин в породах и минералах. Тренды 1–1 и 1–2 (2012–2015 гг.) характеризуют последовательное усиление закрытия микротрещин с увеличением температуры; в первом из них [$T(\text{Na/Li})$ от 16 до 28 $^\circ\text{C}$] значения ОА4/8 снижаются от 3.3 до 3.0 и во втором [$T(\text{Na/Li})$ от 8 до 25 $^\circ\text{C}$] – значения ОА4/8 снижаются от 3.17 до 3.10. Тренд 1–1 наследуется трендом 2 (2015–2019 гг.). В более поздней совокупности точек 2019–2020 гг. значения ОА4/8 сокращаются до интервала 3.05–3.15. Эта совокупность точек становится изометричной. По ней определяется гидрогеодинамический центр ст. 27 ($T(\text{Na/Li}) = 25\text{ }^\circ\text{C}$), от которого во время Байкало-Хубсугульской активизации в нейтральном режиме разрастается тренд 4 до $T(\text{Na/Li}) = 100\text{ }^\circ\text{C}$.

Из приведенного сочетания трендов следует вывод о начальной концентрации сжатия ниже сходящихся трендов 1–1 и 1–2, при значении ОА4/8 около 2.95–3.0 при $T(\text{Na/Li}) = 30\text{--}36\text{ }^\circ\text{C}$ (в разрыве трендов точек). Этот

участок сжатия сохраняется до начала Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2022 гг.

Под участком сжатия в 2012–2015 гг. наблюдаются два тренда подземных вод. При значениях $T(\text{Na/Li}) = 36\text{--}55\text{ }^\circ\text{C}$ создается тренд 1–4 в участке контрастного растяжения (ОА4/8=3.2–3.3). При значениях $T(\text{Na/Li}) = 36\text{--}116\text{ }^\circ\text{C}$ к участку сжатия небольшим количеством точек трассируется тренд 1–3 от значения ОА4/8=3.23 до значения ОА4/8=2.97. В этот тренд вписываются 2 точки более поздних подземных вод временного интервала 2015–2019 гг. В 2019–2020 гг. тренд сжатия снизу не получает развития, а в 2020–2022 гг. в интервале температур этого тренда образуется рассеянная совокупность точек нейтрального тренда 4.

На диаграмме А4 – Na/Li (рис. 10а) получается дополнительная информация об участке сжатия ст. 27. Этот участок наблюдается в 2012–2015 гг. при значениях А4 около 0.7–0.8. Над ним определяются сопряженные тренды 1–1 и 1–2, на его уровне обозначаются направленные к нему тренды 1–3 и 1–4. Кроме того, получается дополнительная информация о предсейсмической и сейсмической гидрогеодинамике. Отчетливо обозначается предсейсмический тренд 3 (2019–2020 гг.) повышения А4 (раскрытия микротрещин) с возрастанием температуры от гидрогеодинамического центра ($T(\text{Na/Li}) = 24\text{ }^\circ\text{C}$) до 36 $^\circ\text{C}$. Процессы раскрытия микротрещин получают развитие до $T(\text{Na/Li}) = 88\text{ }^\circ\text{C}$ в виде косейсмического тренда 4–2 (2020–2022 гг.) одновременно с нейтральным трендом 4–1.

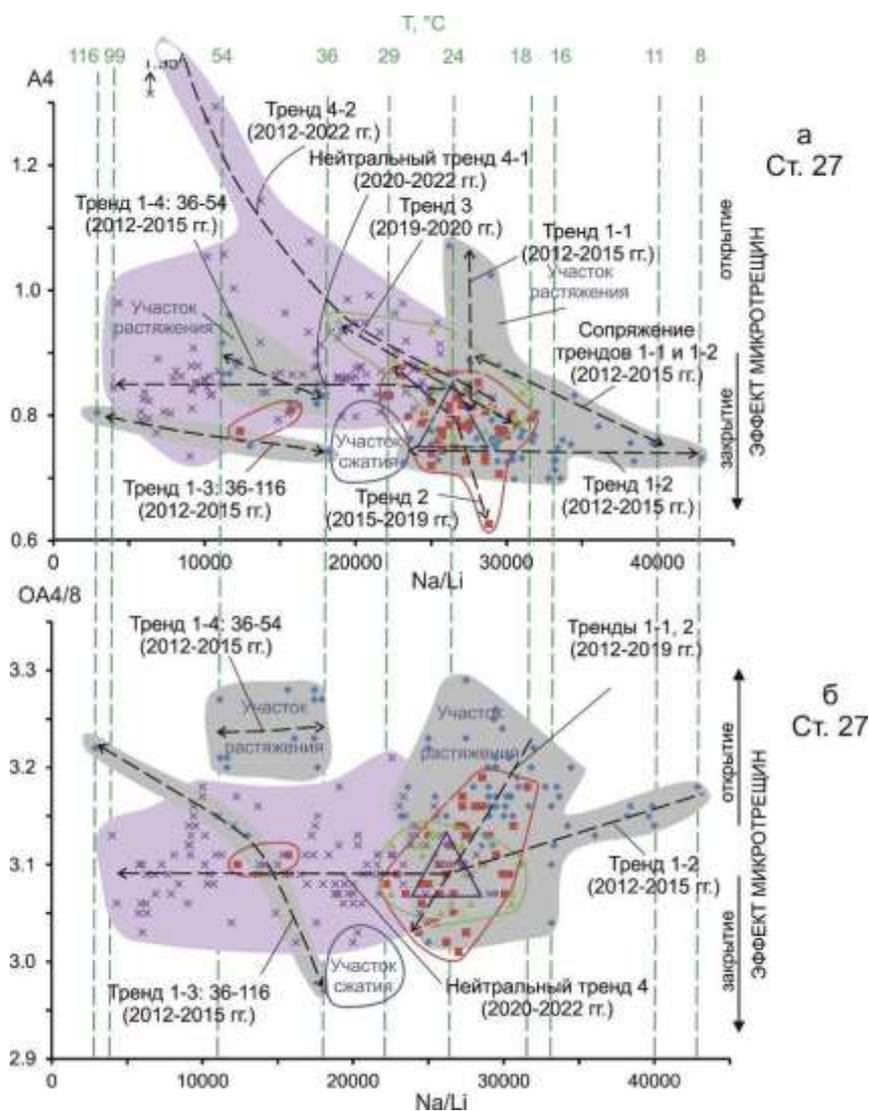


Рис. 10. Разновременные тренды подземных вод ст. 27 на диаграммах A4 – Na/Li (а) и OA4/8 – Na/Li (б). Условные обозначения см. рис. 4. Главный гидрогеодинамический центр генерации подземных вод обозначается при $T(\text{Na/Li}) = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$, при температуре более низкой, чем температура участка сжатия, проявляющегося в интервале $T(\text{Na/Li}) = 28\text{--}36\text{ }^{\circ}\text{C}$ (объяснения в тексте).

Fig. 10. Different time trends of groundwaters from st. 27 in the A4 (activity ^{234}U) vs Na/Li (a) and AR4/8 (activity ratios $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) vs Na/Li (б) diagrams. Symbols are as in Fig. 4. The main hydrogeodynamic center of groundwater generation is indicated at the $T(\text{Na/Li})$ value of about $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, at a temperature lower than the temperature of the compression section, which is displayed in the $T(\text{Na/Li})$ range of $28\text{--}36\text{ }^{\circ}\text{C}$ (explanations in the text).

Станции 40, 8 и 184
($T(\text{Na/Li}) = 50\text{--}125\text{ }^{\circ}\text{C}$)

На диаграммах вариаций A4 и OA4/8 относительно температуры (рис. 11а, б) для подземных вод ст. 40 устанавливается предельно низкое значение A4 (около 0.5) в начале мониторинга, с 12 апреля до 13 июня 2013 г. Такое низкое значение A4 сохраняется в течение 2013–2015 гг., а также в течение

2015–2020 гг. В 2020–2022 гг., во время Байкало-Хубсугульской активизации, образуется дугообразный тренд возрастания A4 с повышением температуры. Параметр A4 ст. 40 свидетельствует об отсутствии в течение всего этого времени фактора дополнительного растяжения и о его проявлении только во время Байкало-Хубсугульской активизации.

Параметр ОА4/8 ст. 40 дает дополнительную информацию. В начале мониторинга (с 12 апреля до 13 июня 2013 г.) в нижнем сателлитном участке определяется снижение ОА4/8 (от 2.43 до 2.34) с уменьшением температуры в резервуаре (от 80 до 73 °С). При повышенных значениях температуры микротрещины раскрываются, при пониженных – закрываются. В 2013–2015 гг. в гидрогеодинамическом ядре и верхнем сателлитном участке определяются широкие интервалы значений ОА4/8 (2.14–2.45) (фрагменты тренда 1). Микротрещины, заполненные циркулирующими подземными водами, испытывают пульсационное закрытие и раскрытие. Во временном интервале 2015–2019 гг. в гидрогеодинамическом ядре по-прежнему пульсирует закрытие и раскрытие микротрещин со слабым перераспределением усилий в сторону их открытия (тренд 2). Во временном интервале 2020–2022 гг. тренд 4 протягивается параллельно оси абс-

цисс. В движение вовлекаются подземные воды от гидрогеодинамического ядра до $T(\text{Na/Li}) = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$.

По представлениям П.И. Чалова (1975), рост ОА4/8 свидетельствует об избыточном поступлении ядер отдачи урана-234 из микротрещин, новообразованных в ходе деформаций. Рост абсолютной концентрации изотопа ^{234}U (А4) может отражать открытие микротрещин, в ходе которого облегчается общий дренаж подземных вод по трещинам (в том числе среднего и крупного размера).

Сопоставление графиков ст. 27 и 40 показывает их сходство и различие. Сходство заключается в проявлении на обеих станциях признаков пульсаций закрытия и раскрытия микротрещин по вариациям ОА4/8, различие – в проявлении подобных признаков закрытия и раскрытия микротрещин по вариациям А4 только на ст. 27 и их отсутствие (проявление нейтрального режима) на ст. 40.

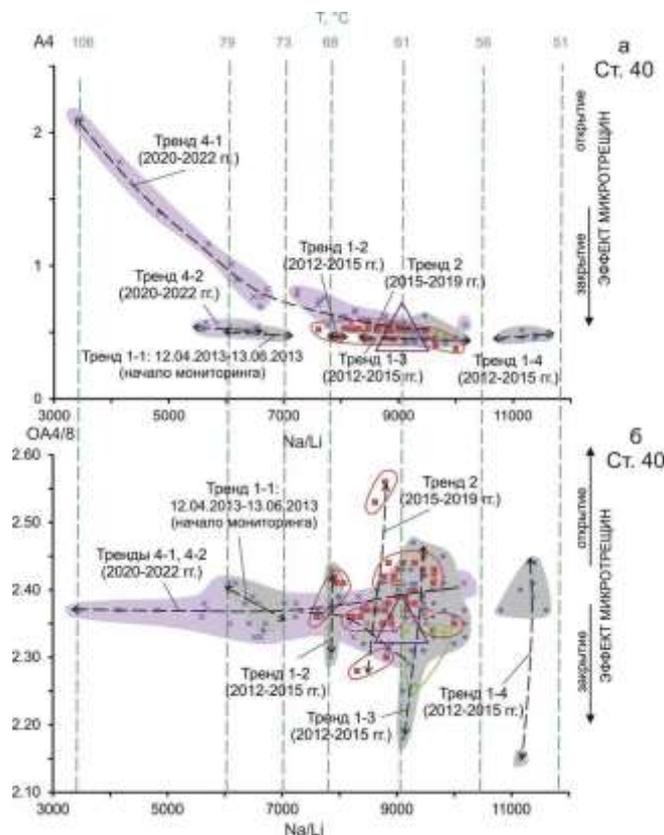


Рис. 11. Разновременные тренды подземных вод ст. 40 на диаграммах А4 – Na/Li (а) и ОА4/8 – Na/Li (б). Условные обозначения см. рис. 4.

Fig. 11. Different time trends of groundwaters from st. 40 in the A4 vs Na/Li (a) and AR4/8 vs Na/Li (б) diagrams. Symbols are as in Fig. 4.

На диаграмме OA4/8 – Na/Li все фигуративные поля подземных вод ст. 8 вытягиваются субпараллельно оси абсцисс (рис. 12а). По этому параметру компоненты с высокими и низкими температурами не различаются между собой. Подземные воды временного интервала 2012–2019 гг. с высокими значениями температуры (70–85 °С, одиночная проба 105 °С) сменяются подземными водами с пониженными значениями температур (62–80 °С) при частичном перекрытии во временном интервале 2019–2022 гг.

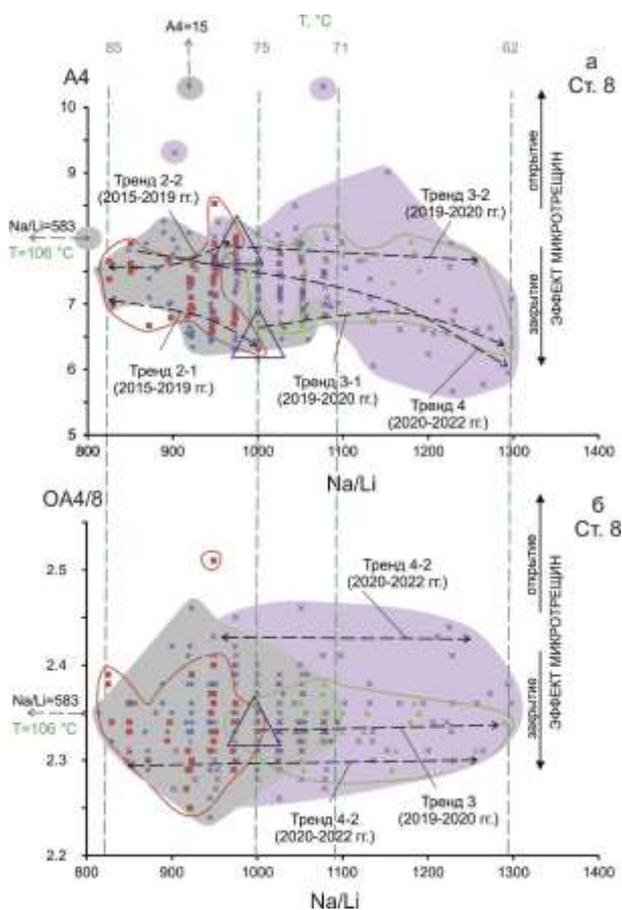


Рис. 12. Разновременные тренды подземных вод ст. 8 на диаграммах A4 – Na/Li (а) и OA4/8 – Na/Li (б). Условные обозначения см. рис. 4.

На ст. 184 воспроизводится финальная (2019–2022 гг.) часть мониторинга. На диаграмме OA4/8 – Na/Li (рис. 13б) наблюдаются тренды 4–4 и 4–3 (2020–2022 гг.), сходящиеся между собой при T(Na/Li) = 100–102 °С и переходящие в тренд 4–2 снижения OA4/8. От T(Na/Li) = 100–102 °С начинается нейтральный тренд 4–1 (2020–2022 гг.) простирающийся до T(Na/Li) = 77 °С.

На диаграмме A4 – Na/Li (рис. 12б) на ст. 8 выявляется особая роль области перекрытия фигуративных полей разновременных подземных вод. В 2012–2019 гг. значения A4 подземных вод находятся в интервале от 5 до 8. Сгущением точек по ординате A4 намечается два гидрогеодинамических центра. Значения отношения Na/Li подземных вод в 2012–2015 гг. соответствуют интервалу температур (71–85 °С, для одной пробы получается температура 106 °С). В переходном интервале 2015–2019 гг. температура резервуара под ст. 8 сокращается до интервала 75–85 °С. В следующем за ним переходном (предсейсмическом) интервале 2019–2020 гг. сокращенный участок T(Na/Li) = 70–75 °С активизируется с образованием трендов 3–1 и 3–2 (соответственно, A4 около 5 и 8 с понижением температуры до 62 °С). Тренд 4 (2020–2022 гг.) наследует изменения, произошедшие в 2019–2020 гг., и обозначает протяженный тренд, субпараллельный оси абсцисс при широком диапазоне значений A4.

В приведенной последовательности изменений A4 и температуры подземных вод отчетливо проявляется активность на нижнем пределе T(Na/Li). В переходном интервале 2015–2019 гг. температура сокращается, но затем, в 2019–2020 гг., сокращенная часть восстанавливается и расширяется в область пониженных температур. Этот интервал активен в 2020–2022 гг.

Рис. 12. Разновременные тренды подземных вод ст. 8 на диаграммах A4 – Na/Li (а) и OA4/8 – Na/Li (б). Условные обозначения см. рис. 4.

Fig. 12. Different time trends of groundwaters from st. 8 in the A4 vs Na/Li (a) and AR4/8 vs Na/Li (б) diagrams. Symbols are as in Fig. 4.

На диаграмме A4 – Na/Li (рис. 13а) тренд 4, имеющий нейтральный статус при T(Na/Li) = 78–95 °С, при высоких температурах изгибается и снижается, отражая закрытие микротрещин подобно трендам на диаграмме OA4/8 – Na/Li. Между тем, на диаграмме A4 – Na/Li выявляются две ветви возрастания A4 (открытия микротрещин). Одна соответствует T(Na/Li) = 85–90 °С (условиям над гидрогеодинамическим цен-

тром тренда 3 (2019–2020 гг.), другая – $T(\text{Na/Li}) = 102\text{--}122\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условиям пониженной температуры относительно области сжатия сходящихся трендов). Фактически, кроме гидрогеодинамического центра, обозна-

чающегося в 2019–2020 гг. при $T(\text{Na/Li}) = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, наблюдается еще один гидрогеодинамический центр, зарождающийся при $T(\text{Na/Li}) = 100\text{--}102\text{ }^{\circ}\text{C}$.

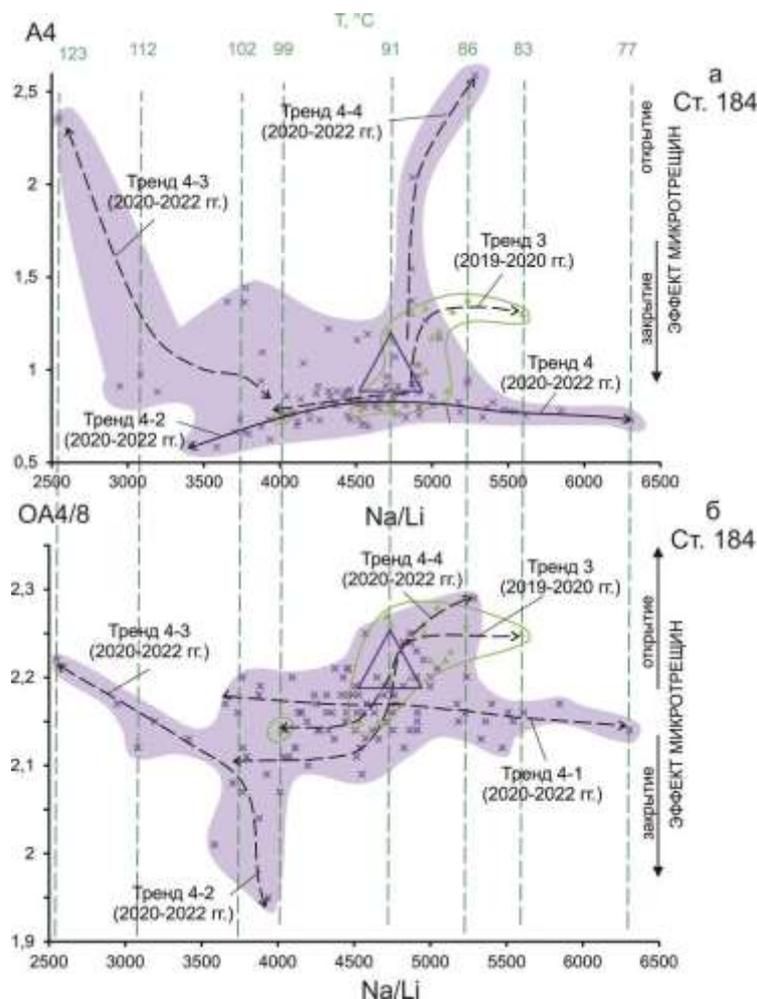


Рис. 13. Разновременные тренды подземных вод ст. 184 на диаграммах A4 – Na/Li (а) и OA4/8 – Na/Li (б). Условные обозначения см. рис. 4.

Fig. 13. Different time trends of groundwaters from st. 184 in the A4 vs Na/Li (a) and AR4/8 vs Na/Li (б) diagrams. Symbols are as in Fig. 4.

Станция 9 ($T(\text{Na/Li}) = 30\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$)

На диаграмме OA4/8 – Na/Li (рис. 14б) все разновременные фигуративные поля ст. 9 вытягиваются субпараллельно оси абсцисс. Подобные тренды наблюдаются на диаграмме A4 – Na/Li (рис. 14а). Однако большинство точек подземных вод 2020–2022 гг. на этой диаграмме образует тренд 4, протягивающийся от общего компонента с температурой $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ с возрастанием температуры (до $47\text{ }^{\circ}\text{C}$) и A4. Тренд повышения A4 в

2020–2022 гг. указывает на процессы растяжения при росте температур. Рост A4 при слабо меняющемся OA4/8 означает увеличение концентрации урана с тем же изотопным составом. Возможно, здесь проявляется эффект увеличения пористости среды (раскрытия средних и крупных трещин) при растяжении. В этих условиях осуществляется более эффективный вынос урана при его экстракции из микротрещин в воду.

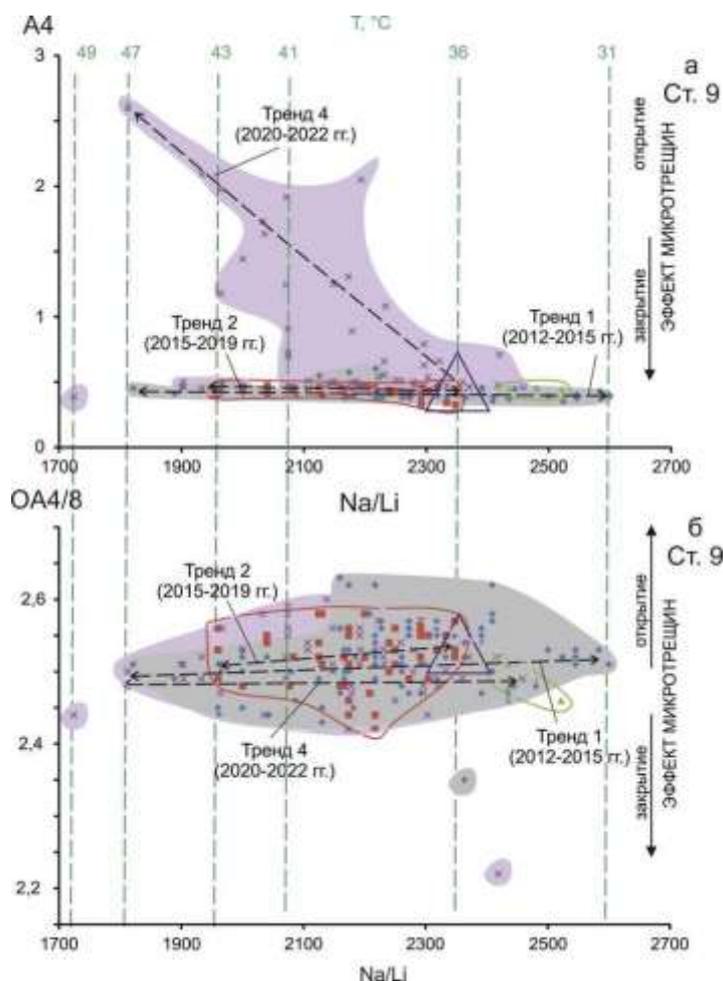


Рис. 14. Разновременные тренды подземных вод ст. 9 на диаграммах A4 – Na/Li (а) и OA4/8 – Na/Li (б). Условные обозначения см. рис. 4.

Fig. 14. Different time trends of groundwaters from st. 9 in the A4 vs Na/Li (a) and AR4/8 vs Na/Li (б) diagrams. Symbols are as in Fig. 4.

Станция 14к ($T(\text{Na/Li}) = 15\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$)

На диаграммах изотопов U тренды ст. 14к имеют ветвящийся характер. В 2012–2015 гг. на диаграммах A4 – Na/Li и OA4/8 – Na/Li (рис. 15) выявляется противоположная направленность трендов. На первой диаграмме максимальный эффект закрытия микротрещин (низкое значение A4) устанавливается при $T(\text{Na/Li}) = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ и максимальный эффект их раскрытия (повышенное значение A4) при $T(\text{Na/Li}) = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$. На второй диаграмме максимальный эффект закрытия микротрещин (низкое значение A4) устанавливается при $T(\text{Na/Li}) = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ и максимальный эффект их раскрытия (повышенное значение A4) – при промежуточном $T(\text{Na/Li}) = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ и максимальном $T(\text{Na/Li}) = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$. На

первой диаграмме протягивается магистральный тренд снижения эффекта раскрытия микротрещин от $T(\text{Na/Li}) = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $T(\text{Na/Li}) = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$, на второй – противоположный магистральный тренд. Объяснение этого феномена на уровне низких и средних температур резервуара требует дополнительного анализа данных. Возможно, что гидрогеохимическая зависимость изотопов U от раскрытия–закрытия микротрещин усложняется влиянием сезонных вариаций.

Подобно другим станциям полигона, ст. 14к показывает разный характер фигуративных полей четырех обозначенных временных интервалов. После охарактеризованного интервала 2012–2015 гг. нижняя предельная температура подземных вод уменьшается в 2015–2019 гг. до $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в 2019–2020 гг. не-

сколько возрастает (до 24 °С). Одновременно поступают отдельные порции подземных вод с максимальным значением температуры около 51 °С. На диаграмме А4 – Na/Li отчетливо воспроизводится соотношение временного интервала 2012–2015 гг.: максимальная температура – закрытые микротрещины, минимальная температура – открытые микротрещины. По основным совокупностям фигуративных точек определяется гидрогеодинамическое ядро подземных вод ст. 14к при значениях $T(\text{Na/Li}) = 25\text{--}30$ °С и по схождению трендов – гидрогеодинамический центр в основании этого интервала, при $T(\text{Na/Li}) = 30$ °С.

С наступлением землетрясений Байкало-Хубсугульской активизации наблюдается

расширение сплошных фигуративных полей подземных вод на обеих диаграммах со смещением точек до минимальных значений $T(\text{Na/Li}) = 15$ °С и максимальных значений $T(\text{Na/Li}) = 40$ °С. Многочисленные точки концентрируются при низких температурах от 15 до 25 °С. На диаграмме А4 – Na/Li ярко проявляются тренды возрастания А4, свидетельствующие о раскрытии микротрещин, проявленном в основном в более низких температурах относительно температуры геодинамического центра. Небольшая совокупность точек образует тренд от геодинамического центра с возрастанием температуры от 30 до 40 °С с нейтральным состоянием микротрещин.

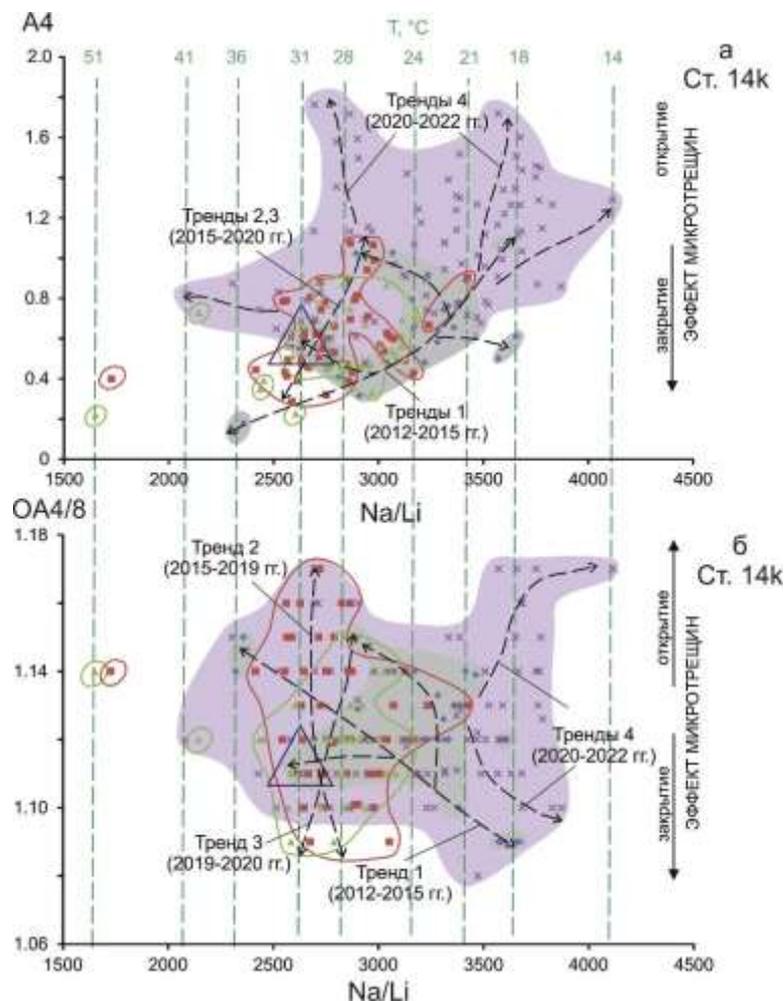


Рис. 15. Разновременные тренды подземных вод ст. 14к на диаграммах А4 – Na/Li (а) и OA4/8 – Na/Li (б). Условные обозначения см. рис. 4.

Fig. 15. Different time trends of groundwaters from st. 14k in the A4 vs Na/Li (a) and AR4/8 vs Na/Li (б) diagrams. Symbols are as in Fig. 4.

Обсуждение результатов

Вариации $T(\text{Na}/\text{Li})$ подземных вод

Происхождение трендов с низкой и повышенной концентрацией Li объясняется включением фактора температурной зависимости этого элемента в реакции катионного обмена вод с глинами и цеолитами (Fouillac, Michard, 1981; Sanjuan et al., 2014):



Реакция с обогащением подземных вод литием идет, если 1) в области дренажа подземных вод присутствуют глинистые минералы и 2) на глину воздействует протон водорода, т.е. кислотность среды возрастает. Чем кислее среда (ниже pH), тем больше концентрация протона в среде, тем интенсивнее идет реакция ионного обмена (больше выход Li в воду).

В плоскости активного разлома развиваются различные глинистые минералы (Moore, Lockner, 2007; Ikari et al., 2009; Kocserha, Gömze, 2010; Tembe et al., 2010). Мы предполагаем, что Na/Li геотермометр дает температуры подземных вод, создающиеся в плоскости активного разлома с синтетектоническим выделением тепла и образованием глинки трения.

По результатам Na/Li геотермометрии подземных вод станции Култукского полигона выстраиваются в ряд низких, средних и высоких температур. По преобладающим подземным водам с взаимным перекрытием фигуративный полей на Na/Li -вариационных диаграммах переходных интервалов 2015–2019 гг. и 2019–2020 гг. для каждой станции определяется $T(\text{Na}/\text{Li})$ гидрогеодинамического ядра и переходного (2015–2020 гг.) гидрогеодинамического центра подземных вод в резервуаре (рис. 16).

В сопоставлении данных, полученных для разных станций полигона, связующую роль играют данные о подземных водах ст. 27, перекрывающие весь диапазон $T(\text{Na}/\text{Li})$ резервуара, от 8 до 115 °С. Переходный гидрогеодинамический центр этой станции определяется на границе низких и средних температур (около 25–30 °С). $T(\text{Na}/\text{Li})$ определение центра согласуется с его $T(\text{Si})$ определением (Чебыкин, Рассказов, 2023).

Исходя из согласованных значений двух геотермометров, можно предположить, что оценка температуры около 25–30 °С гидрогеодинамического центра соответствует региональному геотермическому градиенту коры 25 °С/км (Голубев, 2007). $T(\text{Si})$ гидрогеодинамического центра характеризует подземные воды, поднявшиеся с глубины 1.2 км без разбавления слабо минерализованными водами, а $T(\text{Na}/\text{Li})$ компонента гидрогеодинамического центра обозначает неактивное состояние плоскости разлома, на нарушенное дополнительной генерацией тепла при трении.

С течением времени на ст. 27 существенно варьируются А4 и ОА4/8, свидетельствующие о проявлении движений в плоскости разлома, сопровождающихся закрытием и открытием микротрещин. Особенно сильно закрытию и открытию подвержены микротрещины в области переходного гидрогеодинамического центра в 2012–2015 гг. Переходный гидрогеодинамический центр этой станции образуется на границе участков закрытых микротрещин и вышележащего участка открытых микротрещин. После перестроечного интервала 2015–2019 гг. преобладает открытие микротрещин при высоких температурах (75–105 °С).

Переходные гидрогеодинамические центры подземных вод средних и низких $T(\text{Na}/\text{Li})$ (15–50 °С) образуются при $T(\text{Na}/\text{Li}) = 38$ °С (ст. 9) и 28 °С (ст. 14к). По сравнительно низкой температуре переходных гидрогеодинамических центров эти станции подобны ст. 27. На самом деле, они существенно отличаются от этой станции, прежде всего, по отсутствию высоких значений $T(\text{Na}/\text{Li})$. На ст. 9 U-изотопных признаков закрывающихся микротрещин не выявляется при общей преобладающей тенденции их открытия в 2020–2022 гг. На ст. 14к участок закрытых микротрещин выявляется в резервуаре подземных вод при $T(\text{Na}/\text{Li}) = 35$ °С. После перестроечного интервала 2015–2020 гг., микротрещины под этой станцией открываются, также как под ст. 9, что, впрочем, свойственно и открытию микротрещин под ст. 27.

На станциях подземных вод высоких температур (50–116 °С) переходные гидрогео-

динамические центры обозначаются значениями $T(\text{Na/Li}) = 60\text{ }^\circ\text{C}$ (ст. 40), $75\text{ }^\circ\text{C}$ (ст. 8) и $88\text{ }^\circ\text{C}$ (ст. 184). Эти станции находятся вместе со ст. 27 на Култукской тектонической ступени. Характер распределения открытых и закрытых микротрещин ст. 40 в какой-то мере подобен характеру распределения открытых и закрытых микротрещин ст. 27, но с трансляцией переходного гидрогеодинамического центра и пространственно связанных с ним участков закрытых микротрещин в область более высоких температур. Под этими станциями плоскость активного разлома разогрета сильнее, чем под ст. 27. После перестроечного интервала 2015–2020 гг. в частях резервуара с высокой $T(\text{Na/Li})$ под станциями 40 и 184 преобладает тенденция открытия микротрещин. Такая же тенденция проявляется и под ст. 8 при переходе

от интервала 2012–2015 гг. к интервалу 2020–2022 гг., но без признаков закрытых микротрещин в 2012–2015 гг. и с выходом на пониженные температуры в 2020–2022 гг.

Ст. 184 показывает финальную (2019–2022 гг.) часть мониторинга, в которой наблюдаются явные отличия от других станций подземных вод высоких температур в дифференцированном по этому параметру распределении участков закрытых и открытых микротрещин. Эта единственная станция обнаруживает эффект закрытия микротрещин при значительных температурах (100–112 °C). Микротрещины открываются в финале не только при максимальных значениях $T(\text{Na/Li})$ резервуара (112–122 °C), но и на уровне $T(\text{Na/Li})$ переходного гидрогеодинамического центра (85–90 °C).

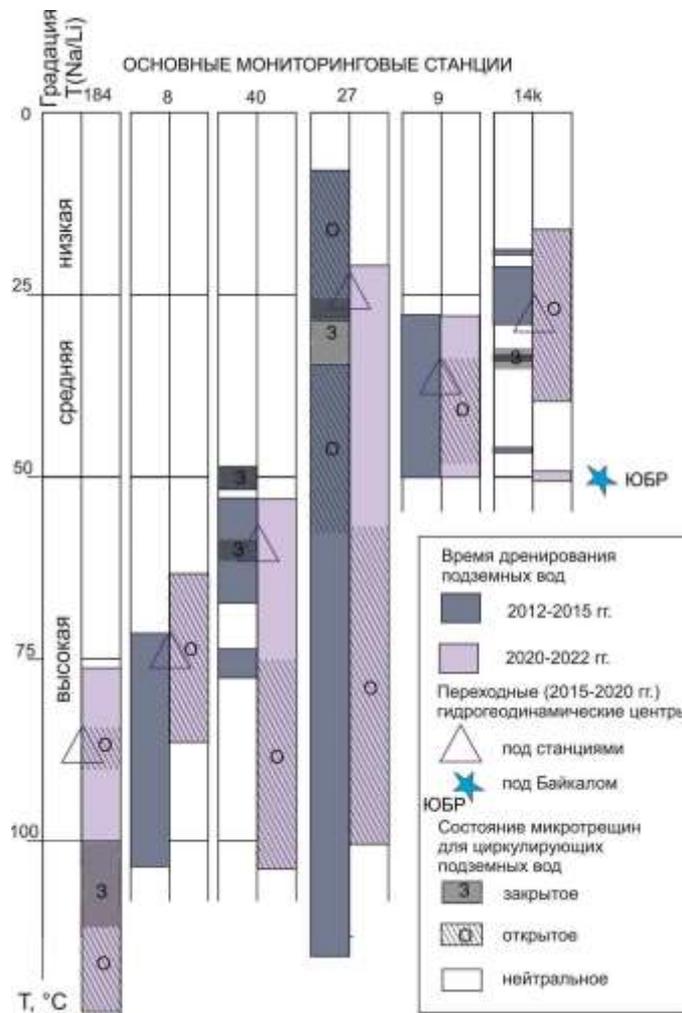


Рис. 16. Схема соотношений $T(\text{Na/Li})$ подземных вод и открытия–закрытия микротрещин на основных мониторинговых станциях Култукского полигона (объяснения в тексте).

Fig. 16. Scheme of relationships between T(Na/Li) groundwater and opening–closing of microcracks in the main monitoring stations of the Kultuk polygon (explanations in the text).

Тренды подземных вод из милонитов и новообразованных разломов в кристаллических породах

На диаграмме T(Na/Li) – Li (рис. 17) для подземных вод основных и вспомогательных станций полигона получаются три тренда фигуративных точек. Один из них имеет компактное выражение и характеризуется в целом пониженной концентрацией Li. Линия тренда протягивается от точки с концентрацией Li = ~0.2 мкг/дм³ при температуре 8 °С до точки с концентрацией Li = ~2 мкг/дм³ при температуре 123 °С. Тренд перекрывает

диапазон температур 8–122 °С. Его составляют подземные воды ст. 27, 40 и 184. Вторым трендом образуются рассеянными совокупностями точек станций 14к, 29, 9 и 8. Он отличается повышенной концентрацией Li (1–2 мкг/дм³) при низкой температуре, возрастающей до интервала 3–4 мкг/дм³ при температуре до 87 °С. Третий тренд находится между первым и вторым трендами и образуется фигуративными точками станций 38, 11, 143 и 66. В этот тренд вписывается компонент ЮБР.

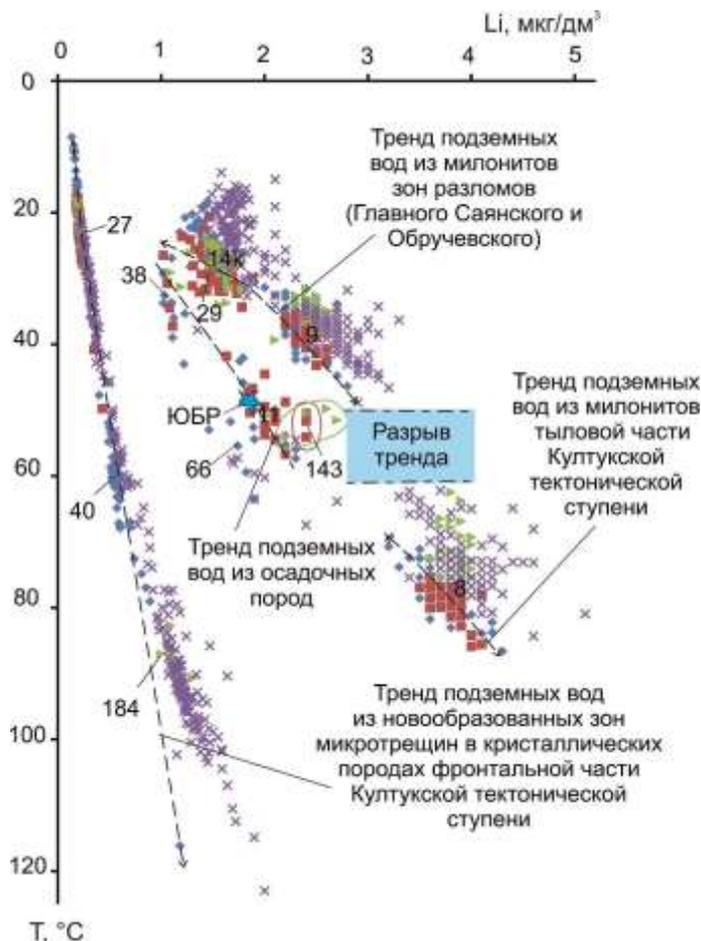


Рис. 17. Тренды подземных вод Култукского резервуара на диаграмме T(Na/Li) – Li. Условные обозначения см. на рис. 4. Штриховыми линиями обозначены тренды станций подземных вод временного интервала 2012–2015 гг. Точки подземных вод временного интервала 2020–2022 гг. смещаются на всех станциях относительно трендов 2012–2015 гг. с возрастанием Li. ЮБР содержит 3.2 мг/дм³ Na и 1.8–1.9 мкг/дм³ Li, что соответствует гидрогеодинамическому центру с T(Na/Li) = 47–49 °С (расчет по уравнению с низким содержанием Cl) или с T(Na/Li) = 144–147 °С (расчет по уравнению с высоким содержанием Cl). Последняя оценка маловероятна.

Fig. 17. Groundwater trends in the Kultuk reservoir on the T(Na/Li) vs Li diagram. Symbols are as in Fig. 4. Dashed lines indicate trends of groundwater stations in the time interval 2012–2015. In the time interval 2020–2022 groundwater points of all stations are shifted relative to the trends of 2012–2015 with Li enrichment. ЮБР – South Baikal Reservoir of deep waters from Lake Baikal – contains 3.2 mg/dm³ Na and 1.8–1.9 µg/dm³ Li that correspond to a hydrogeodynamic center with a source temperature of 47–49 °C (calculated using the low Cl equation) or with a source temperature of 144–147 °C (calculated using high Cl equation). The latter estimate is unlikely.

Тренды подземных вод стартуют при низкой температуре от низкотемпературных составов. Глинистые минералы, участвующие в реакции обмена литием с подземными водами при повышенных температурах, образуются в активных разломах при тектоническом истирании пород в милониты. Мониторинговые станции Култукского полигона, показывающие обогащение подземных вод литием, дренируют милонитизированные участки зоны сочленения активных разломов: Главного Саянского и Обручевского. Участки сейсмогенных деформаций распределяются неравномерно и имеют разные интервалы температур. Высокие значения T(Na/Li) подземных вод из милонитов (60–88 °C) устанавливаются под ст. 8, средние (25–40 °C) – под ст. 9 и средние-низкие (15–38 °C) – под ст. 14к и 29.

Ст. 27, 40 и 184 низкотемпературных подземных вод дренируют активные разломы в кристаллических породах. Низкий Li подземных вод в участках дренажа не предполагает существенного развития глинистых минералов, особенно при средних и низких T(Na/Li). Однако с возрастанием T(Na/Li) в этих разломах роль новообразованных глинистых минеральных фаз (глинки трения) последовательно возрастает, поэтому подземные воды постепенно обогащаются Li.

Тренды с низкой и повышенной концентрацией Li не являются случайными, а имеют конкретную связь с активными разломами. Три станции низко-Li тренда подземных вод (27, 40 и 184) располагаются на торцовой Култукской тектонической ступени Южно-Байкальской впадины. Западнее этой группы, в тыловой части ступени, находится ст. 8, характеризующаяся максимальным обогащением литием при повышенной температуре (60–87 °C). Другие станции подземных вод, имеющие повышенную концентрацию Li (ст. 9, 29, 38, 66 и 143), распределяются в краевых разломах Южно-Байкальской впадины (Обручевском и Юго-

Западном Бортовом). Ст. 14к также имеет повышенную концентрацию Li, но при низкой температуре. Она находится на палеосейсмодислокации Главного Саянского разлома.

В подземных водах из малоглубинных скважин (60–120 м) сохраняются их глубинные Na/Li характеристики, полученные при повышенных температурах. Реакция катионного обмена вод с глинами обеспечивается, по-видимому, только при температуре более 8 °C (см. рис. 4). Подземные воды на выходе имеют в основном температуру 2–5 °C, при которой катионный обмен Li с глинистыми минералами не эффективен.

Вхождение компонента ЮБР в Култукский резервуар подземных вод

Судя по изотопной систематике U и Sr, подземные воды Култукского полигона генетически связаны с глубинной водой ЮБР. Подземные воды полигона относятся к шовной зоне Сибирского палеоконтинента, в которой породы тектонически перемешаны и гомогенизированы. Составы подземных вод полигона описываются моделью смешения изотопных отношений компонентов NE (nonequilibrium U) и E (equilibrium U), соответственно, с составами: OA4/8=3.17, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.70534 и OA4/8=1.0, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.7205. Компонент NE представлен в низко-Li подземных водах ст. 27. Компонент ЮБР содержит около 10 % конечного компонента NE и характеризуется отношением ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.708629 при концентрации Sr=99 мг/дм³ и значением OA4/8=1.96 при концентрации U=0.45 мкг/дм³ (Рассказов и др., 2020; Rasskazov et al., 2020). Гипотеза генетической связи подземных вод Култукского резервуара с резервуаром ЮБР находит дополнительное подтверждение и конкретное выражение в Na/Li отношении.

Хотя байкальская вода слабо минерализована (ее общая минерализация составляет около 100 мг/дм³), концентрации Na и Li в

ней сопоставимы с концентрациями этих элементов в подземных водах станций Култукского полигона. Следовательно, по аналогии с подземными водами, можно предположить, что отношение Na/Li ЮБР определяется механизмом циркуляции подземных вод при их взаимодействии с глинистыми минералами.

В гидрогеодинамическом центре циркуляции под Байкалом для глубинной байкальской воды получается оценка температуры 47–49 °С. Температура придонных вод оз. Байкал составляет 3.3–3.5 °С. В условиях низкой температуры в донных отложениях озера находятся залежи газогидратов (Голубев, 1997). В условиях интенсивного обмена вод ЮБР с водами донных отложений озера в глубинном распределении тепла в коре должна учитываться 1-километровая водная линза. Соответственно, по Na/Li температуре, гидрогеодинамический центр водообмена под акваторией фактически может испытывать влияние водной линзы, по сравнению с гидрогеодинамическими центрами под побережьем. С глубиной латеральное искажение температур под озерной впадиной и побережьем должно нивелироваться (Голубев, 2007).

На диаграмме рис. 17 компонент ЮБР смещается относительно средней части тренда подземных вод из милонитов со снижением концентрации Li. В этой части тренда наблюдается разрыв T(Na/Li) в интервале 45–60 °С. Оценка температуры компонента ЮБР сопоставляется с верхним температурным пределом этого разрыва. В то же время, рядом с ЮБР группируются точки составов подземных вод ст. 11, 143 и 66. Первая из них представляет собой воду оз. Байкал, разбавленную потоком подземных вод, просачивающихся в прибрежном фрагменте Обручевского разлома (Рассказов и др., 2015). Вторая станция обозначает родниковую воду из разрыва, протягивающегося из акватории на берег, вкост простирается Обручевского разлома. Не удивительно, что в роднике ст. 143 содержится байкальская вода. Наконец, третья станция расположена на западном окончании Обручевского разлома (местоположение см. на рис. 1).

С учетом распределения Li компонента ЮБР, связанного с разрывом милонитового тренда и установленного тектонического контроля Na/Li трендов, предполагается эффективная роль водоносного горизонта, протягивающегося при $T(\text{Na/Li}) = 45\text{--}60$ °С. (по береговой оценке) из-под Байкала под его побережье вдоль активных прибортовых разломов Южно-Байкальской впадины: Обручевского и Юго-Западного Бортового. Единый температурный горизонт может иметь смысл общей структуры глубинного разогрева вдоль краевых разломов Южно-Байкальской впадины. Между тем, под торцовую Култукскую тектоническую ступень Южно-Байкальской впадины байкальские воды не проникают. Подземные воды ст. 27, 40 и 184 дренируют новообразованные разломы, пересекающие кристаллический фундамент с образованием глинистых фаз при повышенных температурах. Соответственно, часть резервуара подземных вод, дренируемая ст. 8, также не испытывает влияния вод ЮБР, поскольку находится в тылу этой группы станций.

Значение косейсмической химической гидрогеодинамики для оценки сейсмической опасности территории

Данные Na/Li-температурной и U-изотопной систематики подземных вод станций Култукского резервуара, приведенные в настоящей работе, свидетельствуют об их высокой чувствительности к изменениям, происходящим в прибортовых разломах Южно-Байкальской впадины и ее торцовой Култукской тектонической ступени. На Култукском полигоне получают гидрогеохимические отклики на сейсмогенные деформации, которые характеризуются во времени в терминах T(Na/Li) подземных вод верхнего слоя коры. Результаты наблюдений гидрогеохимических изменений, сопровождающих подготовку и реализацию землетрясений, можно в будущем эффективно использовать для выведения на определение времени конкретных сильных сейсмических толчков.

В ходе развития сейсмогеодинамического цикла от Култукской к Байкало-Хубсугульской активизации в прибортовых

разломах нивелируются участки микротрещин, закрытых для циркуляции подземных вод при значениях $T(\text{Na/Li})$ менее $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и усиливается их открытие при значениях $T(\text{Na/Li})$ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и более. Подобным образом усиливается открытие микротрещин в торцовой Култукской тектонической ступени. Нарушение этой тенденции созданием на ст. 184 участка микротрещин, закрытых для циркуляции подземных вод при $T(\text{Na/Li}) = 100\text{--}112\text{ }^{\circ}\text{C}$, свидетельствует о создании новой сейсмогеодинамической обстановки в коре, отличающейся от той, которая существовала после Култукской сейсмической активизации, в 2012–2015 гг.

Очевидно, что в начале 2023 г. сейсмогенные деформации развиваются по новому сценарию, заложенному перестройкой силового поля коры в 2015–2020 гг., которая привела к Байкало-Хубсугульской активизации. После Быстринского землетрясения, произошедшего 22 сентября 2020 г., рождается новый сценарий сейсмогенных деформаций.

Заключение

По результатам изучения временных вариаций ОА4/8 и А4, отражающим пульсации открытия и закрытия микротрещин (сжатия и растяжения в верхнем слое коры) при разных $T(\text{Na/Li})$ Култукского резервуара подземных вод интерпретированы вариации термофильных элементов Na и Li в ходе развития полного сейсмогеодинамического цикла в центральной части Байкальской рифтовой системы. В рядах гидрогеохимических данных 2012–2022 гг. на станциях Култукского полигона получены $T(\text{Na/Li})$ в интервале от 8 до $122\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Выявлены общие гидрогеохимические закономерности процессов, развивающихся в торцовой Култукской тектонической ступени и прибортовых (Обручевском и Юго-Западном Бортовом) активных разломах Южно-Байкальской впадины. Фактически, получена основа для анализа подготовки и реализации каждого сильного землетрясения в центральной части Байкальской рифтовой системы в терминах откликов на них интегрального показателя Na/Li температуры резервуара подземных вод и открытия–

закрытия микротрещин в верхнем слое коры под мониторинговыми станциями.

Для полигона показательно сквозное развитие резервуара подземных вод под ст. 27 в двух временных отрезках. Сначала, в 2012–2019 гг., при $T(\text{Na/Li}) = 30\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$ микротрещины коры испытывают закрытие, локально предотвращающее циркуляцию подземных вод. Одновременно, в условиях низких $T(\text{Na/Li})$ ($8\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$) и средних $T(\text{Na/Li})$ ($35\text{--}55\text{ }^{\circ}\text{C}$), создаются локальные условия раскрытия микротрещин, способствующие проникновению подземных вод. В результате перестройки деформационного поля в 2019 г. участок закрытых микротрещин $T(\text{Na/Li}) = 30\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$ нивелируется. Последующая (предсейсмическая) ситуация 2019–2020 гг. и наступившая Байкало-Хубсугульская сейсмическая активизация 2020–2022 гг. развивается в режиме раскрытия микротрещин от низких $T(\text{Na/Li})$ (около $20\text{ }^{\circ}\text{C}$) до высоких ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$) на глубинном уровне около 1 км.

Приведенные построения взаимосвязанных гидрогеохимических мониторинговых данных и сейсмичности формулируются как оформляющееся направление геодинамики – «косейсмическая химическая гидрогеодинамика». Применение этих подходов свидетельствует о том, что сейсмическая опасность в центральной части Байкальской рифтовой системы не может оцениваться категориями событий, происходивших до перестройки деформационного поля коры между Муринским землетрясением 6 июля 2020 г. и Быстринским землетрясением 22 сентября 2020 г., но может осуществляться на основе получения новых мониторинговых данных и расшифровки косейсмической химической гидрогеодинамики по ходу продолжающейся Байкало-Хубсугульской активизации.

Благодарности

Состав воды анализировался на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500se в ЦКП «Ультрамикродиагностика» (ЛИН СО РАН, г. Иркутск). Методические подходы к анализу подземных вод частично разработаны в рамках тем Минобрнауки № 0279-2021-0008 (121032300186-9) и FWEF-2021-0009. 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».

Литература

Голенецкий С.И. Проблемы изучения сейсмичности Байкальского рифта / Геодинамика внутриконтинентальных горных областей. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. С. 228–235.

Голубев В.А. Геотермический прогноз глубин нижней границы газогидратного слоя в донных отложениях озера Байкал // Докл. РАН. 1997. Т. 352, 5. С. 652–655.

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

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

Карта эпицентров землетрясений. Иркутск: Байкальский филиал Федерального исследовательского центра Единая геофизическая служба РАН, 2023. <http://www.seis-bykl.ru>

Лепокурова О.Е., Трифонов Н.С. Оценка применимости геохимических геотермометров для пластовых вод Томской области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 12. С. 208–218. DOI 10.18799/24131830/2022/12/3878

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А. Разработка Култукского сейсмопрогностического полигона: вариации ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, № 4. С. 519–553.

Рассказов С.В., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Оргильянов А.И., Коваленко С.Н., Семинский А.К., Попов Е.П., Чебыкин Е.П. Гидрогеохимическая зональность изотопов урана ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) на юге Сибирского палеоконтинента: роль резервуара Южного Байкала в формировании подземных вод // Геодинамика и тек-

тонофизика. 2020. Т. 11, № 3. С. 632–650. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496>

Рассказов С.В., Ильясова А.М., Борняков С.А., Снопков С.В., Чувашова И.С., Чебыкин Е.П. Гидрогеохимические отклики подземных вод ст. 184 в 2020–2021 гг. на сейсмогенные деформации Байкало-Хубсугульской активизации // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 4. С. 26–52. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.26

Чалов П.И. Изотопное фракционирование природного урана. Фрунзе: Илим, 1975. 236 с.

Чебыкин Е.П., Рассказов С.В. Сравнительные исследования изменений термофильных компонентов Si и Na/Li в подземных водах ст. 27 Култукского полигона // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 124–140. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.124>

Чебыкин Е.П., Гольдберг Е.Л., Куликова Н.С., Жученко Н.А., Степанова О.Г., Малопевная Ю.А. Метод определения изотопного состава аутигенного урана в донных отложениях озера Байкал // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 6. С. 604–616.

Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Снопков С.В., Рассказов С.В. Сигналы ртути подземных вод Култукского полигона во время подготовки и реализации Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации 2020–2021 гг. // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 1. С. 7–9. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2022.1.7>

Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В. Первые результаты мониторинга $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // Доклады академии наук. 2015. Т. 460, № 4. С. 464–467.

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

Чувашова И.С., Ильясова А.М. Косейсмические вариации Li в подземных водах станции 27 Култукского полигона // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 106–123. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.106>

Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома //

Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 6. С. 936–937.

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

Fouillac, A.-M., Fouillac, Ch., Cesbron, F., Pillard, F., Legendre, O., 1989. Water–rock interaction between basalt and high-salinity fluids in the Asal Rift, Republic of Djibouti. *Chem. Geol.* 76 (3–4), 271–289.

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

Ikari M. J., Saffer D. M., Marone C. Frictional and hydrologic properties of clay-rich fault gouge // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114. P. B05409. doi:10.1029/2008JB006089.

Karingithi C.W. Chemical geothermometers for geothermal exploration // Short course IV on exploration for geothermal resources, organized by UNU-GTP, KenGen and GDC, at Lake Naivasha, Kenya, 2009. P. 1–12.

Kocserha I., Gömze L.A. Friction properties of clay compounds // *Applied Clay Science*. 2010. Vol. 48. P. 425–430.

Li J., Sagoe G., Wang X., Yang Z. Assessing the suitability of lithium-related geothermometers for estimating the temperature of felsic rock reservoirs // *Geothermics*. 2021. V. 89. P. 101950. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101950>

Moore, D. E., Lockner D.A. Friction of the smectite clay montmorillonite: A review and interpretation of data / *The Seismogenic Zone of Subduction Thrust Faults, MARGINS Theor. Exp. Earth Sci. Ser.*, vol. 2, edited by T. H. Dixon and J. C. Moore, Columbia Univ. Press, New York. 2007. P. 317–345.

Rasskazov S., Ilyasova A., Bornyakov S., Chuvashova I., Chebykin E. Responses of a $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio in groundwater to earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia // *Front. Earth Sci.* 2020. V. 14, No. 4. P. 711–737; doi.org/10.1007/s11707-020-0821-5

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Bornyakov S.A., Chuvashova I.S. Change of seismic hazard levels in complete 12-year seismogeodynamic cycle of the South Baikal Basin: Results of hydroisotopic ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) monitoring // *Geology and Environment*. 2022. V. 2, No. 2. P. 7–21. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.7

Sanjuan B., Millot R. Bibliographical review about Na/Li geothermometry and lithium isotopes applied to worldwide geothermal waters. 2009. Report BRGM/RP-57346-FR, 58 p.

Sanjuan B., Millot R., Brach M., Asmundsson R., Giroud N. Use of a new sodium/lithium (Na/Li) geothermometric relationship for high-temperature Dilute geothermal fluids from Iceland // World Geothermal Congress 2010, Apr 2010, Bali, Indonesia. 12 p. hal-00496119 HAL Id: hal-00496119. <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00496119>

Sanjuan B., Millot R., Brach M., Asmundsson R., Giroud N. Use of two new Na/Li geothermometric relationships for geothermal fluids in volcanic environments // *Chemical Geology*. 2014. V. 389. P. 60–81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.09.011>

Tembe S., Lockner D.A., Wong T.-F. Effect of clay content and mineralogy on frictional sliding behavior of simulated gouges: Binary and ternary mixtures of quartz, illite, and montmorillonite // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. P. B03416. doi:10.1029/2009JB006383.

References

Chalov P.I. Isotopic fractionation of natural uranium. Frunze: Ilim, 1975. 236 p. (in Russian)

Chebykin E.P., Rasskazov S.V. Comparative study of coseismic changes in thermophilic components Si, Na, and Li in groundwater station 27 of the Kultuk polygon, Lakr Baikal // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 124–140. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.124> (in Russian)

Chebykin E.P., Goldberg E.L., Kulikova N.S., Zhuchenko N.A., Stepanova O.G., Malopevnaya Yu.A. Method for determining the isotopic composition of authigenic uranium in the bottom sediments of Lake Baikal // *Geology and Geophysics*. 2007. V. 48, No. 6. C. 604–616. (in Russian)

Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Rasskazov S.V. Groundwater mercury signals from the Kultuk polygon during the preparation and implementation of the Baikal-Khubsugul seismic reactivation in 2020–2021. // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 1. P. 7–9. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2022.1.7> (in Russian)

Chebykin E.P., Rasskazov S.V., Vodneva E.N., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V. First results of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ monitoring in waters from active faults on the western coast of Southern Baikal // *Reports of*

the Academy of Sciences. 2015. V. 460, No. 4. S. 464–467. (in Russian)

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

Chuvashova I.S., Ilyasova A.M. Coseismic variations of Li in groundwaters from station 27 of the Kultuk polygon // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 106–123. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.106> (in Russian)

Golenetsky S.I. Problems of studying seismicity of the Baikal rift / *Geodynamics of inland mountain regions*. Novosibirsk: Science Publisher. Siberian branch, 1990. C. 228–235. (in Russian)

Golubev V.A. Geothermal prediction of the depths of the lower boundary of the gas hydrate layer in the bottom sediments of Lake Baikal // *Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*. 1997. V. 352, N 5. P. 652–655. (in Russian)

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

Ilyasova A.M., Snopkov S.V. Coseismic variations of thermophilic element Si in groundwaters from the southwestern coast of Lake Baikal // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 72–105. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.72> (in Russian)

Lepokurova O.E., Trifonov N.S. Evaluation of the applicability of geochemical geothermometers for reservoir waters of the Tomsk region // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. 2022. Vol. 333, No. 12. P. 208–218. DOI 10.18799/24131830/2022/12/3878 (in Russian)

Map of earthquake epicenters. Irkutsk: Baikal Branch of the Federal Research Center Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, 2023. <http://www.seis-bykl.ru> (in Russian)

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Vodneva E.N., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V., Chechelnytsky V.V., Gileva N.A. Development of the Kultuk seismic prognostic polygon: ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variations in groundwater from active faults on the western coast of the Baikal // *Geodynamics and Tectono-*

physics. 2015. Vol. 6, No. 4. P. 519–553. (in Russian)

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Orgilyanov A.I., Kovalenko S.N., Seminsky A.K., Popov E.P., Chebykin E.P. Hydrogeochemical zoning of uranium isotopes ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) in the Southern Siberian paleocontinent: the role of the South Baikal reservoir in the groundwater formation // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2020. Vol. 11, No. 3. P. 632–650. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496> (in Russian)

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Bornyakov S.A., Snopkov S.V., Chuvashova I.S., Chebykin E.P. Hydrogeochemical responses of groundwater st. 184 in 2020-2021 on seismogenic deformations of the Baikal-Khubsugul activation // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 4. P. 26–52. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.26 (in Russian)

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

Fouillac, A.-M., Fouillac, Ch., Cesbron, F., Pillard, F., Legendre, O., 1989. Water–rock interaction between basalt and high-salinity fluids in the Asal Rift, Republic of Djibouti. *Chem. Geol.* 76 (3–4), 271–289.

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

Ikari M. J., Saffer D. M., Marone C. Frictional and hydrologic properties of clay-rich fault gouge // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114. P. B05409. doi:10.1029/2008JB006089.

Karingithi C.W. Chemical geothermometers for geothermal exploration // *Short course IV on exploration for geothermal resources, organized by UNU-GTP, KenGen and GDC, at Lake Naivasha, Kenya, 2009. P. 1–12.*

Kocserha I., Gömze L.A. Friction properties of clay compounds // *Applied Clay Science*. 2010. Vol. 48. P. 425–430.

Li J., Sagoe G., Wang X., Yang Z. Assessing the suitability of lithium-related geothermometers for estimating the temperature of felsic rock reservoirs // *Geothermics*. 2021. V. 89. P. 101950. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101950>

Moore, D. E., Lockner D.A. Friction of the smectite clay montmorillonite: A review and interpretation of data / *The Seismogenic Zone of Sub-*

duction Thrust Faults, MARGINS Theor. Exp. Earth Sci. Ser., vol. 2, edited by T. H. Dixon and J. C. Moore, Columbia Univ. Press, New York. 2007. P. 317–345.

Rasskazov S., Piyasova A., Borneyakov S., Chuvashova I., Chebykin E. Responses of a $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio in groundwater to earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia // *Front. Earth Sci.* 2020. V. 14, No. 4. P. 711–737; doi.org/10.1007/s11707-020-0821-5

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Piyasova A.M., Snopkov S.V., Borneyakov S.A., Chuvashova I.S. Change of seismic hazard levels in complete 12-year seismogeodynamic cycle of the South Baikal Basin: Results of hydroisotopic ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) monitoring // *Geology and Environment.* 2022. V. 2, No. 2. P. 7–21. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.7

Sanjuan B., Millot R. Bibliographical review about Na/Li geothermometry and lithium isotopes applied to worldwide geothermal waters. 2009. Report BRGM/RP-57346-FR, 58 p.

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, Lermontov, str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
664033 Irkutsk, Ulan-Batorskaya str., 3,
Limnological Institute SB RAS,
email: epcheb@yandex.ru.

Sanjuan B., Millot R., Brach M., Asmundsson R., Giroud N. Use of a new sodium/lithium (Na/Li) geothermometric relationship for high-temperature Dilute geothermal fluids from Iceland // *World Geothermal Congress 2010, Apr 2010, Bali, Indonesia.* 12 p. hal-00496119 HAL Id: hal-00496119. <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00496119>

Sanjuan B., Millot R., Brach M., Asmundsson R., Giroud N. Use of two new Na/Li geothermometric relationships for geothermal fluids in volcanic environments // *Chemical Geology.* 2014. V. 389. P. 60–81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.09.011>

Tembe S., Lockner D.A., Wong T.-F. Effect of clay content and mineralogy on frictional sliding behavior of simulated gouges: Binary and ternary mixtures of quartz, illite, and montmorillonite // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. P. B03416. doi:10.1029/2009JB006383.

Чувашова Ирина Сергеевна,
кандидат геолого-минералогических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
старший научный сотрудник,
664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет,
геологический факультет,
доцент,
email: chuvashova@crust.irk.ru.
Chuvashova Irina Sergeevna,
Candidate of Geological and Mineralogical
Sciences,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Senior Researcher,
664003 Irkutsk, Lenin str., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Assistent Professor,
email: chuvashova@crust.irk.ru.

Хубсугульское землетрясение 12 января 2021 г. и афтершоки: электрохимические отклики подземных вод юго-западного побережья Байкала

С.В. Снопков^{1,2}, А.А. Куроленко¹

¹Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

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

Аннотация. 12 января 2021 года произошло сильное землетрясение, эпицентр которого находился в акватории озера Хубсугул (МНР). Особенностью Хубсугульского землетрясения стала продолжительная афтершоковая активность. В период сейсмической активизации в районе Хубсугула проводились детальные измерения электрохимических параметров подземных вод на юго-западном побережье Байкала. Статистический анализ сейсмической активности и изменения электрохимических параметров воды выявил взаимосвязь этих процессов.

Ключевые слова: землетрясение, озеро Хубсугул, озеро Байкал, электрохимический мониторинг, статистический анализ.

The Khubsugul earthquake of January 12, 2021 and its aftershocks: electrochemical responses of groundwaters from southwestern coast of Lake Baikal

S.V. Snopkov^{1,2}, A.A. Kurolenko¹

¹Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. On January 12, 2021, a strong earthquake occurred, the epicenter of which was located in the water area of Lake Khubsugul (Mongolian People's Republic). A feature of the Khubsugul earthquake was the prolonged aftershock activity. The period of seismic reactivation in the Khubsugul area coincided with detailed measurements of electrochemical parameters of groundwaters at the southwestern coast of Lake Baikal. Statistical analysis of seismic activity and changes in the measured groundwater parameters revealed connection between these processes.

Keywords: earthquake, Lake Khubsugul, Lake Baikal, electrochemical monitoring, statistical analysis.

Введение

Сильное Хубсугульское землетрясение, произошедшее 12 января 2021 г., характеризовалось продолжительной афтершоковой активностью. Авторами проведен анализ влияния этой сейсмической активности в районе озера Хубсугул на электрохимические параметры (окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) и pH подземных вод юго-западного побережья Байкала.

Характеристика сейсмической активности

Эпицентр сильного Хубсугульского землетрясения находился в акватории озера Хубсугул (МНР). Землетрясение стало одним из сильнейших сейсмических событий последних десятилетий, и имело магнитуду 6.8 и энергетический класс – 15.7. Интенсивность сотрясений достигала 6 баллов по шкале МСК-64 и ощущалась на территории Иркутской области и республики Бурятия. Почувствовали землетрясение и жители

Красноярского края. Очаг землетрясения располагался на глубине 10 км.

Серия подземных толчков в Монголии, была спровоцирована Быстринским землетрясением, произошедшем в сентябре 2020 года. В результате Быстринского землетрясения активизировался район Центрального Байкала, а затем и район Хубсугула. (Чебыкин и др., 2021).

Особенностью Хубсугульского землетрясения стала продолжительная афтершоковая активность. Количество афтершоков (классом >9) за 80 суток после землетрясения превысило 250. Афтершоковая активность проявилась не только в числе событий, но и в их энергии. Суммарная энергия всех афтершоков составила 15.6 % от энергии главного события. Наибольшее количество афтершоков произошло в первую неделю после основного сейсмического события. За сутки фиксировалось от 9 до 99 афтершоков, достигающих $K = 13.7$, далее в течении 24 дней происходило до 6 событий в сутки (K до 11.5), затем афтершоковый процесс заметно ослабел – не более 2 событий в сутки (K около 10). Исключение составляют произошедшие в этот период два события (K 12.6 и 14.8). Суммарная энергия всех сейсмических событий, произошедших за сутки, в течении месяца оставалась высокой (до 10000 гДж), а

затем резко уменьшилась на 2–3 порядка. Афтершоковая активность Хубсугульского землетрясения проявилась не только в числе событий, но и в энергии. 8 афтершоков имели класс от 12 до 14.8. (Куруленко, Снопков, 2021) (рис. 1).

По данным Байкальского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (<http://seis-bykl.ru>) такая продолжительная афтершоковая активность происходит редко. Например, после Култукского землетрясения (27 августа 2008 г., $M=6.3$) произошло 8 афтершоков (максимальный класс – 13); после Мондинского землетрясения (5 апреля 1950 г., $M=7$) было зарегистрировано 12 убывающих по силе афтершоков. Продолжительная афтершоковая активность наблюдалась после Среднебайкальского землетрясения (29 августа 1959 г., $M=6.8$). Эпицентр основного события находился в акватории озера Байкал. В течение 7 часов после землетрясения было зарегистрировано 104 повторных толчка, общее же число афтершоков за три последующих месяца превысило 700, а до мая 1960 года было зарегистрировано более 1200 толчков. Общая площадь, охваченная сотрясениями, составила около 700 тысяч кв. км.

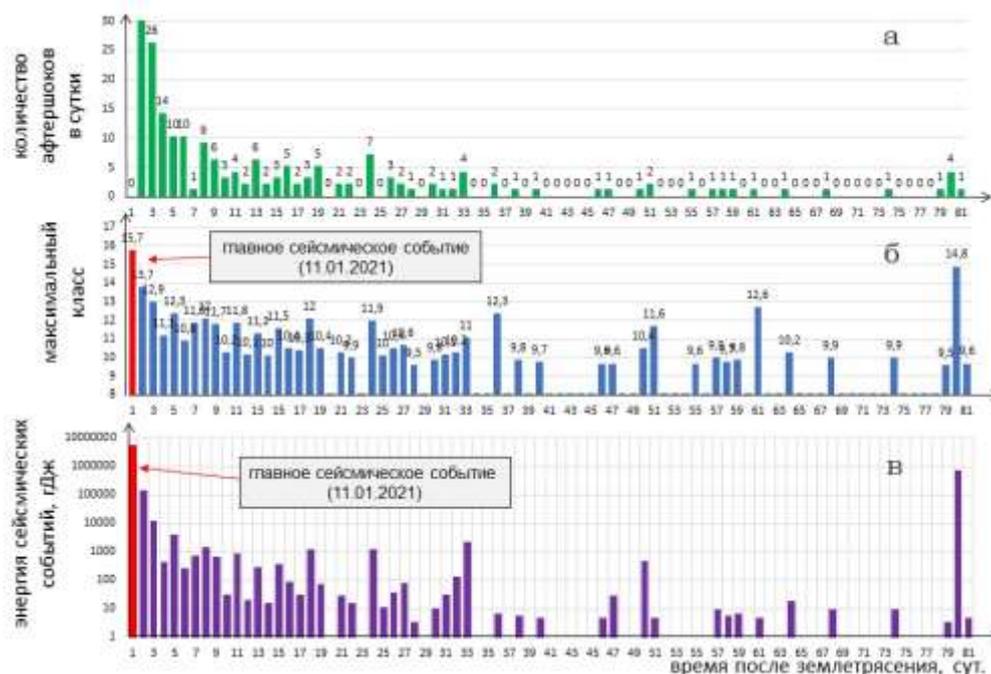


Рис. 1. Сейсмические события на оз. Хубсугул в январе – апреле 2021 г. По абсциссе указаны дни, прошедшие после землетрясения; а – количество афтершоков за сутки; б – максимальный сейсмический класс события за сутки; в – суммарная энергия событий за сутки.

Fig. 1. Seismic events on Lake Khubsugul in January – April, 2021. The abscissa axis indicates days that have passed since the earthquake; *a* is the number of aftershocks per day; *b* is the maximum seismic class of the event per day; *v* is the total energy of events per day.

Методика

Электрохимические измерения подземных вод проводятся при отборе проб гидрогеохимического мониторинга на Култукском полигоне, который находится в зоне сочленения Главного Саянского разлома с Обручевским и Юго-Западным бортовым разломами, ограничивающими западную часть Южно-Байкальской впадины (Чебыкин и др., 2021) Култукский полигон, включающий более 20 станций (водоисточников), начал действовать в 2012 г. Пробы воды отбираются через 3–7 дней. Электрохимические параметры подземных вод – окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), водородный показатель (рН), общая минерализация (TDS), а также температура

(*t*) – измеряются портативными приборами «Нанна» и «Эксперт».

Результаты

На ст. 190 Култукского полигона, в колодце глубиной 8 м, расположенном в 150 м от берега Байкала, с 19 декабря 2020 г. по февраль 2021 г. была проведена серия ежедневных измерений ОВП, рН, TDS и *t* воды для оценки степени их изменчивости. По счастливому стечению обстоятельств, период проведения детальных исследований совпал по времени с Хубсугульским землетрясением и его наиболее сильными афтершоками, что позволило детально проанализировать характер взаимосвязи сейсмических событий и изменения электрохимических параметров воды (рис. 2).

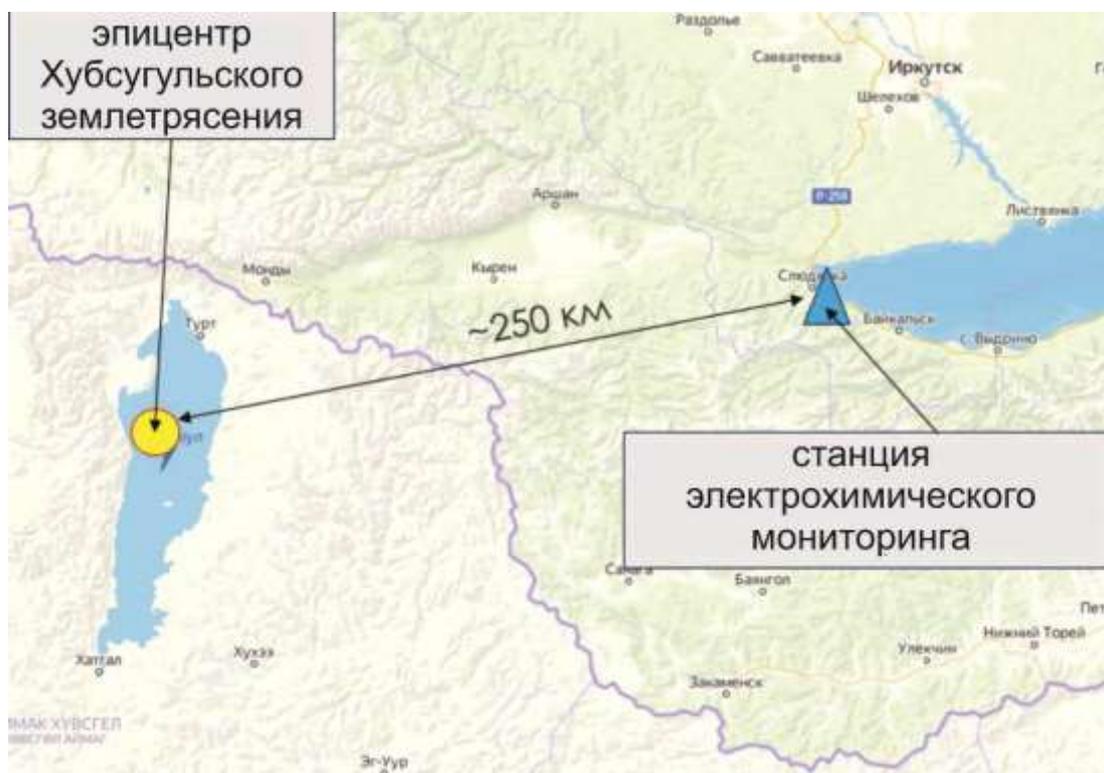


Рис. 2. Схема расположения ст. 190 Култукского полигона относительно эпицентра Хубсугульского землетрясения.

Fig. 2. Scheme of the location of station 190 of the Kultuk polygon relative to the epicenter of the strong Khubsugul earthquake.

Результаты измерений показаны на рис. 3. Изменения электрохимических параметров показаны в сравнении с высвобождающейся

энергией сейсмических событий в районе оз. Хубсугул. Суточная энергия сейсмических событий была рассчитана по данным, взя-

тым с сайта Байкальского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (<http://seis-bykl.ru>).

Используя данные мониторинга параметров ОВП и рН, а также E (десятичный логарифм суточной сейсмической энергии) были выполнены расчеты линейных коэффициентов корреляции (R_{xy}) анализируемых параметров. Расчет статистик выполнялись в программе Excel MS Office.

Коэффициент корреляции ОВП и рН составил 0.36, что свидетельствует о значимой прямой взаимосвязи параметров. Для данной выборки 95 %-ный уровень достоверности корреляционной связи составляет 0.25; 99 %-ный – 0.325. Коэффициент корреляции для E и ОВП, E и рН составил, соответственно, -0.3 и -0.48 . Значимая обратная зависимость параметров указывает на то, что чем выше энергия сейсмических событий, тем сильнее снижались значения ОВП и рН воды.

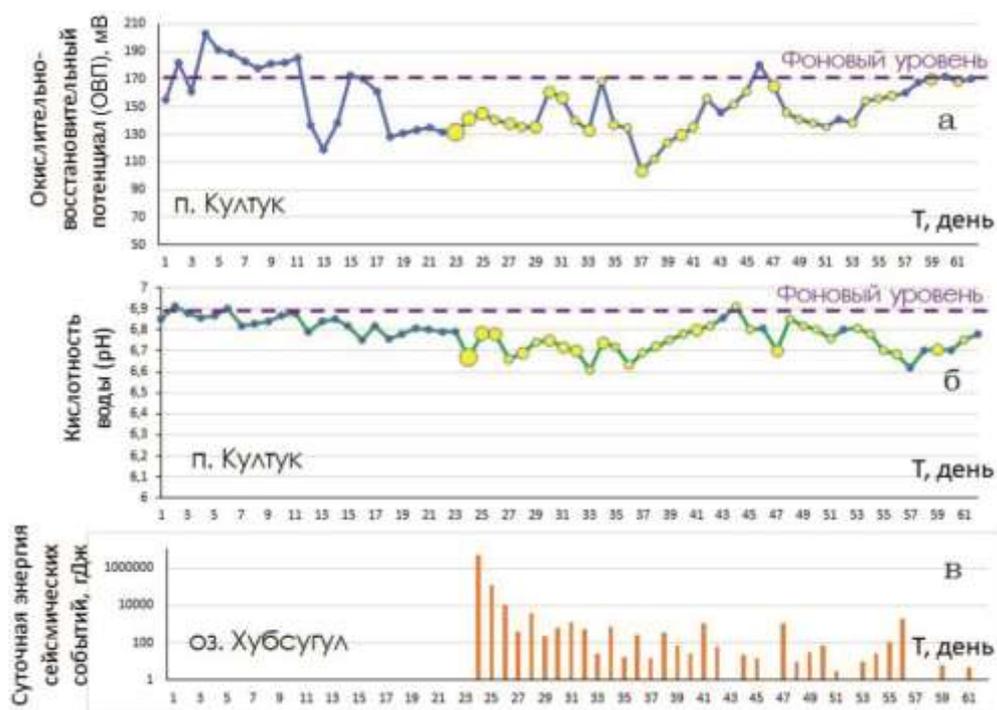


Рис. 3. Графики значений окислительно-восстановительного потенциала (а) и рН (б) воды ст. 190, а также высвободившейся за сутки сейсмической энергии (в). По абсциссе показаны дни с 19 декабря 2020 г. Штриховой фиолетовой линией отмечен фоновый уровень параметров по результатам двух-летних наблюдений; желтыми маркерами выделены сейсмические события $K > 10$ (размер маркера пропорционален классу события).

Fig. 3. Graphs of the redox potential (a) and pH (b) of water from station190, as well as seismic energy released during the day (c). The abscissa shows days since December 19, 2020. The dashed purple line marks the background level of parameters based on results of two-year observations; seismic events $K > 10$ are designated by yellow markers (marker size is proportional to the event class).

Учитывая то, что изменения электрохимических параметров могли происходить не одновременно с сейсмическими событиями, а либо запаздывать, либо, наоборот, предшествовать им, был проведен расчет коэффициентов корреляции параметров при смещении анализируемых параметров во времени относительно друг друга в одну и другую

сторону с шагом 1 день. Методика расчета показана на рисунке 4.

По результатам указанных статистических расчетов были построены графики изменения R_{xy} для пар ОВП– E и рН– E (рис. 5) Характер изменения коэффициентов корреляции при смещении данных во времени показывает, что наиболее значимая корреляционная связь проявляется при смещении гра-

фиков на несколько дней. Причем окислительно-восстановительный потенциал и водородный показатель по-разному реагируют на повышение энергии сейсмических событий: если понижение ОВП предшествует

сейсмическому событию, опережая его на 3–4 дня ($R_{xy} = -0.44$), то pH, наоборот, достигает минимальных значений в тот же день или через 1–3 дня после него ($R_{xy} = -0.44$).

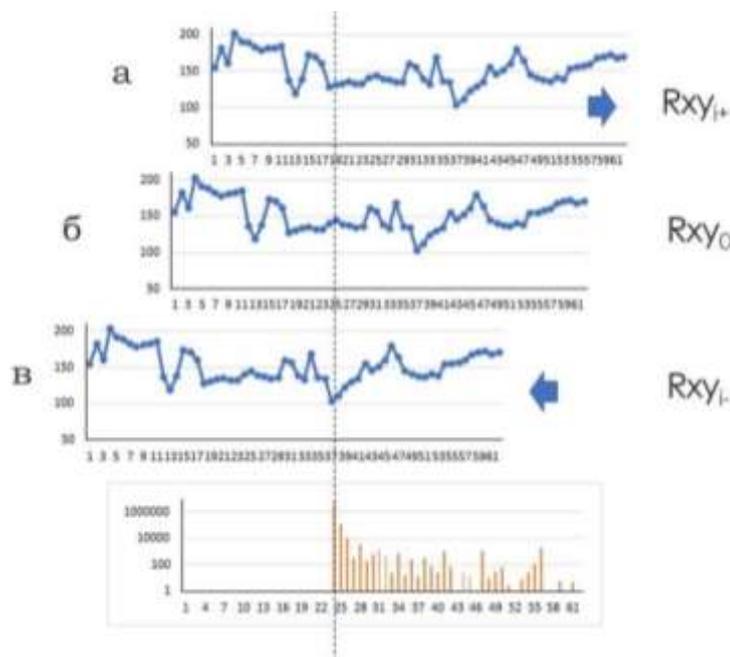


Рис. 4. Методика расчета R_{xy} при проверке гипотезы о возможном предшествовании одних событий другим: а – смещение графика электрохимического параметра в случае предположения о его предшествовании сейсмическому событию; б – без смещения графиков (случай одновременности событий); в – смещение графика электрохимического параметра в случае предположения о его появлении в результате сейсмического события.

Fig. 4. Method for calculating R_{xy} when testing the hypothesis about the possible precedence of some events by others: а – shift of the graph of the electrochemical parameter in case when it precedes a seismic event; б – without graph shift (case of simultaneous events); в – shift of the graph of the electrochemical parameter in the case of its appearance as a result of a seismic event.

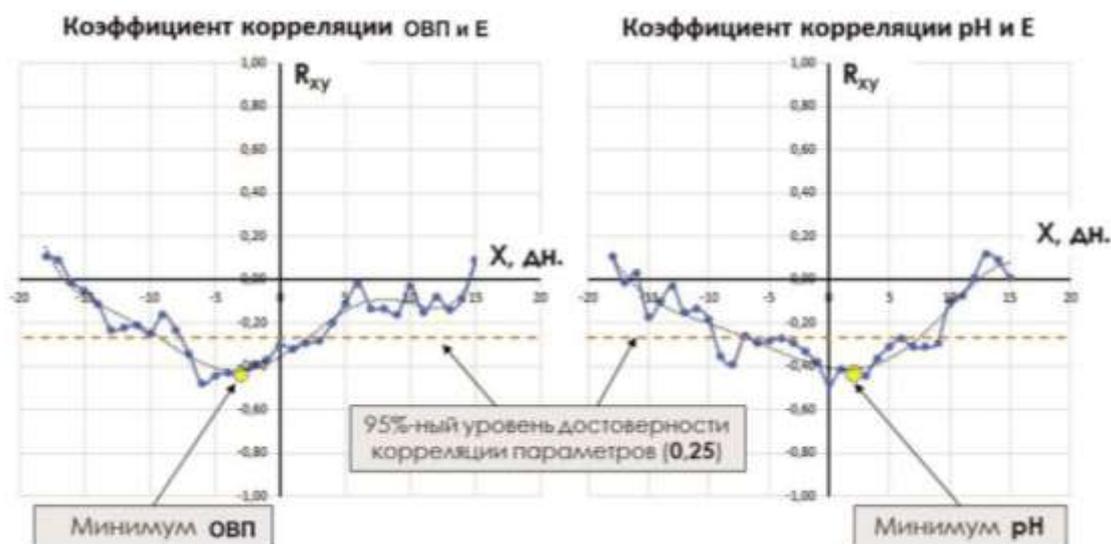


Рис. 5. Изменение коэффициентов корреляции при смещении графиков анализируемых параметров друг относительно друга.

Fig. 5. Change in correlation coefficients when the graphs of the analyzed parameters are shifted relative to each other.

Эти особенности корреляции параметров можно увидеть при визуальном анализе графиков на рис. 6.

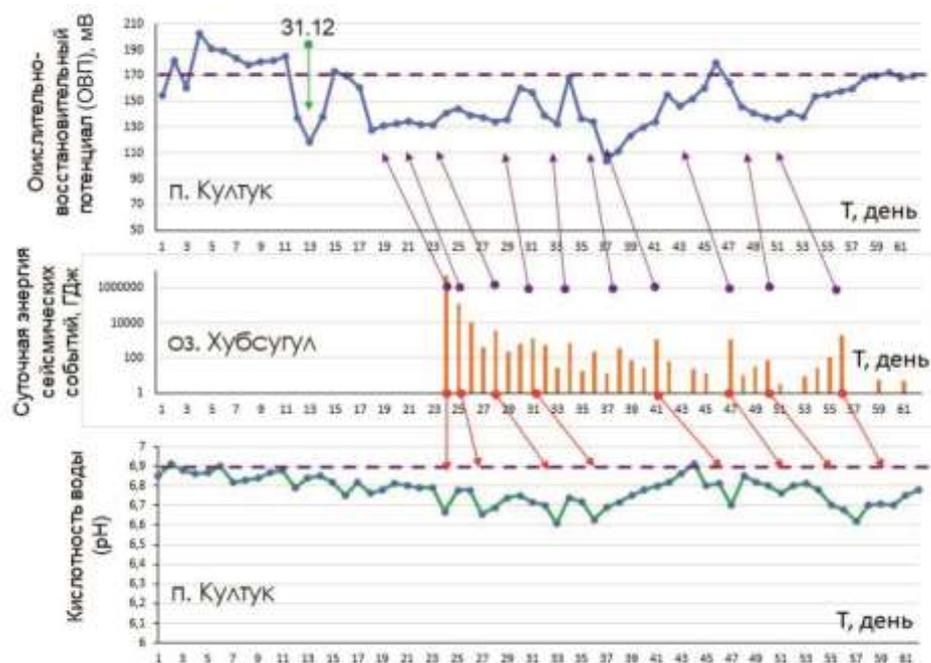


Рис. 6. Взаимосвязь электрохимических свойств воды и энергии сейсмических событий. Фиолетовыми стрелками показано как понижение уровня ОВП предшествует сейсмическим событиям, а уменьшение pH – проявляется как их последствия (красные стрелки). Зеленая стрелка показывает аномалию ОВП, предположительно, связанную с землетрясением, произошедшим 29.12.2020 г. в районе Верхней Ангары ($K=12.9$).

Fig. 6. Relationship between electrochemical properties of water and energy of seismic events. Purple arrows show how a decrease in the ORP level precedes seismic events, and a decrease in pH manifests itself as their consequences (red arrows). The green arrow shows the ORP anomaly, presumably related to the earthquake that occurred on December 29, 2020 in the Upper Angara region ($K=12.9$).

Большинству эпизодов высвобождения сейсмической энергии ($K \geq 12$) предшествует понижение ОВП (за 3–5 дней до события), причем, чем выше высвобождающая энергия, тем раньше начинается снижаться уровень окислительно-восстановительного потенциала. Отрицательные аномалии водородного показателя появляются, в среднем, через 2-3 дня после события. При этом наблюдается обратный эффект: чем сильнее событие, тем быстрее оно находит свое отражение в изменении pH.

Окислительно-восстановительный потенциал зависит от соотношения окислительных и восстановительных компонентов, растворенных в воде (Крайнов и др., 2012). Вариации уровня ОВП в качестве опережающей экспресс-информации используются при анализе обстановки проявления сильных землетрясений (Чебыкин и др., 2021).

На рис. 7 показаны зависимости времени появления и амплитуды аномалий ОВП и pH от среднесуточной выделяемой сейсмической энергии.

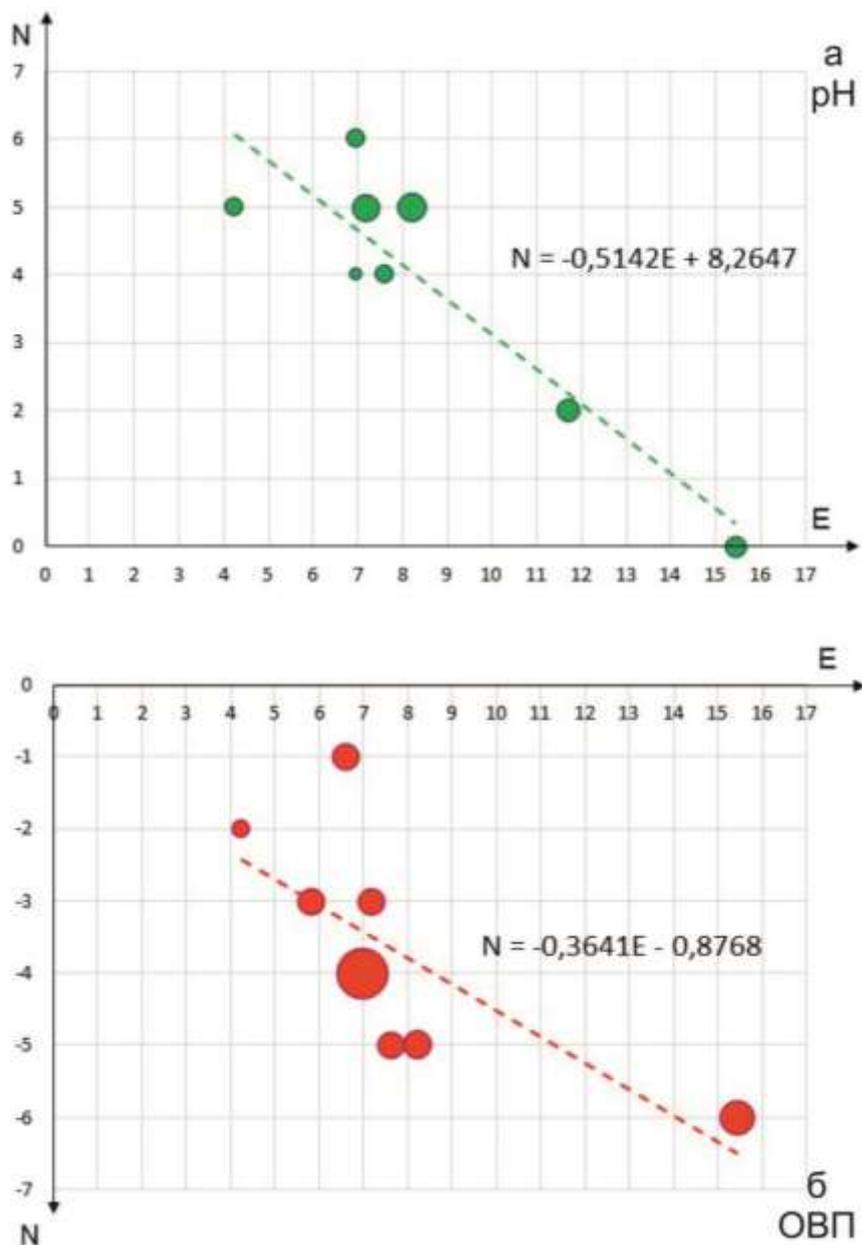


Рис. 7. Диаграммы изменения времени появления (N) аномалий рН (а) и ОВП (б) от среднесуточной выделяемой сейсмической энергии (E). Размер маркеров пропорционален величине аномалии параметров. Штриховой линией показан линейный тренд, описанный приведенными уравнениями.

Fig. 7. Diagrams of changes in time of occurrence (N) of (a) pH and ORP (б) anomalies versus the average daily released seismic energy (E). The size of the markers is proportional to the magnitude of the parameter anomaly. The dashed line shows a linear trend described by the indicated equations.

Коэффициент корреляции параметров N и E составляет $-0,72$ и $-0,91$ соответственно для ОВП и рН. При этом, взаимосвязь среднесуточной энергии и модуля амплитуды аномалии ОВП и рН прослеживается слабо: R_{xy} составляет $-0,26$ и $-0,27$, соответственно для ОВП и рН. Для данной выборки 95 %-ный уровень достоверности корреляционной связи составляет $0,63$.

Заключение

Проведенный статистический анализ данных электрохимического мониторинга показал, что серия сейсмических событий, произошедших на оз. Хубсугул в начале 2021 года, проявилась в снижении значений ОВП и рН подземных вод юго-западного побере-

жья Байкала (на расстоянии более 200 км). Понижение ОВП предшествовало сейсмическим событиям, а уменьшение рН проявлялось как последствие сейсмических толчков. Было замечено, что, чем сильнее было сейсмическое событие, тем раньше возникала аномалия ОВП и быстрее повышалась кислотность воды после землетрясения.

Безусловно, на изменение электрохимических параметров подземных вод оказывает влияние большое число факторов и землетрясение лишь один из них. Из-за неоднозначности причин откликов электрохимических параметров на сейсмические события, они не могут использоваться как прямые сейсмопрогностические признаки. Однако, обнаруженные статистические зависимости, по мнению авторов, представляют интерес. Необходимо продолжить изучение влияния сейсмической активности на электрохимические параметры подземных вод.

Литература

Куроленко А.А., Снопков С.В. Хубсугульское землетрясение 2021 года. // Вестник Иркутского университета. Иркутск: Издательство ИГУ, 2021. Вып. 24. С. 48–50.

Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. Издание второе, дополненное. М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. 672 с.

Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Рассказов С.В., Чувашова И.С., Борняков С.А., Снопков С.В. Култукское сочленение активных разломов Южно-Байкальской впадины и Главного Саянского разлома: чувствительный полигон гидрогеохимического мониторинга подготовки сильного землетрясения // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: тезисы докладов Всероссийского

совещания, посвященного памяти профессора С. И. Шермана. Иркутск, 26–30 апреля 2021 г. Иркутск: Издательство ИГУ, 2021. С. 225–226.

Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В. Первые результаты мониторинга $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // Доклады академии наук. 2015. Т. 460, № 4. С. 464–467.

References

Kurolenko A.A., Snopkov S.V. Khubsugul earthquake in 2021 // Bulletin of the Irkutsk State University. Irkutsk: ISU Publishing House, 2021. Issue 24. P. 48–50. (in Russian)

Krainov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. Geochemistry of groundwaters. Theoretical, applied and ecological aspects. Second edition, extended. M.: TsentrLitNefteGaz, 2012. 672 p. (in Russian)

Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Snopkov S.V. Kultuk junction of active faults of the South Baikal depression and the Main Sayan fault: a sensitive polygon for hydrogeochemical monitoring of the preparation of a strong earthquake // Faulting in the lithosphere and related processes: tectonophysical analysis: abstracts of reports of the All-Russian meeting dedicated to the memory of Professor S.I. Sherman. Irkutsk, April 26–30, 2021. Irkutsk: IGU Publishing House, 2021. P. 225–226. (in Russian)

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

Snopkov Sergey Viktorovich,

*Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
664003 Irkutsk, Lenin, str., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Assistant Professor,
664074, Irkutsk, Kurchatov str., 3,
Siberian School of Geosciences, Irkutsk National
Research Technical University,
Leading Researcher,
email: snopkov_serg@mail.ru.*

Снопков Сергей Викторович,

*кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет, геологический факультет, доцент,
664074, г. Иркутск, ул. Курчатова, 3, Сибирская школа геонаук, Иркутский национальный исследовательский технический университет, ведущий научный сотрудник,
email: snopkov_serg@mail.ru.*

*Куроленко Анатолий Александрович,
664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный универси-
тет, геологический факультет,
студент 4 курса.*

*Kurolenko Anatoliy Alexandrovich,
664003 Irkutsk, Lenin str., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Student of the 4-th course.*

Соотношение времени землетрясений Байкало-Хубсугульской активизации с вариациями окислительно-восстановительного потенциала в подземных водах Култукского полигона

С.В. Рассказов^{1,2}, С.В. Снопков^{2,3}, С.А. Борняков¹

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

²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

³Сибирская школа геонаук, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Время землетрясения определяется вхождением активных разломов центральной части Байкальской рифтовой системы в метастабильное (предсейсмическое) состояние в ходе развития полного сейсмогеодинамического цикла. Исходя из роли потоков флюидов-восстановителей как индикатора дегазации коры, сопутствующей сейсмогенным деформациям, в определении времени землетрясений Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2023 гг. учитываются: 1) снижение атмосферного давления, 2) вхождение в режим согласования и рассогласования окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) разных станций и 3) общее снижение ОВП в подземных водах на мониторинговых станциях Култукского полигона.

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

Relationship between timing of earthquakes of the Baikal-Khubsugul reactivation and oxidation–redox potential in groundwaters from the Kultuk polygon

S.V. Rasskazov^{1,2}, S.V. Snopkov^{2,3}, S.A. Bornyakov¹

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

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

³Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Timing of earthquakes is determined by an entry of active faults in the central part of the Baikal Rift System into a metastable (preseismic) state during the development of a complete seismogeodynamic cycle. Based on a role of fluid flows as possible triggers for seismogenic deformations, in determining earthquake timing of the Baikal-Khubsugul reactivation of 2020–2023, we take into account: 1) decreasing atmospheric pressure, 2) matching–mismatching mode of oxidation–redox potential (ORP) in different stations, and 3) overall ORP decreasing in groundwaters from monitoring stations of the Kultuk polygon.

Keywords: groundwater, monitoring, oxidation–redox potential, earthquake, Baikal.

Введение

Несмотря на ошибочные прогнозы, а нередко и прямое отрицание возможности предвидения сейсмических событий, общество ждет от геологов определения времени землетрясений. Для предупреждения насе-

ления о возможных сейсмических катастрофах во многих странах созданы системы раннего оповещения (Goltz, Flores, 1997; Basher et al., 2006; Iervolino et al., 2007; Guo et al., 2012; Bindi et al., 2015; Kohler et al., 2018; Strauch et al., 2018; Allen, Melgar, 2019; Velazquez et al., 2020; Auclair et al., 2021;

Bracale et al., 2021; Li et al., 2021; Massin et al., 2021; Minson et al., 2021; Peng et al., 2021; Schlesinger et al., 2021; Valbonesi, 2021; Zhang et al., 2021; Zuccolo et al., 2021; Suárez, 2022; Tan et al., 2022). Наиболее серьезные усилия в этом отношении предприняты в Японии (Kamigaichi et al., 2009; Fujinawa, Noda, 2013; Kodera et al., 2020; Zhu et al., 2021). На западном побережье США создана специальная система предупреждения о землетрясениях ShakeAlert. В Японии действующая система раннего оповещения может эффективно сработать за час до события (Suzuki, 2021). Требуется только определение надежных признаков приближающихся сейсмических событий.

При изучении землетрясений дается вероятностный прогноз их проявления на территории в долгосрочной, среднесрочной и ближнесрочной перспективе (Ружич, 1996, 1997; Zavyalov, 2005; Ребецкий, 2007, 2023; Sobolev, 2011; Tikhonov, Rodkin, 2012; Böse, Heaton, 2010; Stefa'nsson, 2011; Sarlis et al., 2014). Нередко принятая логика прогноза времени землетрясения сталкивается со случаями, в которых землетрясение уже должно быть многократно реализовано, но по какой-то причине не происходит. Наступает разочарование относительно возможности определения времени землетрясений. Широко обсуждаемой «ошибкой» был прогноз землетрясения в Паркфилде системы разломов Сан-Андреас, Калифорния (Stefa'nsson, 2011). Несовершенство логики прогноза связано, с одной стороны, со слабой изученностью феномена землетрясения, с другой стороны – с недостаточностью для прогноза только анализа повторяемости самих землетрясений. Необходимо привлекать данные дополнительных наблюдений, которые независимым образом будут нести информацию о приближении землетрясения.

Такие признаки могут быть выявлены при мониторинге простых и понятных геологических процессов, сопутствующих подготовке землетрясений в чувствительных для них активных разломах территории. Важно подобрать индикаторы, действительно откликающиеся на подготовку и реализацию

землетрясений. В последние годы существенное продвижение в понимании процессов, сопутствующих подготовке сильного сейсмического толчка, сделано при систематических исследованиях землетрясения Куамамото, произошедшего в Японии в 2016 г. (Nanjo et al., 2016, 2022; Devi et al., 2022). Цель настоящей работы – показать характер откликов окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) на сейсмические толчки во время Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2023 гг. и наметить подходы к их использованию для определения времени землетрясений.

Переход от асейсмического состояния 2017–2020 гг. в западной части Южно-Байкальской впадины к Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации 2020–2023 гг.

В центральной части Байкальской рифтовой системы сейсмические активизации рассматриваются как сменяющиеся во времени (регулярные) явления. В западной части Южно-Байкальской впадины землетрясения происходят сравнительно редко, с существенными перерывами и меняющимся характером пространственно-временной миграции эпицентров. Между сильной Култукской активизацией 2008–2011 гг. и сильной Байкало-Хубсугульской, начавшейся 22 сентября 2020 г. Быстринским землетрясением и продолжающейся в 2023 г., насчитывается еще 5 слабых активизаций (рис. 1). Каждое обозначается главным (наиболее сильным) сейсмическим толчком. Байкало-Хубсугульская активизация охватила обширную территорию, в которой западная часть Южно-Байкальской впадины оказалась составным элементом. Главное по силе событие этой активизации произошло 12 января 2021 г. в северной части оз. Хубсугул ($K=15.7$, $M_w=6.8$) (Карта..., 2023). Быстринское, Кударинское и другие землетрясения 2020 г. меньшей силы, фактически сыграли роль предшествующих событий.

Сейсмическая активизация	Интервал активизации (продолжительность, месяцы)	Интервал перестройки (продолжительность, месяцы)
Култукская	04.05.2008–04.01.2011 (27)	04.01.2011–24.06.2011 (5)
Толбазихинская	24.06.2011–11.10.2012 (15)	11.10.2012–08.01.2013 (2)
Котовская	0.8.01.2013–21.07.2013 (6)	21.07.2013–11.08.2013 (<1)
Муринская	11.08.2013–20.07.2014 (11)	20.07.2014–13.01.2015 (5)
Голоустная линия	13.01.2015–29.08.2016 (20)	29.08.2016–14.12.2016 (2.5)
Муринская линия	14.12.2016–06.07.2020 (43)	06.07.2020–22.09.2020 (2.5)
Байкало–Хубсугульская	22.09.2020–(продолжается более 22 месяцев)	

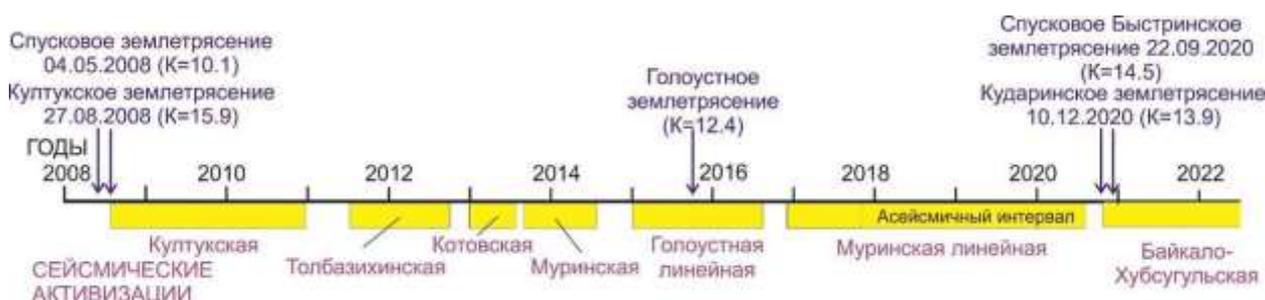


Рис. 1. Временные интервалы сейсмических активизаций и перестроек эпицентров землетрясений (Rasskazov et al., 2000, 2021). Для землетрясений здесь и далее используется каталог (Карта..., 2023) с корректировкой на местное время.

Fig. 1. Time intervals of seismic reactivations and reorganization of earthquake epicenters (Rasskazov et al., 2000, 2021). For earthquakes, hereinafter, the catalog (Карта..., 2023) is used with corrections for local time.

К марту 2023 г. Байкало-Хубсугульская сейсмическая активизация уже превысила продолжительность событий Култукской активизации. В интервале между этими сильными активизациями получен эмпирический мониторинговый материал о гидрогеохимических процессах, сопутствующих землетрясениям на Култукском полигоне. Полигон находится в гидрогеохимической зоне милолитов Главного Саянского разлома, в его сочленении с Обручевским и Юго-Западным Бортовым разломами, ограничивающими западную часть Южно-Байкальской впадины, соответственно, с севера и юга.

По гидрогеохимическим данным в сочетании с распределением землетрясений в западной части Южно-Байкальской впадины реконструируется полный сейсмогеодинамический цикл сжатия и растяжения коры, дающий представление о пульсационном

развитии сейсмогенных деформаций центральной части Байкальской рифтовой системы как упорядоченного во времени процесса. Выделяются стадии подготовки сильных землетрясений (А, В, С, D) и их реализации (Е). Сейсмическим стадиям соответствуют тренды последовательного изменения отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (ОА4/8) и активности ^{234}U (А4) в подземных водах ст. 27 с выходом на экстремальные значения, соответствующие сейсмическим событиям. Значения того и/или другого параметра возрастают вследствие раскрытия микротрещин (растяжения коры), усиливающего эффект перехода атомов отдачи ^{234}U в циркулирующие подземные воды, и снижаются вследствие закрытия микротрещин (сжатия коры), препятствующего этому эффекту (Rasskazov et al., 2020, 2021).

На стадиях А–С, длившихся с 8 января 2013 г. до 29 августа 2016 г., в интервале Голоустной линейной сейсмической активизации (13.01.2015–29.08.2016 гг., стадия С), 5 сентября 2015 г. реализовался главный толчок Голоустного землетрясения умеренной силы ($K=12.4$). Во временном интервале 14.12.2016–10.11.2017 гг. эпицентры слабых землетрясений выстроились в Муринскую

линию, обозначив начало стадии D. После длительного (более 2.5 лет) сейсмического затишья на Южном Байкале случился ощутимый сейсмический толчок ($K=12.3$) 6 июля 2020 г на западном окончании прогрессирующих во времени Голоустной и Муринской эпицентральных линий (рис. 2). В это время сейсмогенные деформации еще подчинялись Муринской линейной зоне.



Рис. 2. Пространственно-временные соотношения сильных землетрясений на Южном Байкале в 2020 г. и Хубсугульского землетрясения в начале 2021 г. в сопоставлении с предшествующими сейсмическими событиями 2015–2017 гг.

Fig. 2. Spatial-temporal relationship between strong earthquakes in South Baikal in 2020 and the Khubsugul one in early 2021 in comparison with previous seismic events of 2015–2017.

Байкальско-Хубсугульская сейсмическая активизация началась после перестройки деформационного поля Муринской эпицентральной линии. Около 2 часа ночи с 21 на 22 сентября 2020 г., в районе пос. Быстрое (Главный Саянский разлом) случилось сильное сдвоенное землетрясение ($K=14.5$ и 13.1), запустившее сейсмическую нестабильность во всей Южно-Байкальской впадине и отзывавшееся сильными Кударинскими землетрясениями 9 и 10 декабря 2020 г. ($K=13.9$ и 12.6). За этими толчками, 12 января 2021 г., последовало сильное Хубсугульское землетрясение ($K=15.7$), сме-

нившееся продолжительной афтершоковой активностью.

Методика

На 11 станциях полигона (рис. 3) отбираются пробы с определением концентраций 72 химических элементов и изотопных отношений урана методом ИСП МС на масс-спектрометре Agilent 7500сe. Характеристика станций полигона, методика элементного анализа воды и методика измерений $O44/8$ приведены в работах (Чебыкин и др., 2007, 2012, 2015] и (Рассказов и др., 2015).

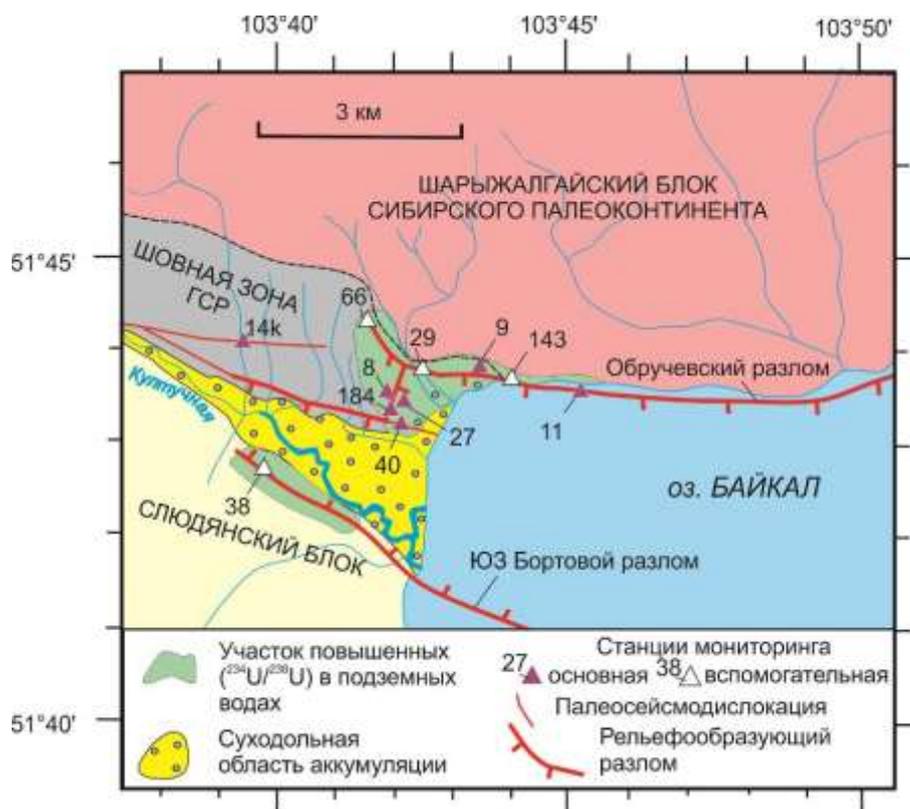


Рис. 3. Култукский полигон. Территории повышенных значений ОА4/8 (2.0–3.3) в подземных водах показаны по работе (Расказов и др., 2015). Палеосейсмодислокации показаны по работе (Чипизубов, Смекалин, 1999).

Fig. 3. The Kultuk polygon. Areas of elevated OA4/8 values (2.0–3.3) in groundwaters are shown after (Ras-skazov et al., 2015), paleoseismic dislocations after (Chipizubov, Smekalin, 1999).

На станциях определяются электрохимические параметры воды: ОВП, рН, электропроводность, а также температура с использованием портативных приборов «Нанна» и «Эксперт». Значения ОВП даются относительно хлор-серебряного электрода в условных единицах прибора. Поправка к нулевому значению Eh, соответствующему водороду, составляет, приблизительно, +200 mV. Паспортная погрешность измерений ОВП прибором «Нанна» составляет ± 20 mV. Вариации указанных параметров используются при определении частоты опробования станций. В среднем пробы отбираются через 2 недели, но в случае аномальных значений ОВП, рН или температуры, а также во время сейсмических событий частота отбора увеличивается до 2-х проб в неделю, а иногда пробы берутся ежедневно. Дополнительно в точке наблюдения определяется давление атмосферы геофизическим аэрометром.

Электрохимические параметры измеряются непосредственно при отборе проб, в отличие от гидрогеохимических данных, которые получают с задержкой на недели и месяцы, после накопления не менее 50 проб для лабораторных измерений на масс-спектрометре.

Результаты мониторинга

Отклики ОВП подземных вод на землетрясения

При Быстринском землетрясении на всех станциях Култукского полигона определяется резкое падение ОВП (Семинский и др., 2021). Аномальные значения этого параметра показывают возможность его использования для экспрессной регистрации откликов подземных вод Култукского полигона на подготовку землетрясения. Глубокий минимум (до -44 mV) получается для подземных вод ст. 8 (рис. 4).

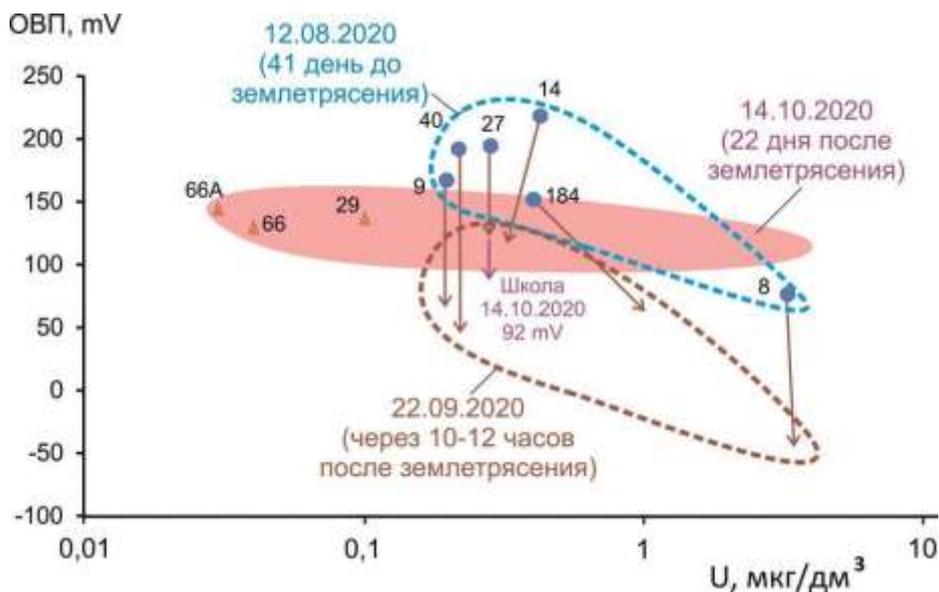


Рис. 4. Диаграмма ОВП – U, показывающая резкое снижение ОВП всех станций Култукского полигона при Быстринском землетрясении.

Fig. 4. Diagram ORP vs. U that shows a sharp decrease in the ORP at all stations of the Kultuk polygon during the Bystraya earthquake.

Сравнение данных ст. 8 и 9 Култукского полигона демонстрирует широкий разброс значений ОВП от –44 до +250 mV с согласованием и рассогласованием значений этого

параметра. Синхронизация снижения ОВП, полученное при Быстринском землетрясении, дополняется подобной синхронизацией во время других землетрясений (рис. 5, 6).

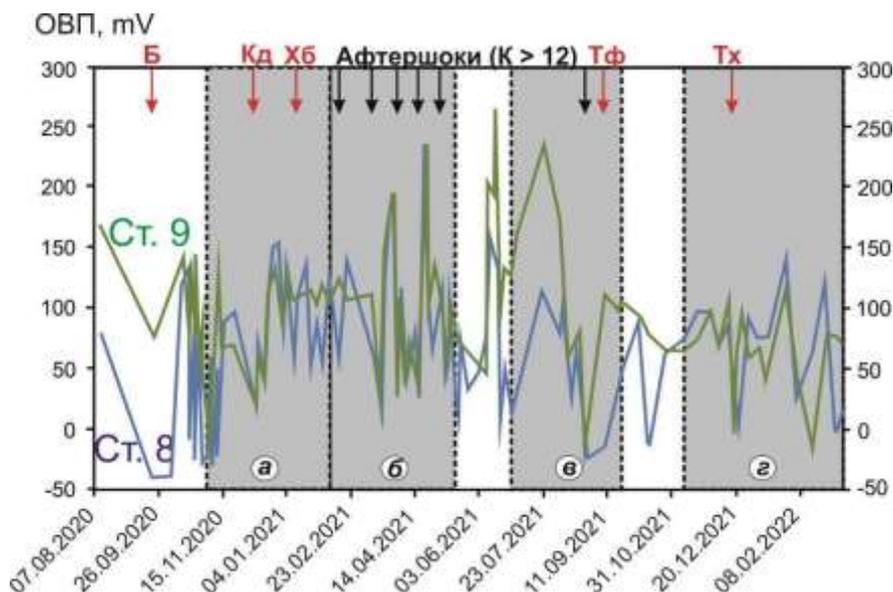


Рис. 5. Диаграмма временных вариаций ОВП в подземных водах ст. 8 и 9. Серыми полосами на диаграмме выделяются участки с обозначением буквами в кружках а, б, в и г, детализированные на рис. 6. Землетрясения: Б – Быстринское, Кд – Кударинское, Хб – Хубсугульское, Тф – Тофаларское, Тх – Танхойское.

Fig. 5. Diagram of temporal variations of ORP in groundwaters from st. 8 and 9. Gray stripes on the diagram highlight areas, designated by letters in circles a, b, v, and g, that demonstrate details in Fig. 6. Earthquakes: Б – Bystroye, Кд – Kudara, Хб – Khubsugul, Тф – Tofalar, Тх – Tankhoi.

С Кударинским и Хубсугульским землетрясениями связывается интервал синхронизации значений ОВП ст. 8 и 9 с 11 ноября 2020 г. до 10 января 2021 г. (рис. 6а). После Быстринского землетрясения пробы отбираются ежедневно. 04 и 05 ноября 2020 г. на ст. 9 наблюдается снижение ОВП до отрицательных значений и затем, 06–10 ноября, обозначается подъем до интервала 40–85

mV. 04 и 05 ноября 2020 г. на ст. 8 также наблюдается (синхронное со ст. 9) снижение ОВП до отрицательных значений, но в последующие дни (до 09 ноября) значения ОВП повышаются до интервала 50–75 mV при их чередовании с отрицательными значениями. Низкие значения ОВП ст. 8 запаздывают относительно низких значений ОВП ст. 9.

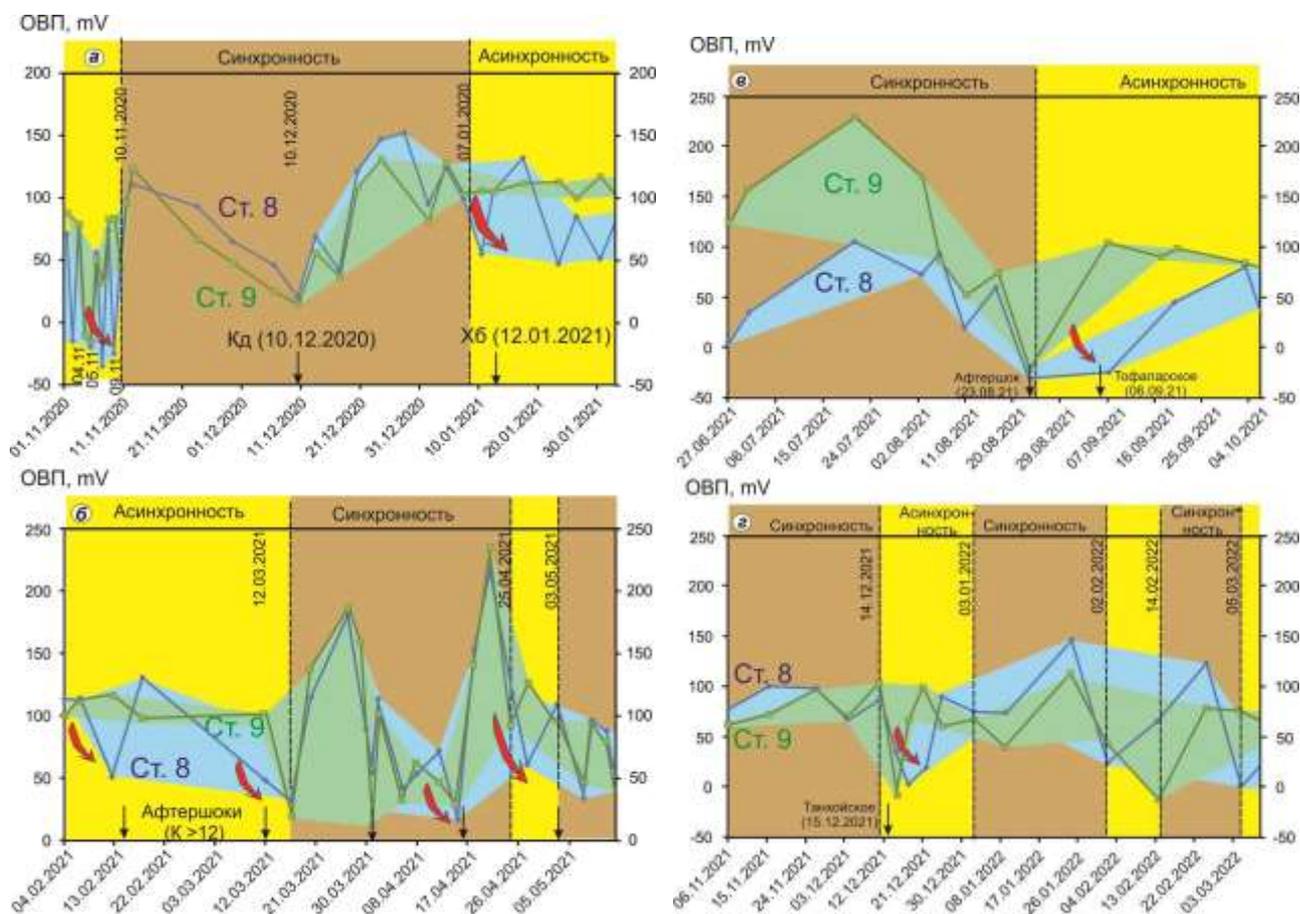


Рис. 6. Диаграммы временных вариаций ОВП ст. 8 и 9. Диаграммы с обозначением буквами в кружках *а, б, в* и *г* объединяются между собой на рис. 5 и выделены на нем серым полосами.

Fig. 6. Diagrams of temporal variations of ORP st. 8 and 9. The diagrams marked by letters in circles *a, b, v*, and *z* are combined in Fig. 5 and highlighted on it with gray stripes.

10, 11 и 12 ноября 2020 г. значения ОВП на ст. 8 и 9 синхронно возрастают до максимума (120–130 mV), а затем также синхронно снижаются до минимума (около 25 mV) 10 декабря. В это время происходит Кударинское землетрясение. Синхронное снижение ОВП с 12 ноября до 10 декабря может свидетельствовать об однонаправленной эволюции гидрогеохимических процессов, установившейся перед землетрясением после режима резких (почти ежедневных) гид-

рогеохимических вариаций. Такой режим поддерживается с 22 сентября (с Быстринского землетрясения) до 10 ноября (время предсейсмической перестройки).

Месячный интервал снижения ОВП, соответствующий подготовке Кударинского землетрясения, продолжается после него синхронными месячными вариациями этого параметра. После таких вариаций, 12 января 2021 г., происходит Хубсугульское землетрясение. Последние синхронные значения

ОВП около 110 mV получаются на ст. 8 и 9 07 января 2021 г. В следующем опробовании, 12 января, значение ОВП ст. 9 остается прежним, а значение этого параметра ст. 8 снижается до 52 mV. В дальнейшем ОВП на ст. 9 практически не меняется, а на ст. 8 меняется от 50 до 130 mV. Запаздывание низких значений ОВП ст. 8, по отношению к повышенным значениям этого показателя ст. 9, проявившийся перед синхронизацией с перестройкой 10 ноября 2020 г., повторяется. Двухмесячный интервал синхронизации ОВП ограничивается по времени перестройками; перестройка вхождения в режим синхронизации не сопровождается землетрясением, перестройка с выходом из синхронизации дает главное событие Байкало-Хубсугульской активизации (Хубсугульское землетрясение). Асинхронный интервал, во время которого происходит один сильный афтершок (14 февраля), продолжается до афтершока 12 марта 2021 г. При обоих афтершоках ОВП ст. 8 существенно снижается относительно значений ОВП ст. 9. Землетрясение 12 марта сопровождается перестройкой, в результате которой наступает синхронизация в вариациях ОВП на ст. 8 и 9, продолжающаяся до 25 апреля. В интервале синхронизации происходят 2 сильных афтершока. Еще один афтершок сопровождается рассогласованием значений ОВП ст. 8 и 9 при более низком значении ОВП в первой из них относительно второй (рис. 6б).

Следующий интервал синхронизации значений ОВП с 03 мая до 23 августа 2021 г. обозначается условно, поскольку в это время пробы отбираются разреженно. Афтершок 23 августа сопровождается структурной перестройкой, за которой следует сильное (далекое) Тофаларское землетрясение (06 сентября 2021 г.). Во время этого землетрясения ОВП ст. 8 существенно снижается относительно значений ОВП ст. 9. ОВП станций синхронизируется (рис. 6в).

Новый интервал синхронизации ОВП, начинающийся 06 ноября 2021 г., сопровождается Танхойским землетрясением 15 декабря этого же года, во время которого происходит перестройка деформационного по-

ля, отражающаяся в потере синхронности ОВП ст. 8 и 9. После землетрясения 16 декабря 2021 г. значение ОВП ст. 9 ниже значения ст. 8, но 17–22 декабря соотношение ОВП станций меняется на обратное. До 3 марта 2022 г. сравнительно короткие интервалы асинхронных вариаций ОВП сменяются интервалами синхронизации без землетрясений. Значения ОВП ст. 8 в целом превышают значения этого параметра ст. 9 (рис. 6г).

Соотношение ОВП подземных вод и землетрясений с атмосферным давлением

График временных вариаций $P_{атм}$ показывает совпадение сильных землетрясений (Кударинского и Хубсугульского) с минимумами атмосферного давления и частичное совпадение с минимумами атмосферного давления слабых сейсмических событий в акватории Южного Байкала. Наблюдается корреляция атмосферного давления с ОВП, поэтому для частичного снятия влияния на ОВП подземных вод атмосферного давления, наряду с измеренными значениями этого показателя, анализируется отношение $100 \times \text{ОВП} / P_{атм}$ (рис. 7).

На примере ст. 8 и 27 различаются 4 временных интервала (цифры в кружках): 1) 25 октября – 10 ноября 2020 г. (интервал в целом несогласующихся вариаций ОВП после Быстринского землетрясения); 2) 11 ноября – 13 декабря 2020 г. (интервал согласующихся вариаций ОВП перед Кударинским землетрясением и непосредственно после него); 3) 13 декабря 2020 г. – 04 января 2021 г. (интервал согласующихся вариаций ОВП между Кударинским и Хубсугульским землетрясениями) и 4) 07 января – 07 февраля 2021 г. (интервал несогласующихся вариаций ОВП во время Хубсугульского землетрясения и его афтершоков).

На диаграммах рис. 7 большая часть землетрясений совпадает с минимумами $P_{атм}$ и $100 \times \text{ОВП} / P_{атм}$. Хубсугульское землетрясение совпадает с минимумом $P_{атм}$ и следует после минимума значений $100 \times \text{ОВП} / P_{атм}$ ст. 8.

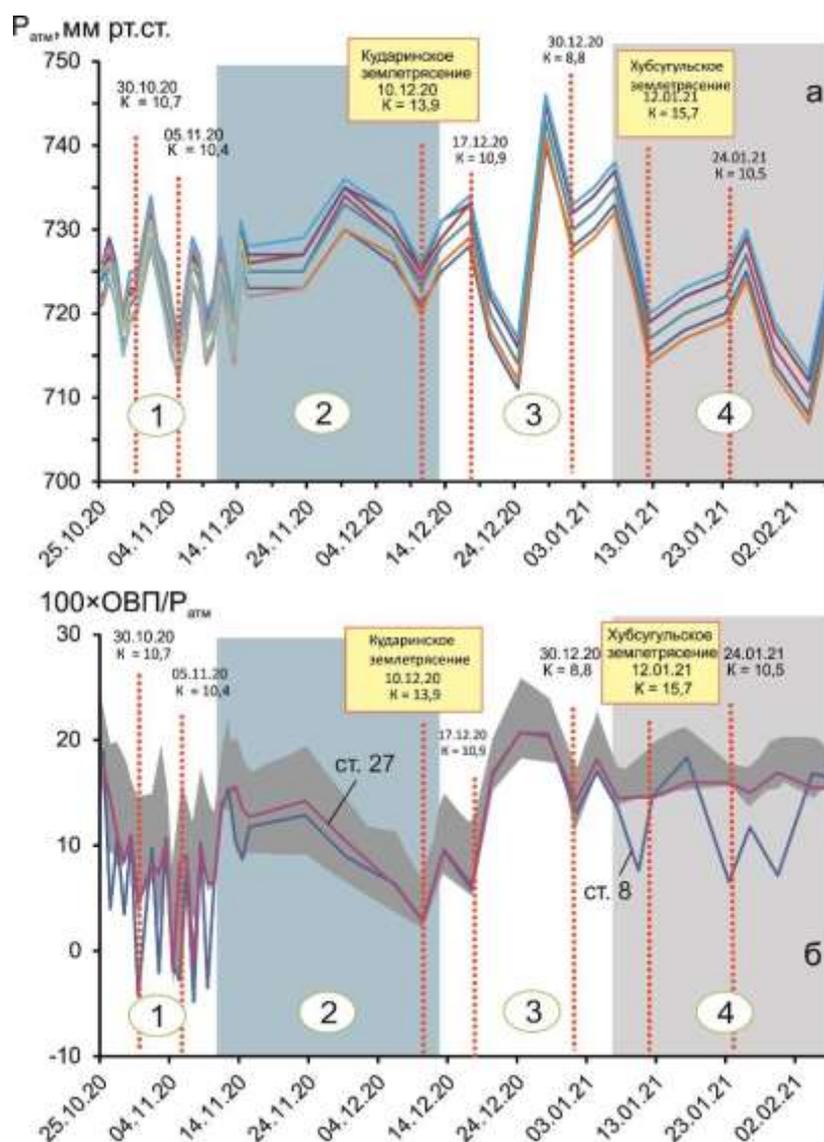


Рис. 7. Диаграммы соотношения временных вариаций $P_{\text{атм}}$ (а) и отношения $100 \times \text{ОВП} / P_{\text{атм}}$ (б). Цифры 1–4 в кружках обозначают интервалы согласующихся и несогласующихся вариаций ОВП ст. 8 и 27. На панели а линиями разного цвета обозначается давление, измеренное непосредственно на станциях при отборе проб. На панели б темно-серым цветом выделен диапазон вариаций отношения $100 \times \text{ОВП} / P_{\text{атм}}$ на станциях Култукского полигона: 9,40,184,14,190,29,191 и 192.

Fig. 7. Diagrams of temporal variations of $P_{\text{атм}}$ (а) and $100 \times \text{ОВП} / P_{\text{атм}}$ ratio (б). Numerals 1–4 the circles denote intervals of consistent and inconsistent ORP variations in groundwaters from st. 8 and 27. In panel а, lines of different colors indicate pressure measured directly at the stations during sampling. In panel б, dark-gray area highlights a range of variations of $100 \times \text{ОВП} / P_{\text{атм}}$ ratio in groundwaters from stations 9,40,184,14,190,29,191, and 192 of the Kultuk polygon.

Частые вариации атмосферного давления с амплитудой более 10 мм рт.ст., установленные в период с 25 октября до 10 ноября 2020 г., соответствуют частым вариациям ОВП (график не показан). Такой нестабильный характер ОВП ежедневно регистрируется на Култукском полигоне со времени Быстринского землетрясения (с 22 сентября 2020 г.). Аномально низкое ОВП с перехо-

дом в отрицательные значения (до -44 мВ) показывают ст. 8 и 27. 11 ноября значения ОВП всех станций полигона возрастают и постепенно снижаются до 9–10 декабря, когда происходят кударинские сейсмические события в дельте р. Селенги. Атмосферное давление плавно возрастает, а затем снижается с выходом на минимум, происходят землетрясения. Позже, до 4 января 2021 г.,

наблюдается согласование минимумов $100 \times Eh/P_{\text{атм}}$ с землетрясениями Южного Байкала. Хубсугульское землетрясение происходит 12 января 2021 г. на фоне стабильно повышенных значений этого параметра на станциях полигона, за исключением аномальных импульсов снижения на ст. 8. В период наблюдений графики ст. 27 и 8 частично совпадают и обнаруживают явный диссонанс перед Хубсугульским землетрясением и после него.

Обсуждение

Предварительные замечания

Вопрос о причинах изменения ОВП в подземных водах входит в область междисциплинарных исследований несейсмических явлений, предшествующих землетрясениям. Одна из возможных причин изменения ОВП – проявление пероксидных дефектов, существующих в структурах породообразующих минералов, и развитие электрохимических процессов в коре при ведущей роли подземных вод в качестве электролита (Freund, 2013). ОВП подземных вод меняется как интегрированное выражение растворенных компонентов с разной валентностью (Крайнов и др., 2012). Чувствительный отклик на сейсмогенные деформации – снижение ОВП – может быть связан с потоками газо-восстановителей (например, таких как H_2 , CH_4 , H_2S), сопутствующих землетрясению. Такие газовые потоки, вызывающие снижение ОВП на разных мониторинговых станциях, предшествуют землетрясению. Важно, что при его подготовке и реализации наблюдается синхронизация изменений ОВП на разных станциях полигона.

Роль газовой (флюидной) составляющей в электрохимических и гидрогеохимических процессах подчеркивается наблюдаемой зависимостью ОВП от атмосферного давления. Поток газов-восстановителей может провоцироваться снижением $P_{\text{атм}}$. Согласование землетрясений с минимумами давления атмосферы может иметь опосредованный характер; снижение давления атмосферы провоцирует поток флюидов-восстановителей и, в свою очередь, поток флюидов-восстановителей может служить

спусковым механизмом сейсмогенных деформаций и/или являться их следствием. Вопрос причин согласования землетрясений с минимумами давления атмосферы требует дополнительного изучения на основе более детальной информации.

Концентрация растворенной ртути как следствие вариаций ОВП подземных вод в потоке флюидов

Вариации ОВП в подземных водах Култукского полигона коррелируются с вариациями ртути, имеющей переменную валентность. Окисленная форма ртути (Hg^{2+}) растворима в воде (Hg_{gw}), тогда как восстановленная форма (Hg^+) представляет собой газ (Hg_{gas}), удаляющийся из подземных вод вместе с другими газами-восстановителями.

Из анализа временных вариаций растворенной ртути в подземных водах Култукского полигона в сочетании с анализом временных вариаций ОВП и А4 (Чебыкин и др., 2022; Rasskazov et al., 2022) получается совместное восприятие меняющихся во времени обоих гидрогеохимических откликов подземных вод на сейсмические активизации (рис. 8). Во время закрытия микротрещин при сжатии коры (низкое А4), сопровождающегося Голоустным землетрясением 2015 г. в Голоустной эпицентральной линии, поток флюидов-восстановителей отсутствует. С продвижением эпицентров землетрясений из Голоустной части эпицентральной линии в Муринскую часть (см. рис. 4) в 2015–2017 гг. режим согласованных максимумов и минимумов А4 и Hg_{gw} сменяется режимом несогласованных максимумов и минимумов А4 и Hg_{gw} ; режим согласования фаз растяжения с вхождением в подземные воды растворенной ртути сменяется, по мере нарастания открытия микротрещин при растяжении (повышение А4) режимом удаления восстановленной (атомарной) ртути из подземных вод в потоках флюидов-восстановителей. В 2019 г. на диаграммах « Hg_{gw} – время» на всех станциях Култукского полигона обозначается глубокая бухта Hg_{gw} . Около 15 февраля 2020 г. регистрируется короткая инверсия А4 – Hg_{gw} , после которой потоки флюидов-восстановителей

возобновляются с вхождением 22 сентября 2020 г. в Байкало-Хубсугульскую сейсмическую активизацию. По мере ее развития вновь наступает согласование максимумов и

минимумов A_4 и Hg_{gw} , свидетельствующее о снижении роли потока флюидов-восстановителей.

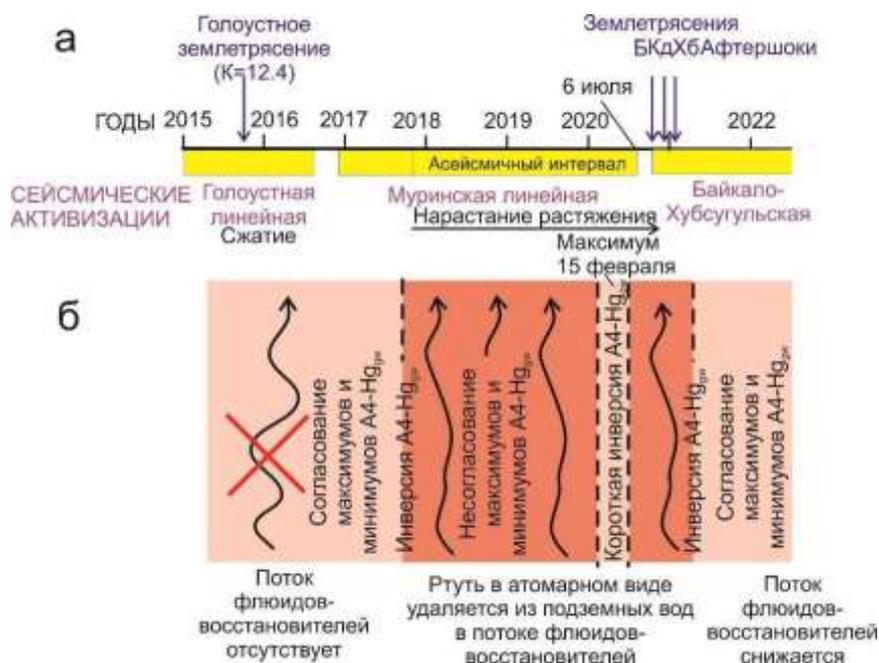


Рис. 8. Схема временных соотношений концентрации ртути в подземной воде ст. 8, ОВП и сейсмических событий Байкало-Хубсугульской активизации (Чебыкин и др., 2022; Rasskazov et al., 2022). БКдХб – Быстринское, Кударинское и Хубсугульское землетрясения.

Fig. 8. Temporal relationships between mercury concentrations in groundwaters from st. 8, ORP, and seismic events of the Baikal-Khubsugul reactivation (Chebykin et al., 2022; Rasskazov et al., 2022). БКдХб – Bystroe, Kudara, and Khubsugul earthquakes.

На ст. 184 максимум Hg_{gw} (высокий ОВП подземных вод) предшествует Быстринскому землетрясению. Во время Кударинского землетрясения концентрация Hg_{gw} находится на минимуме (низкий ОВП подземных вод). Быстринское землетрясение происходит в условиях нарастания потока флюидов-восстановителей, а Кударинское и Хуб-

сугульское сочетаются с его снижением. В апреле–июне 2021 г. максимумы и минимумы Hg_{gw} чередуются между собой. Перестройка деформационных откликов после 29 марта 2021 г. выражается в аномально высокой концентрации Hg_{gw} с максимальным контрастом окислительно-восстановительного режима (рис. 9).

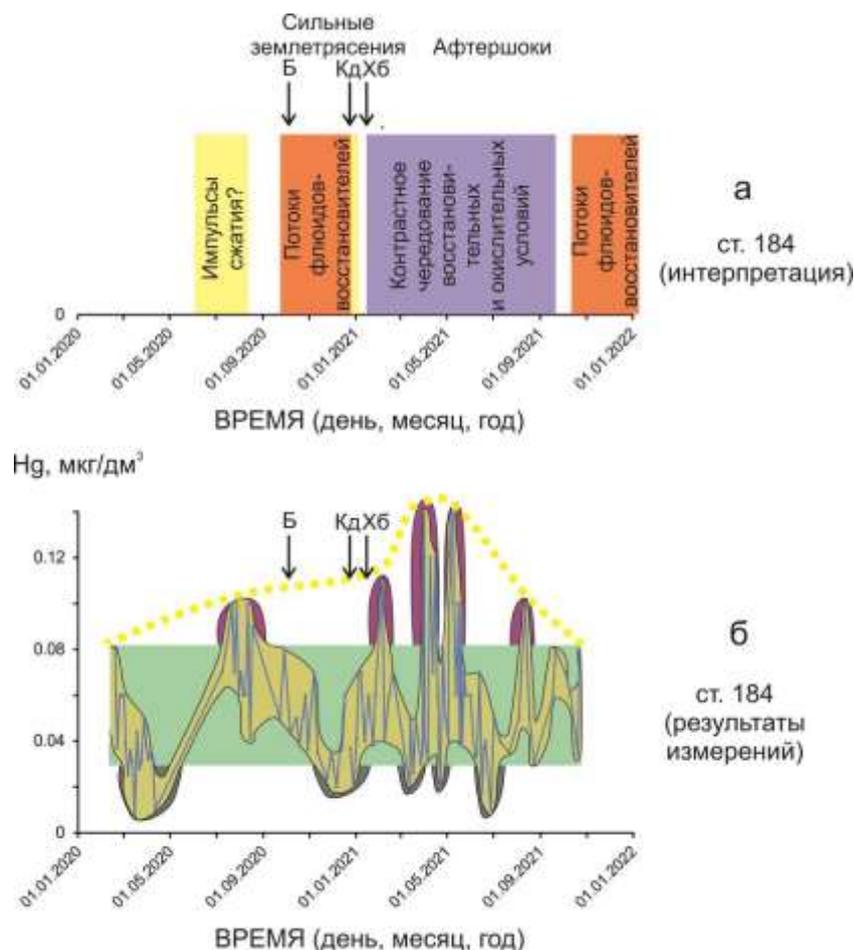


Рис. 9. Схема интерпретации (а) диаграммы временных вариаций Hg_{gw} (б) в подземных водах ст. 184.

Fig. 9. Interpretation scheme (a) for diagram of Hg_{gw} temporal variations (б) in groundwaters from st. 184.

Выход на определение времени землетрясений Байкало-Хубсугульской активизации

Время землетрясений центральной части Байкальской рифтовой системы определяется разными факторами. Главный фактор – вхождение активных разломов территории в метастабильное (предсейсмическое) состояние. Такое вхождение вписывается в полный сейсмогеодинамический цикл и обозначается для Байкало-Хубсугульской активизации комплексом гидрогеохимических данных, полученных на Култукском полигоне в 2019–2020 гг. В это время в западной части Южно-Байкальской впадины имеет место 2.5-летний асейсмичный интервал. С 2015 г. до 2020 г. последовательно повышаются значения A_4 на ст. 27. Во временном интервале 20 июня – 02 июля 2019 г. на всех станциях скачкообразно возрастает концентра-

ция термофильного элемента Si с выходом подземных вод каждой станции на уровень, характерный для Байкало-Хубсугульской активизации. В течение 2019 г. в подземных водах всех станций снижается Hg_{gw} с образованием предсейсмической бухты. После временного интервала 20 июня – 02 июля 2019 г. образуется подобная бухта в вариациях термофильного отношения Na/Li (Чебыкин и др., 2022; Rasskazov et al., 2022; Ильясова, Снопков, 2023).

Поскольку активные разломы центральной части Байкальской рифтовой системы переходят в метастабильное (предсейсмическое) состояние, роль факторов, влияющих на землетрясения, меняется. Начинают проявляться факторы, которые обычно не имеют значения в разломе стабильного состояния, но с его переходом в метастабильное состояние приобретают роль чувствительных индикаторов землетрясений.

Исходя из роли потоков флюидов–восстановителей как индикатора дегазации коры, сопровождающей землетрясения, для определения их времени в Байкало–Хубсугульской активизации важно учитывать:

1) снижение атмосферного давления, усиливающее дегазацию коры. Этот фактор способствует генерации потока газов–восстановителей, но не является достаточным. Землетрясения генерируются не только при низком, но и при повышенном атмосферном давлении;

2) вхождение в режим согласования и рассогласования ОВП разных станций. Режим согласования, отражает эпизодическое действие потока флюидов–восстановителей. Возможны три варианта развития окислительно–восстановительных процессов. Первый вариант – переход разных станций от режима несогласованного ОВП к режиму согласования. Вхождение в этот режим не сопровождается землетрясением. Однако смена флюидов свидетельствует о наступлении качественно нового режима дегазации, который может непосредственно сопровождать подготовку землетрясения. Второй вариант – длительное (в течение месяца и более) снижение согласующихся показаний ОВП на разных станциях, свидетельствующее о последовательном возрастании потока флюидов–восстановителей. Если разлом находится в метастабильном состоянии, однонаправленное изменение в нем может привести к сильному сейсмическому толчку. Наконец, третий вариант – выход из режима согласования ОВП разных станций. Этот вариант также сопровождается землетрясением, которое, в сущности, обозначает структурную перестройку в коре с прекращением и рассредоточением потока флюидов–восстановителей;

3) общее снижение ОВП на всех станциях полигона, свидетельствующее о воздействии на подземные воды газов–восстановителей. Особенно чувствительны к ним подземные воды ст. 8 и 27, в которых ОВП снижается до отрицательных значений (относительно хлор–серебряного электрода).

Планирование дальнейших наблюдений ОВП

Резкое падение ОВП в подземных водах всех станций Култукского полигона во время Быстринского землетрясения в сентябре 2020 г. (Семинский и др., 2021), показало возможность использования этого параметра для первичной регистрации откликов на сейсмогенные деформации подземных вод Култукского полигона. Последующие наблюдения привели к выводу о наиболее высокой информативности для выхода на определенные времени приближающихся землетрясений варьирующих значений ОВП ст. 8 и 9.

Принципиальная схема наблюдений предполагает сравнительные измерения ОВП на этих станциях (или на их аналогах). Одна станция находится в зоне Обручевского разлома, другая – на торцовой Култукской тектонической ступени Южно–Байкальской впадины. Несогласованное изменение этого параметра на станциях означает отсутствие угрозы землетрясения, переход к согласованию, продолжающемуся в течение нескольких дней или недель, может истолковываться в качестве признака приближения землетрясения в центральной части Байкальской рифтовой системы. Если значения ОВП резко падают на обеих станциях, землетрясение произойдет с большой долей вероятности (рис. 10). Разумеется, такая критическая ситуация должна подкрепляться параллельным сбором и анализом независимой информации о других признаках приближения землетрясения.

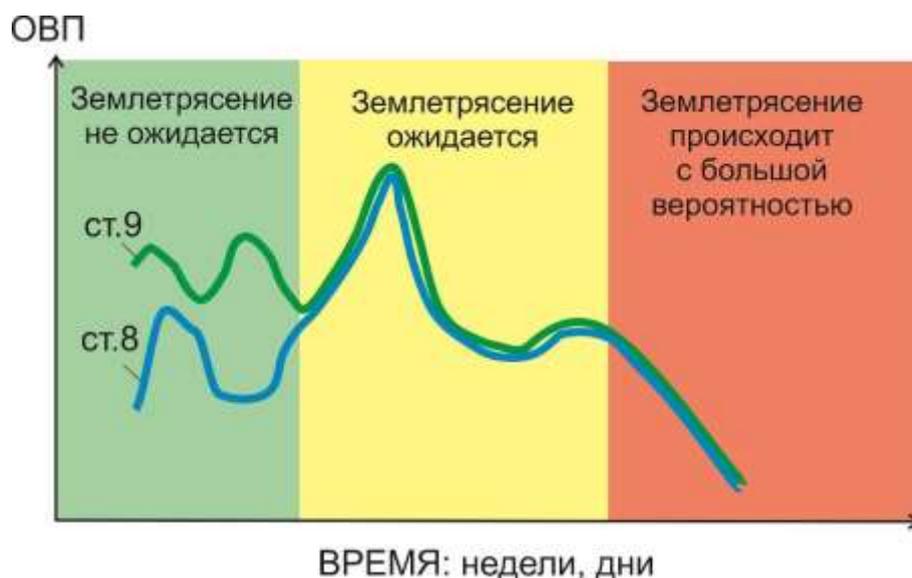


Рис. 10. Принципиальная схема непрерывных наблюдений ОВП ст. 8 и 9 для слежения за сейсмической опасностью зеленого, желтого и красного уровней в центральной части Байкальской рифтовой системы.

Fig. 10. Schematic diagram of continuous observations of ORP in stations 8 and 9 to monitor a seismic hazard of green, yellow, and red levels in the central part of the Baikal Rift System.

В текущий момент мониторинга на Култукском полигоне пробы подземных вод отбираются на станциях с измерением ОВП в среднем через 2 недели. Электрохимические эффекты приближающихся землетрясений неизбежно пропускаются. Необходима организация непрерывных наблюдений с установкой двух зондов и передачей данных в режиме реального времени. Такие данные могут составить основу для развития индикаторного комплекса слежения за угрозами землетрясений в центральной части Байкальской рифтовой системы с выходом на полноценную экспертную оценку их времени.

Заключение

Время землетрясения определяется вхождением активных разломов центральной части Байкальской рифтовой системы в метастабильное (предсейсмическое) состояние в ходе развития полного сейсмогеодинамического цикла. Исходя из роли потоков флюидов-восстановителей как индикатора дегазации коры, сопутствующей подготовке и реализации сейсмогенных деформаций, в определении времени землетрясений Байкало-Хубсугульской активизации учитываются:

1) снижение атмосферного давления, 2) вхождение в режим согласования и рассогласования ОВП разных станций и 3) общее снижение ОВП на станциях полигона.

В настоящее время первичный сигнал об опасном сейсмическом состоянии территории обеспечивается определением ОВП в подземных водах Култукского полигона с помощью портативных датчиков «Нанпа» и «Эксперт». Полученные результаты измерений во время землетрясений Байкало-Хубсугульской активизации достаточны для обоснования выбора места для установки оборудования непрерывных измерений ОВП. Одна станция электрохимических наблюдений должна располагаться на торцовой Култукской тектонической ступени Южно-Байкальской впадины, другая – в зоне Обручевского разлома.

Благодарности

Состав воды анализируется на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500se в ЦКП «Ультрамикрoанализ» (ЛИН СО РАН, г. Иркутск). Методические подходы к анализу подземных вод разработаны при выполнении рамках госзадания ИЗК СО РАН на 2021-2025 гг. «Современная геодинамика,

механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии» (FWEF-2021-0009). В работе используются данные о землетрясениях, полученные на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны, и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Литература

- Ильясова А.М., Снопков С.В. Косейсмические вариации термофильного элемента Si подземных вод западного побережья оз. Байкал // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 72–105. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.72>
- Карта эпицентров землетрясений. Иркутск: Байкальский филиал Федерального исследовательского центра Единая геофизическая служба РАН, 2023. <http://www.seis-bykl.ru>
- Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. Издание второе, дополненное // М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. 672 с.
- Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А. Разработка Култукского сейсмопрогностического полигона: вариации ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, № 4. С. 519–554.
- Ребецкий Ю.Л. Состояние и проблемы теории прогноза землетрясений. Анализ основ с позиции детерминированного подхода // Геофизический журнал. 2007. Т. 29, № 4. С. 92–110.
- Ребецкий Ю.Л. Современное состояние теорий прогноза землетрясений. Результаты оценки природных напряжений и новая модель очага землетрясений // Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 2023. 37 с. <https://www.geokniga.org/books/6034>
- Ружич В.В. О среднесрочном прогнозе землетрясений в Прибайкалье // Геофизические исследования в Восточной Сибири на рубеже XXI века. Новосибирск: Наука, СИФ, 1996. С. 143–147.
- Ружич В.В. Сейсмотектоническая деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны // Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 144 с.
- 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., Быстринское землетрясение в Южном Прибайкалье (21.09.2020 г., Mw=5.4): основные параметры, признаки подготовки и сопровождающие эффекты // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 5. С. 727–743.
- Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений // М.: Наука, 1993. 310 с.
- Чебыкин Е.П., Гольдберг Е.Л., Куликова Н.С., Жученко Н.А., Степанова О.Г., Малопевная Ю.А. Метод определения изотопного состава аутигенного урана в донных отложениях озера Байкал // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 6. С. 604–616.
- Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Снопков С.В., Рассказов С.В. Сигналы ртути подземных вод Култукского полигона во время подготовки и реализации Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации 2020–2021 гг. // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 1. С. 7–9. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2022.1.7>
- Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В. Первые результаты мониторинга $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // Доклады академии наук. 2015. Т. 460, № 4. С. 464–467.
- Чебыкин Е.П., Сороковикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В., Грачёв М.А. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20, № 5. С. 613–631.
- Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 6. С. 936–937.
- Allen R.M., Melgar D. Earthquake early warning: advances, scientific challenges, and societal needs // Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 2019. V. 47. P. 361–388. doi: 10.1146/annurev-earth-053018-060457

- Auclair S., Gehl P., Delatre M. Needs and opportunities for seismic early warning prior to aftershocks for search and rescue teams: an indepth analysis of practitioners' perceptions // *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 2021. V. 65. P. 102545. doi: 10.1016/j.ijdr.2021.102545
- Basher R., Page J., Woo J., Davies M.L., Synolakis C.E., Farnsworth, A.F., et al. Global early warning systems for natural hazards: systematic and people-centred // *Philos. Transac. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2006. V. 364. P. 2167–2182. doi: 10.1098/rsta.2006.1819
- Becker J.S., Potter S.H., Prasanna R., Tan M.L., Payne B.A., Holden C., et al. Scoping the potential for earthquake early warning in Aotearoa New Zealand: a sectoral analysis of perceived benefits and challenges // *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 2020a. V. 51. P. 1–16. doi: 10.1016/j.ijdr.2020.101765
- Bindi D., Boxberger T., Orunbaev S., Pilz M., Stankiewicz J., Pittore M., et al. On-site early-warning system for Bishkek (Kyrgyzstan) // *Ann. Geophysics.* 2015. V. 58. P. 1–8. doi: 10.4401/ag-6664
- Böse M., Heaton T.H. Probabilistic prediction of rupture length, slip and seismic ground motions for an ongoing rupture: implications for early warning for large earthquakes // *Geophys. J. Int.* 2010. V. 183. P. 1014–1030. doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04774.x
- Bracale M., Colombelli S., Elia L., Karakostas V., Zollo A. Design, implementation and testing of a network-based earthquake early warning system in Greece // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 9. P. 667160. doi: 10.3389/feart.2021.667160
- Devi S., Sandeep, Kumar P., Monika, Joshi A. Modelling of 2016 Kumamoto earthquake by integrating site effect in semi-empirical technique // *Natural Hazards.* 2022. Vol. 111. P. 1931–1950. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05123-8>
- Fujinawa Y., Noda Y. Japan's earthquake early warning system on 11 March 2011: performance, shortcomings, and changes // *Earthquake Spectra.* 2013. V. 29. P. 3–25. doi: 10.1193/1.4000127
- Goltz J.D., Flores P.J. Real-time earthquake early warning and public policy: a report on Mexico City's sistema de alerta sismica // *Seismol. Res. Lett.* 1997. V. 68. P. 727–733. doi: 10.1785/gssrl.68.5.727
- Guo K., Wen R., Lu D. Survey and analysis of social effects of earthquake early warning system's application // *J Nat. Disast.* 2012. V. 21. P. 108–115.
- Iervolino I., Manfredi G., Cosenza E. Earthquake early warning and engineering application prospects // *Earthquake Early Warning Systems.* 2007. P. 233–247. doi: 10.1007/978-3-540-72241-0_12
- Freund F. Earthquake forewarning – A multidisciplinary challenge from the ground up to space // *Acta Geophysica.* 2013. V. 61, no. 4. P. 775–807. DOI: 10.2478/s11600-013-0130-4
- Kamigaichi O., Saito M., Doi K., Matsumori T., Tsukada S., Takeda K., et al. Earthquake early warning in Japan: Warning the general public and future prospects // *Seismol. Res. Lett.* 2009. V. 80. P. 717–726. doi: 10.1785/gssrl.80.5.717
- Kodera Y., Hayashimoto N., Moriwaki K., Noguchi K., Saito J., Akutagawa J., et al. First-year performance of a nationwide earthquake early warning system using a wavefield-based ground-motion prediction algorithm in Japan // *Seismol. Res. Lett.* 2020. V. 91. P. 826–834. doi: 10.1785/0220190263
- Kohler M.D., Cochran E.S., Given D., Guiwits S., Neuhauser D., Henson I., et al. Earthquake early warning shakealert system: west coast wide production prototype // *Seismol. Res. Lett.* 2018. V. 89. P. 99–107. doi: 10.1785/0220170140
- Li J., Böse M., Feng Y. and Yang C. Real-time characterization of finite rupture and its implication for earthquake early warning: Application of FinDer to existing and planned stations in Southwest China // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 9. P. 699560. doi: 10.3389/feart.2021.699560
- Massin F., Clinton J. and Böse M. Status of earthquake early warning in Switzerland // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 9. P. 707654. doi: 10.3389/feart.2021.707654
- Minson S.E., Cochran E.S., Wu S., Noda S. A Framework for evaluating earthquake early warning for an infrastructure network: An idealized case study of a Northern California rail system // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 9. P. 620467. doi: 10.3389/feart.2021.620467
- Nanjo K.Z., Izutsu J., Orihara Y., Furuse N., Togo S., Nitta H., Okada T., Tanaka R., Kamogawa M., Nagao T. Seismicity prior to the 2016 Kumamoto earthquakes // *Earth, Planets, and Space.* 2016. Vol. 68. P. 187. DOI 10.1186/s40623-016-0558-2
- Nanjo K.Z., Izutsu J., Orihara Y., Kamogawa M. Changes in seismicity pattern due to the 2016 Kumamoto earthquake sequence and implications for improving the foreshock traffi-light system // *Tectonophysics.* 2022. Vol. 822. P. 229175. doi.org/10.1016/j.tecto.2021.229175

- Peng C., Jiang P., Ma Q., Wu P., Su J., Zheng Y., Yang J. Performance evaluation of an earthquake early warning system in the 2019–2020 M6.0 Changning, Sichuan, China, seismic sequence // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 9. P. 699941. doi: 10.3389/feart.2021.699941
- Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Bornyakov S.A., Chuvashova I.S. Change of seismic hazard levels in complete 12-year seismogeodynamic cycle of the South Baikal Basin: Results of hydroisotopic ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) monitoring // *Geology and Environment.* 2022. V. 2, No. 2. P. 7–21. doi.org/10.26516/2541-9641.2022.2.7
- Rasskazov S., Chuvashova I., Yasnygina T., Saranina E., Gerasimov N., Ailow Y., Sun Y.-M. Tectonic generation of pseudotachylytes and volcanic rocks: Deep-seated magma sources of crust-mantle transition in the Baikal Rift System, Southern Siberia // *Minerals.* 2021. V. 11, No. 5. P. 487.
- Rasskazov S., Ilyasova A., Bornyakov S., Chuvashova I., Chebykin E. Responses of a $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio in groundwater to earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia // *Front. Earth Sci.* 2020. V. 14, No. 4. P. 711–737. doi.org/10.1007/s11707-020-0821-5
- Sarlis N.V., Skordas E.S., Varotsos P.A., Nagao T., Kamogawa M., Uyeda S. Spatiotemporal variations of seismicity before major earthquakes in the Japanese area and their relation with the epicentral locations // *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 2014. P. 1–4. DOI: 10.1073/pnas.1422893112
- Schlesinger A., Kukovica J., Rosenberger A., Heesemann M., Pirenne B., Robinson J., Morley M. An earthquake early warning system for Southwestern British Columbia // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 9. P. 684084. doi: 10.3389/feart.2021.684084
- Sobolev G.A. Seismicity dynamics and earthquake predictability // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011. V. 11. P. 445–458. www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/445/2011/ doi:10.5194/nhess-11-445-2011
- Stefansson R. Advances in earthquake prediction research and risk mitigation // Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011. 265 p.
- Strauch W., Talavera E., Tenorio V., Ramírez J., Argüello G., Herrera M., et al. Toward an earthquake and tsunami monitoring and early warning system for Nicaragua and central America // *Seismol. Res. Lett.* 2018. V. 89. P. 399–406. doi: 10.1785/0220170193
- Suárez G. The seismic early warning system of Mexico (SASMEX): A Retrospective view and future challenges // *Front. Earth Sci.* 2022. V. 10. P. 827236. doi: 10.3389/feart.2022.827236
- Suzuki K. Creation of a next-generation Early Warning Information System for effective earthquake and tsunami crisis response navigators // *Problems of geodynamics and geocology of intracontinental orogens. VIII International Symposium, June 28 – July 2, Bishkek.* 2021.
- Tan M.L., Becker J.S., Stock K., Prasanna R., Brown A., Kenney C., Cui A., Lambie E. Understanding the social aspects of earthquake early warning: A literature review // *Front. Commun.* 2022. V. 7. P. 939242. doi: 10.3389/fcomm.2022.939242
- Tikhonov I.N., Rodkin M.V. Current state of art in earthquake prediction, typical precursors and experience in earthquake forecasting at Sakhalin Island and surrounding areas, Earthquake Research and Analysis – Statistical Studies, Observations and Planning // Dr Sebastiano D'Amico (Ed.). ISBN: 978-953-51-0134-5, InTech, 2012. P. 73–78.
- Valbonesi C. Between necessity and legal responsibility: the development of EEWS in Italy and its international framework // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 9. P. 685153. doi: 10.3389/feart.2021.685153
- Velazquez O., Pescaroli G., Cremen G., Galasso C. A Review of the Technical and Socio-Organizational Components of Earthquake Early Warning Systems // *Front. Earth Sci.* 2020. V. 8. P. 533498. doi: 10.3389/feart.2020.533498
- Zavyalov A.D. Medium-term prediction of earthquakes from a set of criteria: Principles, methods, and implementation // *Russian Journal of Earth Sciences.* 2005. V. 7, No. 1. P. 51–73.
- Zhang M., Qiao X., Seyler B.C., Di B., Wang Y., Tang Y. Brief communication: Effective earthquake early warning systems: appropriate messaging and public awareness roles // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2021. V. 21. P. 3243–3250. https://doi.org/10.5194/nhess-21-3243-2021
- Zhu J., Li S., Song J., Wang Y. Magnitude estimation for earthquake early warning using a Deep Convolutional Neural Network // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 9. P. 653226. doi: 10.3389/feart.2021.653226
- Zuccolo E., Cremen G., Galasso C. Comparing the performance of regional earthquake early warning algorithms in Europe // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 9. P. 686272. doi: 10.3389/feart.2021.686272

References

- Chebykin E.P., Goldberg E.L., Kulikova N.S., Zhuchenko N.A., Stepanova O.G., Malopevnaya Yu.A. Method for determining the isotopic composition of authigenic uranium in the bottom sediments of Lake Baikal // *Geology and Geophysics*. 2007. V. 48, No. 6. P. 604–616. (in Russian)
- Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Rasskazov S.V. Groundwater mercury signals from the Kultuk polygon during the preparation and implementation of the Baikal-Khubsugul seismic activation in 2020–2021 // *Geology and Environment*. 2022. V. 2, No. 1. P. 7–9. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2022.1.7> (in Russian)
- Chebykin E.P., Rasskazov S.V., Vodneva E.N., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V. First results of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ monitoring in waters from active faults on the western coast of Southern Baikal // *Reports of the Academy of Sciences*. 2015. V. 460, No. 4. P. 464–467. (in Russian)
- Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Vodneva E.N., Rasskazov S.V., Khodger T.V., Grachev M.A. The current state of the waters of the Selenga river on the territory of Russia on the main components and trace elements // *Chemistry for sustainable development*. 2012. V. 20, No. 5. P. 613–631. (in Russian)
- Chipizubov A.V., Smekalin O.P. Paleoseis-modislocations and related paleoearthquakes at the Main Sayan Fault zone // *Russian Geology and Geophysics*. 1999. V. 40, No. 6. P. 936–937. (in Russian)
- Ilyasova A.M., Snopkov S.V. Coseismic variations of thermophilic element Si in groundwaters from the southwestern coast of Lake Baikal // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 72–105. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.72> (in Russian)
- Map of earthquake epicenters. Irkutsk: Baikal Branch of the Federal Research Center Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, 2023. <http://www.seis-bykl.ru> (in Russian)
- Krainov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M., Geochemistry of groundwater. Theoretical, applied and environmental aspects. Second edition, supplemented // Moscow: TsentrLitNefteGaz, 2012. 672 p. (in Russian)
- Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Vodneva E.N., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V., Chechel'nitsky V.V., Gileva N.A. Creating the Kultuk polygon for earthquake prediction: variations of ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in groundwater from active faults at the western shore of Lake Baikal // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2015. V. 6, No. 4. P. 519–553. doi:10.5800/GT-2015-6-4-0192. (in Russian)
- Rebetsky Yu.L. The current state of the theories of earthquake prediction. Results of assessment of natural stresses and a new model of the earthquake source // O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, 2023. 37 p. <https://www.geokniga.org/books/6034> (in Russian)
- Ruzhich V.V. On the medium-term forecast of earthquakes in the Baikal region // *Geophysical research in Eastern Siberia at the turn of the XXI century*. Novosibirsk: Nauka, SIF, 1996. P. 143–147. (in Russian)
- Ruzhich V.V. Seismotectonic Destruction of the Earth's Crust in the Baikal Rift Zone // Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 1997. 144 p. (in Russian)
- 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*. 2020. V. 6, No. 5. P. 727–743. (in Russian)
- Sobolev G.A. Fundamentals of Earthquake Prediction // Nauka, Moscow, 1993. 310 p. (in Russian)
- Allen R.M., Melgar D. Earthquake early warning: advances, scientific challenges, and societal needs // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 2019. V. 47. P. 361–388. doi: 10.1146/annurev-earth-053018-060457
- Auclair S., Gehl P., Delatre M. Needs and opportunities for seismic early warning prior to aftershocks for search and rescue teams: an indepth analysis of practitioners' perceptions // *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 2021. V. 65. P. 102545. doi: 10.1016/j.ijdr.2021.102545
- Basher R., Page J., Woo J., Davies M.L., Synolakis C.E., Farnsworth, A.F., et al. Global early warning systems for natural hazards: systematic and people-centred // *Philos. Transac. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2006. V. 364. P. 2167–2182. doi: 10.1098/rsta.2006.1819
- Becker J.S., Potter S.H., Prasanna R., Tan M.L., Payne B.A., Holden C., et al. Scoping the potential

for earthquake early warning in Aotearoa New Zealand: a sectoral analysis of perceived benefits and challenges // *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 2020a. V. 51. P. 1–16. doi: 10.1016/j.ijdr.2020.101765

Bindi D., Boxberger T., Orunbaev S., Pilz M., Stankiewicz J., Pittore M., et al. On-site early-warning system for Bishkek (Kyrgyzstan) // *Ann. Geophysics.* 2015. V. 58. P. 1–8. doi: 10.4401/ag-6664

Böse M., Heaton T.H. Probabilistic prediction of rupture length, slip and seismic ground motions for an ongoing rupture: implications for early warning for large earthquakes // *Geophys. J. Int.* 2010. V. 183. P. 1014–1030. doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04774.x

Bracale M., Colombelli S., Elia L., Karakostas V., Zollo A. Design, implementation and testing of a network-based earthquake early warning system in Greece // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 9. P. 667160. doi: 10.3389/feart.2021.667160

Devi S., Sandeep, Kumar P., Monika, Joshi A. Modelling of 2016 Kumamoto earthquake by integrating site effect in semi-empirical technique // *Natural Hazards.* 2022. Vol. 111. P. 1931–1950. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05123-8>

Fujinawa Y., Noda Y. Japan's earthquake early warning system on 11 March 2011: performance, shortcomings, and changes // *Earthquake Spectra.* 2013. V. 29. P. 3–25. doi: 10.1193/1.4000127

Goltz J.D., Flores P.J. Real-time earthquake early warning and public policy: a report on Mexico City's sistema de alerta sismica // *Seismol. Res. Lett.* 1997. V. 68. P. 727–733. doi: 10.1785/gssrl.68.5.727

Guo K., Wen R., Lu D. Survey and analysis of social effects of earthquake early warning system's application // *J Nat. Disast.* 2012. V. 21. P. 108–115.

Iervolino I., Manfredi G., Cosenza E. Earthquake early warning and engineering application prospects // *Earthquake Early Warning Systems.* 2007. P. 233–247. doi: 10.1007/978-3-540-72241-0_12

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

Kamigaichi O., Saito M., Doi K., Matsumori T., Tsukada S., Takeda K., et al. Earthquake early warning in Japan: Warning the general public and future prospects // *Seismol. Res. Lett.* 2009. V. 80. P. 717–726. doi: 10.1785/gssrl.80.5.717

Kodera Y., Hayashimoto N., Moriwaki K., Noguchi K., Saito J., Akutagawa J., et al. First-year performance of a nationwide earthquake early warning system using a wavefield-based ground-motion prediction algorithm in Japan // *Seismol. Res. Lett.* 2020. V. 91. P. 826–834. doi: 10.1785/0220190263

Kohler M.D., Cochran E.S., Given D., Guiwits S., Neuhauser D., Henson I., et al. Earthquake early warning shakealert system: west coast wide production prototype // *Seismol. Res. Lett.* 2018. V. 89. P. 99–107. doi: 10.1785/0220170140

Li J., Böse M., Feng Y. and Yang C. Real-time characterization of finite rupture and its implication for earthquake early warning: Application of FinDer to existing and planned stations in Southwest China // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 9. P. 699560. doi: 10.3389/feart.2021.699560

Massin F., Clinton J. and Böse M. Status of earthquake early warning in Switzerland // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 9. P. 707654. doi: 10.3389/feart.2021.707654

Minson S.E., Cochran E.S., Wu S., Noda S. A Framework for evaluating earthquake early warning for an infrastructure network: An idealized case study of a Northern California rail system // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 9. P. 620467. doi: 10.3389/feart.2021.620467

Nanjo K.Z., Izutsu J., Orihara Y., Furuse N., Togo S., Nitta H., Okada T., Tanaka R., Kamogawa M., Nagao T. Seismicity prior to the 2016 Kumamoto earthquakes // *Earth, Planets, and Space.* 2016. Vol. 68. P. 187. DOI 10.1186/s40623-016-0558-2

Nanjo K.Z., Izutsu J., Orihara Y., Kamogawa M. Changes in seismicity pattern due to the 2016 Kumamoto earthquake sequence and implications for improving the foreshock traffic-light system // *Tectonophysics.* 2022. Vol. 822. P. 229175. doi.org/10.1016/j.tecto.2021.229175

Peng C., Jiang P., Ma Q., Wu P., Su J., Zheng Y., Yang J. Performance evaluation of an earthquake early warning system in the 2019–2020 M6.0 Changning, Sichuan, China, seismic sequence // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 9. P. 699941. doi: 10.3389/feart.2021.699941

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Bornyakov S.A., Chuvashova I.S. Change of seismic hazard levels in complete 12-year seismogeodynamic cycle of the South Baikal Basin: Results of hydroisotopic ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) monitoring // *Geology and Environment.* 2022. V. 2, No. 2. P. 7–21. doi.org/10.26516/2541-9641.2022.2.7

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

Rasskazov S., Piyasova A., Bornyakov S., Chuvashova I., Chebykin E. Responses of a $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio in groundwater to earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia // *Front. Earth Sci.* 2020. V. 14, No. 4. P. 711–737. doi.org/10.1007/s11707-020-0821-5

Sarlis N.V., Skordas E.S., Varotsos P.A., Nagao T., Kamogawa M., Uyeda S. Spatiotemporal variations of seismicity before major earthquakes in the Japanese area and their relation with the epicentral locations // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014. P. 1–4. DOI: 10.1073/pnas.1422893112

Schlesinger A., Kukovica J., Rosenberger A., Heesemann M., Pirenne B., Robinson J., Morley M. An earthquake early warning system for Southwestern British Columbia // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 9. P. 684084. doi: 10.3389/feart.2021.684084

Sobolev G.A. Seismicity dynamics and earthquake predictability // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011. V. 11. P. 445–458. www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/445/2011/ doi:10.5194/nhess-11-445-2011

Stefánsson R. Advances in earthquake prediction research and risk mitigation // Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011. 265 p.

Strauch W., Talavera E., Tenorio V., Ramírez J., Argüello G., Herrera M., et al. Toward an earthquake and tsunami monitoring and early warning system for Nicaragua and central America // *Seismol. Res. Lett.* 2018. V. 89. P. 399–406. doi: 10.1785/0220170193

Suárez G. The seismic early warning system of Mexico (SASMEX): A Retrospective view and future challenges // *Front. Earth Sci.* 2022. V. 10. P. 827236. doi: 10.3389/feart.2022.827236

Suzuki K. Creation of a next-generation Early Warning Information System for effective earthquake and tsunami crisis response navigators // *Problems of geodynamics and geocology of in-*

tracontinental orogens. VIII International Symposium, June 28 – July 2, Bishkek. 2021.

Tan M.L., Becker J.S., Stock K., Prasanna R., Brown A., Kenney C., Cui A., Lambie E. Understanding the social aspects of earthquake early warning: A literature review // *Front. Commun.* 2022. V. 7. P. 939242. doi: 10.3389/fcomm.2022.939242

Tikhonov I.N., Rodkin M.V. Current state of art in earthquake prediction, typical precursors and experience in earthquake forecasting at Sakhalin Island and surrounding areas, Earthquake Research and Analysis – Statistical Studies, Observations and Planning // Dr Sebastiano D'Amico (Ed.). ISBN: 978-953-51-0134-5, InTech, 2012. P. 73–78.

Valbonesi C. Between necessity and legal responsibility: the development of EEWs in Italy and its international framework // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 9. P. 685153. doi: 10.3389/feart.2021.685153

Velazquez O., Pescaroli G., Cremen G., Galasso C. A Review of the Technical and Socio-Organizational Components of Earthquake Early Warning Systems // *Front. Earth Sci.* 2020. V. 8. P. 533498. doi: 10.3389/feart.2020.533498

Zavyalov A.D. Medium-term prediction of earthquakes from a set of criteria: Principles, methods, and implementation // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2005. V. 7, No. 1. P. 51–73.

Zhang M., Qiao X., Seyler B.C., Di B., Wang Y., Tang Y. Brief communication: Effective earthquake early warning systems: appropriate messaging and public awareness roles // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2021. V. 21. P. 3243–3250. https://doi.org/10.5194/nhess-21-3243-2021

Zhu J., Li S., Song J., Wang Y. Magnitude estimation for earthquake early warning using a Deep Convolutional Neural Network // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 9. P. 653226. doi: 10.3389/feart.2021.653226

Zuccolo E., Cremen G., Galasso C. Comparing the performance of regional earthquake early warning algorithms in Europe // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 9. P. 686272. doi: 10.3389/feart.2021.686272

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

*Институт земной коры СО РАН,
зав. лабораторией,
664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет, геологический факультет,
зав. кафедрой,
email: rassk@crust.irk.ru.*

Rasskazov Sergei Vasilyevich,
*Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor,
664033 Irkutsk, Lermontov Str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Head of Laboratory,
664003 Irkutsk, Lenin str., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Head of Chair,
email: rassk@crust.irk.ru.*

Снопков Сергей Викторович,
*кандидат геолого-минералогических наук,
664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет, геологический факультет,
доцент,
664074, г. Иркутск, ул. Курчатова, 3,
Сибирская школа геонаук, Иркутский национальный исследовательский технический университет,
ведущий научный сотрудник,
email: snopkov_serg@mail.ru.*

Snopkov Sergey Viktorovich,
*Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
664003 Irkutsk, Lenin str., 3, Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Assistant Professor,
664074, Irkutsk, Kurchatov str., 3,
Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University,
Leading Researcher,
email: snopkov_serg@mail.ru.*

Борняков Сергей Александрович,
*кандидат геолого-минералогических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
ведущий научный сотрудник,
email: bornyak@crust.irk.ru.*

Bornyakov Sergey Alexandrovich,
*candidate of geological and mineralogical sciences,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Leading Researcher,
email: bornyak@crust.irk.ru.*

Правила для авторов

В журнале «Геология и окружающая среда» публикуются материалы научно-образовательного направления, отражающие теоретические, методические и практические результаты научной деятельности молодых и зрелых геологов и географов — научных сотрудников, преподавателей, аспирантов, студентов магистерской и бакалаврской подготовки. Кроме научных статей, в журнале помещаются рецензии и отзывы на монографии, учебники, учебные пособия, сборники научных трудов. Важное место отводится тематическим обзорам и событиям научно-учебной деятельности вузов по профилю издания. Важной задачей журнала является опубликование научных статей (в авторстве или соавторстве) студентов, аспирантов и молодых научных сотрудников.

Ответственность за достоверность изложения фактов в публикуемых материалах, плагиат (вольный или невольный) несут авторы. Все заимствованные в рукописи элементы (графика, текст, первичные данные) должны обязательно сопровождаться соответствующими корректными ссылками или разрешением правообладателя.

Мнение редколлегии может не совпадать с мнением авторов. Журнал является рецензируемым. Опубликование рукописей бесплатное. Гонорар авторам не выплачивается.

Рукописи статей присылаются на электронные адреса редакции или ответственного секретаря: kaf-dinamgeol@mail.ru или igrug@mail.ru. Работа должна быть полностью подготовлена для печати. Редакция оставляет за собой право вносить правки по согласованию с авторами. Приемка работ в рукописном или бумажном виде, требующем технического оформления, возможна за дополнительную плату с заключением договора.

Максимальный объем научной статьи — 1.5 печатных листа или 24 страницы с нижеследующими параметрами. На первой странице указывается УДК; название статьи; фамилия и инициалы авторов, название учреждения; аннотация и ключевые слова на русском языке. Аннотация должна содержать не более 15 строк, количество ключевых слов — не более 8.

Шрифт основного текста — Times New Roman, размер 14, межстрочный интервал 1, поля по 2.5 см. Представлять работы необходимо в формате текстового редактора Word или RTF. Более подробная информация об авторах дается в конце статьи (см. примеры в последнем выпуске).

В тексте статьи не допускаются сокращения (кроме стандартных); сокращенные названия поясняются при первом упоминании; все местные географические названия должны быть проверены. Применяется международная система единиц измерения СИ. В расчетных работах необходимо указывать авторов используемых программ.

Не допускается использовать при наборе:

- более одного пробела;
- формирование красной строки с помощью пробелов;
- автонумерацию (нумерованные и маркированные списки) в главах и абзацах;
- принудительные переносы.

Вставленные в работу рисунки, необходимо дублировать отдельными файлами рисунков размером не менее 10x15 см и разрешением не менее 300 dpi, в следующих графических форматах: .jpg, .crt и .cdr. Количество рисунков в статье не должно превышать 10. Рисунки должны иметь все необходимые обозначения и подписи.

Ссылки на рисунки приводятся в круглых скобках в формате: (рис. 1) или (рис. 1, 2) или (рис. 1–4).

Если рисунок единственный в статье, то он не нумеруется, а слово «рис.» в подписи к нему не пишется. Ссылка на него — рисунок.

При представлении материалов по конкретным объектам, статья должна содержать обзорную карту или схему, на которой показан район исследований. На картах необходимо указывать географические координаты, а на рисунках — ориентировку и линейный масштаб. Обозначения сторон света, широт и долгот должны быть указаны на русском языке.

Вставленные в работу таблицы книжного формата, должны иметь ширину не более 16 см, альбомного — 20 см; табличный шрифт Times New Roman, размер 11, межстрочный интервал 1, иметь сквозную порядковую нумерацию в пределах статьи, ссылки на таблицы приводятся в круглых скобках в формате: (табл. 1) или (табл. 1, 2) или (табл. 1–4). Если таблица единственная в статье, то она не нумеруется, а слово «Таблица» в названии не пишется. Ссылка на нее — таблица.

Перед тем, как вставить в статью диаграммы Excel и Word, их необходимо преобразовывать в рисунок 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 косо́го 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 литературы, оформленный в соответствии с правилами библиографического описания литературных источников. Цитируемая литература приводится в конце статьи под заголовком «Литература» в алфавитном порядке: сначала русские работы, затем иностранные.

При ссылках на литературу в тексте работы приводятся фамилия автора с инициалами (двух авторов или первого автора в сочетании с «и др.»), если количество авторов три и более) и год публикации в круглых скобках, например: «как сообщает А.И. Петров (2016)». Если автор публикации в тексте не указывается, то ссылка должна иметь следующий вид: «по данным (Петров, 2016) это...». Ссылки на публикации одного и того же автора, относящиеся к одному году, обозначаются буквенными индексами: (Петров, 2016а, 2016б, 2016в). При ссылке на работы двух и более авторов фамилии указываются в годично-алфавитном порядке: (Белов и др., 2017; Сидоров, 2016; Natton, 2014; Peyerl et al., 2018) (см. примеры в последнем выпуске).

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) / М.А. Федонкин // Проблемы геологии и минералогии.– Сыктывкар : Геопринт, 2016.– С. 331–350.

Марков А.В. Происхождение эукариот как результат интеграционных процессов в микробном сообществе [Электронный ресурс] / А.В. Марков, А.М. Куликов // Доклад в Институте биологии развития 29 января, 2019.– Режим доступа: http://evolbiol.ru/dok_ibr2009.htm. (дата обращения: 23.03.2023). Допускаются ссылки на открытые отчеты геологических фондов.

Требуется акт экспертизы и официальное направление от организации на опубликование статьи в журнале Геология и окружающая среда на бланке организации (в электронном виде в формате JPEG). Ссылки на неопубликованные материалы других авторов и организаций не допускаются.

На отдельной странице в редакцию присылается авторская справка, содержащая фамилию, имя, отчество, ученую степень, звание, должность, место работы, почтовый адрес, телефон, факс и адрес электронной почты каждого автора. Необходимо указать фамилию автора, ответственного за прохождение статьи в редакции. Желательно указать трех специалистов, работающих по тематике статьи, как возможных рецензентов. Решение по вопросам рецензирования рукописей принимаются редколлегией.

Рукописи, оформленные без соблюдения настоящих правил, редколлегией журнала не рассматриваются.

Почтовый адрес редакции: 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, д. 3, Геологический факультет Иркутского государственного университета.

Электронный адрес редакции: kaf-dinamgeol@mail.ru.

Редколлегия журнала