
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 ощутимое 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 БРЗ 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 БРЗ, 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., Bornyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V., Chechel'nitsky 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., 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., Snopkov S.V., Bornyakov 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 (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. (in Russian)
- Semenov R.M., Lopatin M.N., Chechel'nitsky 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.
