

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.

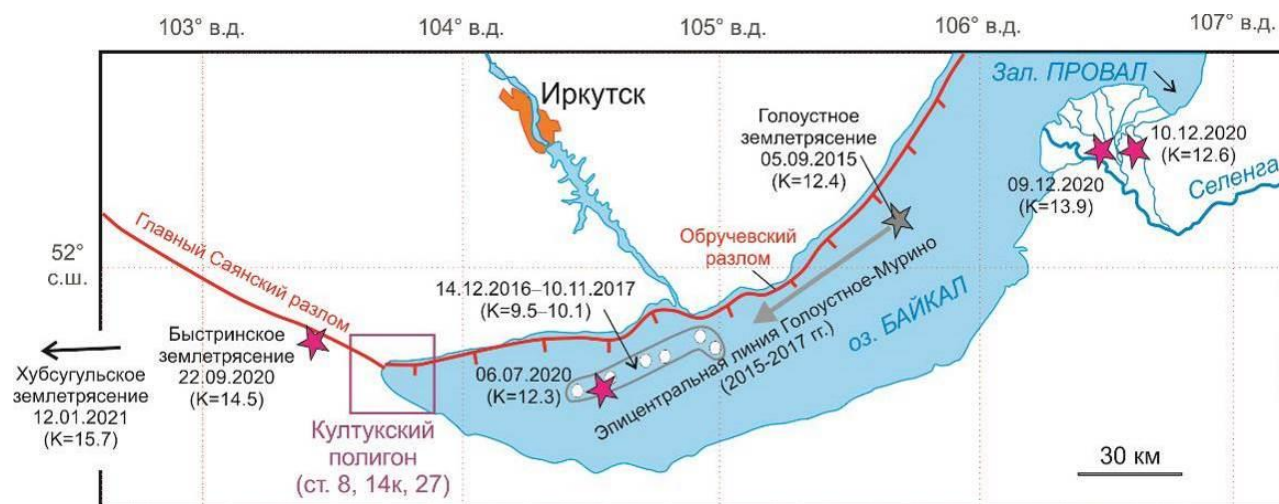


Рис. 2. Пространственно-временные соотношения сильных землетрясений на Южном Байкале в 2020 г. и Хубсугульского землетрясения в начале 2021 г. в сопоставлении с предшествующими сейсмическими событиями 2015–2017 гг.

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).

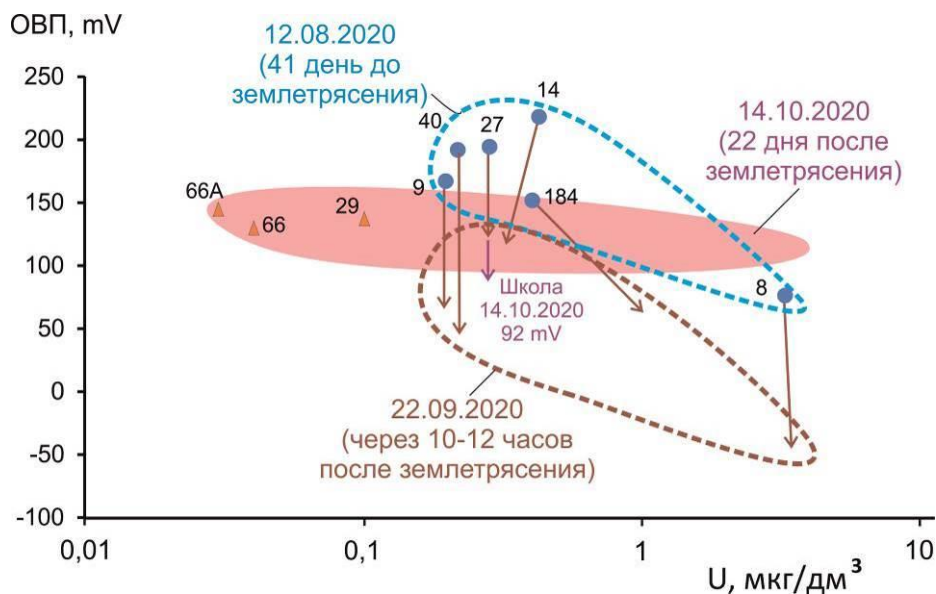


Рис. 4. Диаграмма ОВП – U, показывающая резкое снижение ОВП всех станций Култукского полигона при Быстринском землетрясении.

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).

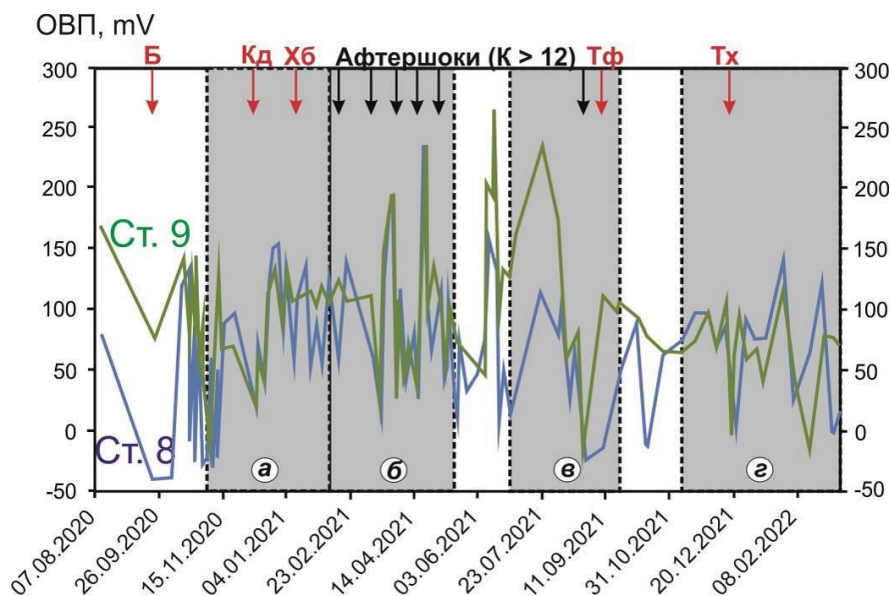


Рис. 5. Диаграмма временных вариаций ОВП в подземных водах ст. 8 и 9. Серыми полосами на диаграмме выделяются участки с обозначением буквами в кружках а, б, в и г, детализированные на рис. 6. Землетрясения: Б – Быстринское, Кд – Кударинское, Хб – Хубсугульское, Тф – Тофаларское, Тх – Танхойское.

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, б, в and г, 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.

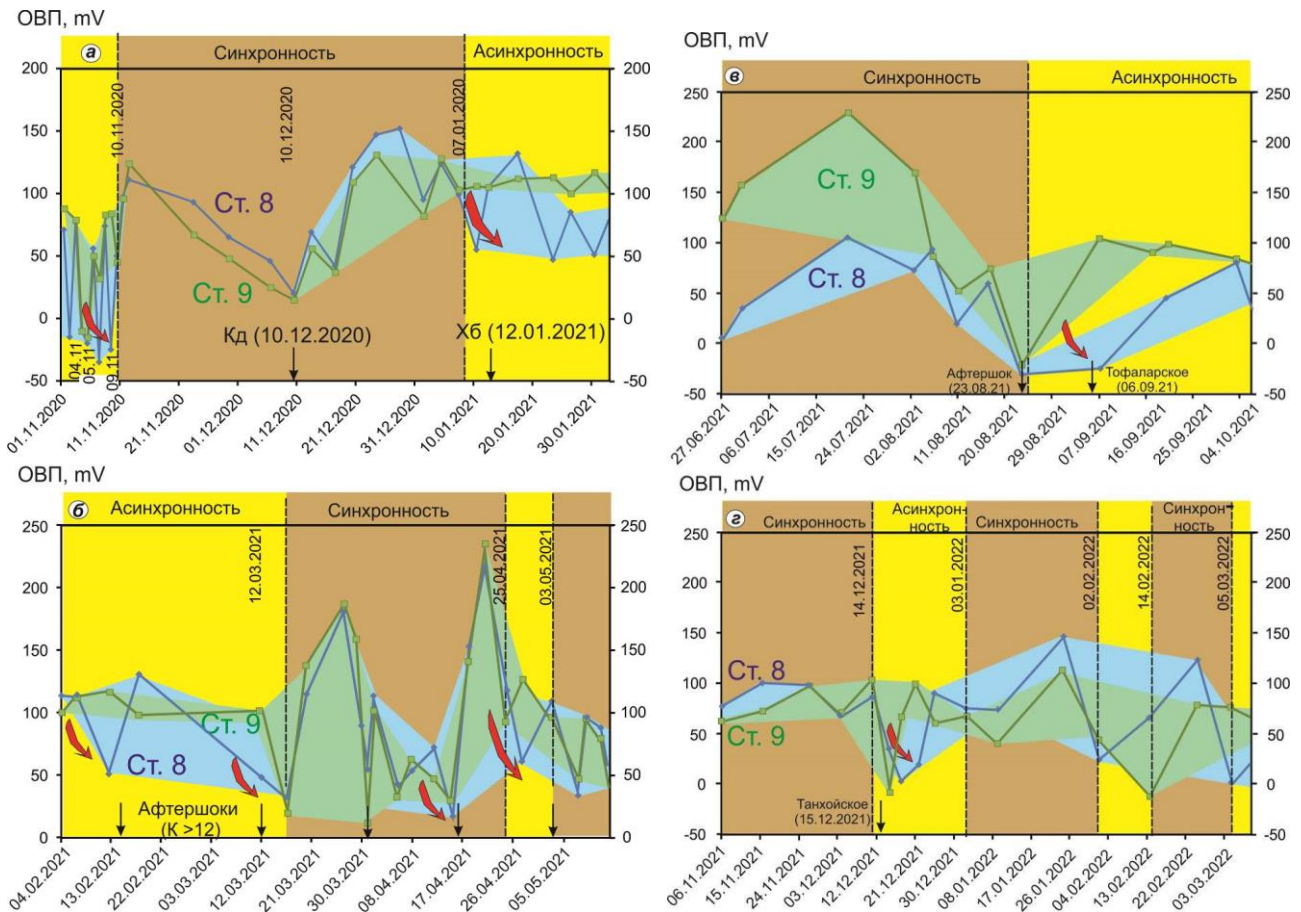


Рис. 6. Диаграммы временных вариаций ОВП ст. 8 и 9. Диаграммы с обозначением буквами в кружках а, б, в и г объединяются между собой на рис. 5 и выделены на нем серым полосами.

Fig. 6. Diagrams of temporal variations of ORP st. 8 and 9. The diagrams marked by letters in circles а, б, в, and г 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.

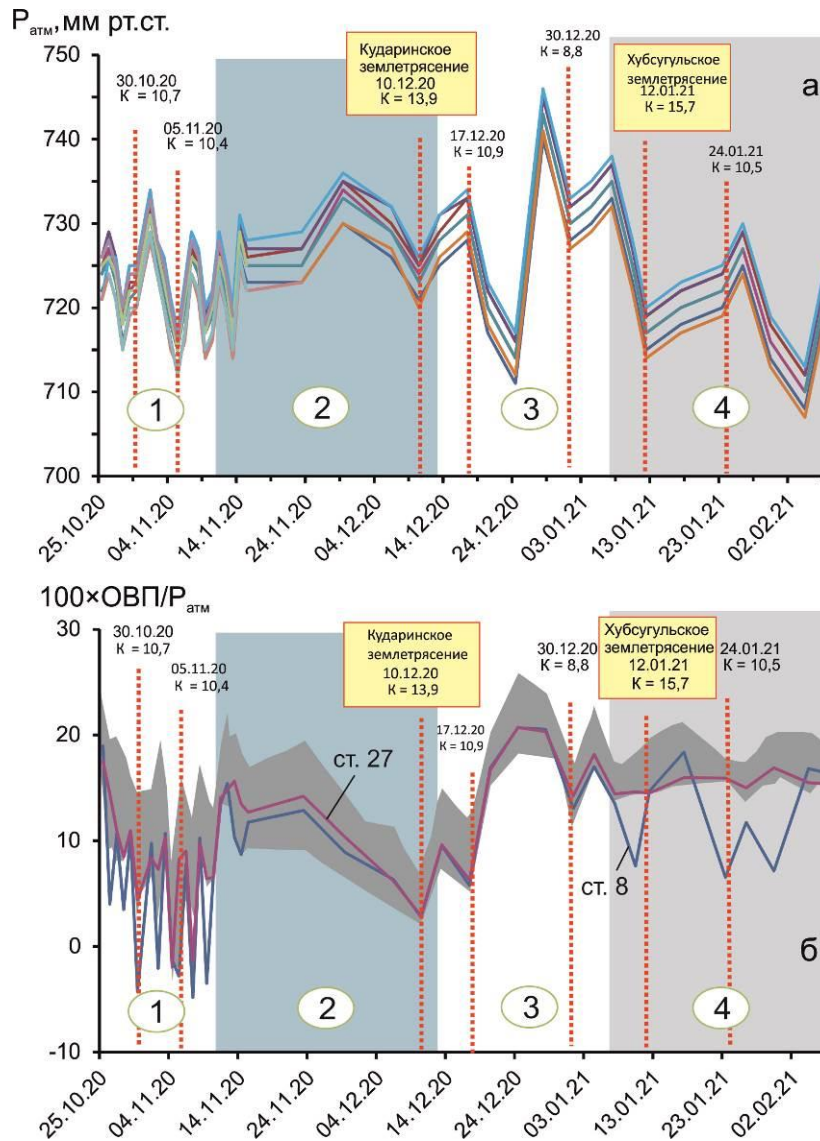


Рис. 7. Диаграммы соотношения временных вариаций $P_{\text{атм}}$ (а) и отношения $100 \times \text{ОВП} / P_{\text{атм}}$ (б). Цифры 1–4 в кружках обозначают интервалы согласующихся и несогласующихся вариаций ОВП ст. 8 и 27. На панели а линиями разного цвета обозначается давление, измеренное непосредственно 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 mV) 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.

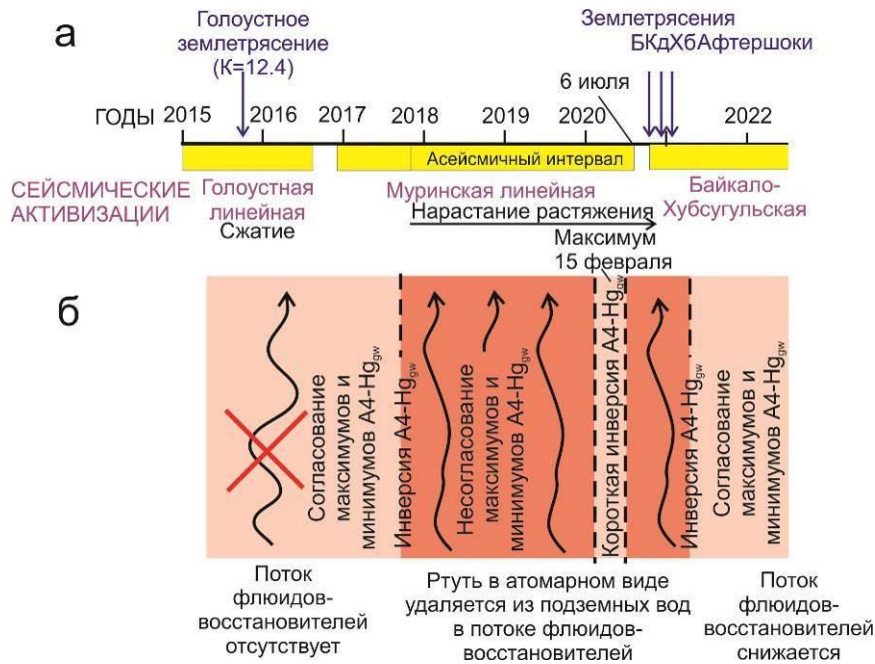


Рис. 8. Схема временных соотношений концентрации ртути в подземной воде ст. 8, ОВП и сейсмических событий Байкало-Хубсугульской активизации (Чебыкин и др., 2022; Rasskazov et al., 2022). БКдХб – Быстринское, Кударинское и Хубсугульское землетрясения.

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).

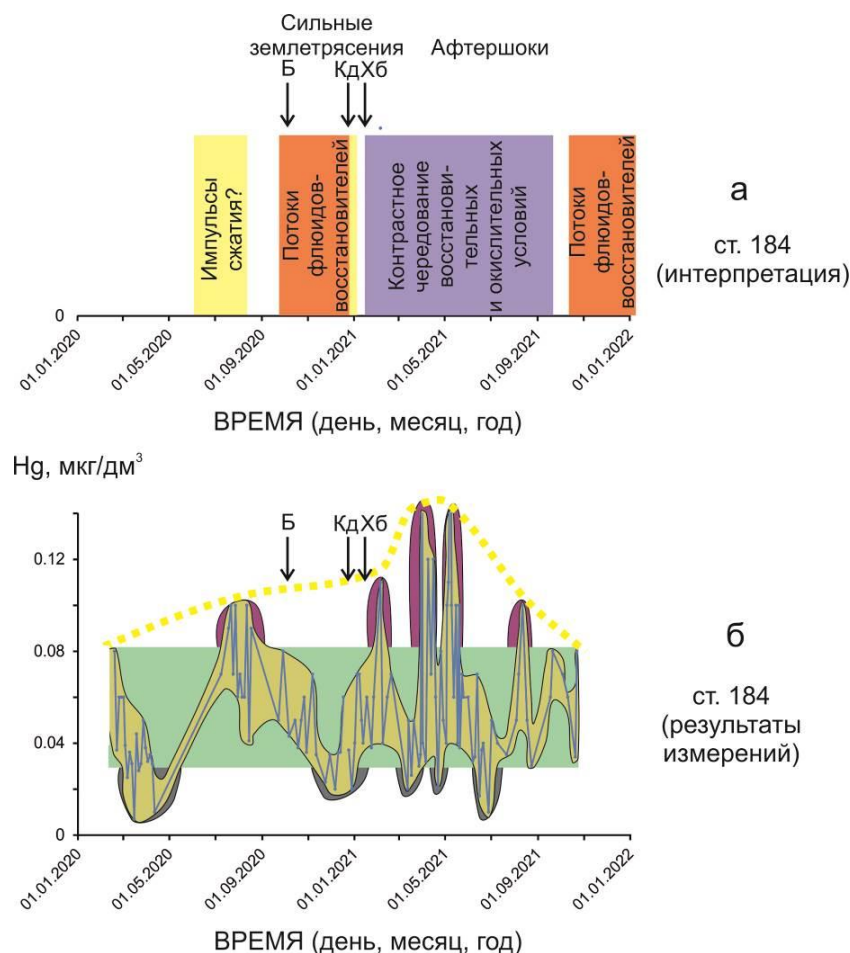


Рис. 9. Схема интерпретации (а) диаграммы временных вариаций Hg_{gw} (б) в подземных водах ст. 184.

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.

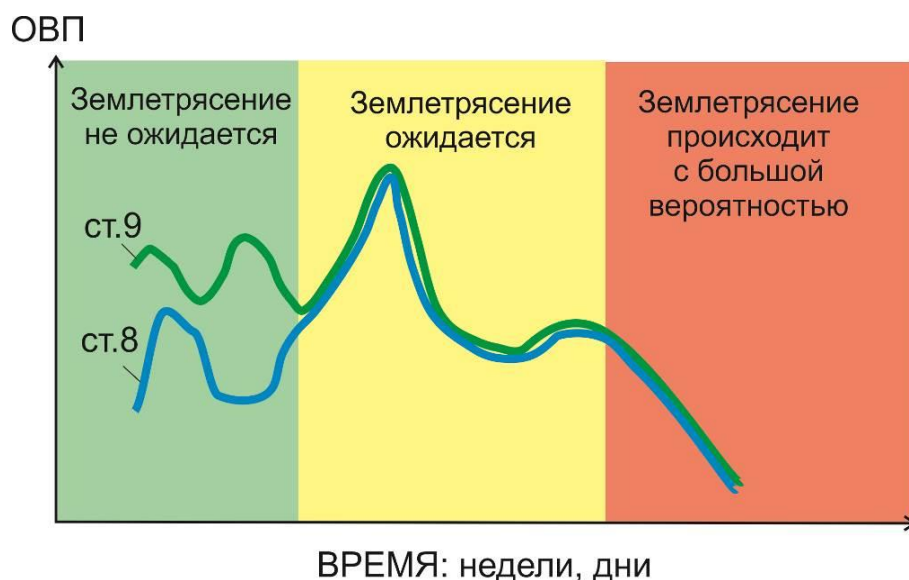


Рис. 10. Принципиальная схема непрерывных наблюдений ОВП ст. 8 и 9 для слежения за сейсмической опасностью зеленого, желтого и красного уровней в центральной части Байкальской рифтовой системы.

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 «Нанна» 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 торцевой 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. Сейсмоструктурная 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.ijdrr.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.*