
Мониторинг окружающей среды

УДК 549.291.1(571.53)

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2022.1.7>

Сигналы ртути подземных вод Култукского полигона во время подготовки и реализации Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации 2020–2021 гг.

Е.П. Чебыкин^{1,2}, А.М. Ильясова¹, С.В. Снопков³, С.В. Рассказов^{1,3}¹ *Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия*² *Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия*³ *Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*

Аннотация. При 5-летнем мониторинге подземных вод Култукского полигона установлены длиннопериодные (около 2.5 лет) и короткопериодные (месяцы) вариации концентрации ртути. Длиннопериодные вариации связаны с подготовкой и реализацией Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации, короткопериодные – непосредственно с землетрясениями. Концентрация ртути в подземных водах была низкой в 2015 г., когда сейсмогенные деформации развивались в условиях сжатия коры, и в целом возрастала к 2020–2021 гг., когда сейсмогенные деформации реализовались в условиях растяжения. Ход сейсмического процесса отразился в последовательной смене соотношений концентрации ртути и окислительно-восстановительного потенциала подземных вод. Предполагается, что аномальное поведение ртути при сейсмической активности может быть одной из причин повышения ее концентрации в осадочных слоях второй половины 18 века – настоящего времени.

Ключевые слова: Байкал, землетрясения, предвестники землетрясений, подземные воды, гидрогеохимический мониторинг, ртуть

Mercury signals of groundwater of the Kultuk area during the preparation and implementation of the Baikal-Khubsugul seismic reactivation in 2020–2021

E.P. Chebykin^{1,2}, A.M. Ilyasova¹, S.V. Snopkov³, S.V. Rasskazov^{1,3}¹ *Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia*² *Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia*³ *Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

Abstract. From 5-year monitoring of groundwater in the Kultuk area, long-period (about 2.5 years) and short-period (months) variations in mercury concentration have been established. Long-period variations are associated with the preparation and implementation of the Baikal-Khubsugul seismic reactivation; short-period ones – directly with earthquakes. Mercury concentrations was low in groundwater in 2015, when seismogenic deformations developed in a state of crustal compression, and generally increased to 2020–2021, when seismogenic deformations occurred under extension. The course of the seismic process was reflected in a successive change in mercury/redox potential relationship in groundwater. It is proposed that the anomalous behavior of mercury during seismic activity resulted in increasing its concentration in the sedimentary layers of the second half of the 18th century through the present.

Keywords: Baikal, earthquakes, precursors of earthquakes, groundwater, hydrogeochemical monitoring, mercury.

Введение

Ртуть – токсичный металл, распределение которого в окружающей среде недостаточно изучено. Половина всех выбросов ртути в атмосферу связывается с деятельностью вулканов, другая половина – с деятельностью человека. Это соотношение обосновывается данными о содержании в 1 кубическом дециметре льда около 4 нг ртути до 1850 г. Более позднее повышение концентрации ртути во льду интерпретируется как результат индустриальной революции. Между тем, деятельность вулканов Земли усилилась несколько раньше. Самое сильное историческое извержение вулкана Тамбора произошло в 1815 г. Вулканические выбросы отражаются в глобальной аэрозольной оптической глубине (AOD, aerosol optical depth). Этот параметр характеризует прозрачность стратосферы для солнечной радиации, выраженную через значения скорости площадного накопления сульфата 10.5 кг/км^2 . Имеется хорошее соответствие между 16 извержениями и похолоданиями во временном интервале 1630–1850 лет и фактически получено относительное снижение AOD (Crowley et al., 2008). Следовательно, бытующее предположение об увеличении поступления ртути за счет усиления вулканической деятельности не подтверждается.

Кроме вулканизма, могут действовать другие природные факторы, способствующие возрастанию содержания ртути в атмосфере. Ртуть извлекается из горных пород при землетрясениях. Например, через 1.2 дня после главного удара Душанбинского землетрясения, произошедшего 29 сентября 1981 г., на расстоянии 20 км от эпицентра концентрация газообразной ртути (Hg_{gas}) возросла на 400 отн. % (Varshal et al., 1981). Выделение Hg_{gas} рассматривается как один из прогностических признаков землетрясений (Cicerone et al., 2009). Зарегистрированная эмиссия ртути свидетельствовала об аномальном поведении этого металла в сейсмогенерирующих разломах. Оказалось, что при землетрясении ртуть не только выделяется в виде газа (gas) (Hg_{gas}), но и фиксируется в подземных водах (groundwater) (Hg_{gw}) (Коваль и др., 2003).

Для обоснования прогноза сильных землетрясений в Южно-Байкальской впадине в 2012 г. был организован Култукский полигон гидрогеохимического мониторинга. Выбраны шесть станций, на которых регулярно определяются концентрации 72 химических элементов и изотопные отношения урана. В качестве предвестников исследуются меняющиеся при землетрясениях гидрогеохимические параметры. Их прогностическая информативность неравнозначна, поскольку причины временных вариаций компонентов остаются неопределенными, даже если они меняются перед и во время землетрясения. Измеряемый параметр на станции мониторинга может измениться при одном землетрясении, но остаться неизменным – при другом. На разных станциях полигона гидрохимические параметры меняются различным образом. Чтобы сделать прогноз землетрясений реальным, мы обосновываем прогностическую информативность каждого меняющегося компонента подземных вод с определением его связи с другими меняющимися гидрогеохимическими параметрами, зависящими от сейсмогенных деформаций.

Цель настоящей работы – представить первые результаты мониторинга Hg_{gw} , полученные на Култукском полигоне за пять лет (до и во время Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации 2020–2021 гг.), и дать предварительную интерпретацию характера временных изменений полученных гидрогеохимических сигналов.

Подходы к мониторингу и методика аналитических исследований подземных вод

Состав подземных вод и изотопные отношения урана определялись методом ИСП-МС с использованием масс-спектрометра Agilent 7500se. Пробы отбирались в среднем через 2 недели. Во время Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации 2020–2021 гг. частота опробования составляла 3–4 дня. Проба 2 мл пропусклась через фильтр 0.45 мкм, фиксировалась капелькой азотной кислоты и шла на измерение элементов. Отношение изотопов урана проводилось отдельно после выделения урана на ионно-обменной колонке. Подробные характеристики используемых методик анализа воды и станций Култукского сейсмопрогностического полигона

приведены в работах (Рассказов и др., 2015; Чебыкин и др., 2015).

Для сейсмопрогностических целей показателем мониторингового ряда данных по подземным водам ст. 27. Сейсмическим стадиям соответствуют тренды последовательного изменения отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (ОА4/8) и активности ^{234}U (А4) с выходом на экстремальные значения, соответствующие сейсмическим событиям. Значения того и/или другого параметра последовательно 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) (рис. 1).

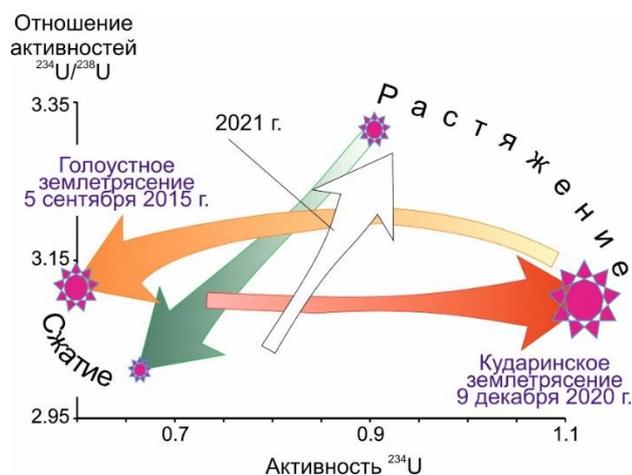


Рис. 1. Реконструкция полного сейсмогеодинамического цикла сжатия и растяжения коры по результатам мониторинга ст. 27 Култукского полигона. Сейсмическим стадиям соответствуют тренды последовательного изменения ОА4/8 и А4 в подземных водах с выходом на экстремальные значения, соответствующие сильным сейсмическим событиям. Слабые неопасные землетрясения 2013–2014 гг. (зеленый уровень) сменялись нарастанием опасности желто-оранжевого уровня в 2015 г. и красным уровнем опасности в конце 2020 – начале 2021 гг.

Fig. 1. Reconstruction of the complete seismogeodynamic cycle of compression and extension of the crust based on monitoring results of st. 27 in the Kultuk area. Seismic stages correspond to trends of consistent change in activity ratio (AR) 4/8 and activity (A) 4 in groundwater with access to extreme values corresponding to strong seismic events. Weak non-dangerous earthquakes of 2013–2014 (green level) were followed with an increase in danger of a yellow-

orange level in 2015 and with a red one in late 2020 – early 2021.

По рядам наблюдений изотопов урана в Южно-Байкальской впадине реконструируется полный сейсмогеодинамический цикл сжатия и растяжения коры, дающий представление о пульсационном развитии сейсмогенных деформаций Байкальской сейсмической зоны как упорядоченного во времени процесса. Выделяются стадии подготовки сильных землетрясений (А, В, С, D) и их реализации (Е), которые согласуются с деформационными этапами, обозначенными по результатам гидрогеохимического мониторинга на Култукском сейсмопрогностическом полигоне.

В подземных водах полигона измеряется широкий диапазон концентраций ртути от значений ниже предела обнаружения (около 0.01 мкг/дм^3) до 0.12 мкг/дм^3 . Поскольку ртуть является переходным химическим элементом, для ее регистрации важно измерение относительных вариаций окислительно-восстановительного потенциала. Обычно в гидрогеохимических расчетах используются значения этого параметра относительно водорода (Eh). В настоящей работе расчетов не приводится. Для качественной оценки изменений окислительно-восстановительно-го потенциала (Eh') даются результаты измерений, полученные в условных единицах на приборе 'Hanna'. Для гидрогеохимических расчетов поправка к нулевому значению Eh, соответствующему водороду, составит, приблизительно, +200 mV.

Байкало-Хубсугульская активизация 2020–2021 гг. в контексте сейсмичности Южно-Байкальской впадины

На стадиях А–С, длившихся с 8 января 2013 г. до 29 августа 2016 г., в интервале Голоустно-Котовской сейсмической активизации (13.01.2015–29.08.2016 гг., стадия С), 5 сентября 2015 г. реализовался главный удар Голоустного землетрясения умеренной силы ($K=12.4$). Во временном интервале 14.12.2016–10.11.2017 гг. эпицентры слабых землетрясений выстроились в Голоустно-Муринскую линию, обозначив начало стадии D (рис. 2).

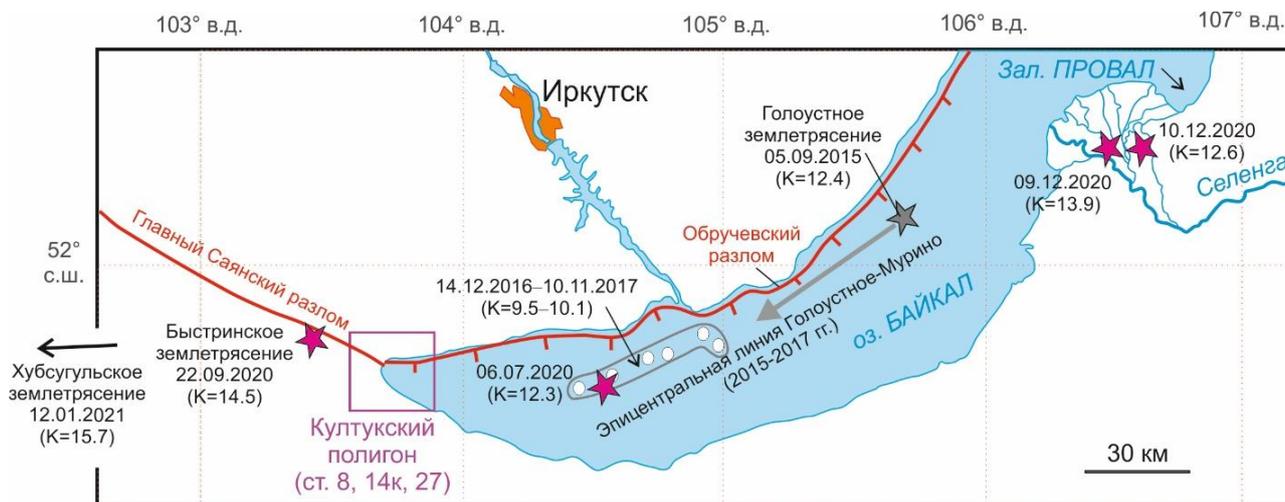


Рис. 2. Распределение сильных землетрясений на Южном Байкале в 2020 г. в сопоставлении с предшествовавшими сейсмическими событиями 2015–2017 гг. Сейсмическая активность, мигрировавшая в 2015–2017 гг. вдоль линии Голоустное–Мурино, сменилась сейсмическим затишьем, продолжавшимся с 10 ноября 2017 г. до 6 июля 2020 г. Землетрясение с энергетическим классом $K=12.3$ произошло на юго-западном окончании этой линии. Затем последовали более сильные сейсмические события. По землетрясениям приводятся данные Байкальского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» (<http://www.seis-bykl.ru>).

Fig. 2. Distribution of strong earthquakes in South Baikal in 2020 in comparison with the previous seismic events of 2015–2017. Seismic activity, migrated in 2015–2017 along the Goloustnoye–Murino line, was followed with a seismic lull that lasted from November 10, 2017 to July 6, 2020. An earthquake with an energy class $K = 12.3$ occurred at the southwestern end of this line. Afterwards, stronger seismic events happened. For earthquakes, data are given after Baikal branch of the “Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences” (<http://www.seis-bykl.ru>).

Байкальско-Хубсугульская сейсмическая активизация 2020–2021 гг. началась после длительного (более 2.5 лет) сейсмического затишья на Южном Байкале с ощутимого сейсмического толчка ($K=12.3$), произошедшего 06 июля 2020 г. на западном окончании Голоустно-Муриновской эпицентральной линии. Затем, в ночь 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 отозвавшееся сильными Кударинскими землетрясениями 09 и 10 декабря 2020 г. ($K=13.9$ и 12.6). За этими толчками, 12 января 2021 г., последовало сильное Хубсугульское землетрясение ($K=15.7$), сменившееся продолжительной афтершоковой активностью.

Результаты мониторинга ртути

В полученных рядах данных гидрогеохимического мониторинга концентрация Hg_{gw} на разных станциях различается более чем на порядок. Для сейсмопрогностических целей наиболее показателен мониторинговый ряд ртути в подземных водах ст. 8 – Чертова гора (рис. 3а).

На стадии D, в 2017 г. – первой половине 2019 г., на ст. 8 обозначаются длиннопериодные (годы) вариации Hg_{gw} . С переходом к стадии E (т. е. с началом Байкальско-Хубсугульской сейсмической активизации) вариации сменяются на короткопериодные (месяцы и недели) на фоне возрастания концентрации Hg_{gw} , подобной интервалу 2017–2019 гг. Байкало-Хубсугульская активизация образует самостоятельный интервал длиннопериодного возрастания и снижения концентрации Hg_{gw} .

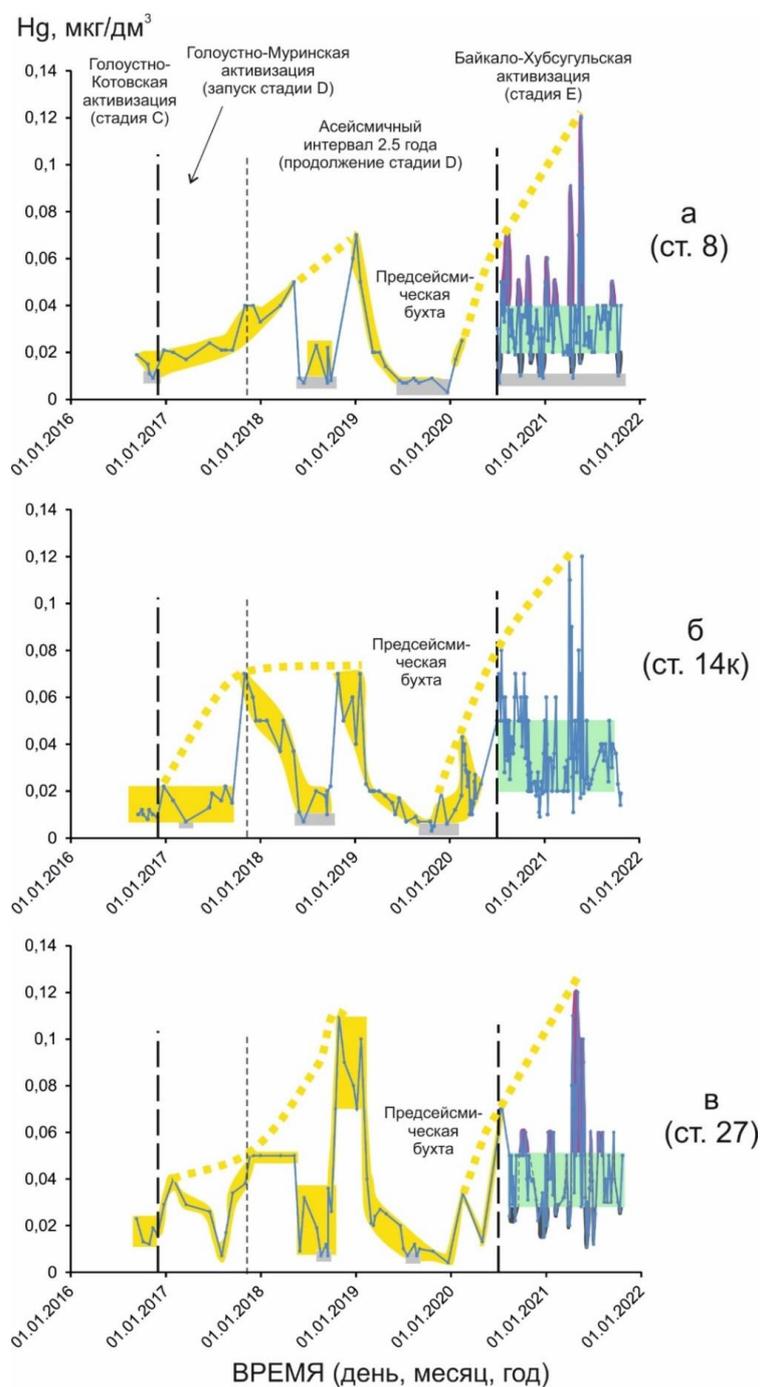


Рис. 3. Два временных интервала длительного возрастания и снижения концентрации Hg в подземных водах ст. 8 (а), 14к (б) и 27 (в) Култукского полигона. Первый интервал охватывает около 2.5 лет (2017 г. – первая половина 2019 г.), второй – не менее 2 лет (вторая половина 2019 г. – настоящее время). Рубежи стадий С, D и E полного сейсмогеодинамического цикла центральной части Байкальской рифтовой системы обозначены по работам (Rasskazov et al., 2020, 2021).

Fig. 3. Two time intervals for a long increase and decrease in the Hg concentration in groundwater of stations 8 (a), 14k (b), and 27 (c) of the Kultuk area. The first interval covers about 2.5 years (2017 – the first half of 2019), the second one – at least 2 years (the second half of 2019 through the present). Milestones of stages C, D, and E in the complete seismogeodynamic cycle of the central part in the Baikal Rift System are shown after (Rasskazov et al., 2020, 2021).

В интервале с 10 сентября 2016 г. до 9 мая 2018 г. наблюдается постепенный рост концентрации Hg_{gw} от значений ниже предела обнаружения (<0.009 мкг/дм³) до 0.05 мкг/дм³. В интервале с 30 мая по 28 сентября 2018 г. наблюдается снижение концентрации ртути ниже предела обнаружения. С 22 декабря 2018 г. до 20 января 2019 г. значение концентрации Hg_{gw} находится на максимуме и затем, к 20 июня, постепенно снижается до значений ниже предела обнаружения. Интервал низкой концентрации Hg_{gw} продолжается до 21 декабря 2019 г., начинает расти 22 января 2020 г. и в дальнейшем выходит на эпизодические максимумы, характерные для Байкало-Хубсугульской активизации. Бухтообразное падение концентрации ртути, продолжавшееся на протяжении 6 месяцев, может рассматриваться как предсейсмическое.

Во время Байкало-Хубсугульской активизации в подземных водах ст. 8 различается интервал преобладающей концентрации Hg_{gw} (0.02 – 0.04 мкг/дм³) и отклонения от этого интервала с относительным возрастанием и снижением концентрации.

Начало активизации обозначено низкой концентрацией Hg_{gw} (0.007 мкг/дм³) в пробе, отобранной 8 июля 2020 г., т. е. через 2 дня после землетрясения, произошедшего 6 июля в Голоустно-Муринской эпицентральной линии. Затем концентрация Hg_{gw} превысила преобладающие значения 15 июля и 8 августа вышла на максимум (0.07 мкг/дм³), а 12 августа вновь оказалась на минимуме (<0.02 мкг/дм³). После выхода на преобладающие значения пробы 22 и 28 сентября показали минимум (<0.01 мкг/дм³), который соответствовал проявлению Быстринского землетрясения (21 сентября). К 26 октября был достигнут максимум концентрации Hg_{gw} (0.06 мкг/дм³), после которого повторилось длительное понижение концентрации Hg_{gw} с выходом на преобладающие значения 04.11.2020–24.12.2020, подобное такому же характеру вариаций в интервале 12.08.2020–28.09.2020.

Низкая концентрация Hg_{gw} (<0.01 мкг/дм³) определялась в пробах 10, 13, 20 и 24 декабря. Начало этого ряда совпало со сдвоенным Кударинским землетрясением 9 и 10 декабря 2020 г. Концентрация Hg_{gw} превысила

преобладающие значения 1 января 2021 г. с достижением максимума (0.06 мкг/дм³) 10 января, перед Хубсугульским землетрясением, которое случилось 12 января. В пробе, отобранной в день землетрясения и в последующих пробах до 24 января, концентрация Hg_{gw} (0.025 – 0.04 мкг/дм³) находилась в интервале преобладающих значений и упала до значения ниже предела обнаружения (<0.02 мкг/дм³) 30 января.

Максимум 0.05 мкг/дм³ фиксируется 7 февраля. С 12 марта до 5 апреля поддерживается относительно низкая концентрация Hg_{gw} (<0.019 мкг/дм³) с резким переходом к максимуму (0.09 мкг/дм³) 8 апреля. Этот и еще два высоких максимума Hg_{gw} (до 0.12 мкг/дм³) воспроизводятся до 28 мая 2021 г., как существенные отклики, сопровождающие афтершоки Хубсугульского землетрясения. На фоне преобладающих значений намечается переход от максимума Hg_{gw} 17 сентября к минимуму Hg_{gw} 10 октября 2021 г. В настоящее время афтершоки продолжают.

Подобные временные вариации концентрации ртути наблюдаются в подземных водах на ст. 14к и 27 (рис. 3б,в).

Сопоставление временных рядов Hg и A4

Под действием гравитационных сил верхняя часть коры испытывает всестороннее сжатие, на фоне которого проявляются импульсы растяжения. Поскольку максимумы и минимумы A4 подземных вод обозначают, соответственно, условия закрытия и раскрытия микротрещин, в сравнительном анализе временных рядов Hg и A4 поведение Hg_{gw} и Hg_{gas} представляется в терминах временного соотношения сжатия и растяжения коры (рис. 4).

Голоустное землетрясение 05 сентября 2015 г. произошло на фоне усиления сжатия коры, достигшего экстремального состояния 29 ноября 2015 г. Затем, 02 декабря 2015 г., фиксируется максимум A4, обозначающий растяжение. Менее выразительное сжатие зарегистрировано ровно через год (10 сентября – 29 ноября 2016 г.), во время которого измерена минимальная концентрация Hg_{gw} . При отсутствии заметного растяжения коры

концентрация ртути в подземных водах была минимальной.

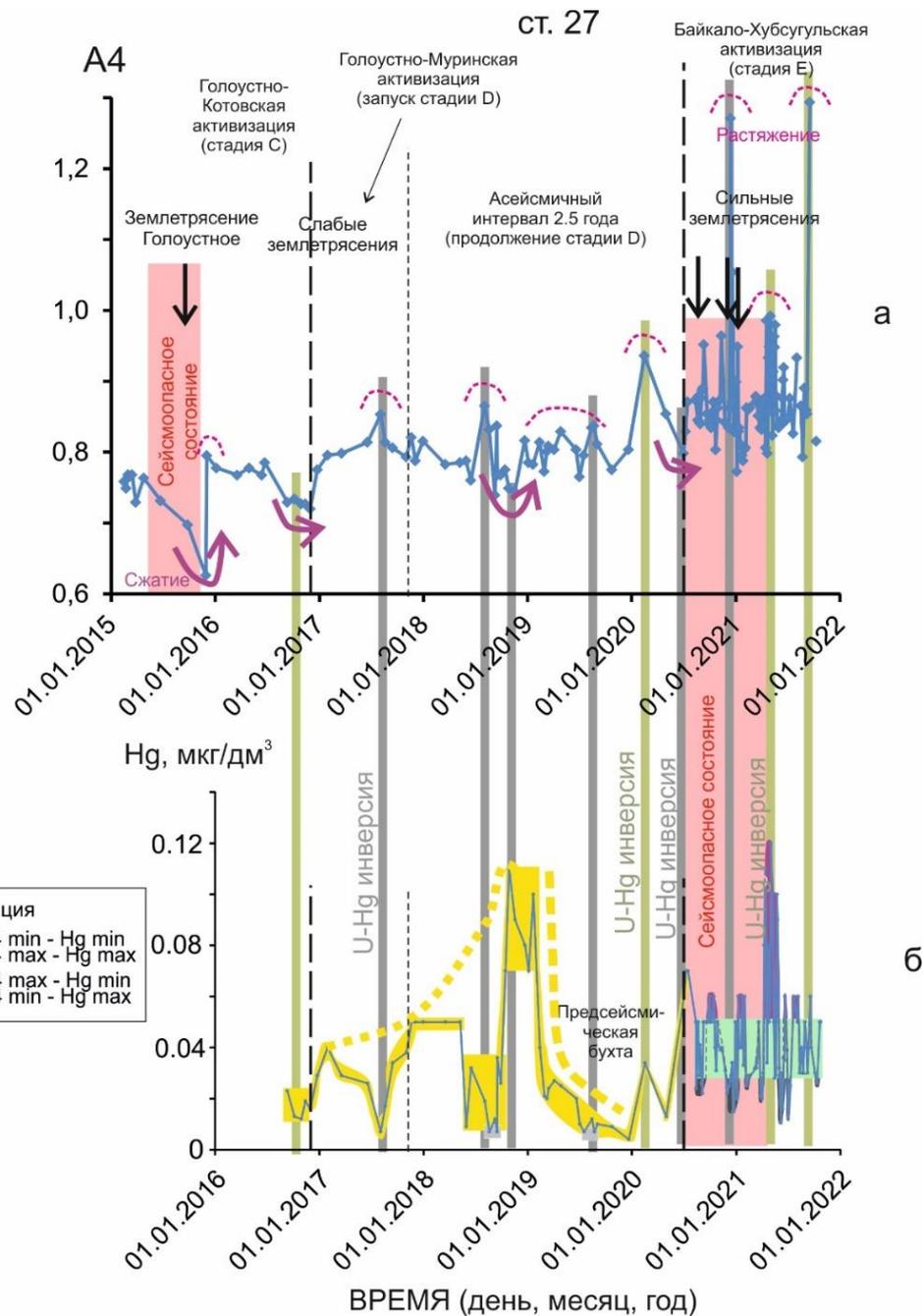


Рис. 4. Смена сейсмогенной обстановки сжатия 2015 г. сейсмогенной обстановкой растяжения 2020–2021 гг. по максимумам и минимумам A4 (а) и сигналы максимумов и минимумов Hg_{гв} (б) во временных рядах ст. 27.

Fig. 4. Change of the seismogenic state of compression in 2015 by the seismogenic one of extension in 2020–2021 at the highs and lows of A4 (a) and signals of highs and lows of Hg_{гв} (b) in time series of st. 27.

Переход к растяжению сопровождался U–Hg инверсией, в результате которой во время локального максимума растяжения 03 августа 2017 г. определен локальный минимум концентрации Hg_{гв}. В дальнейшем, до

августа-сентября 2019 г., установился режим чередования импульсов растяжения с минимальным Hg_{гв} с эпизодами относительного усиления сжатия коры, сопровождавшимися возрастанием Hg_{гв}. Концентрация ртути в

2017–2019 гг. в подземных водах в целом возрасла, но при импульсах растяжения коры концентрация Hg_{gw} снижалась вследствие выделения ртути в виде эманаций (Hg_{gas}). Слабое растяжение с 22 декабря 2018 г. до 21 октября 2019 г. привело к минимальной концентрации Hg_{gw} в виде предсейсмической бухты.

Локальные максимумы А4 и Hg_{gw} 15 февраля 2020 г. свидетельствуют об U–Hg инверсии, которая свидетельствует о начавшихся предсейсмогенных деформационных изменениях в коре. При импульсе растяжения проявился максимум растворенной ртути.

Первое сейсмическое событие Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации 06 июля 2020 г. соответствовало переходу к прежнему режиму поведения ртути. Усиление сжатия вызвало снижение концентрации Hg_{gw} вследствие выделения Hg_{gas} . Этот режим был в целом свойствен временному интервалу проявления сильных (Быстринского, Кударинского и Хубсугульского) землетрясений. Резкий локальный максимум А4, проявившийся 13 декабря 2020 г. (через 3 дня после Кударинского землетрясения), соответствовал минимуму Hg_{gw} . Ртуть удалялась посредством эмиссии.

Следующий существенный максимум А4 02 мая – 08 мая 2021 г. реализовался в наиболее значительной концентрации Hg_{gw} . Это соотношение показало U–Hg инверсию, которая свидетельствовала о перестройке сейсмогенерирующих деформаций.

Сопоставление временных рядов Hg и Eh'

Начальное событие Байкало-Хубсугульской активизации (6 июля 2020 г.) соответствует на ст. 8 минимуму Hg_{gw} . Значение Eh' в это время не определялось. Следующему минимуму Hg_{gw} 12 августа соответствовало положительное значение Eh' (74 mV) без признаков землетрясения. Минимум Hg_{gw} 22 сентября сопровождался отрицательным значением Eh' (–44 mV) и характеризовал отклик на Быстринское землетрясение. Подобные отклики получены 4 и 5 ноября (Eh' от –9 до –20). Хотя минимум Hg_{gw} проявился и при Кударинском землетрясении, Eh' заметно возросло (от 20 mV 10 декабря до 147 mV 24 декабря). Максимуму Hg_{gw}

Хубсугульского землетрясения и афтершоков соответствовали повышенные значения Eh'. С июня 2021 г., на фоне преобладающих значений концентрации Hg_{gw} , зарегистрировано 3 эпизода отрицательных значений Eh'. Совпадение последнего эпизода 10 октября с минимумом Hg_{gw} воспроизвело ситуацию Быстринского землетрясения, тогда как предшествующее совпадение максимума Hg_{gw} с положительным значением Eh' отвечало постоянно предшествующей афтершоковой активности (рис. 5).

Обсуждение

Ртуть – переходный химический элемент

В водах с окислительно-восстановительным потенциалом $Eh > 0.5$ (приведенным к водороду), преобладает двухвалентная ртуть (в виде Hg^{+2} или CH_3Hg^+). Катионы ртути Hg^{2+} образуют устойчивые комплексные соединения с различными органическими и неорганическими лигандами. Особую роль играют комплексы неорганических солей ртути с природными гумусовыми веществами, в частности с гумусово- и фульвокислотами (Янин, 2020). В природных водах ртуть может связываться с твердыми взвешенными частицами размером менее 0.45 мкм. Доля такой связанной ртути в 10 тыс. раз больше, чем растворенной ртути. Для выяснения поведения ртути нужны специальные исследования.

Сейсмогенные деформации в активном разломе приводят к высвобождению ртути. Можно предположить, что зона активного разлома перед и во время землетрясения становится проницаемой для флюидов. При Култукском землетрясении 2008 г. в скважинах и колодцах пос. Култук ощущался сильный запах сероводорода, который мог образоваться в результате воздействия газов-восстановителей (водород, углеводороды, H_2S) на сульфаты и сульфиды. Воздействие водорода могло способствовать переходу ртути из нерастворимой в воде связанной формы HgS в растворимую восстановленную форму CH_3Hg^+ и газообразную ртуть $Hg(0)$. При землетрясении концентрация ртути в подземных водах может возрасти одновременно с эманацией ртути, которая становится частью потока восстановленных газов. Преобладающая эманация Hg_{gas} может сопровождаться падением Hg_{gw} .

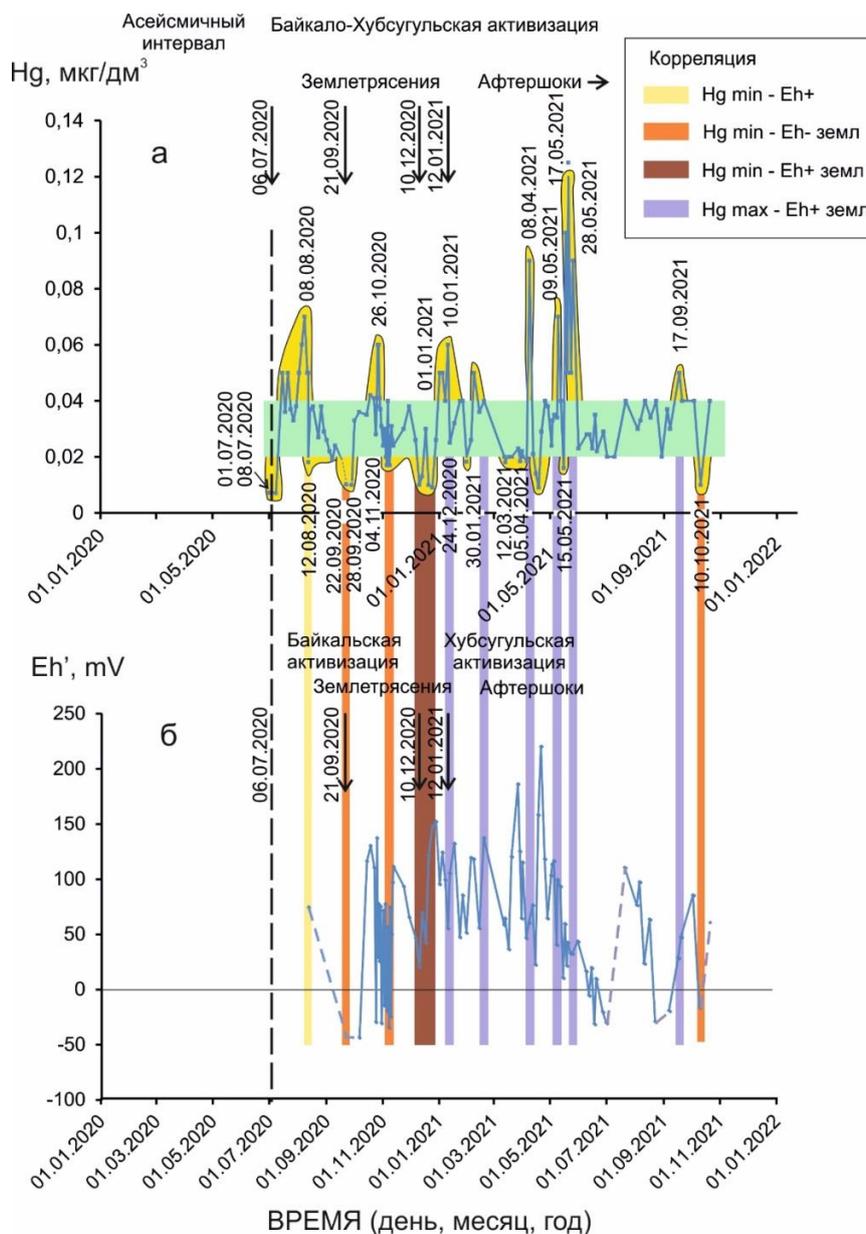


Рис. 5. Корреляции временных вариаций концентрации ртути в подземной воде ст. 8 Култукского полигона с временными вариациями Eh' и сейсмическими событиями Байкало-Хубсугульской активизации. $Hg\ Min$ и $Hg\ Max$ – соответственно, минимум и максимум ртути, $Eh-$ и $Eh+$ – соответственно, минимум и максимум окислительно-восстановительного потенциала, земл – синхронное землетрясение. Байкальская активизация начинается с фазы без землетрясений ($Hg\ Min - Eh+$, желтая полоса), переходит в Быстринскую фазу ($Hg\ Min - Eh-$, светло-коричневая полоса) и затем – в Кударинскую фазу ($Hg\ Min - Eh+$, темно-коричневая полоса). Хубсугульская активизация начинается с сильного сейсмического толчка 12.01.2021 г. и продолжается афтершоками ($Hg\ Max - Eh+$, сиреневые полосы). Измеренные значения окислительно-восстановительного потенциала (Eh') не приведены к водороду.

Fig. 5. Correlations of temporal variations in mercury concentration in groundwater of st. 8 in the Kultuk area with those of Eh' and seismic events of the Baikal-Khubsugul reactivation. $Hg\ Min$ and $Hg\ Max$ – minimum and maximum of mercury concentration, respectively, $Eh-$ and $Eh+$ – minimum and maximum of redox potential, respectively, земл – synchronous earthquake. The Baikal reactivation begins with a phase without earthquakes ($Hg\ Min - Eh+$, yellow stripe), passes into the Bystraya phase ($Hg\ Min - Eh-$, light brown stripe) and then to the Kudara phase ($Hg\ Min - Eh+$, dark brown stripe). The Khubsugul reactivation begins with a strong seismic shock on 12.01.2021 g. and continues with aftershocks ($Hg\ Max - Eh+$, lilac stripes). Measured redox potential (Eh') values do not correspond to hydrogen.

Сигналы Hg подземных вод Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации

Хотя форма Hg_{gas} должна фиксироваться инструментально и сопоставляться с измеренной концентрацией Hg_{gw} , полученные сигналы Hg_{gw} представляют интерес для предварительной интерпретации процессов, предшествующих и сопутствующих сейсмичности. Постепенные амплитудные вариации ртути в 2017–2019 гг. существенно отличаются от резких частых вариаций, установившихся во время сейсмической активизации. Интервал низкой концентрации Hg_{gw} второй половины 2019 г. в сущности служит сигналом предсейсмической бухты. В течение полугода обеспечивалось удаление Hg из подземных вод. Ее низкую концентрацию в воде можно было бы достоверно связать с изменением газового режима в активном разломе, если бы на Култукском полигоне в это время измерялся состав газ-восстановителей с повышенным фоном ртути.

Далее, мы видим отражение хода сейсмического процесса в последовательной смене фаз, которая регистрируется во временных рядах ртути и Eh' подземных вод. В начале Байкальской части активизации низкая концентрация Hg_{gw} при низком Eh' показывает короткие импульсы газ-восстановителей с квазипериодичностью 1–2 месяца. Третий (от начального сейсмического события 6 июля 2020 г.) импульс низкого Eh' совпал с Быстринским землетрясением. Еще через один минимум Eh' случилось Кударинское землетрясение (также на минимумах Hg_{gw} и Eh'). Таким образом, во всех фазах Байкальской части активизации преобладали короткие сейсмогенные импульсы с газами-восстановителями, обозначенными минимумами Hg_{gw} и Eh' .

С переходом в начале 2021 г. к Хубсугульской фазе активизации сейсмические толчки сопровождалась максимумами Hg_{gw} и Eh' . Максимальные концентрации ртути были зарегистрированы в мае 2021 г., после чего до сентября 2021 г. установились преобладающие промежуточные концентрации ртути, хотя обозначились два глубоких минимума Eh' . Короткие импульсы вариаций Hg и Eh'

подземных вод, свойственные для Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации, продолжают в 2022 г.

Сейсмогенное происхождение аномалии Hg

В байкальской воде истока р. Ангара, в воде ручья пади Крестовая и колодца пос. Листвянка в 1997–2001 гг. измерялась низкая фоновая концентрация ртути (порядка 0.0005–0.0010 мкг/дм³). Перед сильным Южно-Байкальским землетрясением, произошедшим 25 февраля 1999 г., в течение 1998 г. фиксировалось эпизодическое возрастание концентрации Hg (до 0.02 мкг/дм³). Определялись одновременные аномально высокие концентрации ртути в воде ручья пади Крестовая и колодца пос. Листвянка (Коваль и др., 2003). Ныне активные разломы Байкальской рифтовой зоны маркировались геохимическими аномалиями металлов, включая Hg (Коваль и др., 2006; Вилор и др., 2015). Аномалии Hg присутствуют в воде, почве, почвенном и приземном воздухе.

На основе наблюдений при подготовке и реализации Южно-Байкальского землетрясения 1999 г. был сделан вывод о концентрационных всплесках ртути, связанных с сейсмичностью, которые превысили фон в 20–30 и более раз и о максимальной эмиссии ртути из разломов накануне сейсмических событий (Коваль и др., 2003, 2006). Более поздние наблюдения в районе пос. Листвянка зафиксировали отдельные выбросы ртути, продолжавшиеся после Южно-Байкальского землетрясения до 2004 г. Последний слабый всплеск концентрации Hg был определен в 2006 г. До 2013 г. концентрации ртути не превышали фоновые значения. При Култукском землетрясении 27 августа 2008 г. и позже аномалий ртути не фиксировалось (Гребенщикова и др., 2020).

Ряд наблюдений 1997–2013 гг. свидетельствует 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 возрастания концентрации ртути. Объяснение отсутствия сигнала ртути нужно искать в характере активизации конкретных

разломов, испытавших сейсмогенные деформации. Пос. Листвянка находится на Ангарском разломе, которых был активизирован во время Южно-Байкальского сейсмического события, но не проявил признаков активизации во время Култукского землетрясения. Этот пример (также как представленные в настоящей работе ряды наблюдений Hg_{gw} Култукского полигона, полученные при подготовке и реализации Байкало-Хубсугульской активизации) показывает пространственную избирательность активизации сейсмогенных деформаций в разломах.

Еще один объект изучения аномального поведения ртути – донные отложения мелководного оз. Окуневое в дельте р. Селенги, в которых определено повышение концентрации ртути от 20 нг/г до 40 нг/г и более около 1870 г. и во второй половине XX века (Roberts et al., 2020). Для соответствия названию журнала “Environmental Pollution” рост концентрации ртути был интерпретирован авторами как следствие развития промышленного освоения Сибири и Монголии в связи с загрязнением вод, связанным с добычей золота. Конкретных сведений о существовавших промыслах на этой территории авторами, однако, не приведено, поэтому предложенное объяснение причины повышения концентрации ртути не имеет оснований. Повышенные концентрации ртути сосредоточены в коренных породах, почвах, донных отложениях и поверхностных водах в зоне промышленного освоения Иркутского Предбайкалья, на левобережье р. Ангара от оз. Байкал до г. Зима и по северо-западному побережью оз. Байкал (Китаев и др., 2008).

Между тем, район дельты Селенги отличается высокой сейсмической активностью. Серии сильных сейсмических толчков проявились здесь в 1769–1779 гг. (три события за 10 лет) и в 1839–1885 гг. (5 событий за 46 лет). Новая сейсмическая серия территории, продолжающаяся в настоящее время, обозначилась Средне-Байкальским землетрясением 29 августа 1959 г., хотя на сопредельных территориях в районе Мондинской впадины и на юге Центральной Монголии сильные землетрясения (Мондинское и Гобийское) произошли несколько раньше, соответственно, в 1950 и 1957 гг. (Мельникова и др., 2012). Следовательно, зарегистрированное

повышение концентрации ртути в осадочных слоях оз. Окуневое около 1870 г. и во второй половине XX века, скорее всего, не имеет отношения к деятельности человека, а отражает природный процесс поступления ртути в осадок в результате повышения концентрации Hg_{gas} и Hg_{gw} при землетрясениях.

Эпизоды палеоземлетрясений, сопровождавшихся вулканизмом, датируются в Байкальской сейсмической зоне временным интервалом последних 14.4 тыс. лет с сокращающимися квазипериодами от 5.6 до 3.1 тыс. лет и менее (Рассказов, Макаров, 1997). Подобно седиментационному маркированию повышенной концентрацией ртути сейсмичности в 19–21 веках, можно ожидать маркирование ртутью и более ранних сейсмических эпизодов.

Заключение

Hg – переходный химический элемент, распределение которого в подземных водах сейсмоактивных разломов определяется изменениями окислительно-восстановительного потенциала. При мониторинге подземных вод ст. 8, 14к и 27 Култукского полигона установлены длиннопериодные и короткопериодные вариации концентрации ртути. Временные интервалы длиннопериодного возрастания и снижения концентрации Hg определены в 2017–2019 гг. и с 2019 г. по настоящее время. Первый временной интервал соответствует стадии D подготовки Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации, второй – переходу от стадии D к стадии E ее реализации. Короткопериодные вариации получены непосредственно во время Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации. Концентрации ртути в подземных водах в целом возрастали от 2015 г., когда сейсмогенные деформации развивались в состоянии сжатия коры, к 2020–2021 гг., когда сейсмогенные деформации реализовались в импульсах растяжения.

Развитие сейсмического процесса во времени отразилось во временных рядах ртути и Eh' подземных вод ст. 8. Во время вступления Байкало-Хубсугульской активизации определены короткие импульсы низкой концентрации Hg_{gw} при низком Eh' с квазипериодичностью 1–2 месяца. Третий импульс совпал с Быстринским землетрясением, пятый –

с Кударинским. По снижению Eh' проявления импульсов связывается с проникновением в активный разлом газов–восстановителей. С переходом в начале 2021 г. к Хубсугульской фазе активизации сейсмические толчки сопровождалась максимумами Hg_{gw} и Eh' .

Повышенные концентрации Hg в зонах современных активных разломов сочетаются с повышенными концентрациями Hg в зоне промышленного освоения территории Иркутского Предбайкалья. Повышение концентрации этого металла в осадочных слоях второй половины 18 века – настоящего времени в дельте Селенги может свидетельствовать о его накоплении при выделении Hg_{gas} и Hg_{gw} в результате землетрясений. Подобно седиментационному маркированию сейсмичности 18–21 веков повышенной концентрацией ртути, в Байкальской сейсмической зоне можно ожидать маркирование и более ранних эпизодов высокой активности разломов.

Благодарности. Концентрации ртути в воде измерялись на масс-спектрометре Agilent 7500se ЦКП Микроанализ ЛИН СО РАН.

Литература

- Вилор Н.В., Адрулайтис Л.Д., Зарубина О.В., Данилов Б.С. Геохимия сейсмоактивных региональных разломов (Байкальская рифтовая зона, Восточная Сибирь) // Геохимия. 2015. № 1. С. 64–82
- 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.
- Китаев Н.А., Гребенщикова В.И., Лустенберг Э.Е., Ломоносов И.С., Коваль П.В. Ртуть в окружающей среде Южного Прибайкалья // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2008. № 6. С. 517–530.
- 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 В.А., Ясеновский А.А., Андрулайтис Л.Д. Геохимическая активность разломов Байкальской рифтовой зоны // Доклады академии наук. 2006. Т. 409. № 3. С. 389–393.
- Мельникова В.И., Гилева Н.А., Арефьев С.С., Быкова В.В., Масальский О.К. Култукское землетрясение 2008 г. с $M_w = 6.3$ на юге Байкала: пространственно-временной анализ сейсмической активизации // Физика Земли. 2012. № 11. С. 44–62.
- Рассказов С.В., Макаров С.А. Об эволюции напряженного состояния верхней части земной коры Прибайкалья в голоцене // Геологическая среда и сейсмический процесс. Материалы Всероссийской межрегиональной конференции. Иркутск, 1997. С. 33–35.
- 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 ($^{234}U/^{238}U$) и $^{87}Sr/^{86}Sr$ в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, № 4. С. 519–554.
- 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 $^{234}U/^{238}U$ в водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // Доклады академии наук. 2015. Т. 460, № 4. С. 464–467.
- Янин Е.П. Ртуть, человек, окружающая среда (краткий очерк). ИГЕМ РАН, 2020. 15 с.
- Cicerone R.D., Ebel J.E., Britton J. A systematic compilation of earthquake precursors // Tectonophysics. 2009. V. 476. P. 371–396.
- Crowley T.J., Zelinski G., Vinter B., Udisti R., Kreutz K., Cole-Dai J., Castelland E. Volcanism and the Little Ica Age // Pages News. 2008. V. 16, N 2. P. 22–23.
- <http://www.seis-bykl.ru> Байкальский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук»
- Rasskazov S., Pyasova A., Bornyakov S., Chuvashova I., Chebykin E. Responses of a $^{234}U/^{238}U$ activity ratio in groundwater to earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia // Front. Earth Sci. 2020. V. 14, No. 4. P. 711–737.
- 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.

Roberts S., Adams J.K., Mackay A.W., Swann G.E.A., McGowan S., Rose N. L., Panizzo V., Yang H., Vologina E., Sturm M., Shchetnikov A.A. Mercury loading within the Selenga River Basin and Lake Baikal, Siberia // *Environmental Pollution*. 2020, V. 259. P. 113814.

Varshal, G.M., Sobolev, G.A., Barsukov, V.L., Koltsov, A.V., Kostin, B.I., Kudinova, T.F., Stakheyev, Y.I., Tretyakova, S.P. Separation of

volatile components from rocks under mechanical loading as the source of hydrogeochemical anomalies preceding earthquakes // *Pure Appl. Geophys.*, 1985. V. 122. P. 463–477.

Scholz C. A. Stratigraphic and structural evolution of the Selenga delta accommodation zone, Lake Baikal, Siberia / C. A. Scholz, D. R. Hutchinson // *Int. J. Earth Sci.*– 2000.– V. 89.– P. 212–228.

Чебыкин Евгений Павлович,

кандидат химических наук, старший научный сотрудник,

664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,
Лимнологический институт СО РАН,
email: epcheb@yandex.ru.

Ильясова Айгуль Маратовна,

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер,

664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
email: ila@crust.irk.ru.

Снопков Сергей Викторович,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,

664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет,
геологический факультет,
email: snopkov_serg@mail.ru.

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор, зав. лабораторией,

664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет,
геологический факультет,
зав. кафедрой,
email: rassk@crust.irk.ru.

Chebykin Evgeny Pavlovich,

Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher,

664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
664033 Irkutsk, Ulaanbaatarskaya str., 3,
Limnological Institute SB RAS,
email: epcheb@yandex.ru.

Ilyasova Aigul Maratovna,

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Engineer,

664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
email: ila@crust.irk.ru.

Snopkov Sergei Viktorovich,

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Assistent Professor,

664003 Irkutsk, Lenin str., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
email: snopkov_serg@mail.ru.

Rasskazov Sergei Vasilyevich,

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Head of Laboratory,

664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
664003 Irkutsk, Lenin str., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Head of Chair,
email: rassk@crust.irk.ru.