

Сравнительные исследования косейсмических изменений концентраций термофильных элементов Si, Na и Li в подземных водах ст. 27 на Култукском полигоне, оз. Байкал

Е.П. Чебыкин^{1,2}, С.В. Рассказов^{1,3}

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

²Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

³Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Мониторинговый ряд термофильного отношения Na/Li в подземных водах ст. 27 Култукского полигона, полученный в 2012–2022 гг., сопоставляется с мониторинговым рядом концентрации термофильного элемента Si. Расхождения во временных вариациях рассчитанных температур используются для идентификации компонентов подземных вод резервуара, образующихся в гидрогеодинамическом центре, подверженном косейсмической генерации глинки трения.

Ключевые слова: подземные воды, мониторинг, Na/Li, Si, геотермометр, землетрясения, глина трения, Байкал.

Comparative study of coseismic changes in thermophilic elements Si, Na, and Li in groundwaters from station 27 in the Kultuk polygon, Lake Baikal

E.P. Chebykin^{1,2}, S.V. Rasskazov^{1,3}

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

²Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

³Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Abstract. Monitoring series of the Na/Li thermophilic ratio in groundwater obtained at the station 27 of the Kultuk polygon in 2012–2022 is compared with those of the Si thermophilic element concentrations. Discrepancies in time variations of calculated temperatures are used to identify reservoir groundwater components that exhibit a hydrogeodynamic center subjected to coseismic generation of friction clay.

Keywords: groundwater, monitoring, Na/Li, Si, geothermometer, earthquakes, friction clay, Baikal.

Введение

В практике отслеживания признаков приближающихся землетрясений обычно находят разнообразные предвестники, которым в ретроспективе присваивается прогностическая роль (Solonenko, 1974; Sadovsky et al., 1977; Sadovsky, 1978; Пиннекер и др., 1984; Varshal et al., 1985; Sobolev, 1993; King et al., 1995; Tsunogai, Wakita, 1995; Claesson et al., 2004; Chia et al., 2008; Борняков, 2010; Бор-

няков и др., 2016, 2017; Sukhija et al., 2010; Plastino et al., 2011; Matsumoto, Koizumi, 2013; Shi et al., 2015; Boldina, Kopylova, 2017; Семинский и др., 2021, 2022). Однако последующее использование предвестников, выделенных таким образом, ведет к объявлениям ошибочных сигналов сейсмической опасности. Предвестники оказываются ложными, а землетрясения случаются без предвестников. Очевидно, что необходима разработка каких-то иных подходов, которые

могли бы обеспечить регистрацию развития доступного для изучения явления в земной коре, протекающего синхронно и в целом аналогично процессу подготовки и реализации землетрясения. В случае обнаружения такого явления, констатация совпадений–несовпадений землетрясений и их предвестников, может перерасти в более надежную оценку угрозы землетрясений на основе анализа развития парагенетических (сейсмического и сопутствующего ему) процессов.

В подземных водах Култукского полигона установлены существенные временные вариации термофильного отношения Na/Li и концентрации термофильного элемента Si (Ильясова, Снопков, 2023; Чебыкин, Чувашова, 2023; Чувашова, Ильясова, 2023). В 2012–2022 гг. эти вариации вписываются в ход развития полного сейсмогеодинамического цикла центральной части Байкальской рифтовой системы, охватывающего временной интервал от сильной Култукской активизации (землетрясения от 27 августа 2008 г. до 04 января 2011 г.) до Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации (землетрясения, начавшиеся 22 сентября 2020 г. и продолжающиеся в 2023 г.). Цикл начинается и завершается высокими значениями отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (ОА4/8) и активности ^{234}U (А4) при низких значениях обоих показателей в его середине (в 2015 г.), что свидетельствует об открытии микротрещин, способствующем циркуляции подземных вод в условиях растяжения коры, и об их закрытии, снижающем циркуляцию при сжатии (Чебыкин и др., 2022; Rasskazov et al., 2022).

Разные гидрогеохимические геотермометры в пробах подземных вод одной и той же станции должны давать сопоставимые оценки температуры в резервуаре, если геотермометры надежно калиброваны по одинаковым принципам и подземные воды под-

нимаются из резервуара без задержки и разбавления. Однако, если геотермометры основаны на разных принципах, может возникнуть несоответствия температурных оценок подземных вод термофильных компонентов разного происхождения. Цель настоящей работы – использовать изменения температурных характеристик подземных вод ст. 27 Култукского резервуара по вариациям отношения Na/Li в сопоставлении с температурными характеристиками по вариациям Si для идентификации косейсмических компонентов подземных вод.

Местоположение ст. 27 на Култукском полигоне, отбор, хранение и аналитические исследования природных вод

Постоянный мониторинг подземных вод проводится на Култукском полигоне с частотой опробования в среднем один раз в 2 недели более 10 лет на шести основных станциях: на скважинах – станции 27 (Школа), 184 (ул. Школьная), 8 (Чертова Гора), 40 (Стрелка), 9 (Земляничный) и в роднике – ст. 14к (Ключ Тигунчиха). Скважины имеют глубину от 60 до 120 м. Население пос. Култук ежедневно берет из них воду, обеспечивая эффективную прокачку. Менее часто, но регулярно, опробуются вспомогательные станции полигона (рис. 1).

Мониторинговые станции занимают разное положение в активных разломах структурного сочленения Южно-Байкальской впадины и Тункинской долины и существенно расходятся между собой по гидрогеохимическим показателям подземных вод. Ст. 27 находится в центре полигона, на Култукской тектонической ступени, наклоненной к востоку, в сторону Байкала. Кроме этой станции, на тектонической ступени находятся ст. 184, 8 и 40.



Рис. 1. Схема расположения ст. 27 и других основных станций гидрогеохимического опробования активных разломов на западном побережье оз. Байкал (Култукский полигон). Показаны палеосейсмодислокации в шовной зоне Главного Саянского разлома (ГСР) (Чипизубов, Смекалин, 1999).

Fig. 1. Location scheme of station 27 and other main stations for hydrogeochemical sampling of active faults on the western coast of Lake Baikal (Kultuk polygon). Paleoseismic dislocations in the suture zone of the Main Sayan Fault (ГСР) are shown after (Chipizubov, Smekalin, 1999).

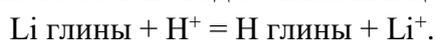
Для определения химического элементного состава образцы воды фильтруются через шприц-насадки с диаметром пор 0.45 мкм (Minisart 16555-K, ацетат целлюлозы, Sartorius Stedim Biotech GmbH, Германия) в предварительно взвешенные 2 мл полипропиленовые пробирки Эппендорфа (Axugen Scientific, Cat.-No. MCT-200-C, США, Мексика), содержащие 40 мкл консерванта. В качестве консерванта используется концентрированная азотная кислота (70 %), дважды очищенная с помощью суббойлинговой системы перегонки кислот (Savillex DST-1000 sub-boiling distillation system, Япония), в которую добавляется индий (типично 1000 ppb) в качестве внутреннего стандарта. Аликвоты консерванта взвешиваются при добавлении в пробирки. Пробирки с отобранными образцами воды взвешиваются и рассчитывается

точное содержание азотной кислоты (типично 2 %) и индия (типично 30 ppb). Пробы хранятся в холодильнике при положительной температуре. В подготовленных растворах определяются содержание 72 химических элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСПР-МС) на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 (Чебыкин и др., 2012). Вместе с Li анализируются основные компоненты Cl и S. Определение углерода методом ИСП-МС встречает трудности из-за периодической контаминации газа аргона, используемого для генерации плазмы.

Si и Na/Li геотермометрия

Si и Na/Li геотермометрия основана на принципиально разных подходах. В расчете

Si температур учитывается количество кремния растворенного в воде (кремниевой кислоты). Если подземная вода разбавляется слабо минерализованной порцией поверхностной воды или водным компонентом Южно-Байкальского резервуара (ЮБР) (Расказов и др., 2020), концентрация Si снижается. Можно сделать вывод только об эффекте разбавления подземных вод резервуара. Стартовая температура подземных вод в резервуаре не определяется. В расчете Na/Li температур учитывается эмпирически установленная температурная зависимость катионного обмена вод с глинами и цеолитами:



Оценки температур подземных вод Култукского полигона по разным кремниевым геотермометрам не превышают 100 °С. Температуры в резервуаре рассчитываются по халцедоновой модификации геотермометра (Arnorsson et al., 1983).

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

где C – концентрация SiO₂ в мг/дм³; T – температура в °С.

Натрий–литиевые температуры рассчитываются по геотермометру (Fouillac, Michard, 1981), в котором применяются уравнения для вод, содержащих <11 г/кг Cl (Cl < 0.3 моль/кг) и >11 г/кг Cl (Cl > 0.3 моль/кг).

Уравнение

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1195}{0.130 + \log(m\text{Na} / m\text{Li})} - 273.15$$

действительно для концентраций Cl > 0.3 моль/кг. Уравнение

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1000}{0.389 + \log(m\text{Na} / m\text{Li})} - 273.15$$

действительно для концентраций Cl < 0,3 моль/кг). В обоих уравнениях используются концентрации элементов в молях (*mNa* и *mLi*).

Соотношение температурных оценок подземных вод по Si и Na/Li геотермометрам в Култукском резервуаре под ст. 27

На ст. 27 наблюдаются три временных интервала (2013–2015 гг., 2018–2019 гг. и 2020–2023 гг.), в которые T(Na/Li) существенно меняется от значений в 2 раза ниже значений T(Si) до значений, в 2–3 и более раз превышающих T(Si). В промежутках между этими интервалами (в 2015–2018 гг. и в 2019–2020 гг.) значения T(Si) устойчиво превышают значения T(Na/Li) (рис. 2,3).

Мы предполагаем, что в подземных водах активного разлома Na/Li геотермометр отражает их взаимодействие с образующейся глиной трения. Расчет основан на вариациях Na/Li отношения. Интервалы с повышенными значениями T(Na/Li) обозначают импульсы эффективного образования глины трения в активной плоскости разлома под ст. 27. Низкие значения T(Na/Li) отражают снижение роли этого фактора. Интервалы 2013–2015 гг., 2018–2019 гг. и 2020–2023 гг. характеризуют синкинематические изменения в плоскости разлома под ст. 27, а интервалы 2015–2018 и 2019–2020 гг. – относительную стабилизацию. Вариации T(Si) не зависят от импульсов T(Na/Li). Мы предполагаем, что вариации T(Si) являются первичными, а вариации T(Na/Li) – наложенными на вариации T(Si).

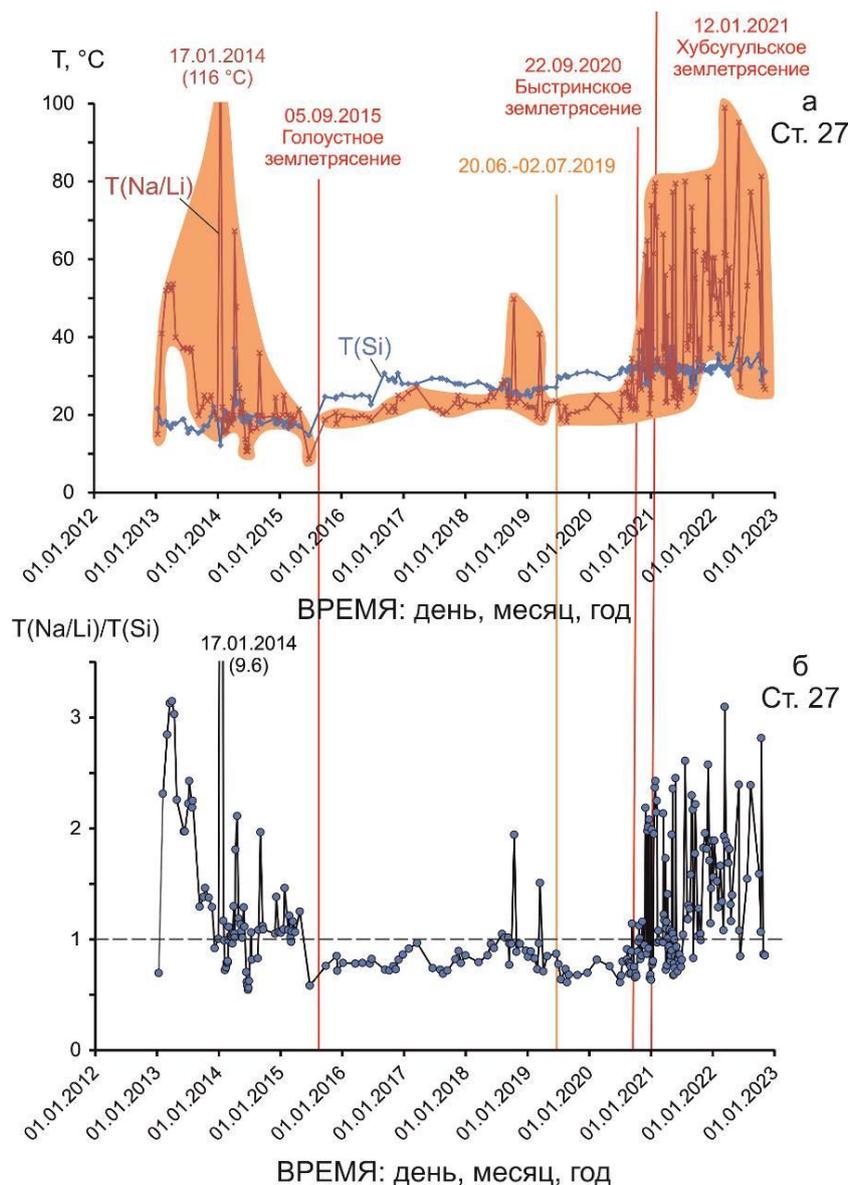


Рис. 2. Временные вариации температуры резервуара подземных вод под ст. 27 по халцедоновому [T(Si)] и Na/Li [T(Na/Li)] геотермометрам (а) и [T(Si)] / [T(Na/Li)] отношений (б). Красными вертикальными линиями показано время ключевых землетрясений (Карта..., 2023), оранжевой линией – эпизод резкого подъема концентрации Si в подземных водах всех станций Култукского полигона в 2019 г. с переходом к предсейсмическому режиму (Ильясова, Снопков, 2023).

Fig. 2. Temporal variations in temperature of a groundwater reservoir under station 27 from chalcedony [T(Si)] and Na/Li [T(Na/Li)] geothermometers (a) and [T(Si)] / [T(Na/Li)] ratios (б). Red vertical lines show timing of key earthquakes (Map..., 2023), the orange line shows an episode of a sharp increase in the Si concentration in groundwater at all stations of the Kultuk polygon in 2019 with transition to a preseismic regime (Plyasova, 2023).

Компоненты подземных вод на диаграммах Li – Si и Na – Si

В 2012–2022 гг. концентрация термфильного элемента Si в подземных водах всех станций Култукского полигона последовательно возрастает (Ильясова, Снопков,

2023). Прослеживание временных изменений температур резервуара требует анализа компонентного состава подземных вод. В подземных водах Култукского полигона компонентный состав выявляется через соотношение элементов с температурными трендами и трендами смешения.

Для прослеживания трендов ряды наблюдений разделяются на 4 временных интервала: 1) 2012–2015 гг. (до Голоустного землетрясения 5 сентября 2015 г.), 2) 2015–2019 гг. (от Голоустного землетрясения до 20 июня 2019 г.), 3) 2019–2020 гг. (предсейсмический интервал от 02 июля 2019 г. до Быстринского землетрясения 22 сентября 2020 г.) и 4) 2020–2022 гг. (сейсмический интервал от 22 сентября 2020 г. до конца 2022 г.).

Во временном интервале 2012–2015 гг. концентрация Si подземных вод ст. 27 находится в основном в интервале 5–7 мг/дм³. Преобладающая концентрация Li составляет около 0.2 мкг/дм³. В отдельных пробах его концентрация возрастает до 0.4 мкг/дм³, а в пробе, отобранной 17 января 2014 г., увеличивается до 1.2 мкг/дм³. После Голоустного землетрясения, в 2015–2019 гг., concentra-

ция Si возрастает до интервала 6.5–8.5 мг/дм³, а концентрация Li по-прежнему в основном составляет около 0.2 мкг/дм³. Концентрация Li слегка повышается (до интервала 0.27–0.43 мкг/дм³) только в трех пробах, отобранных 19 августа и 14 октября 2018 г., а также 15 марта 2019 г. В следующем временном интервале 2019–2020 гг., Si снова растет (до интервала 8.0–8.7 мг/дм³) при концентрации Li 0.20–0.28 мкг/дм³. Только одна проба, отобранная 10 сентября 2020 г., показывает повышенную концентрацию Li (0.34 мкг/дм³). В последнем временном интервале 2020–2022 гг. содержание Si составляет в основном 8.4–8.7 мг/дм³ при концентрации Li 0.2–0.4 мкг/дм³. На диаграмме Li – Si фигуративные точки рассеиваются с возрастанием Si и Li (рис. 3а).

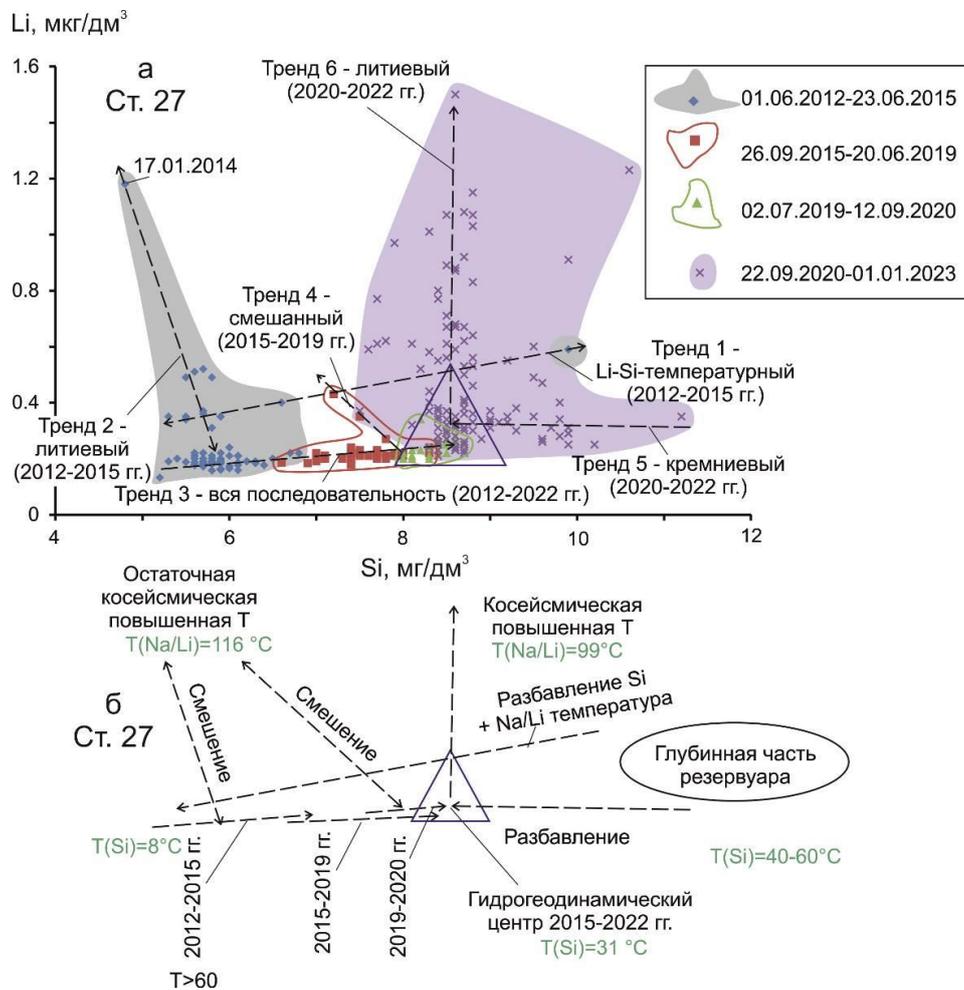


Рис. 3. Диаграмма Li – Si (а) и ее интерпретация (б) для подземных вод ст. 27.

Fig. 3. Diagram Li vs Si (a) and its interpretation (б) for groundwaters from station 27.

Разновременные тренды, выделенные на рис. 3а, интерпретируются на рис. 3б. В интервале 2012–2015 гг. различаются 2 тренда: тренд 1 – Li–Si температурный, характеризует широкие вариации Si при повышенной концентрации Li; тренд 2 – литиевый, обозначает широкие вариации Li при относительно низкой концентрации Si. Тренд 2 характеризует смешение косейсмического компонента с повышенной Na/Li температурой (до 116 °С) в плоскости разлома под ст. 27 с относительно холодными подземными водами тренда 2 в 2012–2015 гг. Косейсмический высокотемпературный Li компонент характеризует первую половину временного интервала между Култукской и Байкало-Хубсугульской активизациями и рассматривается как выражение остаточных процессов, фактически связанных с завершением сейсмогенных деформаций сильной Култукской активизации.

Основной тренд всей мониторинговой последовательности (тренд 3) включает фигуративные поля подземных вод 2012–2022 гг., показывающие возрастание температуры по Si геотермометру от 10–15 °С до Голоустного землетрясения 2015 г. до 31 °С в гидрогеодинамическом центре 2015–2022 гг. Вдоль основного тренда 3 последовательно возрастает роль подземных вод с повышенной T(Si), поступающих из глубинной части резервуара. Тренд 4 показывает Li компонент, связанный с общим гидрогеохимическим центром в 2015–2019 гг.

Тренды 5 и 6 2020–2022 гг., направленные, соответственно, вдоль абсциссы и ординаты, обозначаются как кремниевый и литиевый тренды. Кремниевый тренд 5 свидетельствует о глубинной подпитке гидрогеодинамического центра, в котором определяется температура около 31 °С. С одной стороны, гидрогеодинамический центр образуется в результате разбавления

подземных вод, поднимающихся из глубинной части резервуара, слабо минерализованными водами с образованием тренда 5, с другой стороны, этот центр дает исходные составы для развития тренда 6 косейсмического возрастания температуры по Na/Li геотермометру до 99 °С. Следовательно, Na/Li температура повышается непосредственно в гидрогеодинамическом центре.

Из регионального геотермического градиента 25 °С/км (Голубев, 2007), по Si геотермометру получаем оценку глубины гидрогеодинамического центра 2015–2022 гг. около 1.2 км.

Концентрация Na в подземных водах ст. 27 находится в основном в интервале 5.4–6.4 мг/дм³ и снижается 17 января 2014 г. до 3.4 мг/дм³ при содержании Si 4.8 мг/дм³. В этом соотношении Na и Si тренды подземных вод 2012–2015 и 2015–2022 гг. сходятся между собой. Фактически, тренд 2015–2022 гг. начинает выстраиваться от общего состава, проявившегося 17 января 2014 г., концентрированной группой трех фигуративных точек 19 апреля – 09 мая этого же года. Более отчетливо тренд оформляется после Голоустного землетрясения, в интервале с 26 сентября 2015 г. до 20 июня 2019 г. В начале этого интервала (во второй половине 2015 г.) и в первой половине 2016 г., четыре фигуративные точки смещаются к тренду 2012–2015 гг. Образуется основа тренда А. Следующий временной интервал (02 июля 2019 г. – 12 сентября 2020 г.), предшествующий Быстринскому землетрясению 22 сентября 2020 г., обозначается концентрированной совокупностью точек. Образуется основа тренда Б с более крутым возрастанием Na и Si, чем в тренде А. С 22 сентября 2020 г. до конца 2022 г. фигуративные точки концентрируются вдоль трендов А и Б с частичным рассеиванием в их окружении (рис. 4).

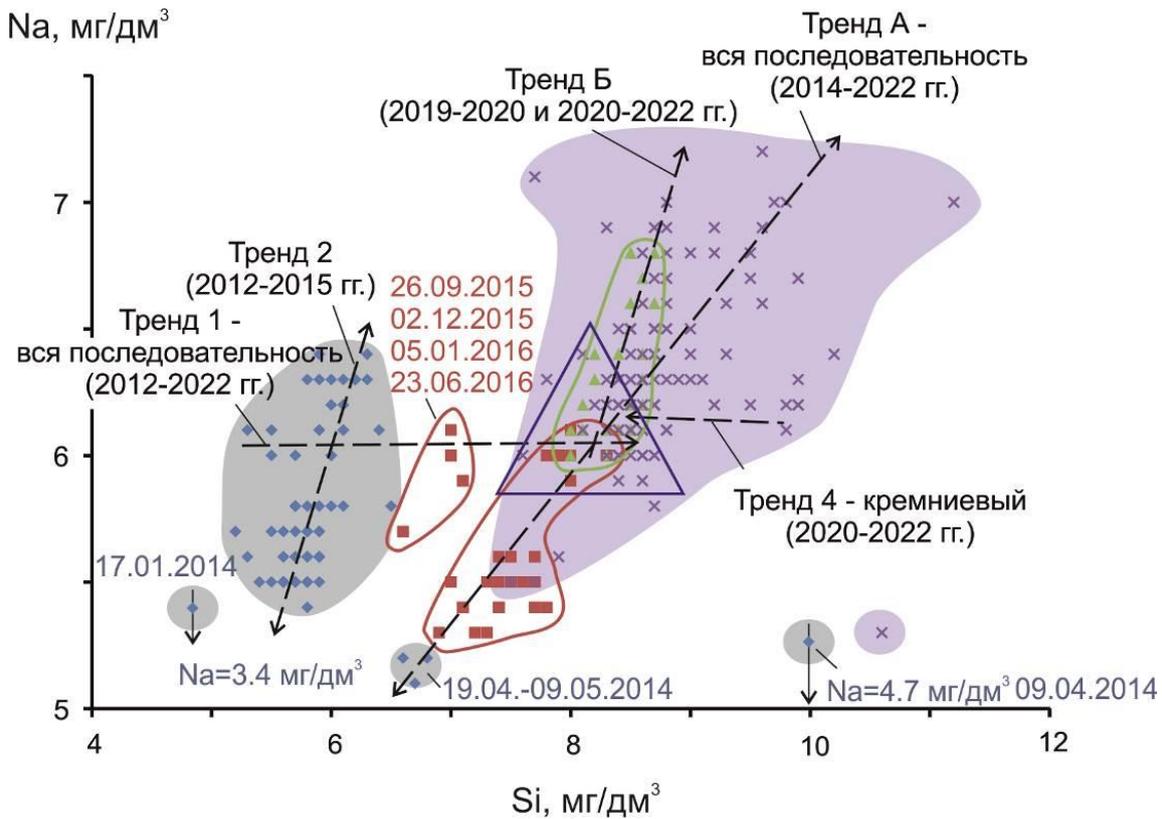


Рис. 4. Диаграмма Na –Si подземных вод ст. 27. Условные обозначения см. на рис. 3а.

Fig. 4. Diagram of Na vs Si for groundwaters from station 27. Symbols are as in Fig. 3a.

Из анализа диаграмм рис. 3 и 4 следует вывод о существенном различии поведения Li относительно Si и поведения Na относительно Si. Поведение Li отчетливо контролируется косейсмическим эффектом возрастания температуры с образованием глинки трения в плоскости разлома. Хотя группирование точек Na относительно Si в общем соответствует группированию Li относительно Si, тренды отражают зависимость поведения Na не только от температуры, но и других гидрогеохимических параметров подземных вод Култукского полигона, которые в настоящей работе не рассматриваются.

Обсуждение результатов

Схема развития резервуара подземных вод под ст. 27

В кремниевом (халцедоновом) и Na/Li геотермометрах заложены разные принципы

расчета температуры резервуара подземных вод. Первый основан на зависимости растворимости Si от температуры и отражает фактор разбавления термальных вод, поднимающихся из резервуара. По кремниевому термометру определяется температура растворения–разбавления (ТРР). Второй служит показателем косейсмических деформаций в плоскости активного разлома Култукского полигона, сопровождающихся возрастанием температуры с образованием глинки трения. По Na/Li геотермометру определяется температура трения (ТТ). Благодаря различию принципов фиксации температуры подземных вод развитие резервуара расшифровывается в терминах ТТ и ТРР (рис. 5, 6).

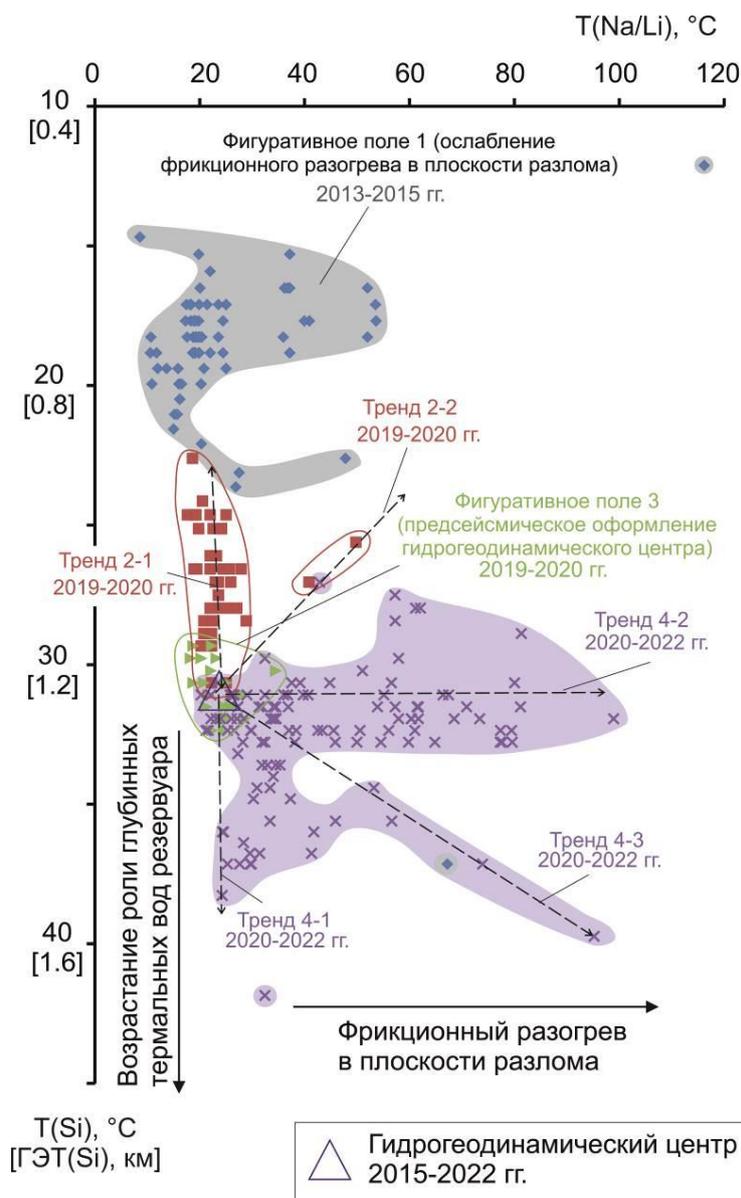


Рис. 5. Диаграмма $T(\text{Si}) - T(\text{Na/Li})$ подземных вод ст. 27. Условные обозн. см. на рис. 3а. ГЭТ(Si) – глубинный эквивалент температуры.

Fig. 5. Diagram $T(\text{Si}) - T(\text{Na/Li})$ of groundwaters from st. 27. Symbols are as in Fig. 3a. ГЭТ(Si) is deep equivalent of temperature.

В подземных водах 2013–2015 гг. наблюдаются относительно низкие ТРР резервуара. Подземные воды либо поступают из неглубокого (менее 1 км) источника или существенно разбавляются слабо минерализованными водами. Между тем, косейсмические движения коры приводят к возрастанию ТТ с образованием глинки трения в плоскости активного разлома, в связи с чем $T(\text{Na/Li})$ подземных вод варьируется от 8 до 53 °С. Отдельный эпизод $T(\text{Na/Li}) = 116$ °С проявляется при низком значении $T(\text{Si})$

(12 °С), другой эпизод $T(\text{Na/Li}) = 67$ °С – при повышенном значении $T(\text{Si})$ (37 °С). По отсутствию ярко выраженных трендов ТТ и/или ТРР активность 2013–2015 гг. рассматривается как остаточная от развития предшествующей сильной Култукской сейсмической активизации 2008–2011 гг. (фигуративное поле 1 на рис. 5).

5 сентября 2015 г. Голоустное землетрясение маркирует кардинальную перестройку сейсмогенных деформаций коры от сильной Култукской активизации к сильной Байкало-

Хубсугульской. В 2015–2019 гг. в резервуаре оформляется новый гидрогеодинамический центр на глубине около 1.2 км. В этом временном интервале компоненты подземных вод формирующегося гидрогеодинамического центра продолжают смешиваться с косейсмическим компонентом 2013–2015 гг. От гидрогеодинамического центра ($T(\text{Na/Li}) = 20$ °С, $T(\text{Si}) = 31$ °С) отходят два тренда: тренд ТРР (тренд 2–1), субпараллельный оси ординат, и тренд ТРР+ТТ (тренд 2–2) возрастания $T(\text{Na/Li})$ до 50 °С одновременно со снижением $T(\text{Si})$ до 25 °С.

В 2019–2020 гг. гидрогеодинамический центр оформляется в виде изометричного фигуративного поля точек 3. Заметное косейсмическое возрастание $T(\text{Na/Li})$ подземных вод в нем отсутствует. Это состояние резервуара оценивается как предсейсмическое.

С началом Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2022 гг. от компонента гидрогеодинамического центра образуются новые тренды 4–1, 4–2 и 4–3. В тренде ТРР (тренд 4–1) проявляется роль глубинного компонента при предельно-низком $T(\text{Na/Li})$, на уровне значения гидрогеодинамического центра (см. рис. 3а). В преобладающем тренде ТТ (тренд 4–2) резко отражаются косейсмические движения с образованием глинки трения в плоскости разлома на глубине гидрогеодинамического центра (около 1.2 км) с возрастанием $T(\text{Na/Li})$ до 99 °С. В менее представительном тренде ТРР+ТТ (тренд 4–3) проявляется фактор такого же возрастания температуры трения одновременно с проявлением фактора растворения–разбавления кремния.

Соотношение трендов ТТ и ТРР во временном интервале вступления Байкало-Хубсугульской активизации

В интервале 22 сентября 2020 г. – 18 февраля 2021 гг. различается 12 эпизодов меняющихся соотношений $T(\text{Si}) - T(\text{Na/Li})$ (рис. 7). Землетрясения происходят в ходе изме-

нений температурного режима резервуара подземных вод в терминах ТРР и ТТ.

В предсейсмический интервал 2019–2020 гг. и во время Быстринского землетрясения (22 сентября 2020 г.) подземные воды поступают из гидрогеодинамического центра, а в течение последующих двух месяцев образуется тренд возрастания $T(\text{Si})$ от 31 до 37 °С одновременно с возрастанием $T(\text{Na/Li})$ от 21 до 42 °С (эпизод 1). Быстринскому землетрясению предшествует интервал подземных вод гидрогеодинамического центра, соответствующий подготовке землетрясения продолжительностью 13 месяцев и 20 дней (с 02 июля 2019 г. до 22 сентября 2020 г.). После землетрясения следует 2-х месячный интервал режима ТРР+ТТ, соответствующий релаксации тектонических напряжений в коре после сейсмического толчка.

29 ноября 2020 г. скачкообразно возрастает $T(\text{Na/Li})$ до 61 °С одновременно со снижением $T(\text{Si})$ до 28 °С (эпизод 2), но 06 декабря температуры возвращаются в пределы фигуративного поля эпизода 1 при значениях $T(\text{Si}) = 35$ и $T(\text{Na/Li}) = 30$ (эпизод 3). 10 декабря происходит Кударинское землетрясение, во время которого и 3 дня после него наблюдаются высокие значения $T(\text{Na/Li})$ (57–65 °С) при пониженных значениях $T(\text{Si})$ (28–33 °С) (эпизод 4), но уже 17 декабря значения температур вновь возвращаются в пределы фигуративного поля эпизода 1 ($T(\text{Si}) = 32$ °С и $T(\text{Na/Li}) = 29$ °С (эпизод 5). 20 декабря 2020 г. скачкообразно возрастает $T(\text{Na/Li})$ до 57 °С одновременно со снижением $T(\text{Si})$ до 28 °С (эпизод 6), но 24 декабря температуры возвращаются к значениям гидрогеодинамического центра ($T(\text{Si}) = 31$ и $T(\text{Na/Li}) = 20$) (эпизод 7). Соотношение температур приближается к их соотношению во время Быстринского землетрясения. В эпизодах 2–7 реализуется тренд ТТ. Вдоль этого тренда до и после Кударинского землетрясения насчитывается 11–12 дней.

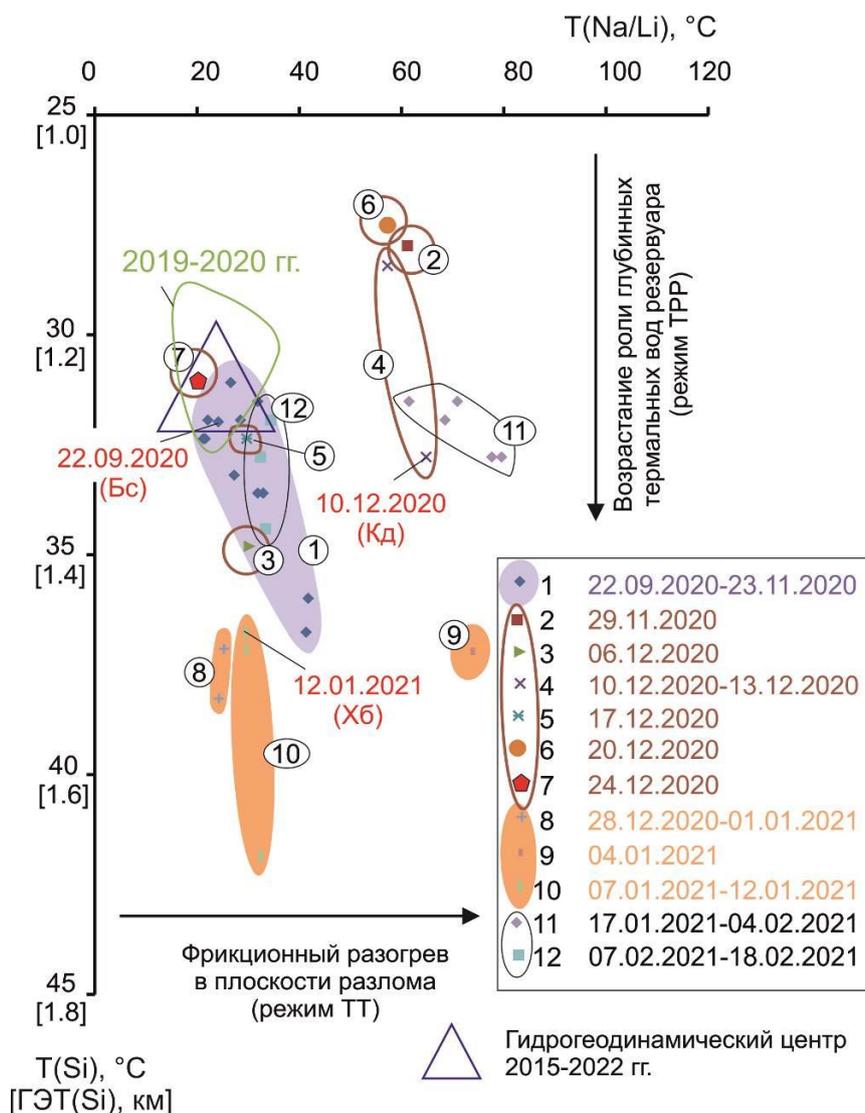


Рис. 7. Диаграмма $T(\text{Si}) - T(\text{Na/Li})$ подземных вод ст. 27 для временного интервала вступления Байкало-Хубсугульской активизации, от 22 сентября 2020 г. (Быстринское землетрясение) до 18 февраля 2021 г. Цветами выделены фигуративные поля и время вариаций температур подземных вод: от зеленого к сиреновому, связанных с Быстринским землетрясением (Бс), темно-коричневым цветом – связанных с Кударинским землетрясением (Кд), персиковым – связанных с Хубсугульским землетрясением (Хб), черным – связанных с афтершоками в Хубсугульском эпицентральной поле. Для сравнения показано фигуративное поле 3 подземных вод предсейсмического интервала 2019–2020 гг.

Fig. 7. Diagram $T(\text{Si}) - T(\text{Na/Li})$ of groundwaters from st. 27 for the time interval of the onset of the Baikal-Khubsugul reactivation, from September 22, 2020 (Bystraya earthquake) to February 18, 2021. Data fields and time of groundwater temperature variations are highlighted in colors: from green to lilac, associated with the Bystraya earthquake (Бс), dark-brown – associated with the Kudara earthquake (Кд), peach – associated with the Khubsugul earthquake (Хб), black – associated with aftershocks in the Khubsugul epicentral field. For comparison, a data groundwater field 3 of the pre-seismic interval 2019–2020 is shown.

В дальнейшем характер вариаций температур меняется. 28 декабря 2020 г. – 01 января 2021 г. заметно возрастает $T(\text{Si})$ (до интервала 37–38 °C) без существенного повышения $T(\text{Na/Li})$ (значения находятся в интервале 24–25 °C) (эпизод 8). 04 января

2021 г. скачкообразно возрастает $T(\text{Na/Li})$ до 74 °C при $T(\text{Si}) = 37$ °C (эпизод 9), но 07 – 12 января 2021 г. температуры возвращаются к значениям эпизода 8 ($T(\text{Si}) = 37\text{--}42$ °C и $T(\text{Na/Li}) = 30\text{--}32$ °C) (эпизод 10). В конце эпизода 10 происходит главное событие

Байкало-Хубсугульской активизации – Хубсугульское землетрясение. В эпизодах 8–10 реализуется тренд ТРР с боковым отклонением тренда ТТ. С Хубсугульским землетрясением связано только предшествующее ему состояние подземных вод в течение 15 дней.

17 января – 04 февраля 2021 г. скачкообразно возрастает $T(\text{Na/Li})$ до интервала 61–80 °С при $T(\text{Si}) = 31\text{--}33$ °С (эпизод 11). В этом интервале происходят афтершоки ($K = 12.0\text{--}12.9$) Хубсугульского эпицентрального поля: 13, 15, 18, 28 января и 03 февраля 2021 г. В этом эпизоде реализуется тренд ТТ (относительно гидрогеодинамического центра).

В интервале 07 – 18 февраля значения температур возвращаются в пределы фигуративного поля эпизода 1 ($T(\text{Si}) = 32\text{--}34$ °С и $T(\text{Na/Li}) = 32\text{--}34$ °С) (эпизод 12). Температуры $T(\text{Si})$ и $T(\text{Na/Li})$ уравниваются между собой. 07 февраля происходит Кударинский афтершок ($K = 11.7$) и 15 февраля – Хубсугульский афтершок ($K = 12.3$).

Дальнейшие соотношения температур подземных вод и землетрясений Байкало-Хубсугульской активизации в настоящей работе не рассматриваются. Уже из представленных данных можно сделать вывод о том, что каждое из трех землетрясений вступления Байкало-Хубсугульской активизации и ближайшие афтершоки характеризуются своим соотношением $T(\text{Si}) - T(\text{Na/Li})$ подземных вод ст. 27. Запускающее Быстринское землетрясение обозначается соотношением температур гидрогеодинамического центра. Промежуточное Кударинское землетрясение показывает возрастание роли движений в плоскости разлома с образованием глинки трения ($T(\text{Na/Li})$), а следующее за ним главное (Хубсугульское) землетрясение – показывает возрастание роли глубинных термальных вод резервуара ($T(\text{Si})$).

Различия между подземными водами гидрогеодинамического центра и производных от него ТТ и ТРР могут расшифровываться с построением схемы развития резервуара подземных вод как тектоно-термального аналога очага землетрясения. В сущности,

по выполненной реконструкции изменений в резервуаре подземных вод, можно судить об основных этапах изменений, происходящих в таком очаге.

Заключение

На Култукском полигоне прослежена термальная история резервуара подземных вод, развивавшегося аналогично процессам подготовки и реализации землетрясений. Ряды данных по концентрациям термофильных элементов Si, Na и Li, полученные для подземных вод ст. 27 в 2012–2022 гг., интерпретированы в связи с переходом от косейсмических Na/Li компонентов Култукской сейсмической активизации к косейсмическим Na/Li компонентам Байкало-Хубсугульской активизации с идентификацией гидрогеодинамического центра по кремниевому компоненту подземных вод на глубине около 1.2 км.

Во временном интервале вступления Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2022 гг. определены эпизоды менявшихся соотношений $T(\text{Si}) - T(\text{Na/Li})$ резервуара подземных вод в терминах ГЦ, ТРР и ТТ. Запускающую активизацию Быстринскому землетрясению предшествует интервал подземных вод гидрогеодинамического центра, соответствующий временному интервалу подготовки землетрясения продолжительностью 13 месяцев и 20 дней. За ним следует 2-х месячный интервал режима ТРР+ТТ, соответствующий релаксации тектонических напряжений после сейсмического толчка. До и после Кударинского землетрясения подземные воды характеризуются режимом ТТ в течение 11–12 дней. С Хубсугульским землетрясением связано только предшествующее ему состояние подземных вод в течение 15 дней, когда реализуется тренд ТРР с боковым отклонением тренда ТТ. После этого землетрясения (во время афтершоков) подземные воды возвращаются к режимам ТТ и ГЦ (рис. 8).

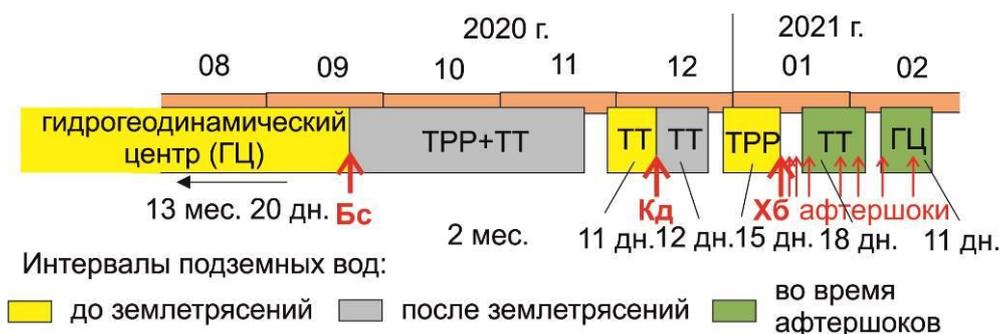


Рис. 8. Схема временных соотношений температурных интервалов Na/Li и Si компонентов подземных вод ст. 27 (ГЦ, ТТ, ТРР и ТРР+ТТ) при вступлении Байкало-Хубсугульской активизации в конце 2020 г. и в начале 2021 г. Землетрясения: Бс – Быстринское, Кд – Кударинское, Хб – Хубсугульское.

Fig. 8. Scheme of temporal relationships between temperature intervals of Na/Li and Si components of groundwaters from st. 27 (ГЦ, ТТ, ТРР and ТРР+ТТ) and the entry of the Baikalo-Khubsugul reactivation in the fall of 2020 and in the early 2021. Earthquakes: Бс – Bystroe, Кд – Kudara, Хб – Khubsugul'skoe.

Установленные соотношения косейсмических компонентов ТРР и ТТ с компонентом гидрогеодинамического центра могут использоваться для распознавания обстановок подготовки и реализации землетрясений в центральной части Байкальской рифтовой системы.

Благодарности

Состав воды анализировался на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500се в ЦКП «Ультрамикроданализ» (ЛИН СО РАН, г. Иркутск). Методические подходы к анализу подземных вод частично разработаны при выполнении темы ИЗК СО РАН на 2021–2025 гг. FWEF-2021-0009 и темы Минобрнауки ЛИН СО РАН № 0279-2021-0008 (121032300186-9). В работе использованы данные о землетрясениях, полученные на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Литература

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

Борняков С.А., Добрынина А.А., Семинский К.Ж., Саньков В.А., Радзиминович Н.А., Салко Д.В., Шагун А.Н. Быстринское землетрясение в южном Прибайкалье (21.09.2020 г., Mw = 5.4):

общая характеристика, основные параметры и деформационные признаки перехода очага в мета-нестабильное состояние // ДАН. Науки о Земле. 2021а. Т. 498, № 1. С. 84–88. DOI: 10.31857/S2686739721050042

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

Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО», 2007. 222 с.

Ильясова А.М., Снопков С.В. Временные вариации термофильного элемента Si подземных вод западного побережья оз. Байкал в 2012–2022 гг. // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 72–105. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.72>

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

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

Рассказов С.В., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Оргильянов А.И., Коваленко С.Н., Семинский А.К., Попов Е.П., Чебыкин Е.П. Гидрогеохимическая зональность изотопов урана ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) на юге Сибирского палеоконтинента: роль резервуара Южного Байкала в формировании подземных вод // Геодинамика и тек-

тонофизика. 2020. Т. 11, № 3. С.:632–650. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496>

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

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

Чебыкин Е.П., Чувашова И.С. Косейсмическая химическая гидрогеодинамика Култукского резервуара подземных вод в 2012–2022 гг.: индикаторные роли Na/Li, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ и ^{234}U // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 141–171. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.141>

Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Снопков С.В., Рассказов С.В. Сигналы ртути подземных вод Култукского полигона во время подготовки и реализации Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации 2020–2021 гг. // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 1. С. 7–9. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2022.1.7>

Чебыкин Е.П., Сороковикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В., Грачёв М.А. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20, № 5. С. 613–631.

Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 6. С. 936–937.

Чувашова И.С., Ильясова А.М. Косейсмические вариации Li в подземных водах станции 27 Култукского полигона в 2012–2022 гг. // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 106–123 <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.106>

Arnorsson S., Gunnlaugsson E., Svavarsson H. The chemistry of geothermal waters in Iceland-II. Mineral equilibria and independent variables controlling water compositions // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1983. V. 47. P. 547–566.

Boldina S.V., Kopylova G.N. Effects of the January 30, 2016, Mw=7.2 Zhupanovsky earthquake on the water level variations in wells YuZ-5 and E-1 in Kamchatka // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2017. V. 8, No. 4. P. 863–880. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0321.

Chia Y., Chiu J.J., Chiang Y.-H., Lee T.-P., Liu C.-W. Spatial and temporal changes of groundwater level induced by thrust faulting // *Pure and Applied Geophysics*. 2008. V. 165, No. 1. P. 5–16. <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0293-5>.

Claesson L., Skelton A., Graham C., Dietl C., Mörth M., Torssander P., Kockum I. Hydrogeochemical changes before and after a major earthquake // *Geology*. 2004. V. 32, No. 8. P. 641–644. doi: 10.1130/G20542.1

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

King C.-Y., Koizumi N., Kitagawa Y. Hydrogeochemical anomalies and the 1995 Kobe Earthquake // *Science*. 1995. V. 269. P. 38–39.

Matsumoto N., Koizumi N. Recent hydrological and geochemical research for earthquake prediction in Japan // *Nat Hazards*. 2013. V. 69. P. 1247–1260. DOI 10.1007/s11069-011-9980-8

Plastino W., Panza G.F., Doglioni C., Frezzotti M.L., Peccerillo A., De Felice P., Bella F., Povinec P.P., Nisi S., Ioannucci L., Aprili P., Balata M., Cozzella M. L., Laubenstein M. Uranium groundwater anomalies and active normal faulting // *J Radioanal Nucl Chem*, 2011. Vol. 288. P. 101–107. DOI 10.1007/s10967-010-0876-y

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Pyasova A.M., Snopkov S.V., Bornyakov S.A., Chuvashova I.S. Change of seismic hazard levels in complete 12-year seismogeodynamic cycle of the South Baikal Basin: Results of hydroisotopic ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) monitoring // *Geology and Environment*. 2022. V. 2, No. 2. P. 7–21. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.7

Sadovsky M.A. Prediction of earthquake time // *Earth and Universe*. 1978. No. 6.

Sadovsky M.A., Monakhov F.I., Semenov A.N. Hydrogeodynamic precursors of the South Kurile earthquakes // *Doklady AN USSR*. 1977. Vol. 236, No. 1.

Shi Z., Wang G., Manga M., Wang C.Y. Mechanism of co-seismic water level change following four great earthquakes – insights from co-seismic responses throughout the Chinese mainland // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. V. 430. P. 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.08.012>.

Sobolev G.A. Fundamentals of earthquake prediction. M: Nauka, 1993. 313 pp.

Solonenko V.P. Seismogeology and the problem of prediction of earthquakes // *Geology and Geophysics*. 1974. No. 5. P. 168–178.

Sukhija B.S., Reddy D.V., Nagabhushanam P., Kumar B. Significant temporal changes in ^{13}C in dissolved inorganic carbon of groundwater related to reservoir-triggered seismicity // *Seismological Research Letters*. 2010. V. 81, No. 2. P. 218–224. doi:10.1785/gssrl.81.2.218

Tsunogai U., Wakita H. Precursory chemical changes in ground water: Kobe Earthquake, Japan // *Science*. 1995. V. 269. P. 61–63.

Varshal G.M., Sobolev G.A., Barsukov V.L., Koltsov A.V., Kostin B.I., Kudinova T.F., Stakheyev Y.I., Tretyakova S.P. Separation of volatile components from rocks under mechanical loading as the source of hydrogeochemical anomalies preceding earthquakes // *Pure Appl. Geophys.*, 1985. V. 122. P. 463–477.

References

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

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

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

Chebykin E.P., Chuvashova I.S. Coseismic chemical hydrogeodynamics of the Kultuk ground-

water reservoir in 2012–2022: indicator roles of the Na/Li, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, and ^{234}U // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 141–171. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.141> (in Russian)

Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Rasskazov S.V. Groundwater mercury signals from the Kultuk polygon during the preparation and implementation of the Baikal-Khubsugul seismic activation in 2020–2021. // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 1. P. 7–9. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2022.1.7> (in Russian)

Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Vodneva E.N., Rasskazov S.V., Khodger T.V., Grachev M.A. The current state of the waters of the Selenga river on the territory of Russia on the main components and trace elements // *Chemistry for sustainable development*. 2012. V. 20, No. 5. P. 613–631. (in Russian)

Chipizubov A.V., Smekalin O.P. Paleoseis-modislocations and related paleoearthquakes at the Main Sayan Fault zone // *Russian Geology and Geophysics*. 1999. V. 40, No. 6. P. 936–937. (in Russian)

Chuvashova I.S., Ilyasova A.M. Coseismic variations of Li in groundwaters from station 27 of the Kultuk polygon in 2012–2022 // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 106–123. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.106> (in Russian)

Golubev V.A. Conductive and convective heat transfer in the Baikal rift zone. Novosibirsk: Academic publishing house "GEO", 2007. 222 p. (in Russian)

Ilyasova A.M., Snopkov S.V. Temporal variations of thermophilic element Si in groundwaters from the SW coast of Lake Baikal in 2012–2022 // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 72–105. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.72> (in Russian)

Map of earthquake epicenters. Irkutsk: Baikal Branch of the Geophysical Survey, 2023. <http://www.seis-bykl.ru> (in Russian)

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

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Orgilyanov A.I., Kovalenko S.N., Seminsky A.K., Popov E.P., Chebykin E.P. Hydrogeochemical zoning of uranium isotopes

(234U/238U) in the Southern Siberian paleocontinent: the role of the South Baikal reservoir in the groundwater formation // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2020;11(3):632-650. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496> (in Russian)

Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Radziminovich N.A., Rasskazov S.V., Sankov V.A., Mialle P., Bobrov A.A., Ilyasova A. M., Salko D.V., Sankov A.V., Seminsky A.K., Chebykin E.P., Shagun A.N., German V.I., Tubanov Ts.A., Ulzibat M. Bystrinskoye earthquake in the Southern Baikal region (September 21, 2020, Mw=5.4): main parameters, signs of preparation and accompanying effects // *Russian Geology and Geophysics*. 2021. V. 62, No. 5. P. 727–743. (in Russian)

Seminsky K.Zh., Dobrynina A.A., Bornyakov S.A., Sankov V.A., Pospeev A.V., Rasskazov S.V., Perevalova N.P., Seminskiy I.K., Lukhnev A.V., Bobrov A.A., Chebykin E.P., Edemskiy I.K., Ilyasova A.M., Salko D.V., Sankov A.V., Korol S.A., 2022. Integrated monitoring of hazardous geological processes in Pribaikalye: Pilot network and first results // *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (5), 0677. doi:10.5800/GT-2022-13-5-0677 (in Russian)

Arnorsson S., Gunnlaugsson E., Svavarsson H. The chemistry of geothermal waters in Iceland-II. Mineral equilibria and independent variables controlling water compositions // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1983. V. 47. P. 547–566.

Boldina S.V., Kopylova G.N. Effects of the January 30, 2016, Mw=7.2 Zhupanovsky earthquake on the water level variations in wells YuZ-5 and E-1 in Kamchatka // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2017. V. 8, No. 4. P. 863–880. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0321.

Chia Y., Chiu J.J., Chiang Y.-H., Lee T.-P., Liu C.-W. Spatial and temporal changes of groundwater level induced by thrust faulting // *Pure and Applied Geophysics*. 2008. V. 165, No. 1. P. 5–16. <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0293-5>.

Claesson L., Skelton A., Graham C., Dietl C., Mörth M., Torssander P., Kockum I. Hydrogeochemical changes before and after a major earthquake // *Geology*. 2004. V. 32, No. 8. P. 641–644. doi: 10.1130/G20542.1

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

King C.-Y., Koizumi N., Kitagawa Y. Hydrogeochemical anomalies and the 1995 Kobe Earthquake // *Science*. 1995. V. 269. P. 38–39.

Matsumoto N., Koizumi N. Recent hydrological and geochemical research for earthquake prediction in Japan // *Nat Hazards*. 2013. V. 69. P. 1247–1260. DOI 10.1007/s11069-011-9980-8

Plastino W., Panza G.F., Doglioni C., Frezzotti M.L., Peccerillo A., De Felice P., Bella F., Povinec P.P., Nisi S., Ioannucci L., Aprili P., Balata M., Cozzella M. L., Laubenstein M. Uranium groundwater anomalies and active normal faulting // *J Radioanal Nucl Chem*, 2011. Vol. 288. P. 101–107. DOI 10.1007/s10967-010-0876-y

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Bornyakov S.A., Chuvashova I.S. Change of seismic hazard levels in complete 12-year seismogeodynamic cycle of the South Baikal Basin: Results of hydroisotopic (²³⁴U/²³⁸U) monitoring // *Geology and Environment*. 2022. V. 2, No. 2. P. 7–21. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.7)

Sadovsky M.A. Prediction of earthquake time // *Earth and Universe*. 1978. No. 6.

Sadovsky M.A., Monakhov F.I., Semenov A.N. Hydrogeodynamic precursors of the South Kurile earthquakes // *Doklady AN USSR*. 1977. Vol. 236, No. 1.

Shi Z., Wang G., Manga M., Wang C.Y. Mechanism of co-seismic water level change following four great earthquakes – insights from co-seismic responses throughout the Chinese mainland // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. V. 430. P. 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.08.012>.

Sobolev G.A. Fundamentals of earthquake prediction. M: Nauka, 1993. 313 pp.

Solonenko V.P. Seismogeology and the problem of prediction of earthquakes // *Geology and Geophysics*. 1974. No. 5. P. 168–178.

Sukhija B.S., Reddy D.V., Nagabhushanam P., Kumar B. Significant temporal changes in ¹³C in dissolved inorganic carbon of groundwater related to reservoir-triggered seismicity // *Seismological Research Letters*. 2010. V. 81, No. 2. P. 218–224. doi:10.1785/gssrl.81.2.218

Tsunogai U., Wakita H. Precursory chemical changes in ground water: Kobe Earthquake, Japan // *Science*. 1995. V. 269. P. 61–63.

Varshal G.M., Sobolev G.A., Barsukov V.L., Koltsov A.V., Kostin B.I., Kudinova T.F., Stakheyev Y.I., Tretyakova S.P. Separation of volatile components from rocks under mechanical loading as the source of hydrogeochemical anomalies preceding earthquakes // *Pure Appl. Geophys.*, 1985. V. 122. P. 463–477.

Чебыкин Евгений Павлович,

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

Chebykin Evgeny Pavlovich,

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

Рассказов Сергей Васильевич,

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

Rasskazov Sergei Vasilyevich,

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