

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

А.М. Ильясова¹, С.В. Снопков^{2,3}

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

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

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

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

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

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

A.M. Ilyasova¹, S.V. Snopkov^{2,3}

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

²*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

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

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

Keywords: groundwater, monitoring, earthquakes, Baikal.

Введение

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Характеристика станций Култукского полигона

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

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

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

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

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

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

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

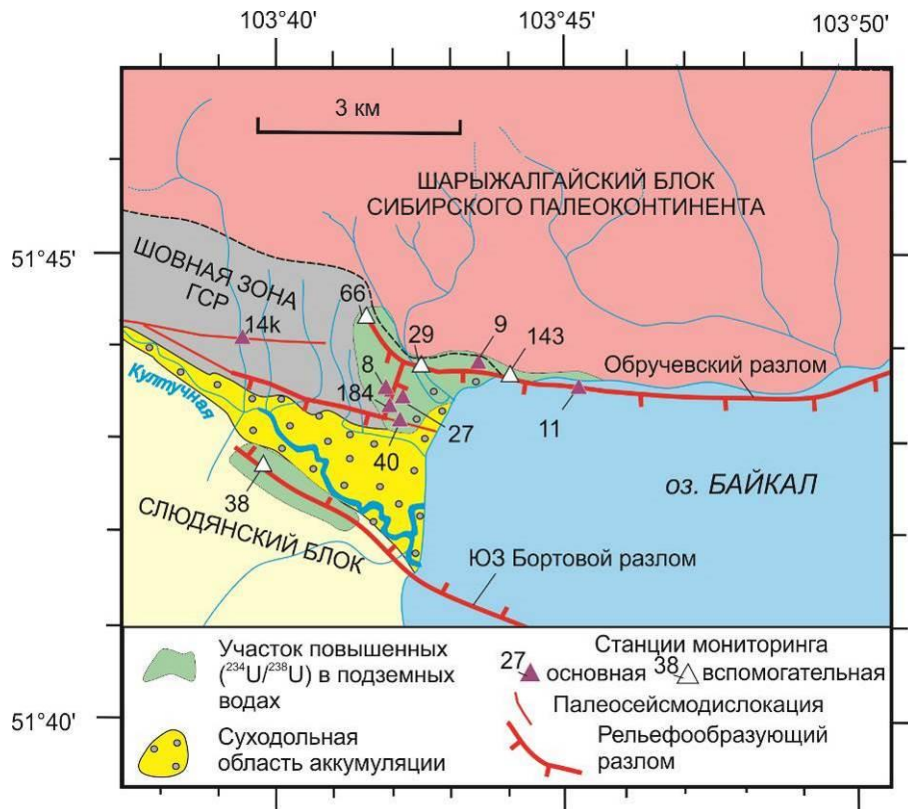


Рис. 1. Схема расположения основных и вспомогательных станций гидрогеохимического опробования активных разломов на западном побережье оз. Байкал (Култукский полигон). Палеосейсмодислокации шовной зоны Главного Саянского разлома (ГСР) показаны по работе (Чипизубов, Смекалин, 1999).

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

Отбор, хранение и аналитические исследования природных вод

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

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

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

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

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

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

Si геотермометрия подземных вод

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Диаграмма Si – Al

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

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

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

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

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

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

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

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

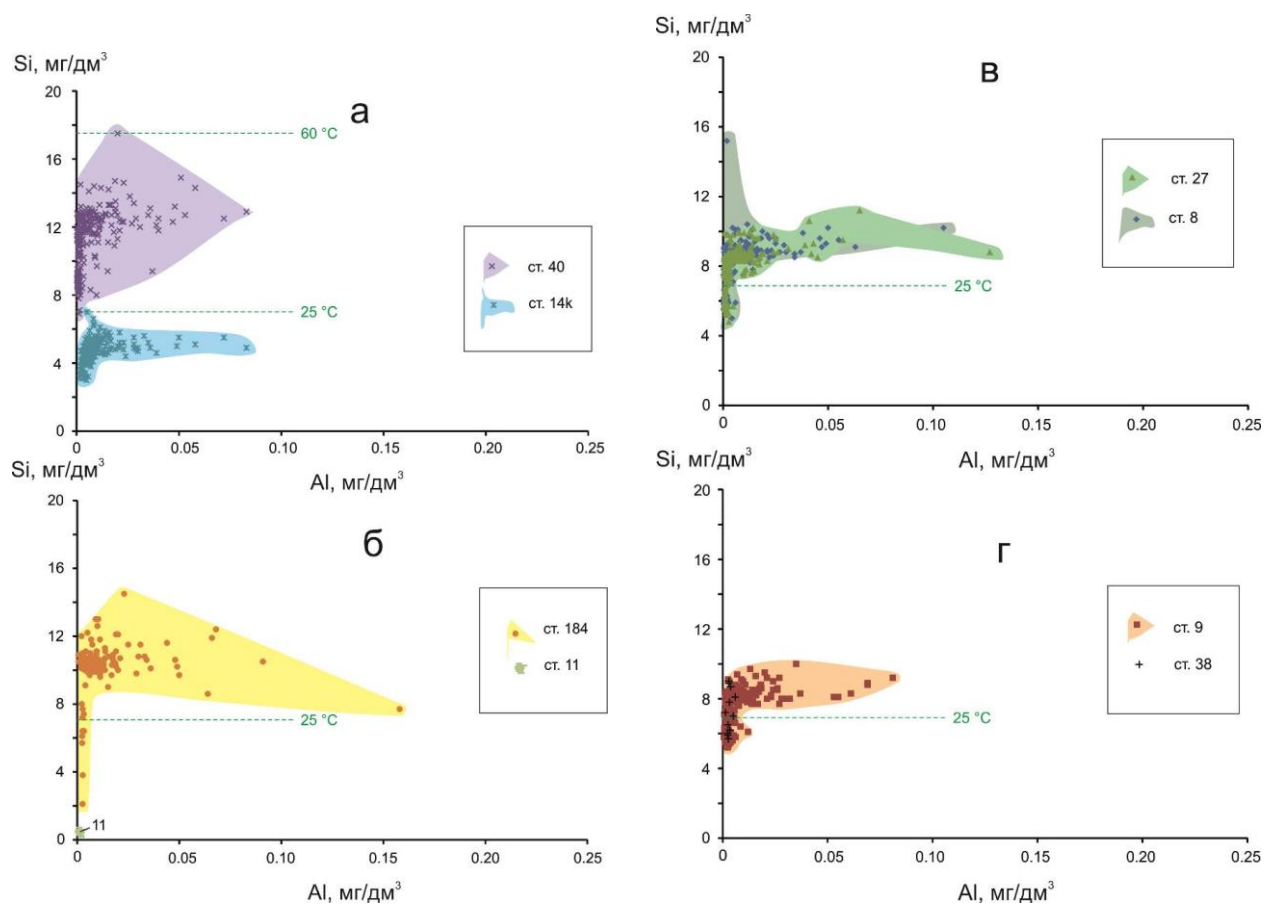


Рис. 2. Диаграммы Si – Al для подземных вод основных станций Култукского полигона: *a* – 40 и 14к зоны ГСР, *б* – ст. 184 Култукской тектонической ступени, наклоненной к востоку, и ст. 11 оз. Байкал, *в* – ст. 27 и 8 Култукской тектонической ступени и *г* – станций западных окончаний зон краевых разломов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

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

Соотношение температур в резервуаре и на выходе подземных вод

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

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

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

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

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

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

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

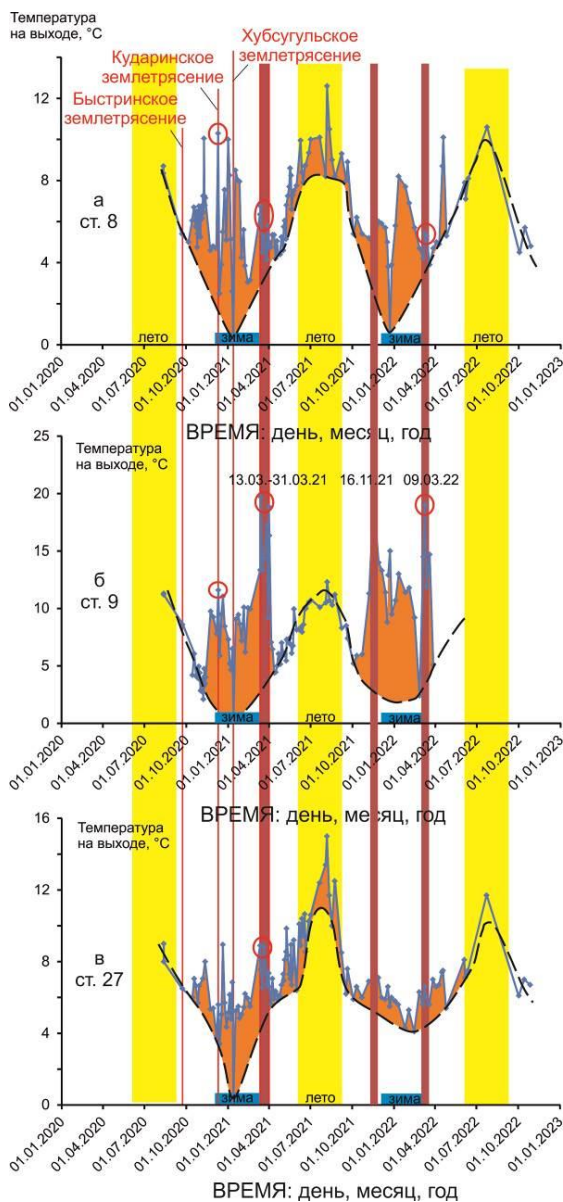


Рис. 3. Диаграмма временных вариаций измеренных температур на выходе подземных вод из скважин: а – ст. 8 (Чертова гора); б – ст. 9 (Земляничный); в – ст. 27 (Школа). Вертикальные желтые полосы обозначают летние месяцы. Черная штриховая линия описывает сезонные минимальные температуры, относительно которых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

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

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

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

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

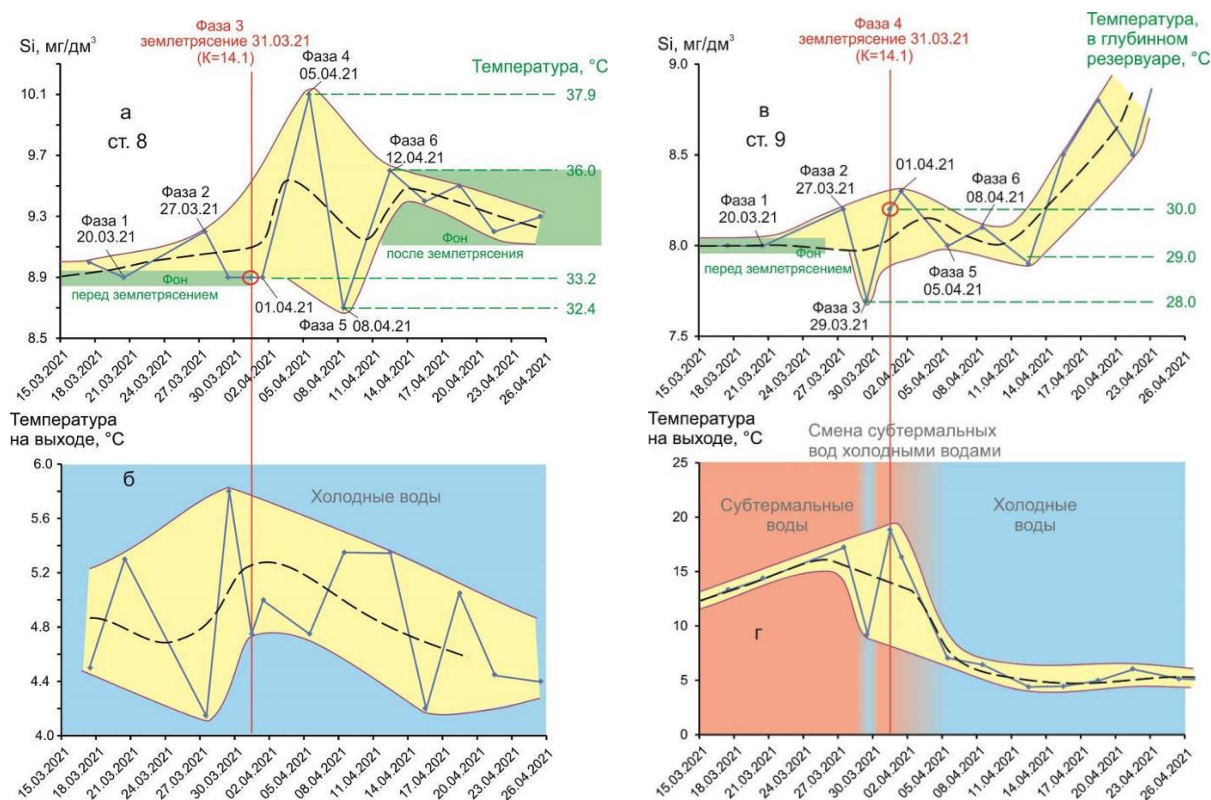


Рис. 4. Диаграмма временных вариаций концентрации Si (а, в) и измеренной температуры на выходе (б, г) в подземных водах из скважин ст. 8 и 9 в интервале от 15 марта до 26 апреля 2021 г. Вариации связаны с землетрясением 31 марта 2021 г. (K=14.1) в Хубсугульском эпицентральной поле (объяснение в тексте).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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

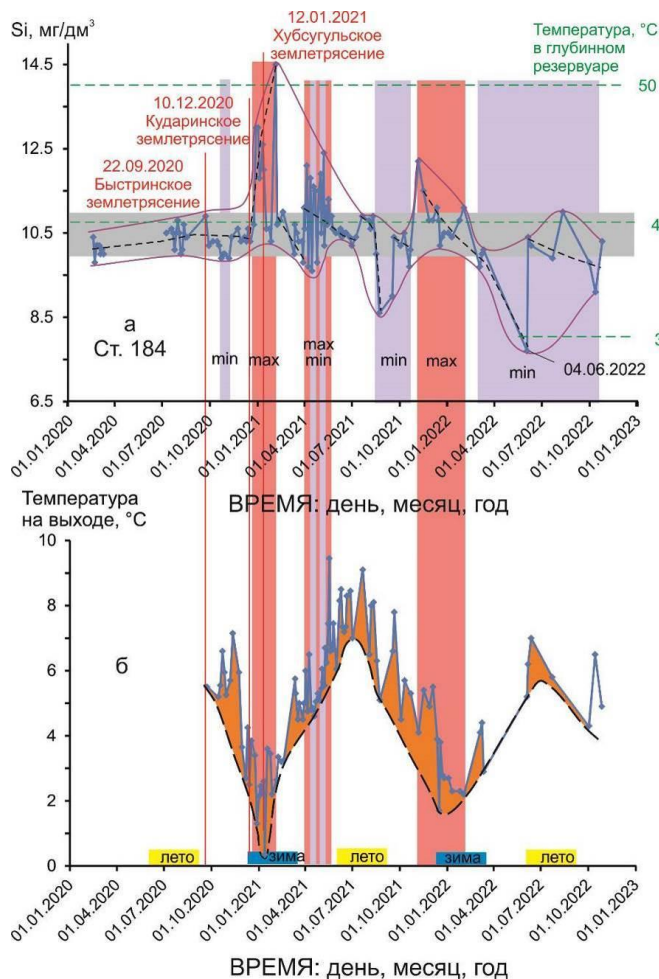


Рис. 5. Диаграмма временных вариаций Si в подземных водах ст. 184 (ул. Школьная) в 2020–2022 гг. (а) и измеренных температур на выходе подземных вод из скважины (б). Условные обозначения см. на рис. 3. На панели а средняя (фоновая) концентрация Si в подзем-

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

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

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

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

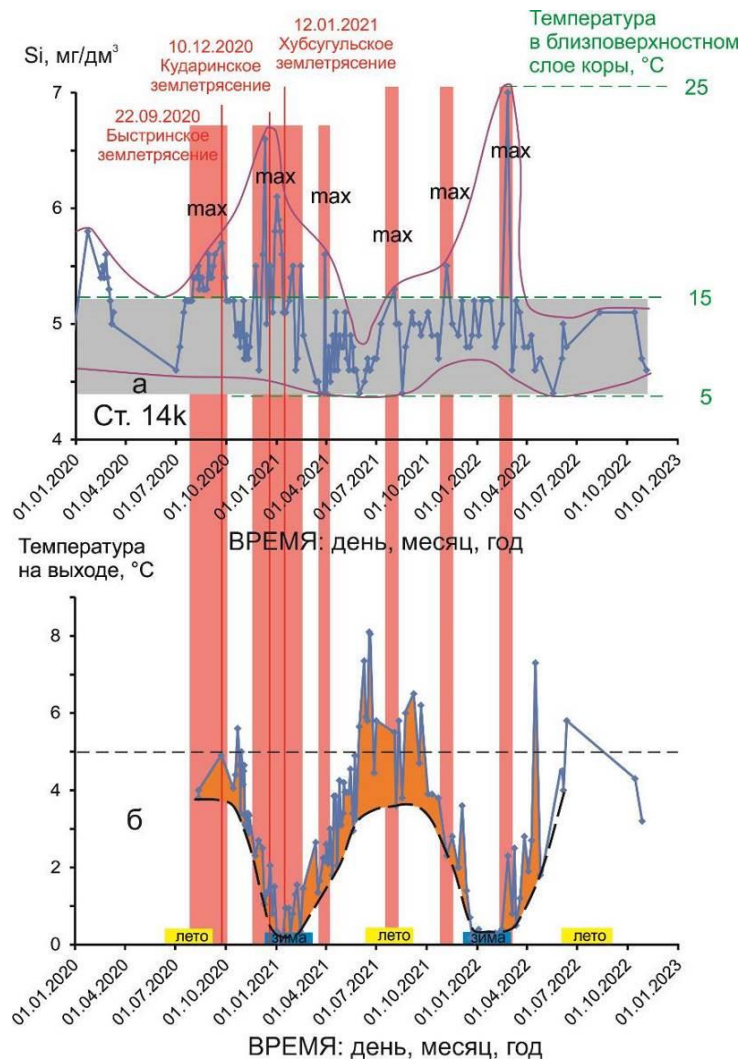


Рис. 6. Диаграмма временных вариаций Si в близповерхностных подземных водах ст. 14к (Ключ Тигунчиха) в 2020–2022 гг. (а) и измеренных температур на изливе (б). Условные обозначения см. на рис. 3. На панели а преобладающая (фоновая) концентрация Si в подземных водах составляет $4.4\text{--}5.2 \text{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

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

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

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

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

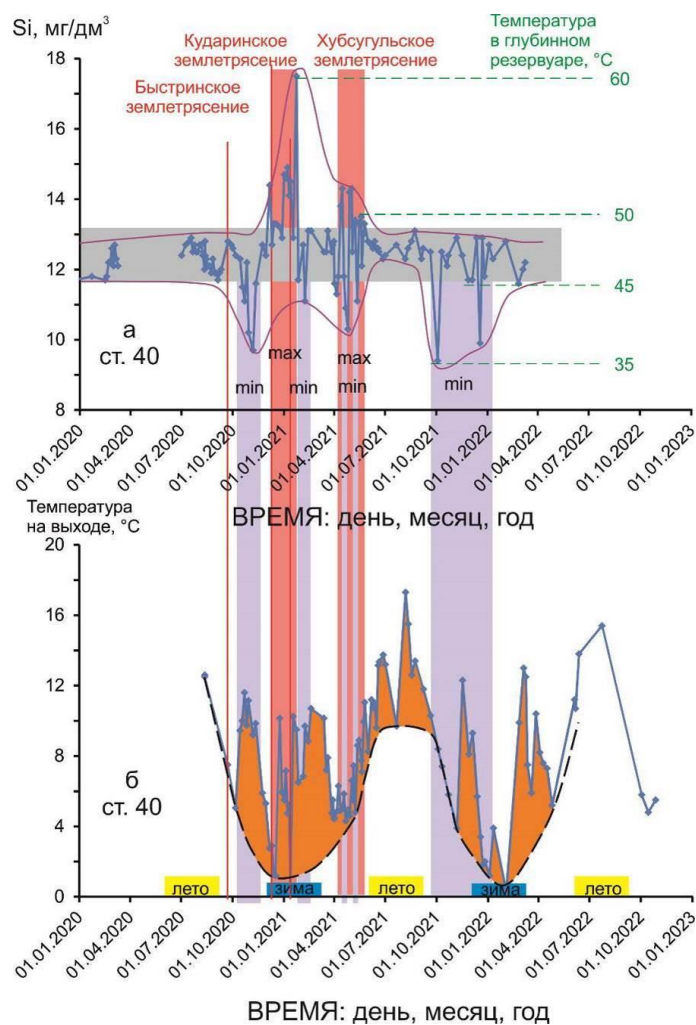


Рис. 7. Диаграмма временных вариаций Si в подземных водах ст. 40 (Стрелка) в 2020–2022 гг. (а) и измеренных температур на выходе подземных вод (б). Условные обозначения см. на рис. 3.

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

Временные вариации Si в 2012–2022 гг.

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

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

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

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

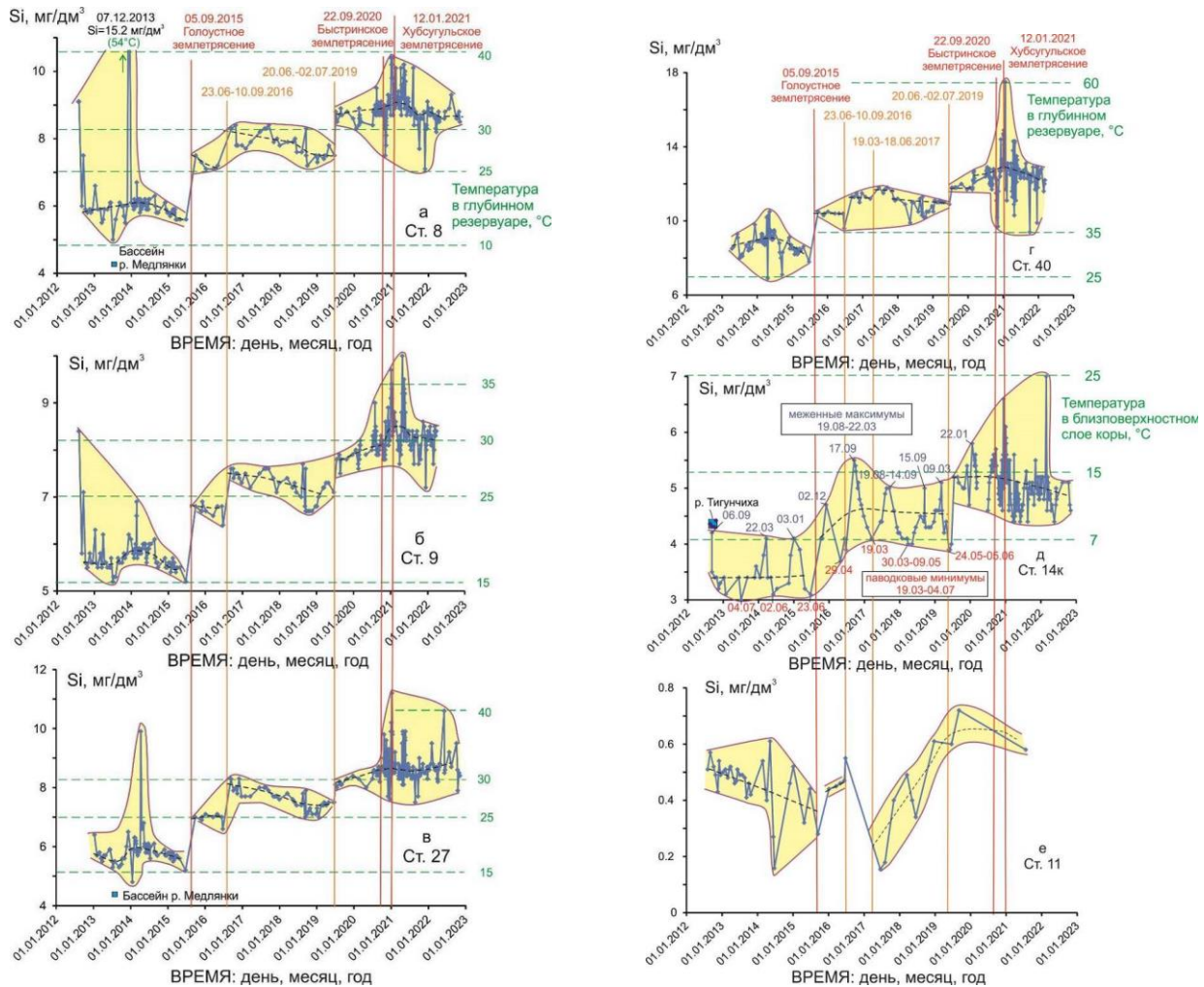


Рис. 8. Диаграммы временных вариаций Si в подземных водах основных мониторинговых станций Култукского полигона: а – ст. 8 (Чертова Гора), б – ст. 9 (Земляничный), в – ст. 27 (Школа), г – ст. 40 (Стрелка), д – ст. 14к (Ключ Тигунчиха) и е – ст. 11 (154 км КБЖД).

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

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

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

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

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

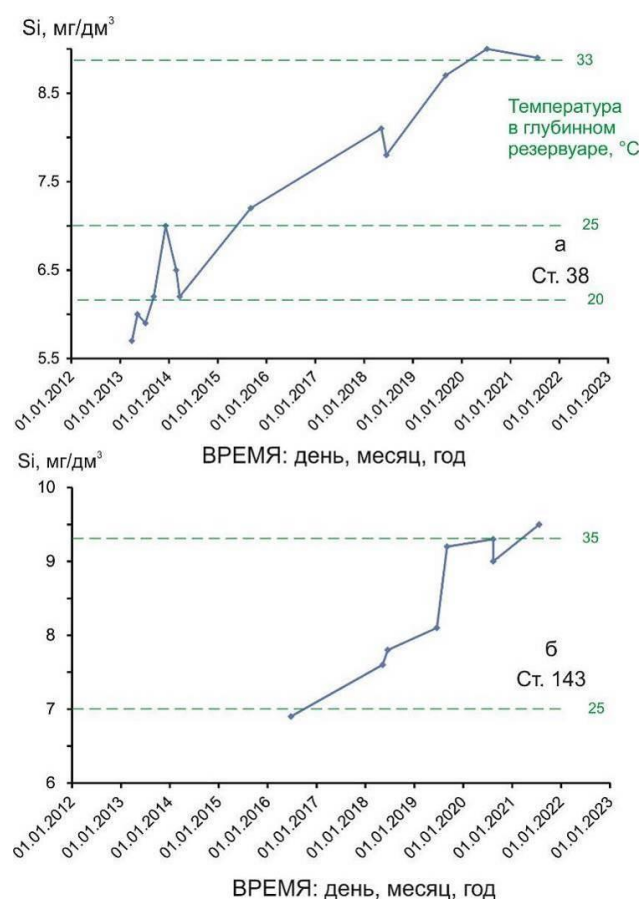


Fig. 9. Diagrams of temporal variations of Si in groundwaters from supplementary stations of the Kultuk polygon: а – station 38 (Willow), б – station 143 (Traffic Light of the Circum-Baikal Railway).

Обсуждение результатов

Компоненты подземных и поверхностных вод

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

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

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

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

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

0.70534, $OA4/8 = 3.3$) и компонента Е с равновесным изотопным составом U (equilibrium U: $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.7205$, $OA4/8 = 1.0$) (Рассказов и др., 2015). Модель смешения получает дополнительную аргументацию по вариациям Si (рис. 10).

сказов и др., 2015). Модель смешения получает дополнительную аргументацию по вариациям Si (рис. 10).

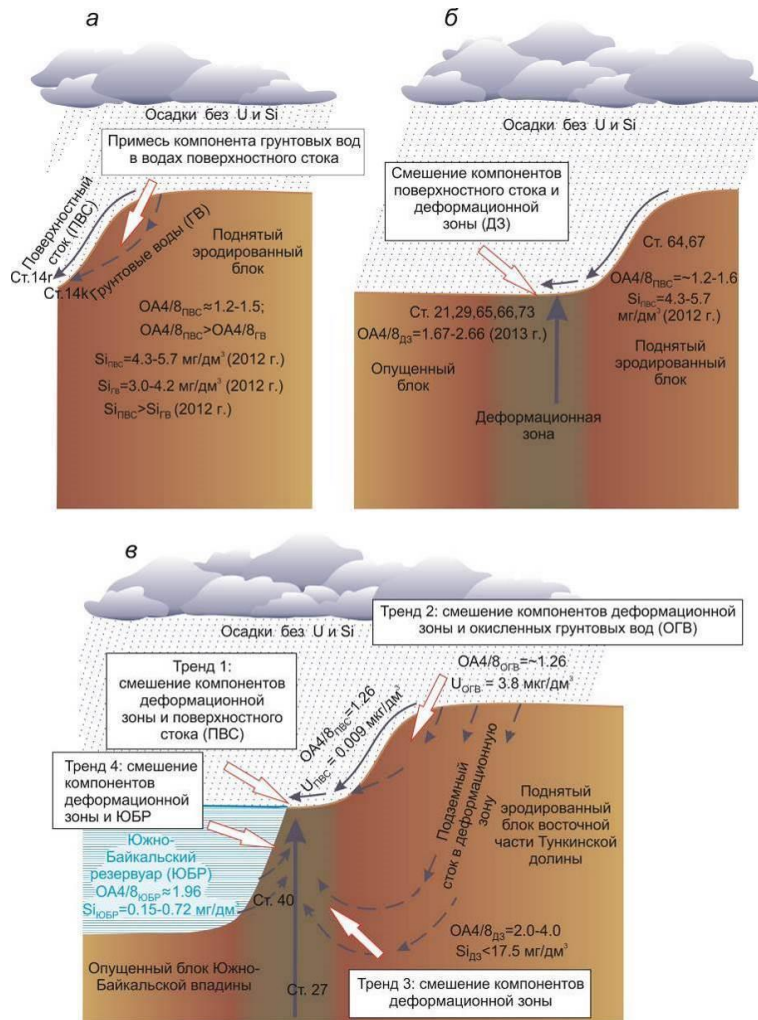


Рис. 10. Соотношения компонентов поверхностных и глубинных подземных вод на Култукском полигоне по концентрации и изотопному отношению U в сочетании с концентрацией Si: а – близповерхностные подземные воды (ст. 14к, Ключ Тигунчиха); б – ручьи бассейна р. Медлянки и ее питающие родники; в – глубинные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

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

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

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

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

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

лов этой станции (01.06.2012–23.06.2015; 26.09.2015–20.06.2019 и 02.07.2019–12.09.2020) наблюдаются тренды снижения A4 при возрастании концентрации Si. Эти тренды обозначают сезонные вариации компонентов подземных вод от паводковых минимумов Si, установленных в разные годы в весенне-летний период (с 19 марта до 17 июля) к межнным максимумам Si, зарегистрированным в осенне-зимний период (с 19 августа до 22 марта).

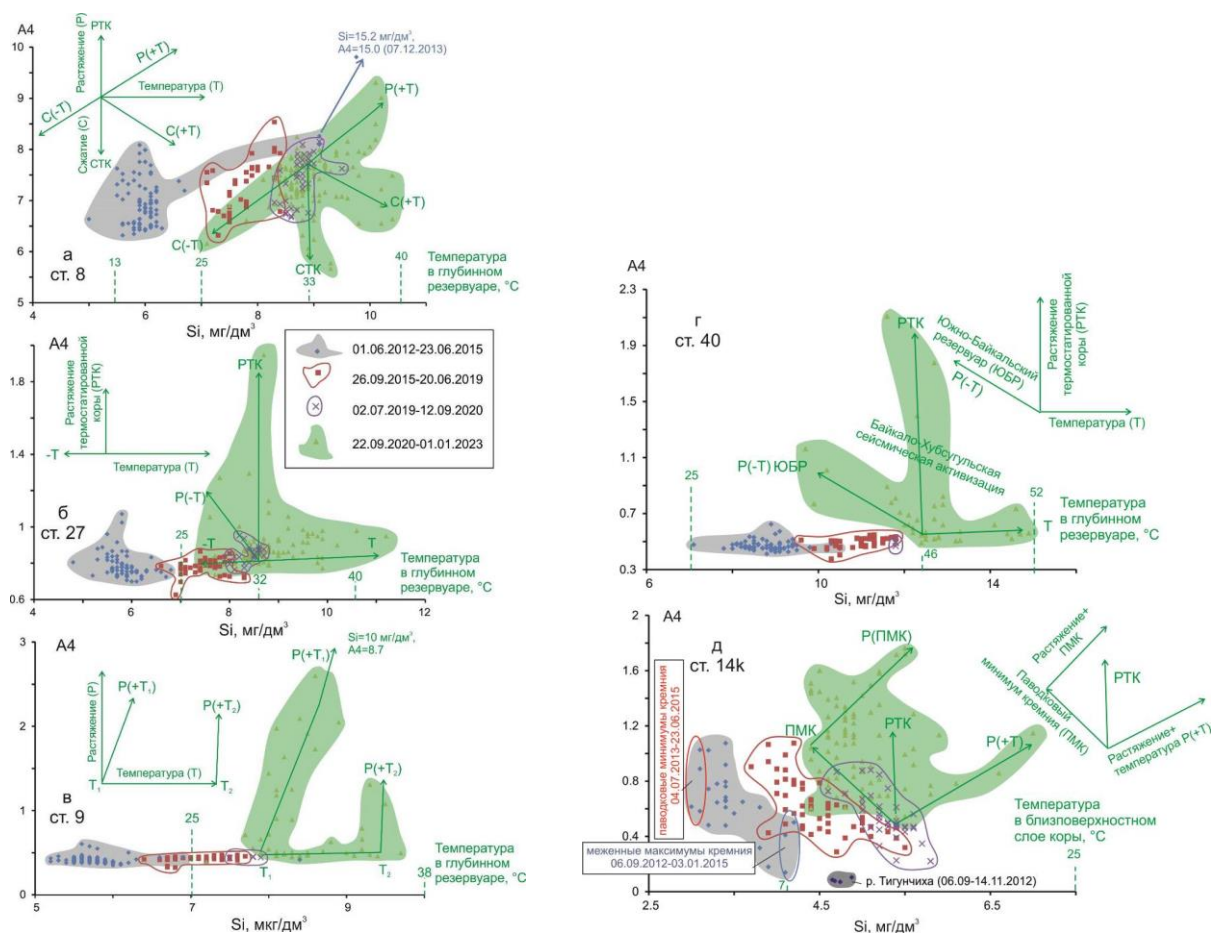


Рис. 11. Диаграммы A4 – Si для четырех временных интервалов подземных вод станций 8 (а), 27 (б), 9 (в), 40 (г) и 14к (д). Во время Байкало-Хубсугульской активизации прогрессирующее развитие Култукского резервуара маркируется компонентами РТК (растягивающейся термостатированной коры) на станциях 40, 27 и 9, регрессирующее – компонентами СТК (сжимающейся термостатированной коры) на ст. 8. Хотя на ст. 14к доминируют паводково-межненные вариации A4 – Si, фигуративное поле подземных вод четвертого (сейсмического) интервала этой станции в целом смещается относительно фигуративного поля подземных вод третьего (предсейсмического) интервала с возрастанием A4 подобно тренду РТК, что свидетельствует о прогрессирующем термостатировании близповерхностных подземных вод.

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

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

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

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

В случае б рис. 10 наблюдается смешение компонентов вод поверхностного стока и глубинной деформационной зоны. Пример – станции 29, 66 и др. в бассейне р. Медлянка-1. При подледном опробовании речной воды в нижнем течении этой реки 11 ноября 2012 г. (ст. 21) измерено значение ОА4/8 = 1.90 ± 0.03 при содержании U = 0.045 мкг/дм³. В русле этой речки находятся два родника, расположенные в 100 м один от другого (ст. 29 и 73). В одном из них (ст. 29) 02 февраля 2013 г. определено ОА4/8 = 2.09 ± 0.02 при содержании U = 0.046 мкг/дм³, 07 декабря 2013 г. – ОА4/8 = 2.03 ± 0.02 при содержа-

нии U = 0.045 мкг/дм³, 17 января 2014 г. – ОА4/8 = 2.02 ± 0.02 при содержании U = 0.040 мкг/дм³ и 28 января 2014 г. – ОА4/8 = 2.09 ± 0.02 при содержании U = 0.044 мкг/дм³. В другом (ст. 73) 07 декабря 2013 г. определено ОА4/8 = 2.11 ± 0.02 при содержании U = 0.072 мкг/дм³.

Повышенные значения ОА4/8 в воде р. Медлянка-1, близкие к значениям в воде обоих родников, свидетельствуют о значительном вкладе подземных вод в её водный баланс в зимнее время. Основной поток подземных вод сфокусирован в основании уступа Обручевского разлома, зону которого дренирует эта короткая (около 1 км) речка. В бассейне р. Медлянка-2 доля подземных вод в поверхностном стоке резко снижается. В речке правого распадка бассейна (ст. 64) измерено низкое ОА4/8 – 1.26 ± 0.05 при самом низком (для всего полигона) содержании U (0.0087 мкг/дм³). В левом распадке бассейна (ст. 67) ОА4/8 и концентрации U в воде поверхностного стока возрастают и составляют, соответственно, 1.57 ± 0.05 и 0.022 мкг/дм³.

Повторное опробование родниковых вод ст. 29 во время Байкало-Хубсугульской активизации в 2020 г. (три пробы отбирались в интервале с 14 октября до 22 октября) показало низкие значения ОА4/8 (2.03), соответствующие уровню значений 2013–2014 гг., но повышенную концентрацию U (0.10–0.12 мкг/дм³).

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

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

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

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

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

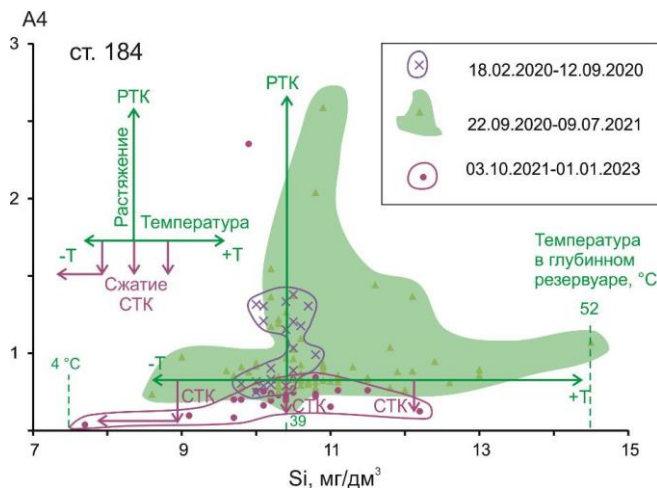
Второй временной интервал устанавливается с 26 сентября 2015 г. до 20 июня 2019 г. в верхней части тренда первого временного интервала с повышенной концентрацией Si (7.1–8.4 мг/дм³). Третий временной интервал с 2 июля 2019 г. до 12 сентября 2020 г. (предсейсмический, т.е. до Быстринского землетрясения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

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

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

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

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



characteristic of st. 8.

Мы видим, что в подземных водах основных станций Култукского полигона (кроме ст. 14к) преобладают глубинные компоненты. Концентрация Si обычно превышает концентрацию этого элемента в поверхностных водах. Например, в 2013 г. в ручьях бассейна р. Медлянки содержится 4.3 мг/дм^3 , тогда как в подземных водах ст. 8 и ст. 27 составляет 5 мг/дм^3 и более (см. рис. 9а,в). Возрастание концентрации Si в подземных водах всех станций с течением времени при

чения T_1 до значения T_2 , от которого намечается тренд $P(+T_2)$. Тренд $P(+T_1)$ направлен к максимальному измеренному значению $Si=10 \text{ мг/дм}^3$ при $A_4=8.7$. Он имеет нестационарный характер. Концентрация Si в исходной точке T_2 тренда РТК(T_2) не достигает $Si=10 \text{ мг/дм}^3$. Следовательно, тренд $P(+T_2)$ также не термостатирован и может получить развитие с некоторым наклоном до максимальной концентрации Si при усилении растяжения (при возрастании A_4).

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

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

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

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

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

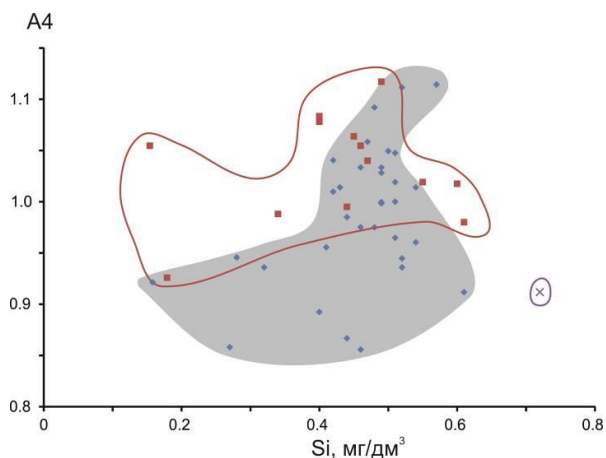


Рис. 13. Диаграмма A4 – Si для двух временных интервалов и одной пробы третьего интервала прибрежной байкальской воды из зоны Обручевского разлома (ст. 11). Усл. обозн. см. рис. 11.

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

Температура подземных вод в режиме термостатирования при растяжении

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

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

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

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

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

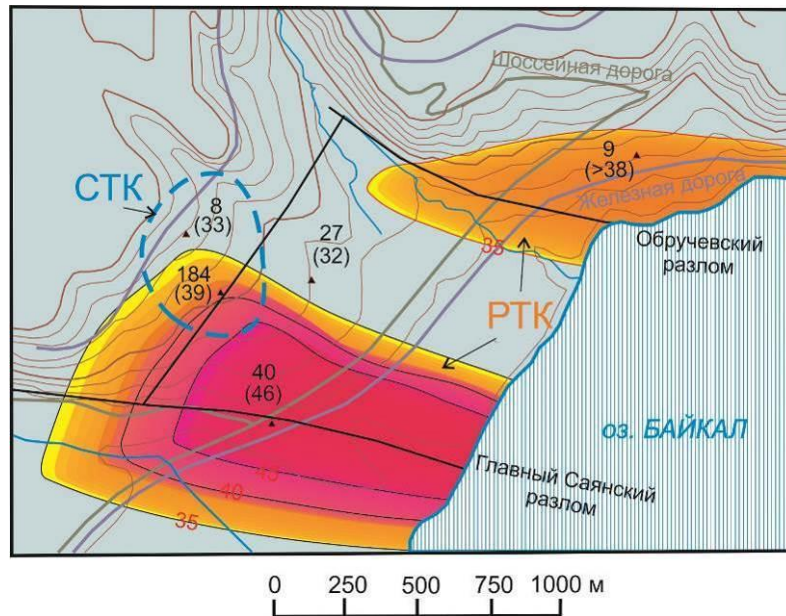


Рис. 14. Предполагаемый контроль разломами температурных аномалий в подземных водах при растяжении и сжатии коры (компонентов РТК и СТК) во время Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2022 гг. Ниже номеров основных мониторинговых станций в скобках приводится температура компонента РТК или СТК в °С (см.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

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

Косейсмическое пространственно-временное изменение температуры подземных вод

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

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

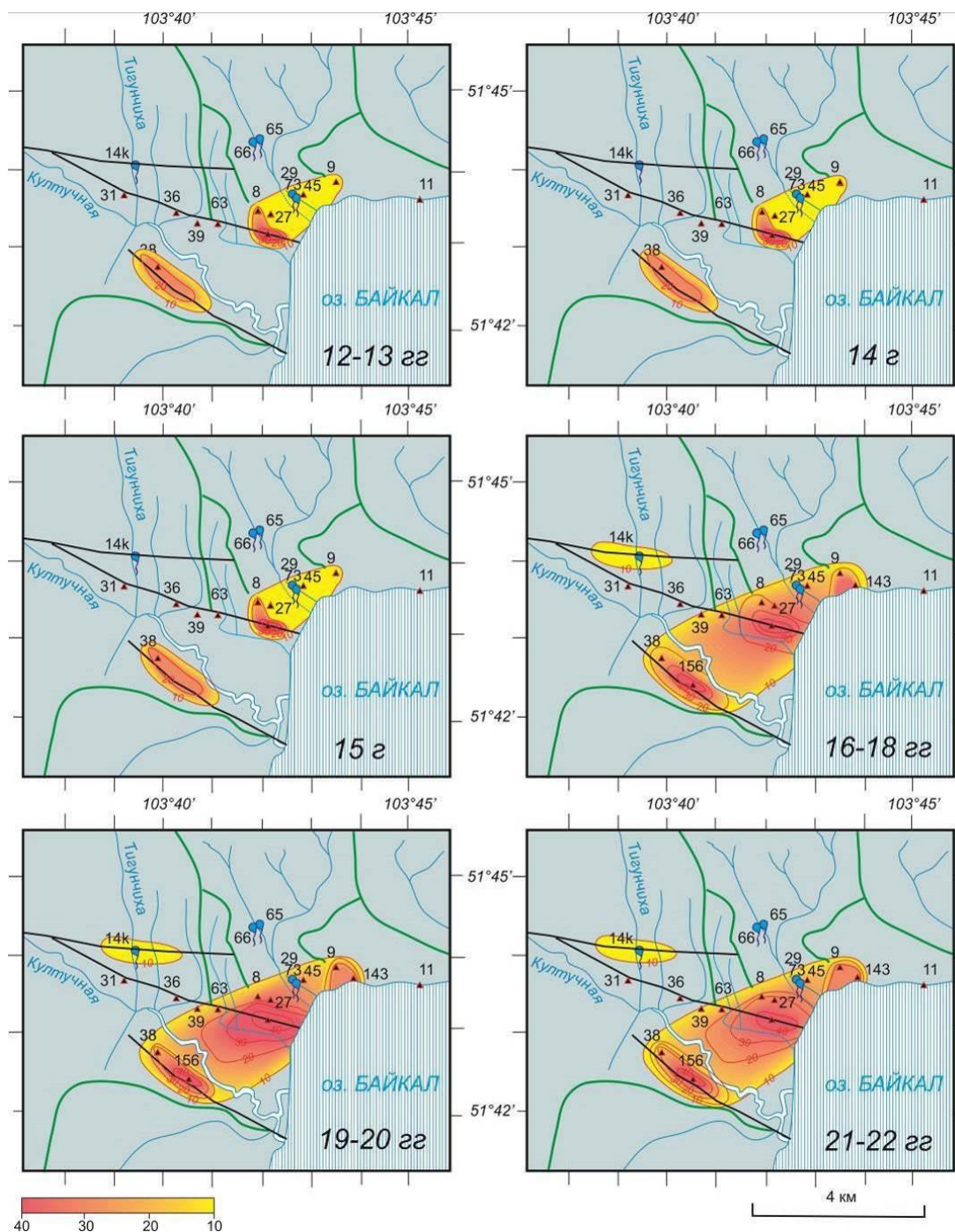


Рис. 15. Иллюстрация косейсмического изменения средних температур в Култукском резервуаре. Температуры рассчитаны с использованием халцедонового геотермометра по средней концентрации Si в подземных водах мониторинговых рядов и дополнительным данным единичных проб.

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

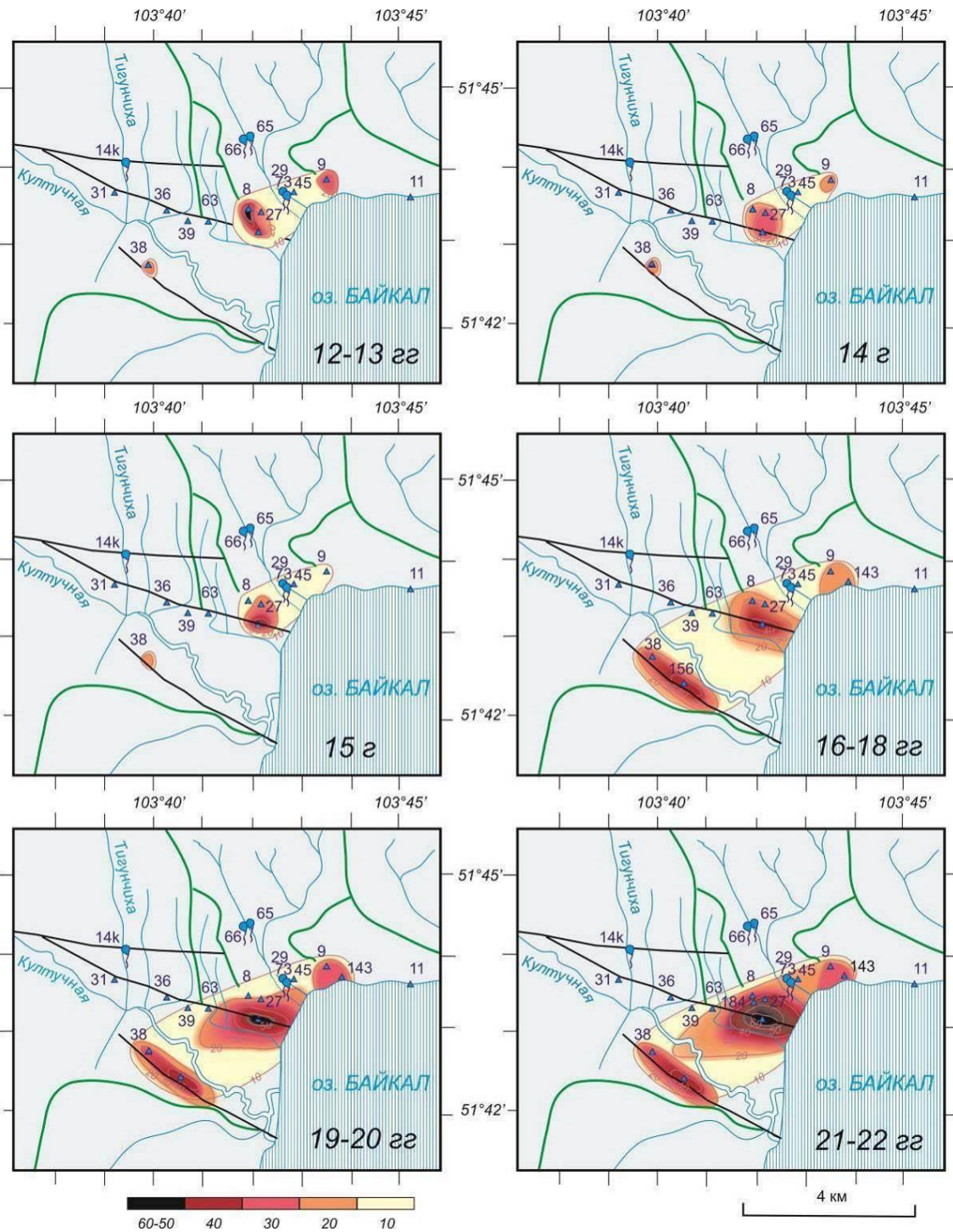


Рис. 16. Иллюстрация косейсмического изменения максимальных температур в Култукском резервуаре. Температуры рассчитывались с использованием халцедонового геотермометра по максимальной концентрации Si в подземных водах мониторинговых рядов и дополнительным данным единичных проб.

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

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

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

Сопоставления

Предшествующие результаты гидрогеохимического мониторинга в Байкальской рифтовой зоне

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

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

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

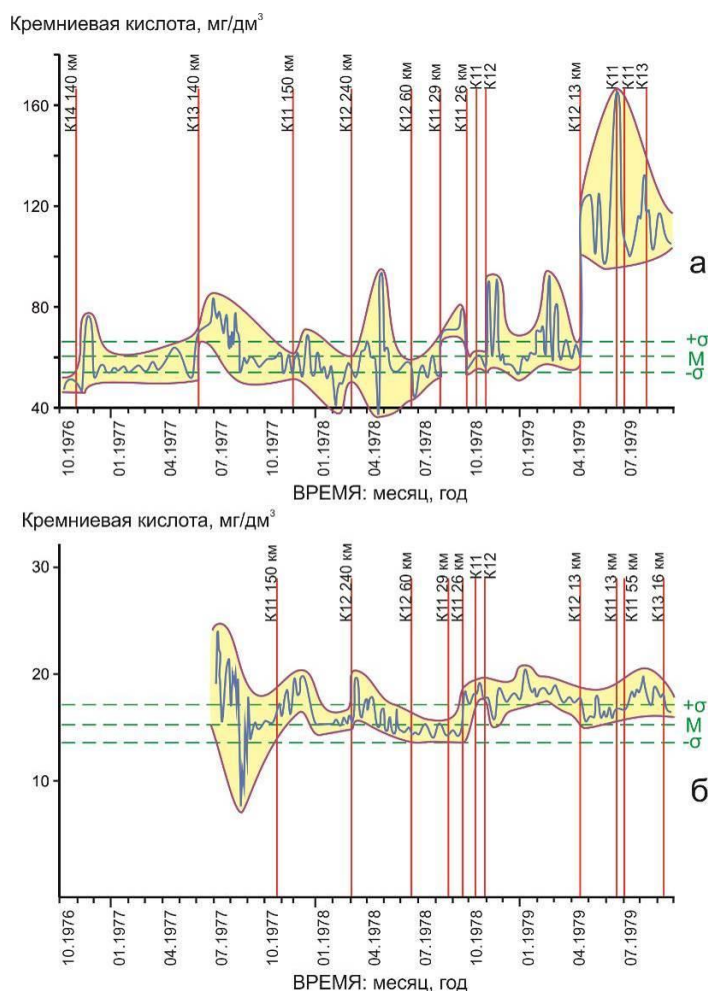


Рис. 17. Графики режимных наблюдений содержания кремнекислоты в термальном источнике 35 (а) и холодном источнике 99 (б). Штриховыми зелеными линиями, параллельными оси абсцисс, показаны значения: М – медиана и отклонения от нее – $+\sigma$ и $-\sigma$. Красными линиями, параллельными оси ординат, показаны: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

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

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

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

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

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

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

Другие результаты определений Si в подземных водах

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

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

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

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

Из общих сопоставлений концентрации Si в полученных мониторинговых рядах станций Култукского полигона с опубликованными данными вытекает необходимость рассмотрения вод, подобных подземным водам Култукского полигона, как субтермальных и холодных вод особой категории, отличающихся от подземных вод выходов термальных источников с более высокими температурами глубинных резервуаров.

Родники субтермальных вод, подобных култукским подземным водам (с температурой на изливе 7–15 °С), трассировались вдоль разломов у подножия Баргузинского хребта по его юго-западному окончанию и в прибортовой части Усть-Баргузинской впадины (Замана, 1968). Опробовались большедебитные родники трещинно-жильных вод с температурой на изливе в интервале от 5.5 до 13.8 °С в центральной и северо-восточной частях Байкальской рифтовой зоны – в Гололондинском хребте, на западном склоне хр. Улан-Бургасы, на Икатском и Баргузинском хребтах, в районе нижнего течения р. Баргузин и в Муйской впадине (Борисенко, Замана, 1978). Эти родники связаны с активными разломами. Общая минерализация трещинно-жильных вод оказалась в 2–3 раза выше общей минерализации вод из родников поверхностного дренирования, а концентрация Si достигала в среднем 20 мг/дм³ (температура в резервуаре соответствует 66 °С). Более высокая концентрация Si (до 28 мг/дм³, температура в резервуаре до 82 °С) отмечалась в холодных родниках Юго-Восточного Забайкалья (Замана, Гладкая, 1991). Диапазон концентрации Si в субтермальных водах и водах поверхностного дренирования на указанных территориях Байкальской рифтовой зоны и в сопредельном Юго-Восточном Забайкалье сопостави-

мы с диапазоном концентрации Si глубинных и близповерхностных вод Култукского полигона.

Заключение

На Култукском полигоне проводится мониторинг подземных вод верхнего слоя коры, в котором наблюдаются гидрогеохимические отклики на сейсмогенные деформации. В 2012–2022 гг. определена минимальная концентрация термофильного элемента Si (3 мг/дм³) 4 июля 2013 г. в родниковой воде станции 14к близповерхностных вод и его максимальная концентрация (17.5 мг/дм³) 23 января 2021 г. в воде из скважины ст. 40 субтермальных подземных вод. Обе мониторинговые станции расположены на палеосейсмодислокациях зоны ГСР. В процессе мониторинга выявлено последовательное зональное возрастание концентрации Si в подземных водах полигона с центром на ст. 40. Показан контроль концентрации Si в подземных водах из зон других активных разломов: Обручевского и ЮЗ Бортового. Предложено объяснение косейсмической природы возрастания концентрации Si в подземных водах полигона при существенном влиянии их разбавления слабо минерализованными водами (метеорными и ЮБР).

Предполагается, что Култукский резервуар проявился во время сильной Култукской сейсмической активизации (27 августа 2008 г. – 04 января 2011 г.) с максимальной температурой ст. 8. Гидротермы частично вырождались во время слабой Толбазихинской активизации (24 июня 2011 г. – 11 октября 2012 г.) и имели минимальную температуру в 2014–2015 гг. Затем температура гидротерм увеличивалась при подготовке и реализации Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации, обозначившейся сильными землетрясениями 2020–2022 гг.

Термальное состояние подземных вод полигона, по данным Si термометрии, отражает развитие полного сейсмогеодинамического цикла сжатия и растяжения коры, установленного, соответственно, по снижению и возрастанию отношения активностей ²³⁴U/²³⁸U и активности ²³⁴U в подземных водах. Усиление сжатия коры с вырождением гидротерм Култукского резервуара сопровождается землетрясениями умеренной силы: Северо-Хубсугульским 5 декабря 2014 г. и Голоустным 05 сентября 2015 г., проявление растяжения коры с генерацией гидротерм обозначается сильными землетрясени-

ями Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2022 гг.

В ядре гидротермального резервуара ГСР (ст. 40) по кремниевому (халцедоновому) геотермометру подземных вод получается минимальная температура 25 °С 17 сентября 2014 г. (перед землетрясениями 2014–2015 гг.) и максимальная температура 60 °С 23 января 2021 г. (через 11 дней после сильнейшего Хубсугульского землетрясения). От состояния сжатия коры 2014–2015 г. к состоянию ее растяжения в 2020–2022 гг. в ходе развития полного сейсмогеодинамического цикла температура в ядре Култукского резервуара возрастает почти в 2.5 раза. Смена подземных вод объясняется действием механизма бокового отпора блока верхней части коры, сопредельной с оз. Байкал. В эпизодическом снижении температур подземных вод на фоне афтершоков Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2022 гг. выявляются признаки начинающейся деградации резервуара подземных вод. Механизм контроля его глубины боковым отпором блоков верхней коры, по-видимому, должен действовать и в других районах, сопредельных с оз. Байкал, в которых распространены субтермальные и холодные подземные воды. По приведенным в настоящей работе расчетам с использованием халцедонового геотермометра принимается граница субтермальных (глубинных) и холодных (близповерхностных) подземных вод рифтовых структур на глубине около 1 км.

Вариации термофильного элемента Si в подземных водах Култукского резервуара воспринимаются как чувствительные индикаторы косейсмических изменений, происходящих в центральной части Байкальской рифтовой системы. При подготовке и реализации землетрясений на разных станциях регистрируются фазы нарушения фонового режима с синхронизацией температурных изменений подземных вод. В ходе развития сейсмогенных деформаций наблюдаются фазы возрастания и снижения температуры в резервуаре и на выходе подземных вод и фазы их возвращения к фоновому состоянию. Такие вариации могут учитываться при разработке подходов к определению времени приближающегося землетрясения.

Благодарности

Состав воды анализировался на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500се в ЦКП «Ультрамикроанализ» (ЛИН СО РАН, г. Иркутск). Методические подходы к анали-

зу подземных вод частично разработаны при выполнении госзадания ИЗК СО РАН на 2021–2025 гг. «Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии» (FWEF-2021-0009). В работе использованы данные о землетрясениях, полученные на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Литература

- Бадминов П.С., Ганчимэг Д., Оргильянов А.И., Крюкова И.Г., Оюунцэцэг Д. Оценка глубинных температур термальных источников Хангая и Восточного Саяна с помощью гидрохимических геотермометров // Вестник БГУ. Химия, физика. 2011. Вып. 3. С. 90–94.
- Борисенко И.М., Замана Л.В. Минеральные воды Бурятской АССР. Улан-Удэ: Бурят, кн. изд-во, 1978. 162 с.
- Волкова В.П., Афанасенко В.Е. Термоминеральные воды зоны освоения БАМ и возможности их эффективного использования // Мерзлотные исследования. Вып. XIX. М.: Изд-во МГУ, 1980. С. 154–163.
- Голенецкий С.И., Голубев В.А. О связи сейсмичности с тепловым потоком в районе впадины озера Байкал // Геология и геофизика. 1985. № 6. С. 87–96.
- Голубев В.А. Тепловые и химические характеристики гидротермальных систем Байкальской рифтовой зоны // Советская геология. 1982. № 10. С. 100–108.
- Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО», 2007. 222 с.
- Голубев В.А., Платонов Л.М. Опыт применения кремниевое геотермометра для оценки теплового потока на юге Восточной Сибири // Геология и геофизика. 1990. № 6. С. 155–159.
- Замана Л.В. Новые данные о некоторых термальных источниках Баргузинского района Бурятской АССР // Вопросы геологии Прибайкалья и Забайкалья. Вып. 5. Чита: Изд-во Забайкал. фил. Геогр. о-ва СССР, 1968. С. 173–174.
- Замана Л.В., Гладкая Н.М. Новые данные по геохимии природных вод района Уровской эн-

демии в Сибири // Докл. РАН. 1991. Т. 321, № 3. С. 593–595.

Ильин В.А., Кононов В.И., Поляк Б.Г., Козловцева С.В. Оценка глубинных температур с помощью гидрогеохимических показателей // Геохимия. 1979. № 6. С. 888–901.

Ильясова А.М., Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Борняков С.А., Снопков С.В., Чувашова И.С., Тубанов Ц.А., Герман Е.И., Бартанова С.В. Тестирование эффекта Чердынцева–Чалова с использованием сейсмодвижителя ЦВО-100 и мониторинг подобных U-гидроизотопных откликов на подготовку землетрясений на Култукском полигоне, Южный Байкал // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 4. С. 7–25. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.7

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

Козловцева С.В., Хуторской М.Д. Опыт применения гидрохимических индикаторов для оценки геотермических условий недр Монголии // Литология и полезные ископаемые. 2002. №4. С. 110–120.

Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. Российская академия наук; Институт динамики геосфер; Российский научный фонд. М.: ГЕОС, 2016. 424 с.

Логачев Н.А. Вулканогенные и осадочные формации рифтовых зон Восточной Африки. М.: Наука, 1977. 183 с.

Ломоносов И.С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1974. 164 с.

Лысак С.В., Зорин Ю.А. Геотермическое поле Байкальской рифтовой зоны. М.: Наука, 1976. 90 с.

Лысак С.В., Шерман С.И. Глубинный тепловой поток и сейсмическая активность Прибайкалья // Сейсмичность и глубинное строение Прибайкалья. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. С. 56–68.

Лысак С.В., Шерман С.И., Дорофеева Р.П. О связи теплового потока Байкальской рифтовой зоны с сейсмической активностью // Результаты комплексных геофизических исследований в сейсмоопасных зонах. М.: Наука, 1978. С. 126–131.

Милановский Е.Е. Рифтовые зоны континентов. М.: Недра, 1976. 279 с.

Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Ломоносов И.С., Колдышева Р.Я., Диденко А.А., Шерман С.И. Гидрогеология Прибайкалья. Москва: изд-во Наука, 1968. 170 с.

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

Писарский Б.И. Закономерности формирования подземного стока бассейна озера Байкал. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1987. 154 с.

Плюснин А.М., Чернявский М.К., Посохов В.Ф. Условия формирования гидротерм Баргузинского Прибайкалья по данным микроэлементного и изотопного состава // Геохимия. 2008. № 10. С. 1063–1072.

Пшенников К.В. Об энергетическом балансе в области очага сильного землетрясения // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1965. № 10. С. 23–29.

Рассказов С.В. Магматизм Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: ВО "Наука". Сибирская издательская фирма, 1993. 288 с.

Рассказов С.В., Чувашова И.С. Вулканизм и трансенсия на северо-востоке Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2018. 383 с.

Рассказов С.В., Ильясова А.М., Борняков С.А., Снопков С.В., Чувашова И.С., Чебыкин Е.П. Гидрогеохимические отклики подземных вод ст. 184 в 2020–2021 гг. на сейсмогенные деформации Байкало-Хубсугульской активизации // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 4. С. 26–52. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.26

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

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А. Разработка Култукского сейсмопрогностического полигона: вариации ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала

// Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, № 4. С. 519–553.

Ружич В.В., Кочарян Г.Г., Савельева В.Б., Травин А.В. О формировании очагов землетрясений в разломах на приповерхностном и глубинном уровне земной коры. Часть II. Глубинный уровень // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 1039–1061. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0383.

Чебыкин Е.П., Гольдберг Е.Л., Куликова Н.С., Жученко Н.А., Степанова О.Г., Малопевная Ю.А. Метод определения изотопного состава аутигенного урана в донных отложениях озера Байкал // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 6. С. 604–616.

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

Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В. Первые результаты мониторинга $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // Доклады академии наук. 2015. Т. 460, № 4. С. 464–467.

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

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

Шестакова А.В., Гусева Н.В. Применение геотермометров для оценки глубинных температур циркуляции термальных вод на примере Восточной Тувы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 1. С. 25–36.

Arnorsson S. The use of mixing models and chemical geothermometers for estimating underground temperatures in geothermal systems // J. Volcan. Geoth. Res. 1985. V. 23. P. 209–335.

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

Belhai M., Fujimitsu Y., Bouchareb Haouchine F.Z., Haouchine A., Nishijima J. A hydrochemical study of the Hammam Righa geothermal waters in northcentral Algeria // Acta Geochim. 2016. V. 35. P. 271–287. DOI: 10.1007/s11631-016-0092-8

Cowan D. S. Do faults preserve a record of seismic slip? A field geologist's opinion. Journal of Structural Geology. 1999. V. 21, No. 8-9. P. 995–1001.

Dolgorjav O. Geochemical characterization of thermal fluids from the Khangay area, Central Mongolia // Geothermal training programme. 2009. V. 10. P. 125–150.

Gülic N. Applications of geothermometry. <https://studylib.net/doc/8327695/1-applications-of-geothermometry-nilg%C3%BCn-g%C3%BCle%C3%A7-middle>

Ehlers T.A., Chapman D.S. Normal fault thermal regimes: conductive and hydrothermal heat transfer surrounding the Wasatch fault, Utah // Tectonophysics. 1999. V. 312, No. 2–4. P. 217–234.

Fournier R.O. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. Geothermics. 1977. V. 5. P. 41–50.

Fournier R.O., Potter R.W. II A revised and expanded silica (quartz) geothermometer. Geotherm. Resour. Counc. Bull. 1982. V. 11. P. 3–12.

Fournier R.O., Rowe J.J. Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells // Amer. J. Sci. 1966. V. 264, No. 9. P. 685–697.

Friedrichsen H. Geothermal systems in the Upper Rhine graben und Northern Black Forest: A chemical and stable isotope study//Tectonophysics. 1981. V. 73, No. 1–3. P. 125–140.

Karingithi C.W. Chemical geothermometers for geothermal exploration // Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources, organized by UNU-GTP, KenGen and GDC, at Lake Naivasha, Kenya, 2009. P. 1–12.

Kilty K., Chapman D.S., Mase C.W. Forced convective hot transfer in the Monroe hot springs geothermal system// J. Volcanol. Geotherm. Res. 1979. V. 6, No.3/4. P. 257-277.

Kilty K., Chapman D.S. Convective heat transfer in selected geologic situations // *Ground-water*. 1980. V. 18, No. 4. P. 386–395.

Levitte D., Eckstein J. Correlation between the silica concentration and the orifice temperature in the Wann springs along the Jordan-Ded Sea rift wally // *Geothermics*. 1977. V. 7, NLP. P. 1–8.

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

Rasskazov S., Chuvashova I., Yasnygina T., Saranina E., Gerasimov N., Ailow Y., Sun Y.-M. Tectonic generation of pseudotachylytes and volcanic rocks: Deep-seated magma sources of crust-mantle transition in the Baikal Rift System, Southern Siberia // *Minerals*. 2021. V. 11, No. 5. P. 487.

Sibson R.H. Interactions between temperature and pore fluid pressure during an earthquake faulting and a mechanism for partial or total stress relief // *Nature*. 1973. V. 243. P. 66–68.

Sibson, R.H. (1975). Generation of pseudotachylyte by ancient seismic faulting. *Geophysical Journal International*, 43(3), P. 775–794.

Sibson R.H. Fault rocks and fault mechanisms // *J. Geol. Soc. London*. 1977. 133, p. 191–213.

Uzelli T., Baba A., Mungan G.G. et al. Conceptual model of the Gulbahce geothermal system, Western Anatolia, Turkey: Based on structural and hydrogeochemical data // *Geothermics*. 2017. V. 68. P. 67–85.

References

Badminov P.S., Ganchimeg D., Orgil'yanov A.I., Kryukova I.G., Oyuuntsetseg D. Estimation of deep temperatures of Khangai and Eastern Sayan thermal springs using hydrochemical geothermometers // *Bulletin of BSU. Chemistry, physics*. 2011. Issue 3. P. 90–94. (in Russian)

Borisenko I.M., Zamana L.V. Mineral waters of the Buryat ASSR. Ulan-Ude: Buryat, book publishing house, 1978. 162 p. (in Russian)

Volkova V.P., Afanasenko V.E. Thermal mineral waters of the BAM development zone and the possibility of their effective use // *Permafrost research*. Issue. XIX. M.: Publishing House of Moscow State University, 1980. P. 154–163. (in Russian)

Golenetsky S.I., Golubev V.A. On the connection between seismicity and heat flow in the region of the Baikal basin // *Geology and Geophysics*. 1985. No. 6. P. 87–96. (in Russian)

Chebykin E.P., Goldberg E.L., Kulikova N.S., Zhuchenko N.A., Stepanova O.G., Malopevnaya Yu.A. Method for determining the isotopic composition of authigenic uranium in the bottom sediments of Lake Baikal // *Geology and Geophysics*. 2007. V. 48, No. 6. C. 604–616. (in Russian)

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

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

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

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

Golubev V.A. Thermal and chemical characteristics of hydrothermal systems of the Baikal rift zone // *Soviet Geology*. 1982. No. 10. P. 100–108. (in Russian)

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

Golubev V.A., Platonov L.M. Experience in the use of a silicon geothermometer to assess the heat flow in the south of Eastern Siberia // *Geology and Geophysics*. 1990. No. 6. P. 155–159. (in Russian)

Ilyin V.A., Kononov V.I., Polyak B.G., Kozlov-tseva S.V. Assessment of deep temperatures using

- hydrogeochemical indicators // *Geochemistry*. 1979. No. 6. P. 888–901. (in Russian)
- Ilyasova A.M., Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Bornyakov S.A., Snopkov S.V., Chuvashova I.S., Tubanov Ts.A., German E.I., Bartanova S.V. Testing the Cherdyntsev–Chalov effect using the TsVO-100 seismic vibrator and monitoring similar U-hydroisotope responses to earthquake preparation at the Kultuk polygon, Southern Baikal // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 4. P. 7–25. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.7 (in Russian)
- Kozlovitseva S.V., Khutorskoy M.D. Experience in the use of hydrochemical indicators to assess the geothermal conditions of earth interior in Mongolia // *Lithology and Mineral Deposits*. 2002. No. 4. P. 110–120. (in Russian)
- Kocharyan G.G. *Geomechanics of faults*. The Russian Academy of Sciences; Institute of Geosphere Dynamics; Russian Science Foundation. M.: GEOS, 2016. 424 p. (in Russian)
- Logatchev N.A. *Volcanogenic and sedimentary formations of rift zones in East Africa*. M.: Nauka, 1977. 183 p. (in Russian)
- Lomonosov I.S. *Geochemistry and formation of modern hydrotherms of the Baikal rift zone*. Novosibirsk: Science. Sib. branch, 1974. 164 p. (in Russian)
- Lysak S.V., Zorin Yu.A. *Geothermal field of the Baikal rift zone*. M.: Nauka, 1976. 90 p. (in Russian)
- Lysak S.V., Sherman S.I. *Deep heat flow and seismic activity of the Baikal region* // *Seismicity and deep structure of the Baikal region*. Novosibirsk: Science. Sib. branch, 1978. P. 56–68. (in Russian)
- Lysak S.V., Sherman S.I., Dorofeeva R.P. *On the connection of the heat flow of the Baikal rift zone with seismic activity* // *Results of integrated geophysical studies in seismically hazardous zones*. M.: Nauka, 1978. P. 126–131. (in Russian)
- Map of earthquake epicenters. Irkutsk: Baikal Branch of the Federal Research Center Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, 2023. <http://www.seis-bykl.ru> (in Russian)
- Milanovsky E.E. *Rift zones of continents*. M.: Nedra, 1976. 279 p. (in Russian)
- Pinneker E.V., Pisarsky B.I., Lomonosov I.S., Koldysheva R.Ya., Didenko A.A., Sherman S.I. *Hydrogeology of the Baikal region*. Moscow: Science Publishing House, 1968. 170 p. (in Russian)
- Pinneker E.V., Shabynin L.L., Yasko V.G. et al. *Geology and seismicity of the BAM zone*. Hydrogeology. Novosibirsk: Nauka, 1984. 167 p. (in Russian)
- Pisarsky B.I. *Regularities of groundwater runoff formation in the Baikal basin*. Novosibirsk: Science. Siberian Branch, 1987. 154 p. (in Russian)
- Plyusnin A.M., Chernyavsky M.K., Posokhov V.F. *Conditions of the formation of hydrothermal springs in the Barguzin-Sis-Baikal region from trace element and isotope compositions* // *Geochemistry*. 2008. No. 10. P. 1063–1072.
- Pshennikov K.V. *On the energy balance in region of a strong earthquake source* // *Bulletin of Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Earth*. 1965. No. 10. P. 23–29.
- Rasskazov S.V. *Magmatism of the Baikal rift system*. Novosibirsk: Nauka. Siberian publishing company, 1993. 288 p.
- Rasskazov S.V., Chuvashova I.S. *Volcanism and transtension in the northeast of the Baikal rift system*. Novosibirsk: Academic publishing house "Geo", 2018. 383 p.
- Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Vodneva E.N., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V., Chechelnickey V.V., Gileva N.A. *Development of the Kultuk seismic prognostic polygon: ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variations in groundwater from active faults on the western coast of the Baikal* // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2015. V. 6, No. 4. P. 519–553.
- Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Bornyakov S.A., Snopkov S.V., Chuvashova I.S., Chebykin E.P. *Hydrogeochemical responses of groundwater station 184 in 2020–2021 on seismogenic deformations of the Baikal-Khubsugul reactivation* // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 4. P. 26–52. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.26
- Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Orgilyanov A.I., Kovalenko S.N., Seminsky A.K., Popov E.P., Chebykin E.P. *Hydrogeochemical zoning of uranium isotopes ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) in the Southern Siberian paleocontinent: the role of the South Baikal reservoir in the groundwater formation* // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2020. V. 11, No. 3. P. 632–650. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496>
- Ruzhich V.V., Kocharyan G.G., Savelyeva V.B., Travin A.V. *On the formation of earthquake sources in faults at the near-surface and deep levels of the earth's crust. Part II. Deep level* // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018. V. 9. No. 3. P. 1039–1061. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0383.

- Shestakova A.V., Guseva N.V. The use of geothermometers to assess the deep temperatures of thermal water circulation on the example of Eastern Tuva // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. 2018. V. 329. No. 1. P. 25–36.
- Zamana L.V. New data on some thermal springs of the Barguzin area of the Buryat ASSR // *Questions of Geology of the Baikal and Transbaikalia*. Issue 5. Chita: Transbaikal Publishing House. Branch of Geogr. Society of the USSR, 1968. P. 173–174. (in Russian)
- Zamana L.V., Gladkaya N.M. New data on the geochemistry of natural waters in the region of the Urov endemia in Siberia, Reports of RAS. 1991. V. 321, No. 3. P. 593–595. (in Russian)
- Arnorsson S. The use of mixing models and chemical geothermometers for estimating underground temperatures in geothermal systems // *J. Volcan. Geoth. Res.* 1985. V. 23. P. 209–335.
- Arnorsson S., Gunnlaugsson E., Svavarsson H. The chemistry of geothermal waters in Iceland-II. Mineral equilibria and independent variables controlling water compositions // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1983. V. 47. P. 547–566.
- Belhai M., Fujimitsu Y., Bouchareb Haouchine F.Z., Haouchine A., Nishijima J. A hydrochemical study of the Hammam Righa geothermal waters in northcentral Algeria // *Acta Geochim.* 2016. V. 35. P. 271–287. DOI: 10.1007/s11631-016-0092-8
- Cowan D. S. Do faults preserve a record of seismic slip? A field geologist's opinion. *Journal of Structural Geology*. 1999. V. 21, No. 8–9. P. 995–1001.
- Dolgorjav O. Geochemical characterization of thermal fluids from the Khangay area, Central Mongolia // *Geothermal training programme*. 2009. V. 10. P. 125–150.
- Gülic N. Applications of geothermometry. <https://studylib.net/doc/8327695/1-applications-of-geothermometry-nilg%C3%BCn-g%C3%BCle%C3%A7-middle>
- Ehlers T.A., Chapman D.S. Normal fault thermal regimes: conductive and hydrothermal heat transfer surrounding the Wasatch fault, Utah // *Tectonophysics*. 1999. V. 312, No. 2–4. P. 217–234.
- Fournier R.O. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*. 1977. V. 5. P. 41–50.
- Fournier R.O., Potter R.W. II A revised and expanded silica (quartz) geothermometer. *Geotherm. Resour. Counc. Bull.* 1982. V. 11. P. 3–12.
- Fournier R.O., Rowe J.J. Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells // *Amer. J. Sci.* 1966. V. 264, No. 9. P. 685–697.
- Friedrichsen H. Geothermal systems in the Upper Rhine graben und Northern Black Forest: A chemical and stable isotope study//*Tectonophysics*. 1981. V. 73, No. 1–3. P. 125–140.
- Karingithi C.W. Chemical geothermometers for geothermal exploration // *Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources*, organized by UNU-GTP, KenGen and GDC, at Lake Naivasha, Kenya, 2009. P. 1–12.
- Kilty K., Chapman D.S., Mase C.W. Forced convective hot transfer in the Monroe hot springs geothermal system// *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1979. V. 6, No. 3/4. P. 257–277.
- Kilty K., Chapman D.S. Convective heat transfer in selected geologic situations // *Ground-water*. 1980. V. 18, No. 4. P. 386–395.
- Levitte D., Eckstein J. Correlation between the silica concentration and the orifice temperature in the Wann springs along the Jordan-Ded Sea rift valley // *Geothermics*. 1977. V. 7, NLP. P. 1–8.
- Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Bornyakov S.A., Chuvashova I.S. Change of seismic hazard levels in complete 12-year seismogeodynamic cycle of the South Baikal Basin: Results of hydroisotopic ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) monitoring // *Geology and Environment*. 2022. V. 2, No. 2. P. 7–21. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.7
- Rasskazov S., Chuvashova I., Yasnygina T., Saranina E., Gerasimov N., Ailow Y., Sun Y.-M. Tectonic generation of pseudotachylytes and volcanic rocks: Deep-seated magma sources of crust-mantle transition in the Baikal Rift System, Southern Siberia // *Minerals*. 2021. V. 11, No. 5. P. 487.
- Sibson R.H. Interactions between temperature and pore fluid pressure during an earthquake faulting and a mechanism for partial or total stress relief // *Nature*. 1973. V. 243. P. 66–68.
- Sibson, R.H. (1975). Generation of pseudotachylyte by ancient seismic faulting. *Geophysical Journal International*, 43(3), 775–794.
- Sibson R.H. Fault rocks and fault mechanisms // *J. Geol. Soc. London*. 1977. 133, p. 191–213.

Uzelli T., Baba A., Mungan G.G. et al. Conceptual model of the Gulbahce geothermal system, Western Anatolia, Turkey: Based on structural and hydrogeochemical data // *Geothermics*. 2017. V. 68. P. 67–85.

Ильясова Айгуль Маратовна,

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

Pyasova Aigul Maratovna,

candidate of geological and mineralogical sciences,
664033 Irkutsk, Lermontov str., d. 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Leading Engineer,
email: ila@crust.irk.ru.

Снопков Сергей Викторович,

кандидат геолого-минералогических наук,
664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет, геологический факультет,
доцент,

664074, г. Иркутск, ул. Курчатова, 3,

Сибирская школа геонаук, Иркутский национальный исследовательский технический университет,

ведущий научный сотрудник,

email: snopkov_serg@mail.ru.

Snopkov Sergey Viktorovich,

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,

664003 Irkutsk, Lenin str., 3, Irkutsk State University, Faculty of Geology,

Assistant Professor,

664074, Irkutsk, Kurchatov str., 3, Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University,

Leading Researcher,

email: snopkov_serg@mail.ru.
