

Косейсмические вариации Li в подземных водах станции 27 Култукского полигона

И.С. Чувашова^{1,2}, А.М. Ильясова¹

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

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

Аннотация. Приводятся результаты мониторинга термофильного микроэлемента Li и связанных с ним макрокомпонентов Cl и S в подземных водах ст. 27 Култукского полигона. Устанавливается зависимость их вариаций от землетрясений и афтершоков Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2022 гг. По Na/Li геотермометрии, отношению активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ и активности ^{234}U обозначаются источники подземных вод в резервуаре с температурой до 100 °С и более при растяжении коры и источники с температурой до 8 °С при ее сжатии. В ходе развития полного сейсмогеодинамического цикла сжатия и растяжения коры расшифровываются фазы стабилизации, а также фазы возрастания и снижения температуры подземных вод.

Ключевые слова: подземные воды, мониторинг, Na/Li, землетрясения, Байкал.

Coseismic variations of Li in groundwaters from station 27 of the Kultuk polygon

I.S. Chuvashova^{1,2}, A.M. Ilyasova¹

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

² *Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

Abstract. Monitoring results of the thermophilic trace element element Li and related macrocomponents Cl and S in groundwaters from station 27 in the Kultuk polygon. The dependence of their variations on earthquakes and aftershocks of the 2020–2022 Baikal-Khubsugul reactivation is established. From Na/Li geothermometry, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio, and ^{234}U activity, groundwater sources in a deep reservoir with a temperature as high as 100 °C or more under crust stretching and those with a temperature as low as 8 °C under crust compression are designated. Phases of stabilization, increase and decrease in groundwater temperature are deciphered in the course of the development of a complete seismogeodynamic cycle of compression and extension of the crust.

Keywords: groundwater, monitoring, Na/Li, earthquake, Baikal.

Введение

При землетрясениях регистрируется действие различных геологических факторов, влияющих на распределение химических элементов в подземных водах. Связь таких элементов с сейсмогенными деформациями становится очевидной, если в подземных водах длительное время сохраняется их фоновая концентрация, а непосредственно перед землетрясением или при его реализации устанавливается их аномальное поведение.

В этом случае нужно выявлять характер связи между развитием сейсмичности и гидрогеохимическими процессами, контролирующими распределение элементов между твердыми и жидкими средами.

В подземных водах Култукского полигона индикаторную роль косейсмических откликов выполняет Li. Деформационные эффекты этого элемента регистрируются в подземных водах ст. 27, которые характеризуются как конечный компонент Култукско-

го резервуара в шовной зоне Главного Саянского разлома (ГСР) с наиболее неравновесным U и наименее радиогенным Sr в двухкомпонентной U–Sr-изотопной модели смешения (Расказов и др., 2015). Li-деформационные эффекты устанавливаются в 2013–2015 гг., перед Северо-Хубсугульским и Голоустным землетрясениями

и произошедшими, соответственно, 05 декабря 2014 г. и 05 сентября 2015 г. После этих сейсмических событий, в 2015–2020 гг., концентрация Li находится в основном на уровне фона (около 0.2 мкг/дм³) и последовательно возрастает (до 1.15 мкг/дм³) во время Байкало-Хубсугульской активизации 2020–2022 гг. (рис. 1).

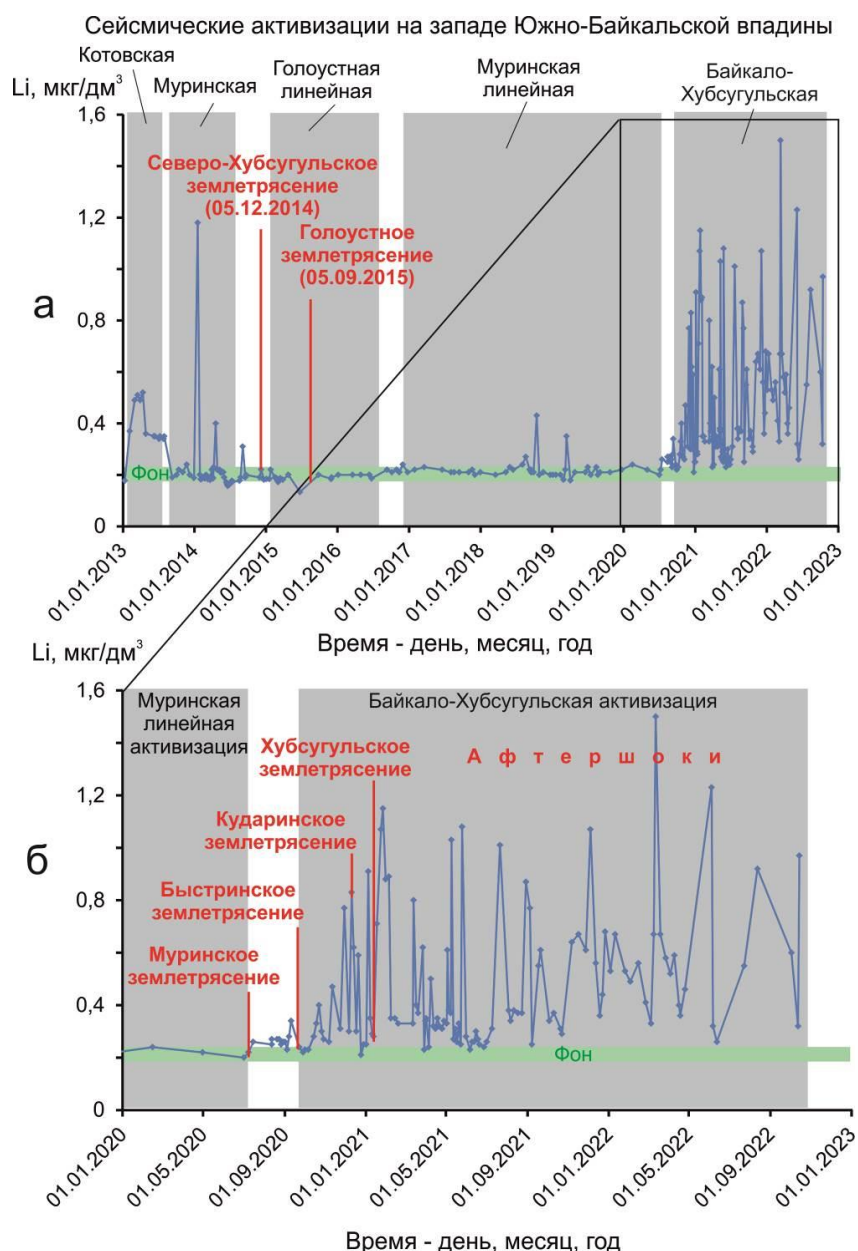


Рис. 1. Диаграммы вариаций концентрации Li в подземных водах ст. 27 Култукского полигона в течение всего временного интервала наблюдений 2013–2022 г. (а) и в течение последних трех лет (б).

Fig. 1. Diagrams of Li variations in groundwaters from station 27 of the Kultuk polygon during the entire observation time interval of 2013–2022 (a) and during the last three years (b).

Литий присутствует в подземных водах в микроколичествах в виде катиона Li⁺ и в соединениях с основными компонентами (Cl, S

и C) в виде: LiSO₄⁻, LiOH⁰, LiCl⁰, LiCH₃COO⁰, Li(CH₃COO)₂⁻ (Merkel, Planer-Friedrich, 2005). В настоящей работе прово-

дится анализ мониторингового ряда Li ст. 27 для выявления характера его косейсмического обогащения и обеднения подземных вод и установления его соотношений с основными компонентами, образующими соединения в ходе развития сейсмических активизаций.

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

Постоянный мониторинг подземных вод проводится на Култукском полигоне с частотой опробования в среднем один раз в 2 недели более 10 лет на шести основных станциях: на скважинах – станции 27 (Школа), 184 (ул. Школьная), 8 (Чертова Гора), 40

(Стрелка), 9 (Земляничный) и в роднике – ст. 14к (Ключ Тигунчиха). 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. Менее часто, но регулярно, опробуются вспомогательные станции. Ст. 27 находится в центре полигона, на Култукской тектонической ступени, наклоненной к востоку, в сторону Байкала (рис. 2).



Рис. 2. Схема расположения ст. 27 и других основных и вспомогательных станций гидрогеохимического опробования активных разломов на западном побережье оз. Байкал (Култукский полигон). Палеосейсмодислокации в шовной зоне Главного Саянского разлома (ГСР) показаны по работе (Чипизубов, Смекалин, 1999).

Fig. 2. Location scheme of station 27 and other main and supplementary stations for hydrogeochemical sampling of active faults on the western coast of Lake Baikal (Kultuk polygon). Paleoseismic dislocations in the suture zone of the Main Sayan Fault (ГСР) are shown after (Chipizubov, Smekalin, 1999).

Для определения химического элементного состава образцы воды фильтруют через

шприц-насадки с диаметром пор 0.45 мкм (Minisart 16555-К, ацетат целлюлозы, Sarto-

rius Stedim Biotech GmbH, Германия) в предварительно взвешенные 2 мл полипропиленовые пробирки Эппендорфа (Axugen Scientific, Cat.-No. MCT-200-C, США, Мексика), содержащие 40 мкл консерванта. В качестве консерванта используется концентрированная азотная кислота (70%), дважды очищенная с помощью суббойлинговой системы перегонки кислот (Savillex DST-1000 sub-boiling distillation system, Япония), в которую добавляется индий (типично 1000 ppb) в качестве внутреннего стандарта. Аликвоты консерванта взвешиваются при добавлении в пробирки. Пробирки с отобранными образцами воды взвешиваются и рассчитывается точное содержание азотной кислоты (типично 2 %) и индия (типично 30 ppb). Пробы хранятся в холодильнике при положительной температуре. В подготовленных растворах определяются содержание 72 химических элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) на квадрупольном

масс-спектрометре Agilent 7500 (Чебыкин и др., 2012). Вместе с Li анализируются основные компоненты Cl и S. Определение углерода методом ИСП-МС встречает ряд трудностей из-за периодической контаминации газа аргона, используемого для генерации плазмы.

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).

Сейсмические активизации

По каталогу (Карта..., 2023) в пространственно-временном распределении эпицентров землетрясений западной части акватории Южного Байкала в 2008–2022 гг. определяется 7 сейсмических активизаций, разделенных между собой перестройками (табл. 1).

Таблица 1

Временные интервалы сейсмических активизаций и перестроек эпицентров землетрясений в 2008–2022 гг. (от сильной Култукской активизации до сильной Байкало–Хубсугульской)

Table 1

Time intervals of seismic reactivations and reorganizations of earthquake epicenters in 2008–2022 (from strong Kultuk reactivation to strong Baikal-Khubsugul one)

Сейсмическая активизация	Интервал активизации (продолжительность, месяцы)	Интервал перестройки (продолжительность, месяцы)
Култукская	27.08.2008–04.01.2011 (27)	04.01.2011–24.06.2011 (5)
Толбазихинская	24.06.2011–11.10.2012 (15)	11.10.2012–08.01.2013 (2)
Котовская	0.8.01.2013–21.07.2013 (6)	21.07.2013–11.08.2013 (<1)
Муринская	11.08.2013–20.07.2014 (11)	20.07.2014–13.01.2015 (5)
Голоустная линейная	13.01.2015–29.08.2016 (20)	29.08.2016–14.12.2016 (2.5)
Муринская линейная	14.12.2016–06.07.2020 (43)	06.07.2020–22.09.2020 (2.5)
Байкало–Хубсугульская	22.09.2020–(продолжается более 30 месяцев)	

Примечание: Обоснование интервалов приведено в работе (Rasskazov et al., 2020). Дополнительно обозначается окончание активности Муринской эпицентральной линии Муринским землетрясением 06 июля 2020 г. и перестройка 06 июля 2020 г. – 22 сентября 2020 г., обозначившая начало Байкало–Хубсугульской активизации.

До сильного Южно-Байкальского землетрясения, произошедшего в западной части Южно-Байкальской впадины 25 февраля 1999 г. ($K=14.6$), во временном интервале от 22 марта до 10 февраля 1999 г., пространственно-временное распределение эпицентров землетрясений этой территории сочеталось с активизацией Саянской сейсмической ветви, которая протягивалась цепочкой эпи-

центров от Южно-Байкальской впадины в Тункинскую долину. После Южно-Байкальского землетрясения сейсмогенные деформации перестроились и в едином режиме латерального распределения эпицентров привели к Култукскому землетрясению 2008 г. Эпицентры мигрировали в пределах этой структуры без распространения в Тункинскую долину. Сильное Култукское зем-

летрясение повлекло за собой многочисленные афтершоки, охватившие не только акваторию оз. Байкал, но и сопредельное южное побережье. Временному интервалу до и после Култукской сейсмической активизации, происходившей в 2008–2011 гг., было свойственно в целом латеральное распределение эпицентров относительно Южно-Байкальской впадины (Rasskazov et al., 2020).

После Култукского землетрясения латеральный режим распределения эпицентров землетрясений поддерживался до 2013 г. В 2014–2015 гг. произошли сейсмические события, объединившие Хубсугульскую и Южно-Байкальскую впадину и связующую эти структуры Тункинскую долину в об-

ширную Байкало-Хубсугульскую сейсмогенерирующую область (рис. 3). 05 декабря 2014 г. произошло сильное Северо-Хубсугульское землетрясение ($K=13.9$) в северной части Хубсугульской впадины, за которым 05 сентября 2015 г. последовало Голоустное землетрясение умеренной силы ($K=12.3$) в Южно-Байкальской впадине. В это время Байкало-Хубсугульская сейсмогенерирующая область настроилась на режим переключки сейсмическими событиями между Хубсугульским эпицентральной полем и эпицентральной полями Южно-Байкальской впадины. В 2020–2022 гг. такой режим в целом характеризовал Байкало-Хубсугульскую сейсмическую активизацию.

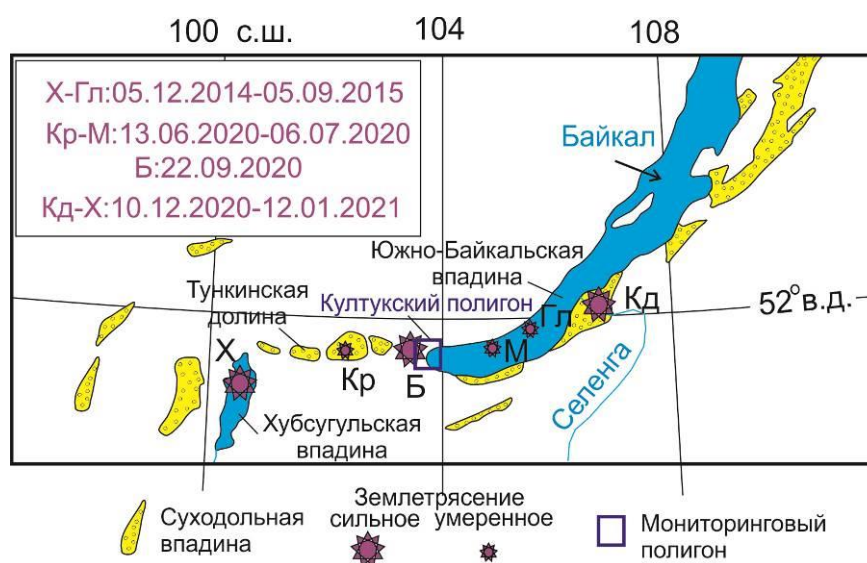


Рис. 3. Схема распределения сильных и умеренных землетрясений Байкало-Хубсугульской сейсмической области в 2014–2022 гг. Афтершоки не показаны. Землетрясения 2014–2015 гг.: X – Северо-Хубсугульское, Гл – Голоустное. Землетрясения 2020–2021 гг.: Kr – умеренное Кыренское в Тункинской долине, М – умеренное Муринское в Южно-Байкальской впадине, Б – сильное Быстринское, Кд – сильное Кударинское, X – сильное Хубсугульское. Использован каталог (Карта..., 2023).

Fig. 3. Scheme of distribution of strong and moderate earthquakes in the Baikal-Khubsugul seismic region in 2014–2022. Aftershocks are not shown. Earthquakes of 2014–2015: X – North-Khubsugul, Гл – Goloustnoe. Earthquakes in 2020–2021: Kr – moderate Kyren in the Tunka Valley, М – moderate Murin in the South Baikal Basin, Б – strong Bystraya, Кд – strong Kudara, X – strong Khubsugul. The catalog (Map..., 2023) is used.

Развитие деформаций коры в центральной части Байкальской сейсмической зоны рассматривается в рамках полного сейсмогеодинамического цикла, проявившегося от Култукской до Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации. При мониторинге подземных вод на Култукском полигоне в

2012–2022 гг. установлено снижение отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ и активности ^{234}U , свидетельствующее об относительном закрытии микротрещин (возрастании фактора сжатия коры), а затем – возрастание этих параметров, отражающее открытие микротрещин (возрастание фактора растяжения

коры). Сжатие реконструировано в середине сейсмогеодинамического цикла (в 2014–2015 г.), растяжение – в его конце, при развитии Байкало-Хубсугульской активизации (в 2020–2022 гг.) (Чебыкин и др., 2022; Ras-skazov et al., 2022).

Временные вариации концентрации Li в подземных водах и землетрясения

Землетрясения 2013–2015 гг.: Котовская и Муринская активизации, переход к Голоустной линейной активизации

Котовская сейсмическая активизация начинается с наиболее сильного (главного) землетрясения 08 января 2013 г. ($K=11.2$). Она продолжается 6 месяцев (до 21 июля 2013 г.). Середине этой активизации (01

марта – 12 апреля 2013 г.) соответствует плоский максимум Li из четырех точек $0.49–0.52$ мкг/дм³. В конце Котовской активизации концентрация Li ступенчато снижается до интервала $0.34–0.36$ мкг/дм³. Это снижение сопровождается слабыми землетрясениями 24 апреля и 07 июня, эпицентры которых находятся рядом с пос. Култук. Степень Li длится от землетрясения 24 апреля до 30 июля и захватывает начало структурной перестройки эпицентральных полей между Котовской и Муринской активизациями. 09 сентября концентрация Li выходит на фоновое значение (0.19 мкг/дм³) со слабым подъемом на низкий максимум (0.24 мкг/дм³) 22 ноября с последующим возвращением к фону 29 декабря 2013 г. (рис. 4).

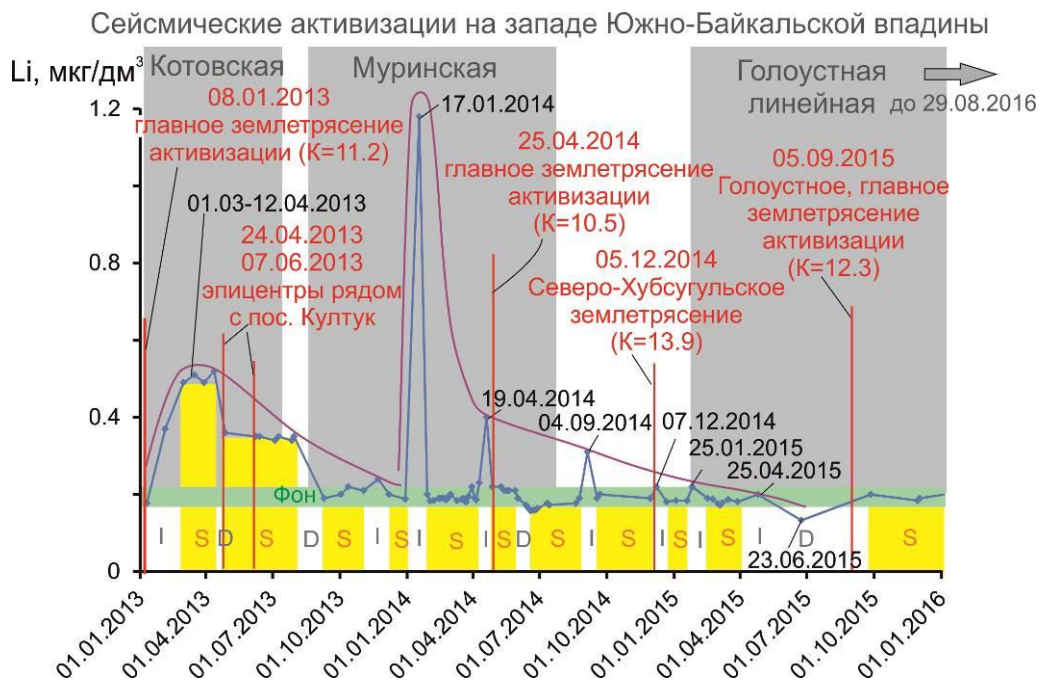


Рис. 4. Диаграмма сопоставления Li-фаз в подземных водах ст. 27 с сейсмическими событиями 2013–2015 гг. в Байкало-Хубсугульской сейсмогенерирующей области. Желтыми полосами выделены стабильные (S, stable) фазы Li, белыми полосами между ними – фазы возрастающей (I, increasing) и снижающейся (D, decreasing) концентрации Li.

Fig. 4. Comparison diagram of Li-phases in groundwaters from station 27 with seismic events of 2013–2015 in the Baikal-Khubsugul seismogenerating region. The yellow stripes indicate stable (S) Li-phases, the white stripes between them show those of increasing (I) and decreasing (D) Li concentrations.

С 11 августа 2013 г. до 20 июля 2014 г. следует Муринская активизация в основном при фоновой концентрации Li. В середине этой активизации (19 апреля 2014 г.) выделяется одиночный максимум Li (0.4

мкг/дм³). Во время перестройки между Муринской и Голоустной линейной активизациями (20.07.2014–13.01.2015) 04 сентября 2014 г. опять выделяется одиночный максимум Li (0.31 мкг/дм³). На фоне преобладаю-

щих значений 0.18 мкг/дм^3 появляется низкий максимум (0.22 мкг/дм^3) 07 декабря, близкий по времени Северо-Хубсугульскому землетрясению (05 декабря 2014 г.). За снижением концентрации Li (до 0.13 мкг/дм^3) 23 июня 2015 г. следует Голоустное землетрясение (05 сентября 2015 г.).

В 2013–2015 гг. фазы повышенной концентрации Li в целом объединяются в два асимметричных максимума. С первым из них связаны слабые (приближенные к полигону) землетрясения в акватории Байкала: Листвянское (08 января 2013 г.) и Култукские (24 апреля и 07 июня 2013 г.). В конце второго интервала реализуются сильное (Северо-Хубсугульское) и умеренное (Голоустное) землетрясения. Первое из них происходит при перестройке от Муринской к Голоустной (линейной) активизации, второе – проявляется как главное землетрясение Голоустной линейной активизации. При более поздней концентрации эпицентров землетрясений вдоль Муринской линии (с 14 де-

кабря 2016 г. до 06 июля 2020 г.) выдерживается в основном фоновая концентрация Li с двумя небольшими максимумами в конце 2018 – начале 2019 гг. (см. рис. 1).

Землетрясения, запускающие сильную Байкало-Хубсугульскую активизацию в 2020–2021 гг.

В западной части Южно-Байкальской впадины в 2017–2020 гг. землетрясения отсутствуют 2.5 года. Тункинская долина и Южно-Байкальская впадина вовлекаются в сейсмогенные деформации в июне–июле 2020 г. 06 июля 2020 г. происходит Муринское ($K=12.3$) событие в акватории оз. Байкал. 13 июня 2020 г. ему предшествует Кыренское землетрясение в центральной части Тункинской долины ($K=11.7$).

В это время в подземных водах ст. 27 регистрируется фоновая концентрация Li (рис. 5).

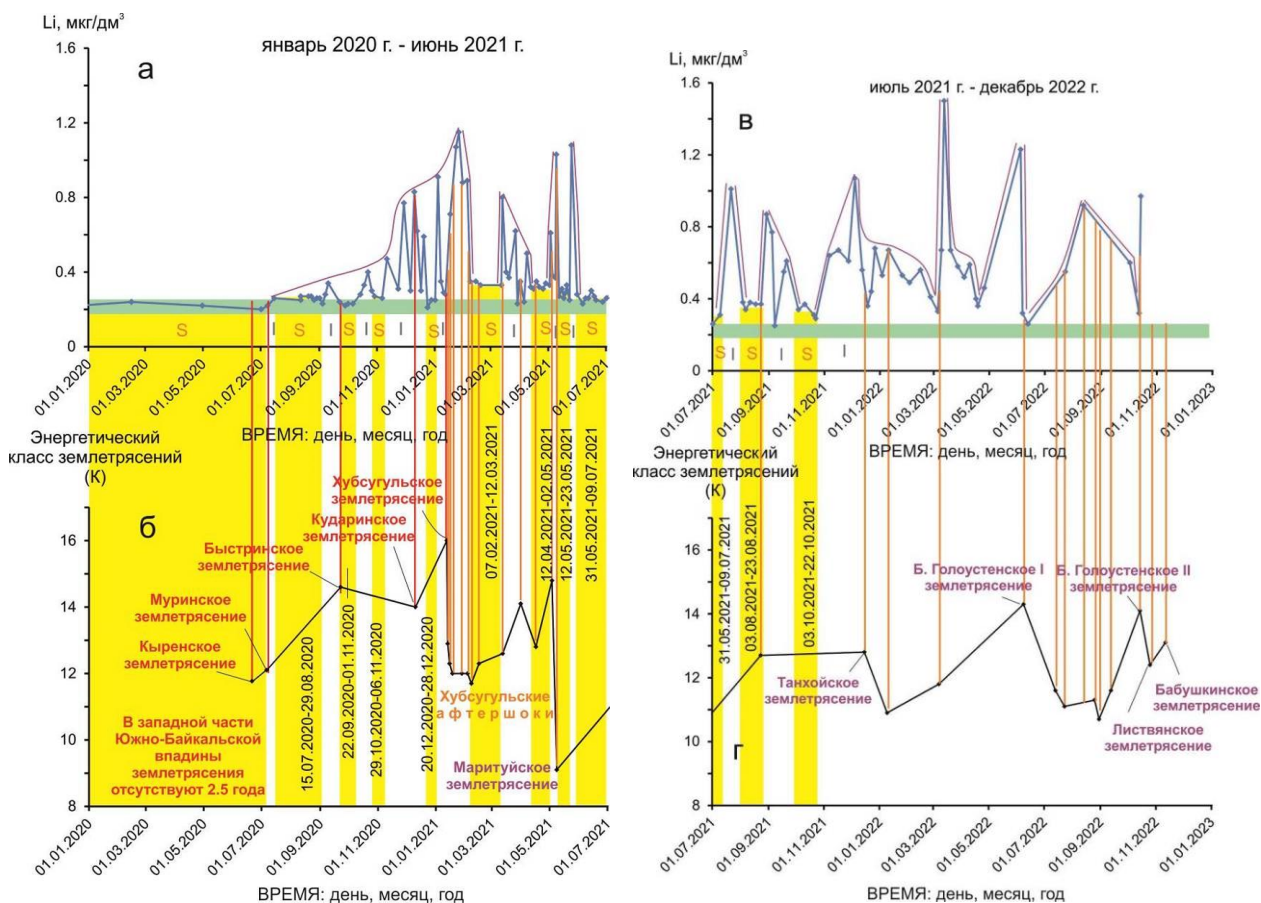


Рис. 5. Диаграммы сопоставления временных вариаций концентрации Li в подземных водах ст. 27 (а, в) с сейсмическими событиями 2020–2022 гг. в Байкало-Хубсугульской сейсмогенерирующей области (б, г). Временной интервал 2020–2022 гг. разделяется на 2 отрезка: январь 2020 г. – июнь 2021 г. и июль 2021 г. – декабрь 2022 г. Условные обозн. см. на рис. 3.

Fig. 5. Comparison diagrams of temporal variations in Li concentration in groundwaters from station 27 (a, b) with seismic events of 2020–2022. in the Baikal-Khubsugul seismogenic region (b, r). Timing of 2020–2022 is subdivided into 2 segments: January 2020 – June 2021 and July 2021 – December 2022. Symbols are as in Fig. 3.

Три пробы, отобранные 01, 07 и 15 июля 2020 г., дают слабый подъем концентрации Li от 0.20 мкг/дм³ до 0.26 мкг/дм³ с выходом за верхний предел фона. В дальнейшем наблюдаются: подобная концентрация Li (0.25–0.26 мкг/дм³) до 29 августа, снижение концентрации (до 0.23 мкг/дм³) 04 сентября, подъем (до 0.34 мкг/дм³) 10 сентября и падение (до 0.24 мкг/дм³) через 10 часов после Быстринского землетрясения (22 сентября). Стабильная концентрация на этом же уровне поддерживается до 1 ноября. К 22 октября концентрация поднимается до 0.4 мкг/дм³, снижается до 0.26 мкг/дм³ 29 октября, остается на том же уровне 06 октября, но уже 11 ноября поднимается до 0.47 мкг/дм³, вновь снижается 23 ноября до 0.31 мкг/дм³, поднимается 29 ноября до 0.77 мкг/дм³, снижается 06 декабря до 0.30 мкг/дм³, поднимается 10 декабря до 0.83 мкг/дм³ (происходит Кударинское землетрясение), снижается 17 декабря до 0.30 мкг/дм³, поднимается 20 декабря до 0.59 мкг/дм³, снижается 24 декабря до фона (0.21 мкг/дм³) и остается до 28 декабря на низком уровне (не выше 0.25 мкг/дм³).

04 января 2021 г. концентрация Li снова поднимается (до 0.91 мкг/дм³), снижается к 10 января до 0.29 мкг/дм³ и 12 января (в день самого сильного Хубсугульской активизации) остается почти на том же уровне (0.28 мкг/дм³). В дальнейшем, в течение двух недель, идет последовательный подъем концентрации Li до самого высокого значения (1.15 мкг/дм³) 26 января. Затем концентрация Li снижается (до интервала 0.33–0.35 мкг/дм³) с ее стабилизацией с 7 февраля до 12 марта. Максимальный подъем концентрации Li после Хубсугульского землетрясения 12 января 2021 г. до стабилизации 7–12 февраля совпадает с самым сильным (Хубсугульским) землетрясением и сближен-

ными с ним афтершоками в Хубсугульском эпицентральной поле. Нарастание концентрации Li с июня–июля 2020 г. к январю 2021 г. от фоновых значений до 1.15 мкг/дм³ имеет направленный характер как отклик на нарастающие сейсмогенные деформации коры.

Афтершоки Байкало-Хубсугульской активизации

В ходе афтершоков Байкало-Хубсугульской активизации, с 12 января 2021 г. (время Хубсугульского землетрясения) до 22 октября 2021 г., продолжается чередование пиков Li и интервалов его стабильной концентрации. Интервалы стабилизации (07.02.2021–12.03.2021, 12.04.2021–02.05.2021, 12.05.2021–23.05.2021, 31.05.2021–09.07.2021, 03.08.2021–23.08.2021 и 03.10.2021–22.10.2021) сначала сопровождаются частыми хубсугульскими афтершоками, завершающиеся небольшим (близким к Култукскому полигону) Маритуйским землетрясением в акватории Южного Байкала, и продолжаются с афтершоком в Хубсугульском эпицентральной поле. При переходе к Танхойскому землетрясению, случившемуся 15 января 2021 г. ($K=12.8$), и последующим сейсмическим событиям интервалы стабильной концентрации Li больше не регистрируются (рис. 5б).

Временные вариации общей минерализации, концентраций Cl и S в подземных водах

Общая минерализация (ОМ) подземных вод ст. 27 с течением времени возрастает от интервала значений 210–240 мг/дм³ в 2012–2015 гг. до интервала преобладающих значений 260–270 мг/дм³ в 2019–2022 гг. (рис. 6). На фоне этого подъема выделяются отдельные минимумы и максимумы.

В 2012–2015 гг. минимальное значение ОМ (120 мг/дм³) наблюдается 17 января

2014 г., максимальное (270 мг/дм^3) – 09 апреля этого же года. Минимум ОМ (180 мг/дм^3) образуется 29 ноября 2015 г., после Голоустного землетрясения. После этого минимума значения ОМ выходят в 2016–2019 гг. на более высокий уровень, по сравнению с уровнем ОМ в 2012–2015 гг. Новый переход на более высокий уровень ОМ наблюдается 20 июня – 02 июля 2019 г. Перед Быстринским землетрясением устанавливается уровень преобладающих значений ОМ 2019–2022 гг. В течение этого времени неоднократно возникают минимумы и максимумы. Самый существенный максимум ($\text{ОМ}=360 \text{ мг/дм}^3$) образуется 04 июня 2022 г., самый существенный минимум ($\text{ОМ}=170 \text{ мг/дм}^3$) – 02–14 октября 2022 г.

В отличие от ОМ, концентрация микрокомпонента Li поддерживается в течение длительных временных интервалов 2012–2020 гг. на одном (фоновом) уровне (см. рис. 1). Иными словами, поведение Li не зависит от последовательного ступенчатого возрастания ОМ. Возникает вопрос: связаны ли макрокомпоненты, образующие в подземных водах химические соединения с Li (Cl и S), с последовательным ступенчатым возрастанием ОМ или имеют поинтервальные вариации, подобные вариациям Li?

Временные изменения концентрации макрокомпонента Cl характеризуются генеральным фоновым уровнем (около $5\text{--}6 \text{ мг/дм}^3$), выдержанным в течение 10 лет (рис. 6б). В интервале 2012–2015 гг. фоновый уровень сужается на нижнем пределе значений генерального уровня. В первой половине 2013 г. концентрация Cl уходит ниже фона, в 2014–2015 гг. – поднимается выше него. Самый большой выброс Cl (09 апреля 2014 г.) совпадает с максимумом ОМ. После

Голоустного землетрясения концентрация Cl стабилизируется на фоновых значениях. Первый небольшой выброс Cl (до 7.2 мг/дм^3) происходит 20–23 августа 2020 г. между Муринским землетрясением (6 июля 2020 г.) и Быстринским (22 сентября 2022 г.). В дальнейшем наблюдаются максимумы возрастающих концентраций Cl: 12.3 мг/дм^3 (Быстринское землетрясение 22 сентября 2020 г.), 18.2 мг/дм^3 и 29 мг/дм^3 (04 июня 2022 г.). Переход от фоновой концентрации Cl к максимумам подобен переходу концентрации Li в 2020–2022 гг. (см. рис. 1). Следовательно, косейсмическая гидрогеохимическая специфика микрокомпонента Li в подземных водах ст. 27 может иметь связь с концентрацией макрокомпонента Cl.

Временные вариации концентрации макрокомпонента S также отличаются от вариаций ОМ выдержанными во времени фоновыми значениями. Подобно концентрации макрокомпонента Cl, концентрация S дает фон (около $4\text{--}6 \text{ мг/дм}^3$) в 2015–2022 гг., но имеет широкий разброс значений в 2012–2015 гг. В середине 2013 г. (04–27 июля) концентрация S уходит на минимум, в 2014 г. (25 февраля–09 апреля) – на максимум, после которого снижается к фону, устанавливаемому в 2015 г. после Голоустного землетрясения (рис. 6в). Во время Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации наблюдаются отдельные максимумы S выше фоновых значений. Наиболее выразительный максимум S (04 июня 2022 г.) совпадает с максимумом ОМ и максимумом Cl. Такое согласованное поведение разных гидрогеохимических показателей связано с подготовкой одного из сильнейших афтершоков (Б. Голоуспенского–2) с $K=14.3$, произошедшего 08 июня 2022 г.

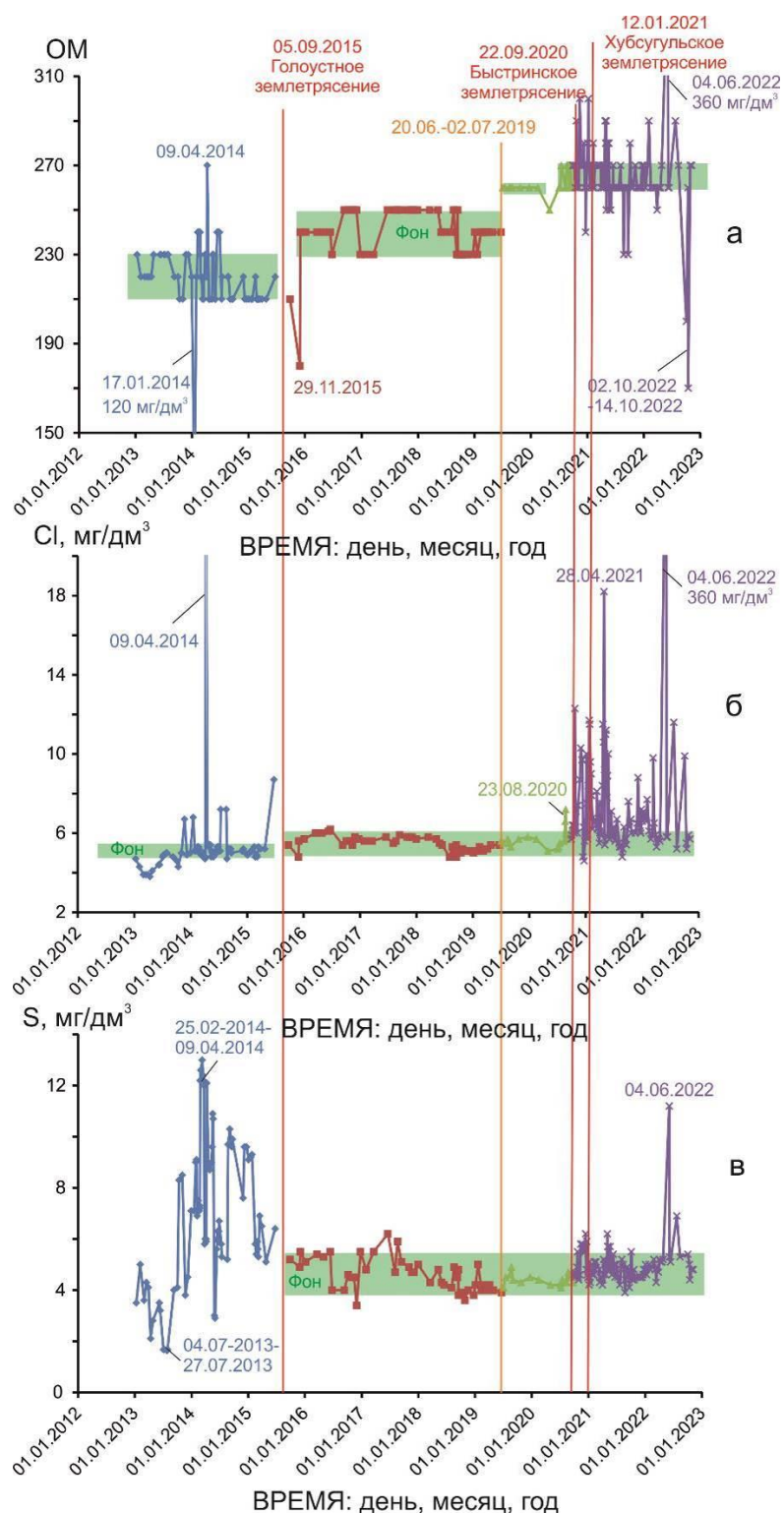


Рис. 6. Диаграммы временных вариаций общей минерализации (ОМ) (а), концентраций макрокомпонентов Cl (б) и S (в) в подземных водах ст. 27.

Fig. 6. Diagrams of temporal variations of total mineralization (TM) (а), concentrations of macrocomponents Cl (б) and S (в) in groundwaters from station 27.

Соотношения вариаций Cl и S с вариациями Li

Временные изменения микрокомпонента Li в подземных водах по-разному соотносятся с временными изменениями содержаний макрокомпонентов Cl и S.

На диаграмме Cl – Li (рис. 7а) фоновой концентрации Li (около 0.2 мкг/дм³) (см. рис. 1) соответствует фоновое содержание Cl (5–6 мг/дм³) (см. рис. 6б). Фон обозначается обособленной группой фигуративных точек подземных вод временного интервала 2012–2015 гг. В этом же временном интервале и в последующие три интервала от фонового состава протягиваются фигуративные поля точек подземных вод, попадающих ниже и выше фона. В 2012–2015 гг. обозначается временной тренд возрастания концентрации Cl со снижением концентрации Li от значений ниже фона к значениям выше фо-

на. От тренда отрицательной корреляции Cl и Li отрываются отдельные фигуративные точки с относительным возрастанием Li (до 1.2 мкг/дм³) или Cl (до 27 мг/дм³). Во временном интервале 2020–2022 гг. обозначаются тренды относительного возрастания Li и Cl в виде полосовидных сгущений фигуративных точек подземных вод. Одна полоса протягивается субпараллельно оси абсцисс, другая – субпараллельно оси ординат. Часть точек подземных вод временного интервала 2020–2022 гг. показывает обогащение обоими элементами (Li и Cl).

Следовательно, в интервале 2012–2015 гг. проявляются фоновые соотношения Cl и Li, обратная корреляция между этими элементами и отдельные выбросы их ураганных концентраций, которые в целом характеризуют сейсмический интервал 2020–2022 гг.

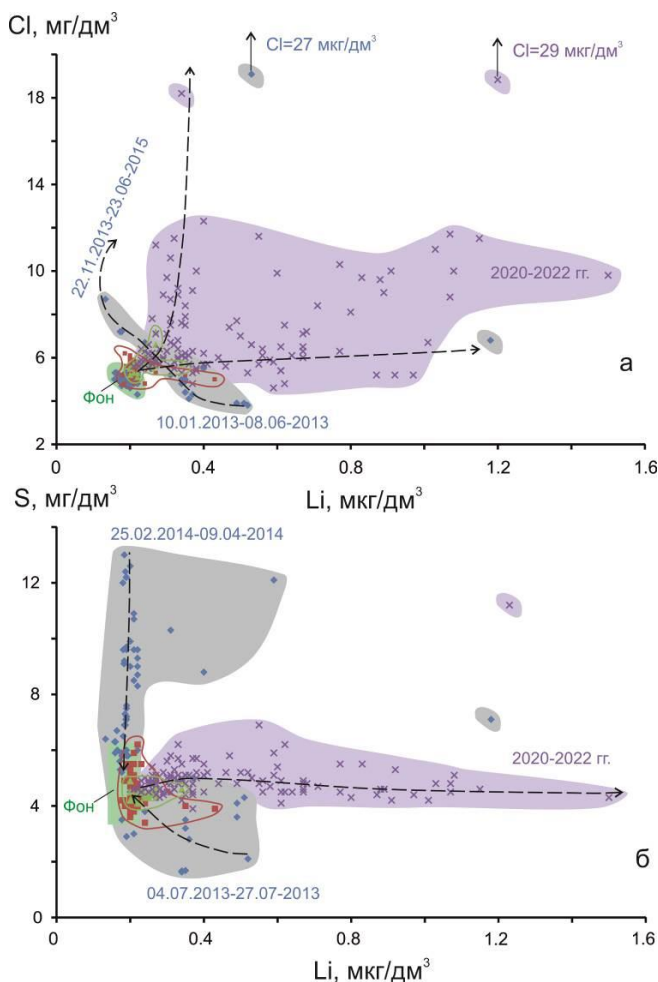


Рис. 7. Диаграммы ковариаций макрокомпонентов (а – Cl, б – S) и микроэлемента Li в подземных водах ст. 27. Условные обозн. см. рис. 6. Штриховыми линиями со стрелками обозначаются тренды по сгущениям фигуративных точек.

Fig. 7. Diagrams of covariations of the macrocomponents (a – Cl, б – S) and the trace element Li in groundwaters from station 27. Symbols are as in Fig. 6. Dashed lines with arrows show trends extended along dense areas of data points.

На диаграмме S – Li (рис. 7б) отчетливо различаются соотношения этих элементов в 2012–2015 гг. (до Голоустного землетрясения), в 2015–2020 гг. (между Голоустным и Быстринским землетрясениями) и в 2020–2022 гг. (во время Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации). Обозначается перекрытие фоновой концентрации Li (около 0.2 мкг/дм³) (см. рис. 1), соответствующее фоновому содержанию S (4–6 мг/дм³), проявляющемуся в подземных водах в 2015–2020 гг. (рис. 6в). Относительно фона резко обособляются фигуративные поля точек подземных вод 2012–2015 и 2020–2022 гг. В первом интервале наблюдается тренд, субпараллельный оси ординат, показываю-

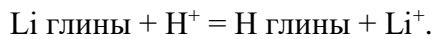
щий возрастание S при концентрации Li , близкой к фоновой. На верхнем окончании тренда и ниже фонового фигуративного поля точки смещаются правее тренда с относительным возрастанием Li . Во втором (сейсмическом) интервале образуется тренд, протягивающийся от фонового фигуративного поля субпараллельно оси абсцисс.

Обсуждение результатов

Со ступенчатым возрастанием OM (см. рис. 6а) согласуется последовательное повышение термофильного макрокомпонента Si (Ильясова, Снопков, 2023). Между тем, ряды мониторинговых данных Li и макрокомпонентов, образующих с ним соединения (Cl и S), не вписываются в эти ступени и интерпретируются в связи с термофильностью Li в подземных водах с выходом на косейсмические процессы в резервуаре подземных вод.

Косейсмическое маркирование подземных вод термофильным элементом Li

Концентрация Li в подземных водах зависит от температуры. Эмпирический Na/Li геотермометр (Fouillac et al. 1981) основан на температурной зависимости реакции катионного обмена вод с глинами и цеолитами:



Геотермометр дает оценку температуры резервуара подземных вод по элементному отношению без учета относительных вариаций концентрации Na и Li . В природных термальных подземных водах образуются температурные тренды. Они описываются двумя уравнениями: одно используется для вод, содержащих <11 г/кг Cl ($Cl < 0.3$ моль/кг), другое – для вод, содержащих >11 г/кг Cl ($Cl > 0.3$ моль/кг).

Уравнение

$$T^{\circ}C = \frac{1000}{0.389 + \log(mNa / mLi)} - 273.15$$

действительно для концентраций $Cl > 0.3$ моль/кг. Уравнение

$$T^{\circ}C = \frac{1195}{0.130 + \log(mNa / mLi)} - 273.15$$

действительно для концентраций $Cl < 0.3$ моль/кг). В обоих уравнениях концентрации элементов даются в молях (mNa и mLi).

При подъеме воды из Култукского резервуара на поверхность отношение Na/Li не должно меняться. Для оценки температур в резервуаре под ст. 27 используется первое уравнение. Получается общий температурный диапазон в резервуаре 8–116 °С. Высокие температуры (около 116 и 99 °С) регистрируются, соответственно, 17 января 2014 г. и 12 марта 2022 г. (рис. 8). Повышенная температура (50 °С) отмечается также 14 октября 2018 г. Это повышение служит предтечей более сильного возрастания температуры в 2020–2022 гг.

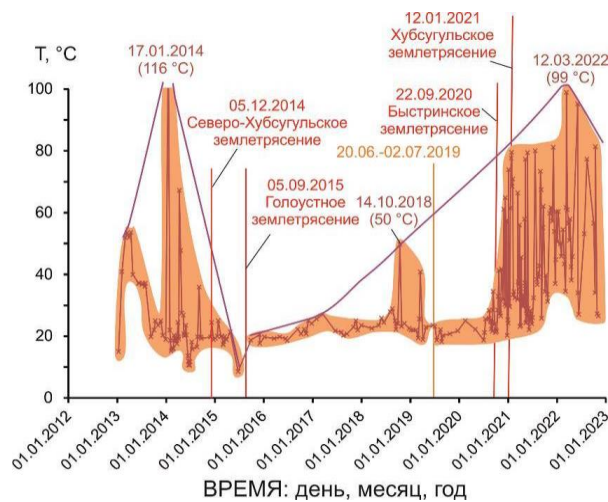


Рис. 8. Диаграмма временных вариаций температуры резервуара подземных вод ст. 27 по Na/Li геотермометрии (объяснения в тексте).

Fig. 8. Diagram of temporal variations in a temperature of a deep groundwater reservoir station 27 from Na/Li geothermometry (explanations in the text).

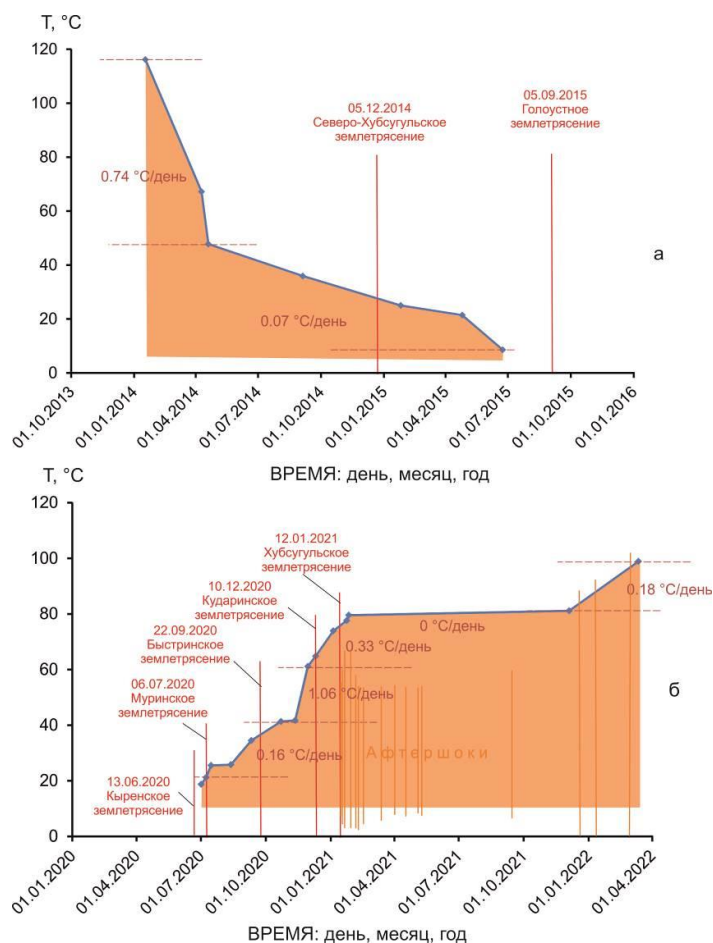


Рис. 9. Диаграммы неравномерного снижения максимальных значений температуры резервуара подземных вод ст. 27 при уменьшении растяжения (нарастании сжатия) коры в 2014–2015 гг. (а) и неравномерного возрастания максимальных значений температуры при повышении растяжения в 2020–2022 гг. (б) (объяснения в тексте).

Fig. 9. Diagrams of uneven temperature decrease of maximal values in a deep reservoir of groundwaters from station 27 under decreasing extension (increasing compression) of the crust in 2014–2015 (a) and its uneven increase under growing extension in 2020–2022 (б) (explanations in the text).

В развитии резервуара подземных вод главную роль играет снижение температуры в 2014–2015 гг. и ее возрастание в 2020–2021 гг. На рис. 9 приводится детальная расшивка максимальных значений температуры этих временных интервалов.

В 2014–2015 гг., с 17 января до 19 апреля 2014 г., максимальные значения температуры резервуара снижаются в интервале от 116 °С до 48 °С быстро, в среднем на 0.74 °С в день (или 5.2 °С в неделю). С 19 апреля 2014 г. до 25 апреля 2015 г. снижение максимальных значений температуры от 48 °С до 21 °С замедляется и составляет в среднем 0.07 °С в день (или 0.51 °С в неделю).

В 2020–2021 гг., с 06 июля до 11 ноября 2020 г., максимальные значения температу-

ры резервуара возрастают в интервале от 21 °С до 42 °С медленно, в среднем на 0.16 °С в день (или 1.16 °С в неделю). С 11 до 29 ноября температура резко увеличивается с 42 до 61 °С, на 1.06 °С в день (или 7.4 °С в неделю). С 29 ноября 2020 г. до 26 января 2021 г. температура продолжает увеличиваться до 80 °С несколько медленнее, в среднем на 0.33 °С в день (или 2.3 °С в неделю). Однако в дальнейшем, на протяжении более 10 месяцев, максимальные значения температуры не повышаются. Затем, с 04 декабря 2021 г. до 12 марта 2022 г., они еще возрастают в интервале от 81 °С до 99 °С, в среднем на 0.18 °С в день (или 1.3 °С в неделю). После максимума 99 °С 12 марта 2022 г. наблюдается тенденция к снижению максимальных

значений температуры (см. рис. 8). В температурном интервале 81–99 °С с 12 марта до 14 октября 2022 г. температура снижается в среднем на 0.08 °С в день (или 0.58 °С в неделю).

В 2014–2015 гг. происходит Северо-Хубсугульское землетрясение на фоне структурной перестройки эпицентральных полей Муринской и Голоустной (линейной) активизаций (см. рис. 1а и 4). Температура резервуара на Култукском полигоне последовательно снижается. Голоустное землетрясение обозначает достижение самой нижней критической температурной отметки 8 °С, после которой глубинный резервуар подземных вод приобретает новую направленность термальной эволюции, восходящей к максимуму 50 °С 14 октября 2018 г. (см. рис. 8).

По отношению к температурной эволюции резервуара 2014–2015 гг., его температурная эволюция в Байкало-Хубсугульскую активизацию 2020–2022 гг. имеет противоположную направленность, от низких температур к высоким. Сначала температура растет медленно (0.16 °С в день). Критическое состояние обозначается ускоренным (1.06 °С в день) возрастанием температуры резервуара подземных вод 11–29 ноября 2020 г. Новая критическая точка достигается 26 января 2021 г., после которой температура не увеличивается. Перед этой критической точкой реализуется самое сильное Хубсугульское землетрясение. Интервал нового возрастания температуры с 04 декабря 2021 г. до 12 марта 2022 г. примечателен тремя афтершоками: Танхойским, $K=12.8$ (15.12.2021), Б. Голоустенским-1, $K=10.9$ (09.01.22) и Хубсугульским, $K=11.8$ (07.03.2022). Во временном интервале самой высокой возрастающей температуры (81–99 °С) проявляются южно-байкальские сейсмические события и хубсугульское (см. рис. 5 в,г).

Отметим общую закономерность для максимальных значений снижающихся и поднимающихся температур резервуара: температура меняется быстрее при ее средних значениях (40–80 °С) и медленнее – при низких и высоких. Косейсмический рост температуры подземных вод инициируется и прекращается в связи с уменьшением растя-

жения (сжатием) и усилением растяжения коры в ходе развития полного сейсмогеодинамического цикла, реконструированного по вариациям отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ и активности ^{234}U (Чебыкин и др., 2022; Ras-skazov et al., 2022).

Косейсмическое возрастание концентрации термофильного элемента Li связывается с развитием глинки трения в активном разломе в условиях повышенной температуры. Чем больше образуется глинистых минералов при движении в плоскости разлома, тем выше температура. В данном случае, очевидно, что концентрация Li (Na/Li геотермометрия) подземных вод отражает возрастание температуры вследствие усиления взаимодействия вода–порода в активном разломе по принципу механического размешивания твердых глинистых частиц в жидкости.

Развитие резервуара подземных вод

В 2013–2015 гг., в условиях Котовской и Муринской сейсмических активизаций, подземные воды ст. 27 проявляются из резервуара с максимальной Na/Li температурой 116 °С. Во временном интервале 2015–2020 гг. Na/Li температура подземных вод ст. 27, за исключением двух коротких максимумов 2018–2019 гг., находится в диапазоне 20–30 °С (см. рис. 9). Преобладание низких температур в течение 5-ти лет при слабой сейсмичности (и при ее отсутствии) отражает состояние коры, близкое к стабильному.

Проявление сейсмических процессов Байкало-Хубсугульской активизации сопровождается возрастанием Na/Li температурных характеристик резервуара. Повышенные температуры, однако, чередуются с температурами, близкими к фоновым, т.е. резервуар активизируется импульсно на фоне стабильных литиевых фаз.

Наблюдаются протяженные по температуре тренды 2013–2015 и 2020–2022 гг. и сокращенные по температуре тренды 2015–2019 и 2019–2020 гг. Протяженный тренд 2013–2015 гг. смещен относительно протяженного тренда 2019–2020 гг. в высокотемпературной части диаграммы T – Li с относительным снижением концентрации Li (рис. 10). Такое смещение на одной и той же станции 27 можно связать с относительно

слабой сейсмичностью 2013–2015 гг. и ее существенным усилением в 2019–2020 гг. Другая особенность трендов заключается в представительности фигуративных точек в высокотемпературной части этой диаграммы; в 2013–2015 гг. точки единичны, в 2019–

2020 гг. – точки многочисленны. Представительность точек по температуре и смещение концентрации Li может быть косвенным показателем силы сейсмических активизаций, происходящих в центральной части Байкальской рифтовой системы.

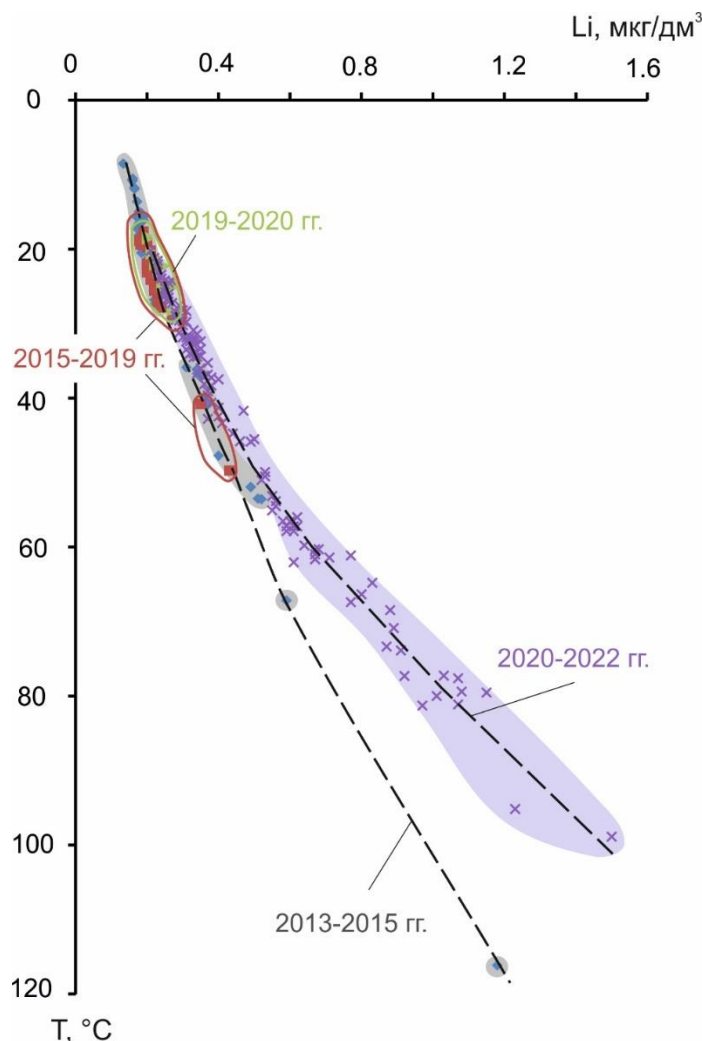


Рис. 10. Расходящиеся тренды подземных вод ст. 27 2013–2015 и 2020–2022 гг. на диаграмме T – Li. Условные обозначения см. на рис. 6.

Fig. 10. Divergent 2013–2015 and 2020–2022 groundwater trends of st. 27 on the T vs Li diagram. Symbols are as in Fig. 6.

В работе (Рассказов и др., 2022) было показано чередование стабильных и нестабильных Li-фаз на ст. 184 после фазы S (stable) и проявление всплесков фаз D и I (соответственно, возрастающей и снижающейся концентрации Li). Смена режима чередования фаз S, D и I крупноамплитудными максимумами и минимумами, произошедшая 01 июля 2021 г., интерпретировалась как следствие перехода от эпизодического внешнего

воздействия – деформационных Li-эффектов, распространяющихся от очагов сейсмических толчков с интервалами стабилизации – к автоколебательным процессам на полигоне, в которых интервалы стабилизации отсутствуют.

В стабильных и нестабильных Li-фазах ст. 27 (см. рис. 4 и 5) также включается механизм эпизодического внешнего воздействия на полигон. С нарастанием активиза-

ции Na/Li температура резервуара возрастает. При достижении $T = 99\text{ }^{\circ}\text{C}$ развиваются автоколебания: сначала (01 июля 2021 г.) на ст. 184, а через 2 месяца и 22 дня (22 октября 2021 г.) – на ст. 27.

В контексте настоящей работы, микрокомпонент Li воспринимается как главный

индикатор температурных косейсмических изменений в резервуаре подземных вод, участвующий в соединениях с макрокомпонентами Cl и S. В 2013–2015 гг. основную маркирующую роль играют Cl и S, позже – Cl (рис. 11).

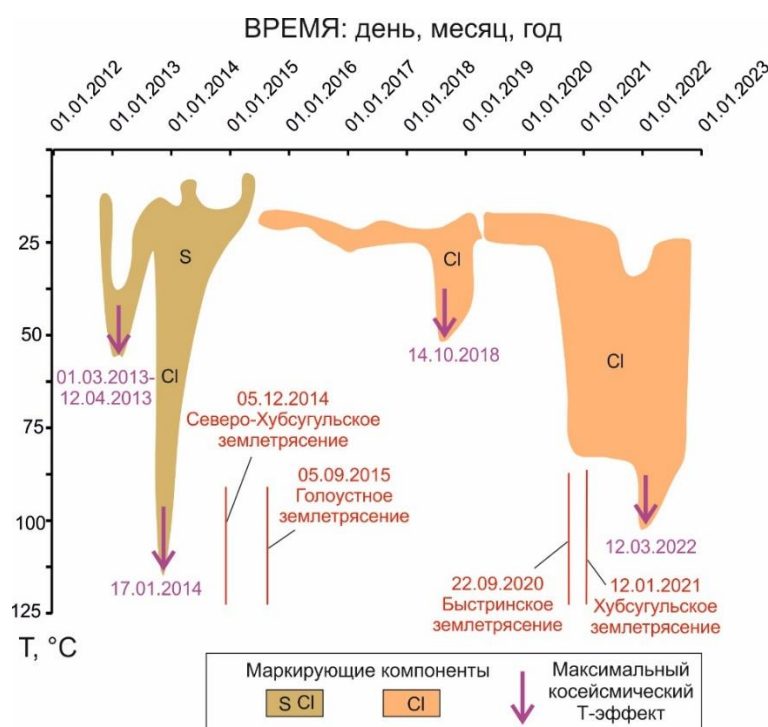


Рис. 11. Схема временного проявления максимальных косейсмических эффектов температуры (Na/Li геотермометр) под ст. 27 Култукского резервуара и маркирующих компонентов, геохимически связанных с Li.

Fig. 11. Scheme of temporal displaying of maximal coseismic temperature effects (Na/Li geothermometer) beneath station 27 of the Kultuk reservoir and marking, geochemically Li-related components.

Заключение

По Na/Li геотермометрии подземных вод ст. 27 Култукского полигона получен широкий температурный интервал от 8 до $116\text{ }^{\circ}\text{C}$. Возрастание температуры рассматривается как результат косейсмического усиления взаимодействия вода–порода в активном разломе при механическом размещивании твердых глинистых частиц в жидкости. Мониторинговые ряды концентрации микрокомпонента Li и геохимически связанных с ним макрокомпонентов (Cl и S), полученные в 2013–2022 гг. для подземных вод ст. 27, интерпретированы в связи с косейсмической эволюцией их резервуара. В 2013–2015 гг., при Котовской и Муринской сейсмических

активизациях на западе Южно-Байкальской впадины, установлен отклик Na/Li температуры до $116\text{ }^{\circ}\text{C}$ в подземных водах, обогащенных серой и хлором. В 2015–2020 гг., при активизации Голоуустенской и Муринской эпицентральных линий землетрясений, обозначено состояние, близкое к стабильному. В это время основную роль играет Cl. В 2020–2022 гг., во время Байкало-Хубсугульской активизации Na/Li температура возрастает до $99\text{ }^{\circ}\text{C}$ и прослеживается переход от эпизодического внешнего воздействия на Култукский полигон сейсмогенных процессов к развитию автоколебаний.

Благодарности

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

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

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., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А. Разработка Култукского сейсмопрогностического полигона: вариации ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, № 4. С. 519–554. doi:10.5800/GT-2015-6-4-0192

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., Грачев М.А. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20. 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.

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

Merkel B.J., Planer-Friedrich B. Groundwater geochemistry. A practical guide to modeling of natural and contaminated aquatic systems. Springer Berlin Heidelberg New York, 2005. 200 p.

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Piyasova 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., Piyasova A., Bornyakov S., Chuvashova I., Chebykin E. Responses of a $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio in groundwater to earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia // Front. Earth Sci. 2020. V. 14, No. 4. P. 711–737; doi.org/10.1007/s11707-020-0821-5

References

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

Chebykin E.P., Piyasova A.M., Snopkov S.V., Rasskazov S.V. Groundwater mercury signals from the Kultuk polygon during the preparation and im-

plementation of the Baikal-Khubsugul seismic activation in 2020–2021 // *Geology and Environment*. 2022. V. 2, No. 1. P. 7–9. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2022.1.7> (in Russian)

Chebykin E.P., Rasskazov S.V., Vodneva E.N., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Borneyakov 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., 1999. Paleoseismodislocations and related paleoearthquakes at the Main Sayan Fault zone // *Russian Geology and Geophysics*. V. 40, No. 6. P. 936–937. (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)

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Vodneva E.N., Chuvashova I.S., Borneyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V., Chechel'nitsky V.V., Gileva N.A. Creating the Kultuk polygon for earthquake prediction: variations of ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in groundwater from active faults at the

western shore of Lake Baikal // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2015. V. 6, No. 4. P. 519–553. doi:10.5800/GT-2015-6-4-0192.] (in Russian)

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Borneyakov 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. V. 2, No. 4. P. 26–52. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.26 (in Russian)

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

Merkel B.J., Planer-Friedrich B. Groundwater geochemistry. A practical guide to modeling of natural and contaminated aquatic systems. Springer Berlin Heidelberg New York, 2005. 200 p.

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Borneyakov 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., Ilyasova A., Borneyakov S., Chuvashova I., Chebykin E. Responses of a $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio in groundwater to earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia // *Front. Earth Sci*. 2020. V. 14, No. 4. P. 711–737; doi.org/10.1007/s11707-020-0821-5

*Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Assistant Professor,
email: chuvashova@crust.irk.ru.*

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.

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

Чувашова Ирина Сергеевна,
кандидат геолого-минералогических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
старший научный сотрудник,
664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет,
геологический факультет,
доцент,
email: chuvashova@crust.irk.ru.
Chuvashova Irina Sergeevna,
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Senior Researcher,
664003 Irkutsk, Lenin str., 3,