

Гидрогеохимические отклики подземных вод ст. 184 в 2020–2021 гг. на сейсмогенные деформации Байкало-Хубсугульской активизации

С.В. Рассказов^{1,2}, А.М. Ильясова¹, С.А. Борняков¹, С.В. Снопков^{2,4},
И.С. Чувашова^{1,2}, Е.П. Чебыкин^{1,3}

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

²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

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

⁴Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Ряд гидрогеохимических данных, полученный в 2020–2021 гг. на ст. 184 Куктукского полигона, интерпретируется в связи с проявлением в ходе Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации процессов поднятия восстановленных–окисленных флюидов, растяжения–сжатия микротрещин и деформационных эффектов, распространяющихся от очагов сейсмических толчков, также образующихся вследствие автоколебательных процессов на полигоне. Установленные временные соотношения вариаций $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, ^{234}U , U, Hg, Li с землетрясениями могут использоваться для прогноза будущих сильных сейсмических событий в центральной части Байкальской сейсмической зоны.

Ключевые слова: $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, ^{234}U , U, Hg, Li, pH, окислительно-восстановительный потенциал, подземные воды, мониторинг, прогноз землетрясений, Байкал.

Hydrogeochemical responses of groundwater from station 184 in 2020–2021 on seismogenic deformations of the Baikal-Khubsugul reactivation

S.V. Rasskazov^{1,2}, A.M. Ilyasova¹, S.A. Bornyakov¹,
S.V. Snopkov^{2,4}, I.S. Chuvashova^{1,2}, E.P. Chebykin^{1,3}

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

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

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

⁴Limnological Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. A series of hydrogeochemical data obtained in 2020–2021 at station 184 of the Kultuk polygon, is interpreted in connection with the displaying of three processes during the Baikal-Khubsugul seismic reactivation: raise of reduced–oxidized fluids, extension–compression of microcracks, and deformation effects propagating from the sources of seismic shocks and resulted from self-oscillatory processes at the polygon area. The found temporal relationships between $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, ^{234}U , U, Hg, Li variations and earthquakes can be used for prediction of future strong seismic events in the central part of the Baikal seismic zone.

Keywords: $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, ^{234}U , U, Hg, Li, pH, redox potential, groundwater, monitoring, earthquake prediction, Baikal.

Введение

Прогноз сильных землетрясений представляет собой нерешенную задачу современной геологии. Один из путей ее решения – разработка критериев прогноза через мониторинг гидрогеохимических откликов на сейсмогенерирующие деформации. Гидрогеохимические эффекты порождаются разными явлениями, происходящими в коре. В них могут действительно проявиться отклики на сейсмогенные деформации, и последует сейсмический толчок, но могут проявиться подобные эффекты, не связанные с сейсмогенными деформациями, и землетрясение не произойдет. Очевидно, что для прогноза сейсмического толчка одной констатации отклика не достаточно. Чтобы исключить ошибки в прогнозе, необходимо идентифицировать разные гидрогеохимические процессы, развивающиеся при подготовке и реализации сейсмических активизаций.

Байкало-Хубсугульская сейсмическая активизация началась в середине 2020 г. серией землетрясений: Кыренского, Муринского, Быстринского, Кударинского и Хубсугульского (КрМБКдХ), сменившейся афтершоками. Сравнительно слабое Кыренское землетрясение произошло в центральной части Тункинской долины ($K=11.7$, координаты эпицентра: 51.73° с. ш., 102.00° в. д.) 13 июня 2020 г. (в 15 ч. 36 мин., здесь и далее приводится местное время). Муринское землетрясение ($K=12.1$) имело место в Муринской эпицентральной линии Южного Байкала, активной в 2017 г., но утратившей активность на 2.5 года (Rasskazov et al., 2022a). Детально охарактеризованы Быстринское землетрясение, случившееся 22 сентября ($K=14.5$) (Семицкий и др., 2021), и Кударинское, случившееся 10 декабря 2020 г. ($K=13.9$) (Семицкий и др., 2022). Затем, 12 января произошло Хубсугульское землетрясение ($K=15.7$), сопровождавшееся многочисленными афтершоками.

Мониторинг подземных вод проводится на Култукском полигоне, в центральной части Байкальской сейсмической зоны (Рассказов и др., 2015; Чебыкин и др., 2015, 2022; Ильясова и др., 2022; Rasskazov et al., 2022a,b). В качестве показательных откликов на сейсмогенные деформации принимаются концентрации и изотопные отношения переходного химического элемента урана. Возрастание отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (ОА4/8) и/или активности ^{234}U (А4) интерпретируется как результат растяжения коры в

активной зоне разлома, снижение – как результат сжатия. По полученным мониторинговым рядам ОА4/8 и А4 в подземных водах ст. 27 обосновано выделение полного сейсмогеодинамического цикла сжатия и растяжения коры в Южно-Байкальской впадине. Последние сильные землетрясения, ограничивающие полный сейсмогеодинамический цикл, произошли 27 августа 2008 г. (Култукское землетрясение, $K = 15.9$) и 10 декабря 2020 г. (Кударинское землетрясение, $K = 13.9$) (здесь и далее используются данные Байкальского филиала Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук” (Карта..., 2022, <http://www.seis-bykl.ru>). Сильные землетрясения предварялись сейсмическими событиями в районе Култукского полигона, соответственно, 04 мая 2008 г. ($K = 10.1$) и 22 сентября 2020 г. ($K = 14.5$, Быстринское землетрясение). После Кударинского землетрясения 12 января 2021 г. произошло Хубсугульское землетрясение ($K = 15.7$). В средней части сейсмогеодинамического цикла, 05 сентября 2015 г., сжатие коры на полигоне усиливалось и вызвало землетрясение умеренной силы (Голоустное землетрясение, $K = 12.4$). Перед Голоустным землетрясением, 05 декабря 2014 г., произошло Хубсугульское землетрясение ($K = 13.9$).

В качестве другого показателя используется переходный элемент Hg. На ст. 27 и других станциях полигона установлено общее возрастание содержания ртути, растворенной в подземных водах (Hg_{gw}) при растяжении коры и открытии микротрещин и снижение содержания растворенной ртути в подземных водах в результате сжатия коры и закрытия микротрещин. Предполагается, что при подготовке и реализации сильных землетрясений ртуть может удаляться из подземных вод в атомарной (газообразной) форме Hg^+ вследствие продувки коры потоками восстановленных флюидов.

Поведение других химических элементов в полученных мониторинговых рядах подземных вод Култукского полигона вследствие развития сейсмогенных деформаций пока специально не рассматривалось. В контексте гидрогеохимических откликов представляют интерес временные вариации концентраций элементов, не меняющих валентность (например, Li), не зависящие от растяжения–сжатия микротрещин или окислительно-восстановительного потенциала (ОВП), если, разумеется, такие элементы не

связываются в комплексные соединения с элементами переходной валентности.

Во время Байкало-Хубсугульской активизации мониторинг подземных вод Култукского полигона детализировался. Обычный шаг опробования на станциях (до землетрясения КрМБКдХ) составлял в среднем около 2 недель. В 2020–2021 гг. гидрогеохимическое опробование проводилось в основном через 3–4 дня. Если случалось землетрясение, пробы отбирались ежедневно. Для большей представительности в опробование была включена новая станция под номером 184, на которой были получены контрастные вариации ОА4/8, А4, концентраций U, Hg_{gw} и Li. Цель настоящей работы – связать вариации этих изотопных и элементных характеристик подземных вод ст. 184 с развитием процессов Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации в 2020–2021 гг.

Ст. 184 и ее структурное положение

Пробы подземных вод мониторинговой ст. 184 (Улица Школьная) отбираются из 10-метровой скважины, пройденной на месте бывшего природного родника (координаты: 51° 43.427' с. ш., 103° 42.010' в. д.). Устье скважины находится в закрытом помещении. Забор воды осуществляется из скважины включением насоса. Вода в скважине постоянно возобновляется, поскольку используется населением пос. Култук в качестве питьевой воды.

Станции Култукского полигона чувствительны к деформациям на территориях, расположенных восточнее его (в Южно-Байкальской впадине) и западнее (в Тункинской долине и сопредельных тектонических структурах). Наиболее отчетливые отклики на сейсмогенные деформации дают станции, расположенные на тектонической ступени, наклоненной в сторону оз. Байкал по северо-северо-восточным разломам. Ст. 184 – одна из основных станций этой территории. Ее особенность – расположение непосредственно на северо-северо-восточном разломе, соединяющем активное окончание Обручевского разлома с активным фрагментом Главного Саянского разлома. Несколько ниже по склону от ст. 184, в 470 м к востоку-северо-востоку (аз. 70°), находится основная мониторинговая ст. 27 (Школа). Выше по склону от ст. 184, в 750 м севернее (аз. 350°), находится основная мониторинговая ст. 8 (Чертова Гора). Расстояние между ст. 27 и 8 составляет 1280 м (рис. 1). Обе станции несут ключевую информацию Култукского полигона. Вода ст. 27 обладает среди станций полигона наиболее неравновесным изотопным составом урана (максимальным значением ОА4/8) при минимальном отношении ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, вода ст. 8 содержит U–Sr-изотопный компонент, соответствующий компоненту воды ст. 27 и примесь равновесного компонента, обогащенного радиогенным ⁸⁷Sr (Расказов и др., 2015).



Рис. 1. Схемы расположения мониторинговых станций Култукского сейсмопрогностического полигона в активных разломах западного побережья оз. Байкал (а) и ст. 184 относительно станций 8 и 27 (б).

Fig. 1. Schemes of location of monitoring stations in the Kultuk seismic prognostic polygon in active faults of the western coast of Lake Baikal (a) and station 184 relative to stations 8 and 27 (b).

Методика

По единой аналитической методике (Чебыкин и др., 2007, 2015) с использованием масс-спектрометра Agilent 7500с определяются концентрации 72 химических элементов, ОА4/8 и А4. Для определения элементного состава проба воды 2 мл пропускается через фильтр 0.45 мкм и сразу фиксируется каплей азотной кислоты. Отношение изотопов урана проводится отдельно после выделения урана на ионно-обменной колонке. Используется до 400 мл воды.

В подземных водах Култукского полигона измеряется широкий диапазон концентраций ртути от значений ниже предела обнаружения (около 0.01 мкг/дм³) до 0.12 мкг/дм³. Поскольку ртуть является переходным химическим элементом, для ее регистрации важно измерение относительных вариаций ОВП. Обычно в гидрогеохимических расчетах используются значения этого параметра относительно водорода (Eh). В настоящей работе расчетов не приводится. ОВП измеряется в условных единицах на приборе 'Hanna', имеющем хлор-серебряный датчик. Для гидрогеохимических расчетов поправка к нулевому значению Eh, соответствующему водороду, соответствует, приблизительно, +200 mV. Погрешность измерений прибора составляет ±20 mV. Временные вариации ОВП в подземных водах ст. 184 существенно превышают указанную погрешность. На этом же приборе измеряется рН.

Результаты мониторинга

ОА4/8 и А4

В начале наблюдений, в феврале-марте 2020 г., для ст. 184 определяется интервал фоновых значений А4 от 0.70 до 0.95. Первое сейсмическое событие 06 июля 2020 г. характеризуется значением А4, соответствующим фону. В дальнейшем параметр А4 возрастает и достигает максимума во время Быстринского землетрясения 22 сентября 2020 г. (проба отобрана через 10 часов после

главного толчка). Дальнейшее быстрое падение А4 постепенно замедляется на уровне фона. Во время Кударинского землетрясения А4 не отличается от фона. Только 07 января 2021 г. (за 5 дней до Хубсугульского землетрясения) А4 вновь возрастает. Пробы, отобранные в день Хубсугульского землетрясения (12 января 2021 г.) и позже, имеют значения А4, соответствующие фону. Новое слабое повышение А4 наблюдается 18 июня 2021 г. и более заметное – 03 августа 2021 г. В конце 2021 г. устанавливаются фоновые значения А4 (рис. 2а).

Для ОА4/8 принимается интервал фоновых значений от 2.13 до 2.21. Значение ОА4/8 во время Муринского землетрясения близко к фону и в общем возрастает до максимальных значений во время Быстринского землетрясения. В дальнейшем значения ОА4/8 опускаются ниже фона. Кударинское землетрясение происходит на минимуме ОА4/8 в пределах фона. К Хубсугульскому землетрясению параметр ОА4/8 выходит на средние фоновые значения. В апреле-мае 2021 г. наблюдается минимум ОА4/8 с последующим выходом этого параметра на максимумы 18 июня и 03 августа 2021 г. С 1 сентября обозначается тренд к глубокому минимуму, который достигается 06 ноября. В начале 2022 г. значения частично переходят к фоновым (рис. 2б).

Фоновые значения А4 и/или ОА4/8 свидетельствуют о нейтральном геодинамическом состоянии в зоне активного разлома, на котором находится ст. 184, возрастание этих параметров показывает состояние растяжения, снижение – состояние сжатия. В связи с сейсмическими событиями 2020–2021 гг. в геодинамическом состоянии разлома различается 6 временных интервалов:

I предсейсмический, соответствующий нейтральному состоянию в разломе (первая половина 2020 г. – до 6 июля). В это время на западе Южно-Байкальской впадины продолжается 2.5-годовой асейсмичный интервал;

II сейсмический (Муринско-Быстринский), обозначающий действие силы растяжения (с 6 июля до 18 октября 2020 г.);

III сейсмический (Кударинский), свидетельствующий о нейтральном состоянии в

разломе (с 22 октября 2020 г. до 4 января 2021 г.);

IV сейсмический (Хубсугул-Маритуйский), обозначенный коротким импульсом растяжения 07 января 2021 г. и последующим нейтральным состоянием в разломе (до 19 мая 2021 г.). В этот интервал попадают афтершоки Хубсугульского эпицентрального поля и Кударинский афтершок 07 февраля 2021 г. ($K=11.7$), самый сильный афтершок 31 марта 2021 г. в Хубсугульском эпицентральной поле ($K=14.1$) и еще два афтершока здесь же с переходом активности в Южно-Байкальскую впадину в виде слабого ($K=9.1$) Маритуйского землетрясения 08 мая 2021 г., а также последующее сейсмическое затишье (до 25 апреля 2021 г.);

V асейсмичный, во время которого действовала сила растяжения (с 31 мая до 03 августа 2021 г.);

VI сейсмический (Хубсугул-Танхойский), обозначающий действие силы сжатия (с 17 сентября до окончания ряда наблюдений 02 февраля 2022 г.). Этот сейсмический интервал фактически начинается с афтершока в Хубсугульском эпицентральной поле 23 августа 2021 г. ($K = 12.7$), когда выстраивается серия точек перехода от состояния растяжения через нейтральное состояние к состоянию сжатия. Сильное далекое Тофаларское землетрясение ($K=14.4$) происходит 06 сентября во время прогрессирующего сжатия. Затем, 15 декабря 2021 г., следуют Танхойский афтершок ($K = 12.8$) и 9 января 2022 г. – Голоустенский ($K=10.9$).

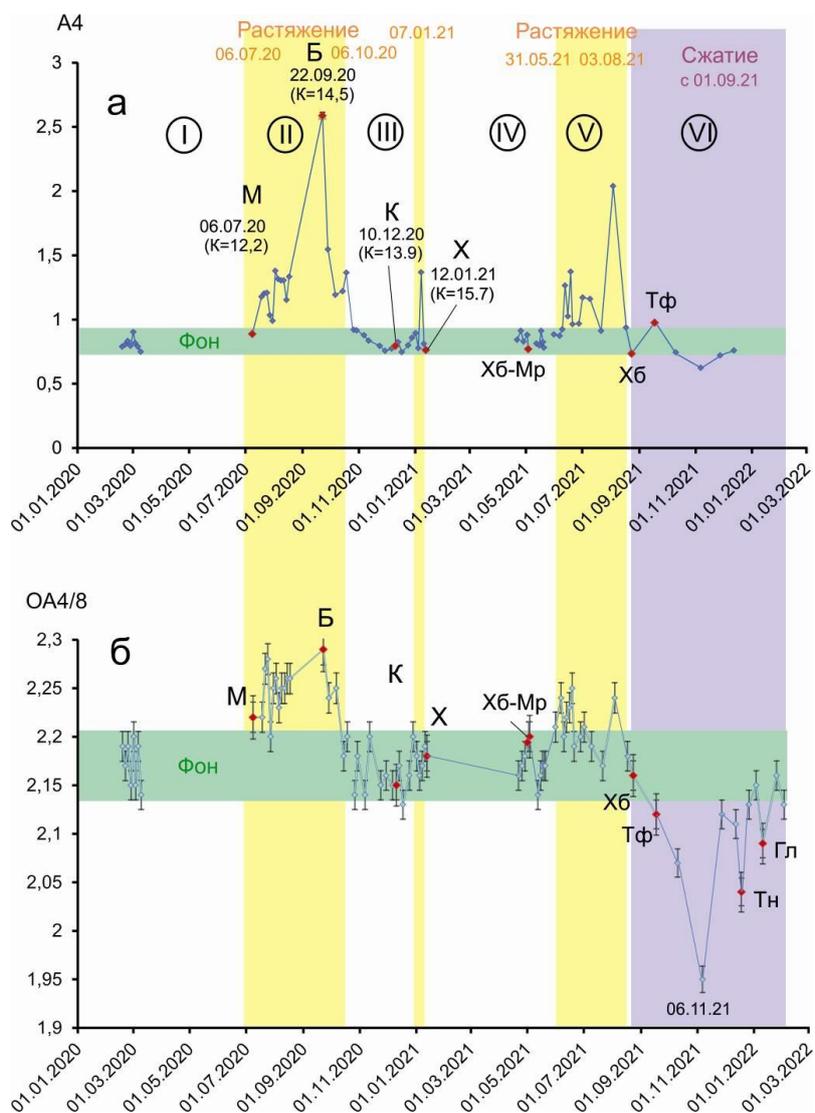


Рис. 2. Временные вариации А4 (а) и ОА4/8 (б) в подземных водах ст. 184. Для каждого значения ОА4/8 показан интервал погрешности измерения. Красными ромбиками помечены точки отбора проб, наиболее близких по времени произошедшим землетрясениям (разрыв обычно составляет не более трех дней). Римскими цифрами в кружках обозначены сменяющиеся интервалы растяжения, нейтрального состояния и сжатия. Желтыми полосами выделены интервалы и короткий импульс растяжения (возрастания А4 и/или ОА4/8), сиреневой полосой – интервал сжатия в разломе (снижения А4 и/или ОА4/8). Сейсмические толчки: М – Муринский, Б – Быстринский, К – Кударинский, Х – Хубсугульский, Хб-Мр – сближенные во времени Хубсугульский и Маритуйский, Хб – Хубсугульский (афтершок), Тф – Тофаларский, Тн – Танхойский, Гл – Голоустенский.

Fig. 2. Temporal variations of А4 (а) and ОА4/8 (б) in groundwater from st. 184. For each value of ОА4/8, the measurement error interval is shown. Red rhombuses mark sampling points closest in time to the occurred earthquakes (the gap usually do not exceed three days). Roman numerals in circles indicate alternating intervals of extension, neutral state, and compression. Yellow stripes indicate intervals and a short extension pulse (А4 and/or ОА4/8 increases), a purple stripe shows a compression interval in the fault (А4 and/or ОА4/8 decreases). Seismic shocks: М - Murino, Б – Bystraya, К – Kudara, Х – Khubsugul, Хб-Мр – close in time Khubsugul and Marituy, Хб – Khubsugul (aftershock), Тф – Tofalaria, Тн – Tankhoy, Гл – Goloustnaya.

U и Hg_{gw}

Фоновая концентрация *U* ст. 184, по измерениям проб, отобранных в I (предсейсмическом) временном интервале, составляет от 0.38 до 0.42 мкг/дм³. В начале II (сейсмического) интервала (во время Муринского землетрясения 06 июля 2020 г.) концентрация *U* соответствует фоновому значению. Следующая проба, отобранная 18 июля 2020 г., имеет значение концентрации *U*, превышающее фон. В дальнейшем концентрация *U* растет. Проба, отобранная через 10 часов после Быстринского землетрясения 22 сентября 2020 г., превышает фоновое значение почти в 3 раза. Однако, высокая концентрация *U* (1.13 мкг/дм³) кратковременна. Наблюдается снижение концентрации *U* (до 0.53 мкг/дм³) 06 октября 2020 г. и слабое относительное возрастание (до 0.62 мкг/дм³) 18 октября 2020 г. с дальнейшим падением до фонового значения 22 октября 2020 г.

В III (сейсмическом) интервале, во время Кударинского землетрясения 10 декабря 2020 г., концентрация *U* остается на значении фона и возрастает до 0.7 мкг/дм³ только 07 января 2021 г. (за 5 дней до Хубсугульского землетрясения). Концентрация *U* в пробах, отобранных в день Хубсугульского землетрясения (12 января 2020 г.) и позже, имеет значение фона. В IV (сейсмическом) интервале, после Хубсугульского землетрясения, определяется пара максимумов с возрастанием концентрации *U* от 0.5 мкг/дм³ (04 февраля 2021 г.) до 0.68 мкг/дм³ (18 апреля 2021 г.). В V (асейсмичном) интервале определяется

еще пара максимумов с возрастанием концентрации *U* от 0.61 мкг/дм³ (18 июня 2021 г.) до 0.91 мкг/дм³ (03 августа 2021 г.). В VI (сейсмическом) интервале конца 2021 г. устанавливается концентрация *U* на нижнем пределе фона (рис. 3а).

В начале 2020 г. концентрация ртути, растворенной в воде (Hg_{gw}), находится в области предсейсмической бухты, характерной для всех станций Култукского полигона (Чебыкин и др., 2022). Для I (предсейсмического) временного интервала принимается интервал фоновой концентрации Hg_{gw} от 0.03 до 0.08 мкг/дм³. В начале II (сейсмического) интервала, во время Муринского землетрясения 06 июля 2020 г., концентрация Hg_{gw} (0.07 мкг/дм³) соответствует фоновому значению. Сразу после этого сейсмического события (во временном интервале с 18 июля 2020 г. до 17 августа 2020 г.) определяется максимум Hg_{gw}. Во время Быстринского землетрясения концентрация Hg_{gw} входит в фоновые значения. В III (сейсмическом) интервале, во время Кударинского землетрясения, концентрация Hg_{gw} еще падает и с 23 ноября до 28 декабря 2020 г. выходит за нижний предел фона. В конце III интервала, перед Хубсугульским землетрясением, концентрация Hg_{gw} вновь выходит на уровень фона.

В дальнейшем наблюдается чередование максимумов и минимумов Hg_{gw}, не всегда совпадающих с максимумами и минимумами *U*. В IV (сейсмическом) интервале низкому максимуму *U* 04 февраля 2021 г. соответствует максимум Hg_{gw}, а более высокий максимум *U* 18 апреля 2021 г. сближен во

времени с глубоким минимумом Hg_{gw} 21 апреля 2021 г., который образовался между двумя аномально высокими максимумами Hg_{gw} : 31 марта 2021 г. ($Hg_{gw} = 0.2$ мкг/дм³) и 08 мая 2021 г. ($Hg_{gw} = 0.22$ мкг/дм³). В V (асейсмичном) интервале низкому максимуму U 18 июня 2021 г. соответствует минимум Hg_{gw} , а за более высоким максимумом U 03 августа 2021 г. следует максимум Hg_{gw} 11

августа 2021 г. Это соотношение максимумов U и Hg_{gw} , подобно переходу от максимума U 07 января 2021 г., предшествующего Хубсугульскому землетрясению, к афтершокам с максимумом Hg_{gw} 04 февраля 2021 г. Наконец, в VI (сейсмическом) интервале устанавливается фоновая концентрация Hg_{gw} (рис. 3б).

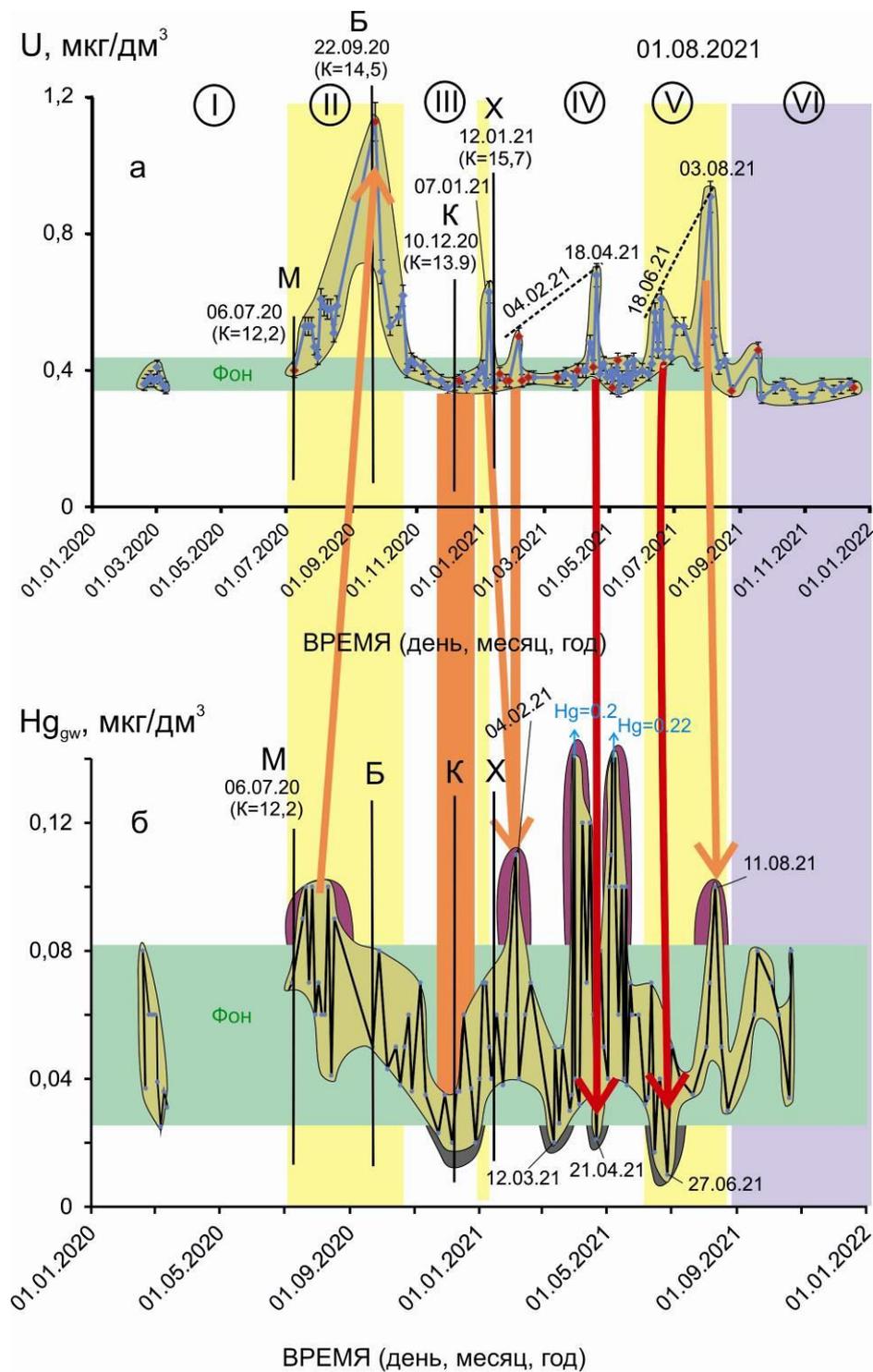


Рис. 3. Временные вариации U (а) и Hg_{gw} (б) в подземных водах ст. 184. Усл. обозн. см. рис. 2. При подготовке Быстринского землетрясения максимум Hg_{gw} предшествует максимуму U , совпадающему по времени с этим землетрясением (последовательность показана оранжевой стрелкой). Во время Кударинского землетрясения концентрация Hg_{gw} находится на минимуме, а концентрация U соответствует фону. В апреле–июне 2021 г. два максимума U предшествуют двум минимумам Hg_{gw} (последовательность показана красными стрелками). Перестройка деформационных откликов после 29 марта 2021 г. выражается в аномально высокой концентрации Hg_{gw} .

Fig. 3. Temporal variations of U (a) and Hg_{gw} (b) in groundwater from st. 184. Designations are as in Fig. 2. During the preparation of the Bystraya earthquake, the Hg_{gw} maximum precedes the U one, which coincides in time with this earthquake (the sequence is shown by the orange arrow). During the Kudara earthquake, the Hg_{gw} concentration is at its minimum, while the U concentration corresponds to the background. In April–June 2021, two U maxima precede two Hg_{gw} minima (the sequence is shown by red arrows). The reorganization of the deformation responses that occurred after March 29, 2021 resulted in an anomalously high concentration of Hg_{gw} .

ОВП и отношение концентраций Hg_{gw} и U

В восстановительных условиях $U(+4)$ не растворим в воде и растворяется (переносится водой) в окисленной форме уранил-иона UO_2^{2+} , в котором этот химический элемент находится в своей высшей степени окисления (+6). Ртуть также растворима в воде в окисленной форме $(Hg_{gw})^{2+}$ и в восстановительных условиях переходит в газообразную форму $(Hg_{gas})^+$. Поскольку концентрации обоих элементов в подземных водах зависят от окисленности–восстановленности среды, их поведение в общем должно быть согласованным, но может усложняться удалением Hg_{gas} из подземных вод вследствие продувки коры восстановленными потоками флюидов.

Несо согласованность максимумов и минимумов U и Hg_{gw} во времени и изменение соотношений концентраций этих элементов подземных вод ст. 184 в ходе развития Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации в 2020–2021 гг. свидетельствует о том, что распределение этих элементов в воде определяется влиянием разных факторов. При интерпретации данных мониторинга мы предполагаем, что основной диссонанс в распределение U и Hg_{gw} вносит эффективное удаление атомарного Hg^+ из подземных вод вместе с восстановленными флюидами, которому способствуют сейсмогенные деформации.

По результатам мониторинга для ст. 184 принимается интервал преобладающих фоновых значений ОВП 50–100 мВ. Во время

Быстринского и Кударинского землетрясений значения ОВП соответствуют нижнему пределу фона и опускаются ниже него (соответственно, 60 и 26 мВ). Во временном промежутке между этими землетрясениями обозначается 2 максимума со значениями более 100 мВ. После Кударинского землетрясения значения ОВП вновь выходят на максимум 150 мВ. Хубсугульское землетрясение и его ближайшие афтершоки соответствуют повышенному ОВП. В середине IV (сейсмического) временного интервала намечается минимум ОВП, который соответствует афтершоку на Хубсугульском эпицентральной поле 12 марта 2021 г. ($K=12.6$). При сильнейшем афтершоке в Хубсугульском эпицентральной поле 31 марта 2021 г. ($K=14.1$), чередуются контрастные максимумы и минимумы ОВП, переходящие в глубокий минимум начала V (асейсмического) интервала. В конце VI временного интервала значения ОВП находятся на максимуме, но к афтершоку на Хубсугульском эпицентральной поле 23 августа 2021 г. выходят на минимум. В дальнейшем намечаются подъемы и спады ОВП. На максимуме ОВП происходит Танхойский афтершок 15 декабря 2021 г. (рис. 4б).

Фон отношения Hg_{gw}/U ст. 184 (0.06–0.21) I временного интервала воспроизводится во II (начальном сейсмическом) временном интервале. Мурынскому землетрясению соответствует значение в области верхнего предела фона, Быстринскому – значение в области нижнего предела, Кударинскому и Хубсугульскому – промежуточные значения фона. В середине IV временного интервала с афтершоком

Хубсугульского

эпицентрального поля 12 марта 2021 г. вновь устанавливается значение Hg_{gw}/U в области нижнего предела. Далее проявляется относительное смещением максимумов и минимумов концентраций Hg_{gw} и U с существенным возрастанием отношения Hg_{gw}/U в двух максимумах (0.5 каждый) при сильнейшем Хубсугульском афтершоке 31 марта 2021 г. и при Маритуйском афтершоке 08 мая 2021 г. Максимумы разделены глубоким минимумом (ниже предела фона). В начале V

(асейсмичного) временного интервала также наблюдаются значения отношения Hg_{gw}/U ниже фоновых, но к концу этого интервала значения отношения Hg_{gw}/U выходят на максимум. В начале и в конце VI (сейсмического) временного интервала отношение Hg_{gw}/U находится ниже фона, но в середине этого интервала эпизодически превышает фон (повышается до 0.26) (рис. 4а).

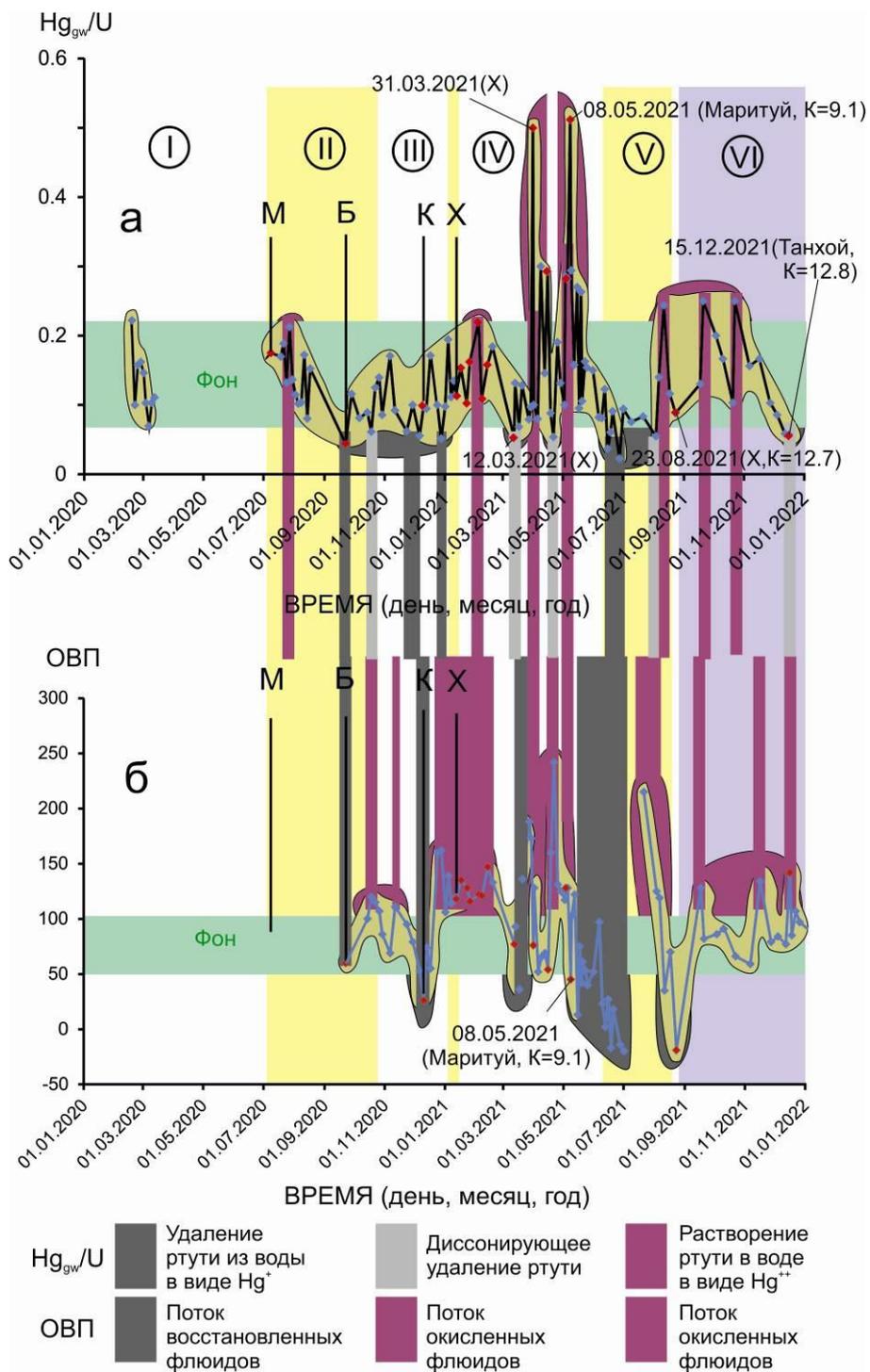


Рис. 4. Временные вариации отношения Hg_{gw}/U (а) и ОВП (б) в подземных водах ст. 184. Усл. обозн. см рис. 2.

Fig. 4. Temporal variations in the Hg_{gw}/U ratio (a) and redox potential (b) in groundwater from st. 184. Designations are as in Fig. 2.

Li и pH

Литий – щелочной металл. Влияют ли на концентрацию этого металла в подземных водах ст. 184 вариации pH?

Фоновая концентрация Li, определенная до начала Байкало-Хубсугульской активизации по пробам, отобраным с 18 февраля до

09 марта 2020 г., находится в интервале 1.14–1.32 мкг/дм³. Во время Муринского и Быстринского землетрясений концентрация Li (соответственно, 1.0 и 1.06 мкг/дм³) опускается ниже фона, хотя между этими событиями поднимается до фоновых значений (рис. 5).

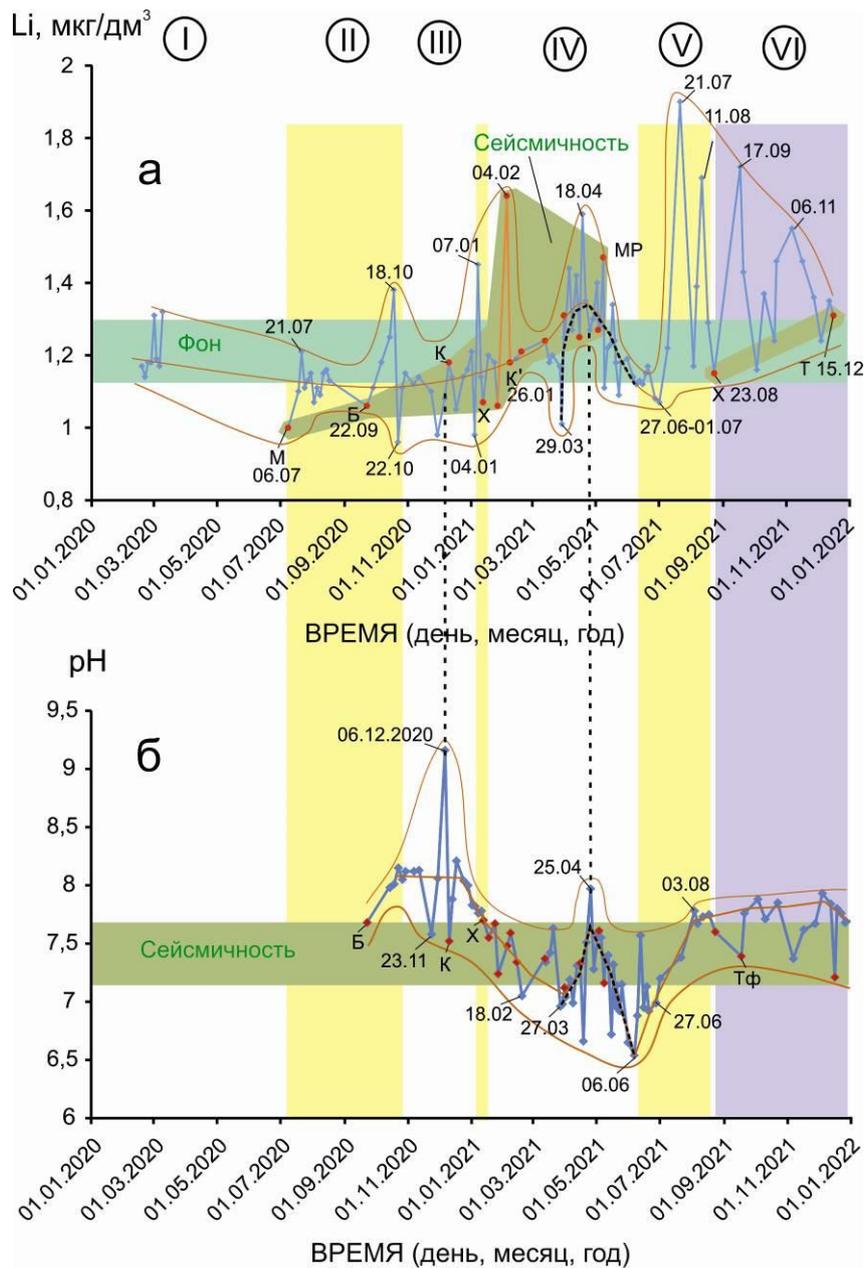


Рис. 5. Временные вариации Li (а) и pH (б) подземных вод ст. 184 в 2020–2021 гг. Усл. обозн. см. рис. 2.

Fig. 5. Temporal variations of Li (a) and pH (b) in groundwater from st. 184 in 2020–2021 Designations are as in Fig. 2.

Во временных вариациях концентрации Li подземных вод относительно фона ст. 184 нижняя огибающая линия дает общий прогиб, верхняя огибающая линия – последовательно нарастающие горбы максимумов. Максимумы разделены значениями концентрации, соответствующими фону. По сгусткам фигуративных точек 2020 г. и первой половины 2021 г. выявляется слабое снижение и выход на максимум 18 апреля 2021 г., снижение на минимум 27 июня – 01 июля 2021 г., после которого фигуративные точки рассеиваются в широком диапазоне значений.

Между нижней и верхней огибающими линиями вырисовываются всплески концентрации Li. Первый всплеск происходит от Муринского землетрясения (06 июля 2020 г.), второй – от Быстринского (22 сентября 2020 г.). После Муринского землетрясения наблюдается возрастание концентрации Li по двум пробам с достижением максимума (1.21 мкг/дм³) на уровне фона 21 июля 2020 г., после Быстринского землетрясения – последовательное возрастание концентрации Li по пяти пробам с достижением максимума (1.38 мкг/дм³) выше фона 18 октября 2020 г. Быстринский всплеск выражен отчетливее Муринского. После максимума 22 октября концентрация Li резко падает до 0.96 мкг/дм³, а 26 октября поднимается до нижнего предела фона и удерживается на этом уровне до 23 ноября. Затем 29 ноября вновь наблюдается минимум Li (0.98 мкг/дм³), после которого концентрация выходит на фоновое значение 1.18 мкг/дм³ во время Кударинского землетрясения (10 декабря 2020 г.). Между этим сильным сейсмическим событием и Хубсугульским (12 января 2021 г.) со значением ниже фона (1.07 мкг/дм³) наблюдается резкий переход (новый всплеск Li) от минимума (0.98 мкг/дм³) 04 января к максимуму (1.45 мкг/дм³) 07 января 2021 г.

Первый Хубсугульский афтершок 26 января 2021 г. характеризуется концентрацией Li ниже фона (1.06 мкг/дм³), сопоставимой с концентрацией, определенной для Хубсугульского землетрясения, хотя между этими событиями, произошедшими на Хубсугуле, концентрация Li возвращается к

фоновым значениям. Второй хубсугульский афтершок 04 февраля обозначается высокой концентрацией Li (1.64 мкг/дм³) с переходом к фоновому значению (1.18 мкг/дм³) во время кударинского афтершока 07 февраля. Последующая серия хубсугульских афтершоков происходит при возрастании концентрации Li до 1.3 мкг/дм³ и выходит на максимум 1.47 мкг/дм³ при Маритуйском афтершоке Южного Байкала, после которого скатывается к минимальному значению концентрации 1.07 мкг/дм³ 27 июня – 01 июля без афтершоковых событий. В процессе серии хубсугульских афтершоков проявляется минимум Li 1.01 мкг/дм³ 29 марта и его максимум 1.59 мкг/дм³ 18 апреля, от которого идет нисходящий тренд концентрации Li к минимуму 27 июня – 01 июля.

Во второй половине 2021 г., когда с большим временным разрывом произошло два афтершока: Хубсугульский (23 августа) и Танхойский (15 декабря), наблюдаются максимумы 21 июля, 11 августа, 17 сентября и 06 ноября, чередующиеся с минимумами на уровне фоновых значений. Этот переход происходит при смене растяжения сжатием коры в активном разломе. Если во второй половине 2020 г. и первой половине 2021 г., с Муринского землетрясения 06 июля 2020 г. до Маритуйского 08 мая 2021 г., наблюдается синхронное с сейсмичностью нарастание концентрации Li от 1.0 до 1.5–1.6 мкг/дм³, во второй половине 2021 г. нарастание концентрации Li ограничивается фоновыми значениями (рис. 5б).

Значения pH на ст. 184 до землетрясений не известны. Во время Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации pH меняется в диапазоне 2.5 mV. Значения pH, измеренные в день сейсмического толчка или в течение 2–3 дней после него, находятся в интервале 7.2–7.7 mV. После Быстринского землетрясения значения выходят на уровень 8.0–8.2 mV. Перед Кударинским землетрясением (23 ноября 2020 г.) pH резко снижается до 7.5 mV, 06 декабря возрастает до 9.2 mV, при Кударинском землетрясении 10 декабря вновь опускается до 7.5 mV, а после него вновь возрастает до 8.2 mV. Таким образом, между

Быстринским и Кударинским землетрясениями (в третьем временном интервале) явно обозначается асейсмичный максимум рН. Короткий максимум проявляется также 25 апреля 2021 г. и более длительный – во второй половине 2021 г., после 3 августа. Обозначается также продолжительный асейсмичный минимум с 18 февраля до 27 июня 2021 г.

В течение всего периода наблюдений концентрация Li варьируется независимо от рН. От Хубсугульского землетрясения на фоне афтершоков рН снижается к 27 марта до 7.0 mV и после подъема до 8.0 mV 25 апреля 2021 г. вновь падает, достигая предельно низкого значения (6.5 mV) на рубеже четвертого (сейсмического) и пятого (асейсмичного) интервалов (06 июня 2021 г.). Переход от минимума Li 29 марта 2021 г. к максимуму 18 апреля и к минимуму 06 июня 2021 г. в целом подобен вариациям рН. Этот (четвертый) временной интервал характеризуется угасанием афтершоков. В течение V интервала наблюдается подъем рН, и во время VI интервала наблюдаются колебания этого параметра от 7.5 mV (частично с сейсмическими толчками) до 8.0 mV (без сейсмических толчков) (рис. 5б).

Обсуждение результатов

Предварительные замечания

Станции Култукского полигона откликаются концентрациями элементов и изотопными отношениями U по-разному, в зависимости от их положения в активном разломе или внутри тектонического блока (Расказов и др., 2015). Мониторинг ст. 184 характеризует состояние разлома север-северо-восточной ориентировки, соединяющего активизированные зоны Главного Саянского и Обручевского разломов.

Сейсмогенные деформации, порождающие сильные землетрясения, проявляются в гидрогеохимических данных непосредственно или опосредованно. Непосредственный эффект – открытие и закрытие микротрещин, соответственно, с относительным увеличением и снижением циркуляции подземных вод – регистрируется по изменению в них ОА4/8 и А4. Опосредованные оценки деформации коры получаются в виде откликов на потоки восстановленных и окисленных флюидов, которые отражаются в изменении ОВП подземных вод и в изменении концентраций переходных химических элементов (рис. 6).

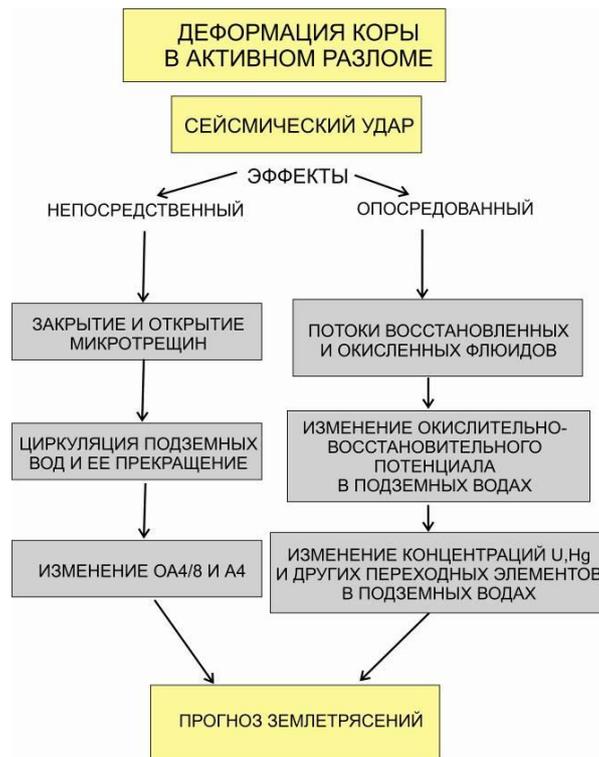


Рис. 6. Блок-диаграмма непосредственных и опосредованных соотношений между сейсмическими толчками и изменением концентраций переходных химических элементов в подземных водах активного разлома.

Fig. 6. Flowchart of direct and indirect relationships between seismic shocks and changes in the concentrations of transitional chemical elements in groundwater from an active fault.

Поскольку переходные химические элементы подземных вод откликаются на изменение ОВП, они отражают одновременные сейсмогенные деформации всей структуры. Элементы одной валентности не подвержены влиянию ОВП. В случае, если изменение ОВП служит доминирующим фактором вариаций переходных элементов, элементы одной валентности (например, Li) могут отражать процессы, не связанные непосредственно с подготовкой и реализацией сильных сейсмических толчков, а служить показателем деформационных эффектов, зарождающихся и распространяющихся с некоторой скоростью от очага землетрясения до станции полигона (рис. 7).

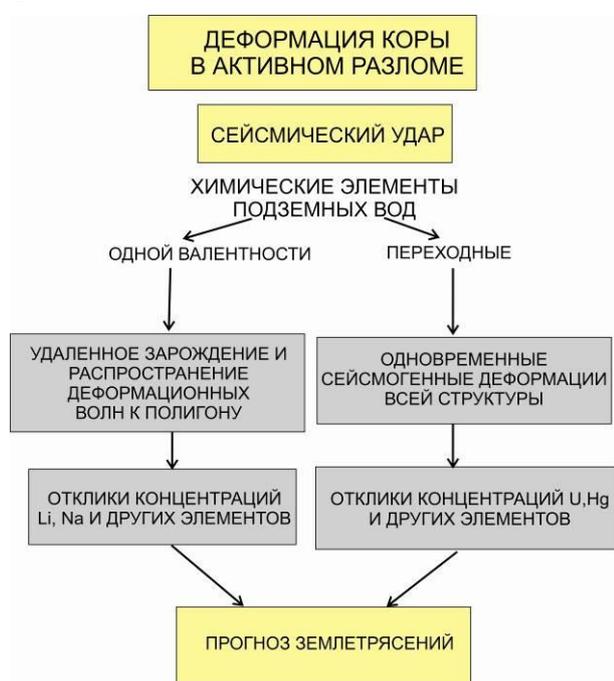


Рис. 7. Блок-диаграмма откликов на сейсмические толчки концентраций химических элементов одной валентности и переходных в подземных водах активного разлома.

Fig. 7. Flowchart of responses to seismic impacts of chemical elements concentrations of single valence and transitional elements in groundwater from an active fault.

Эффект открытия–закрытия микро-трещин в вариациях ОА4/8 и А4

Регистрация ОА4/8 и А4 в подземных водах имеет определяющее значение для отслеживания состояния растяжения и сжатия разлома (см. рис. 2). При подготовке Быстринского землетрясения максимумы А4 и ОА4/8 ст. 184 обозначают длительную (3-х месячную) концентрацию растяжения микро-трещин. Другие землетрясения КрМБКдХ и афтершоки подобных откликов в вариациях А4 и ОА4/8 ст. 184 не имеют. Короткий импульс растяжения за 5 дней до Хубсугульского землетрясения (между III и IV (сейсмическими) интервалами) не может считаться показательным без дополнительной аргументации. Растяжение во время V интервала не сопровождается сейсмическими толчками, но в VI интервале такие толчки наблюдаются при смене растяжения сжатием.

На диаграмме А4 – ОА4/8 (рис. 8) обозначается фигуративное поле фоновых составов первого временного интервала (до начала сейсмической активизации 2020–2021 гг.). Во втором (сейсмическом) временном интервале начальная фигуративная точка (IIa) смещается от фонового фигуративного поля с возрастанием ОА4/8, остальные точки смещаются с возрастанием не только ОА4/8, но и А4, образуя продвинутый верев точек растяжения (группа IIб) с максимальным смещением точки Быстринского землетрясения (IIв). В третьем (сейсмическом) временном интервале фигуративное поле точек только слегка выходит за пределы фигуративного поля фоновых составов, а в четвертом (сейсмическом) становится более концентрированным и полностью вписывается в него, за исключением начальной точки (IVa). Иными словами, параметры ОА4/8 и А4 подземных вод третьего и четвертого (сейсмических) временных интервалов подобны параметрам первого (предсейсмического) интервала. Между третьим и четвертым интервалами (перед Хубсугульским землетрясением)

точка IVa смещается с возрастанием значения A4 при значении OA4/8,

соответствующем среднему значению первого (предсейсмического) интервала.

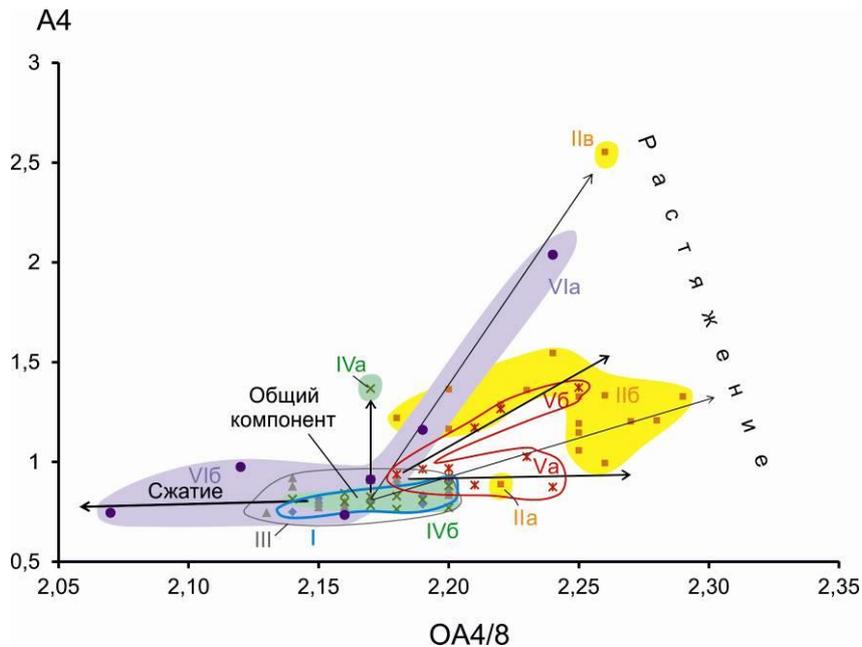


Рис. 8. Диаграмма A4 – OA4/8 для подземных вод шести временных интервалов мониторинга ст. 184 в 2020–2021 гг. Временные интервалы обозначены римскими цифрами.

Fig. 8. Diagram A4 vs OA4/8 for groundwater of six monitoring time intervals from st. 184 in 2020–2021. Time intervals are indicated by Roman numerals.

Значения OA4/8 и A4 пятого (асейсмического) временного интервала (группа V) сопоставляются со значениями второго интервала, во время которого произошло Быстринское землетрясение. Выделяются 2 тренда растяжения: в одном возрастает только A4 со смещением точек подгруппы Va в направлении точки Па, в другом возрастает не только A4, но и OA4/8 со смещением точек подгруппы Vb в центральную часть продвинутого веера подгруппы IIб. В шестом временном интервале также выявляется тренд растяжения (подгруппа VIa) с возрастанием значений A4 и OA4/8 от фигуративного поля фоновых составов первого временного интервала по направлению к точке IIв Быстринского землетрясения. После тренда растяжения образуется тренд сжатия (тренд снижения OA4/8 подгруппы VIб). Переход от растяжения к сжатию устанавливается в самом конце 2021 г.

Потоки восстановленных и окисленных флюидов в концентрациях Hg и U

Принимая ОВП в качестве определяющего параметра и концентрации Hg_{gw}, U (отношение Hg_{gw}/U) – в качестве производных,

отметим, что землетрясение Южно-Байкальской впадины (Кударинское) произошло во II интервале на минимуме ОВП ст. 184, землетрясение переходного III интервала (Маритуйское) имело по-прежнему низкое значение этого параметра и землетрясение IV интервала (Танхойское) вышло на максимум ОВП. И наоборот, землетрясение Хубсугульской впадины (Хубсугульское) произошло во II интервале на максимуме ОВП и в дальнейшем, при афтершоках, перешло к максимальным контрастам ОВП, завершившихся выходом на минимум ОВП 23 августа 2021 г. (см. рис. 3 и 4).

Аномальное (почти троекратное) возрастание концентрации U в течение трех месяцев (18.07.2020–22.10.2020) – между Муринским и Кударинским землетрясениями – воспринимается как явный отклик на подготовку и реализацию Быстринского землетрясения. Слабое (по сравнению с Быстринским) возрастание концентрации U 07 января 2021 г. может показывать более слабый (чем для Быстринского землетрясения) отклик, предшествовавший Хубсугульскому землетрясению.

Аномально низкая концентрация Hg_{gw} может считаться откликом на подготовку и реализацию Кударинского землетрясения

Южно-Байкальской впадины. Во время землетрясений КрМБКДХ в 2020 г. и в начале 2021 г. наблюдаются (с относительным запаздыванием) согласованные максимумы и минимумы U и Hg_{gw} , а после 29 марта 2021 г. определяется перестройка гидрогеохимических откликов (с относительным запаздыванием) минимумов Hg_{gw} относительно максимумов U .

На диаграмме рис. 9 временные вариации Hg_{gw} и U интерпретируются в терминах временных соотношений компонентов А, Б и В. Группы проб первого и третьего временных интервалов имели узкие диапазоны U и Hg_{gw} с преобладанием фонового компонента А. Во втором временном интервале возрастает роль урана при одинаковом отношении Hg_{gw}/U (около 0.1). Согласованное возрастание концентрации обоих элементов характеризует возрастание роли компонента Б при подготовке и реализации Быстринского

землетрясения. Перед Хубсугульским землетрясением (07 января 2021 г.) роль компонента Б была по-прежнему существенной (около 50%). Подобные соотношения компонентов А и Б наблюдались 18 апреля 2021 г., в четвертом временном интервале, который в целом характеризовался уменьшением роли компонента Б (снижением концентрации U) и возрастанием роли компонента В (повышением концентрации Hg_{gw}). Компонент В обозначается в подземных водах более резко после сильнейшего афтершока Хубсугульского эпицентрального поля 31 марта 2021 г. Тенденции четвертого временного интервала прослеживаются в пятом (асейсмичном) временном интервале. Переход к шестому (сейсмическому) временному интервалу выражается в снижении роли компонента В (уменьшении концентрации Hg_{gw}) и в широких вариациях соотношений компонентов А и Б (в вариациях концентрации U).

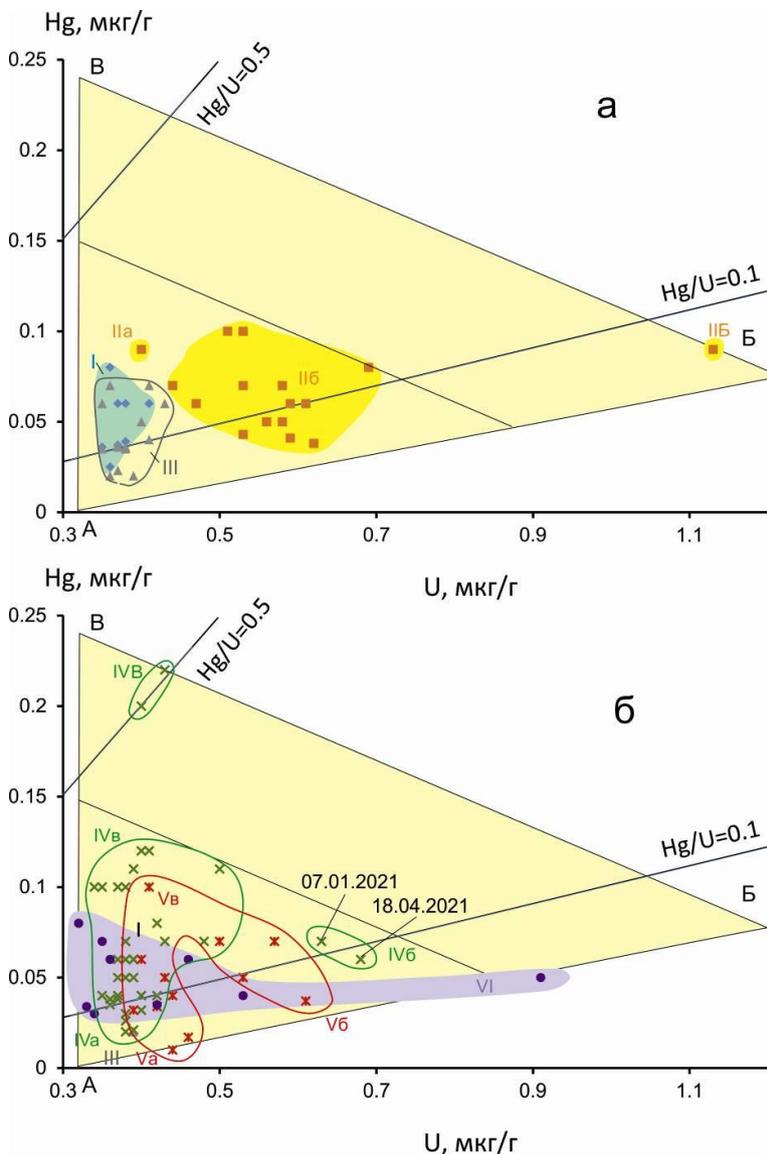


Рис. 9. Диаграмма $Hg_{gw} - U$ для подземных вод первых трех временных интервалов мониторинга ст. 184 (а) и последних трех (б). Усл. обозн. см. рис. 8.

Fig. 9. Diagram Hg_{gw} vs U for groundwater of the first three monitoring time intervals from st. 184 (a) and the last three ones (b). Designations are as in Fig. 2.

Соотношение компонентов А, Б и В в вариациях концентраций Li и К

Так же как на диаграмме $Hg_{gw} - U$ (рис. 9), характеристики подземных вод до и после Хубсугульского землетрясения отчетливо различаются на диаграмме $Li - K$, а соотношения этих элементов интерпретируется в координатах условных компонентов А', Б' и В'. Сначала преобладает компонент А'. Его содержание с течение времени несколько увеличивается за счет компонентов Б' и В'; фигуративные поля точек I, II и III временных

интервалов последовательно смещаются с понижением концентраций обоих элементов при среднем отношении K/Li около 2500 (рис. 10а). Тренд характеризует состояние подземных вод ст. 184 до Хубсугульского землетрясения. Роль компонентов Б' и В' существенно возрастает в IV временном интервале; образуется тренд от компонента А' к компонентам Б' и В' с разворотом к компоненту Б', в V и VI интервалах образуются тренды от компонента А' к компоненту В' (рис. 10б).

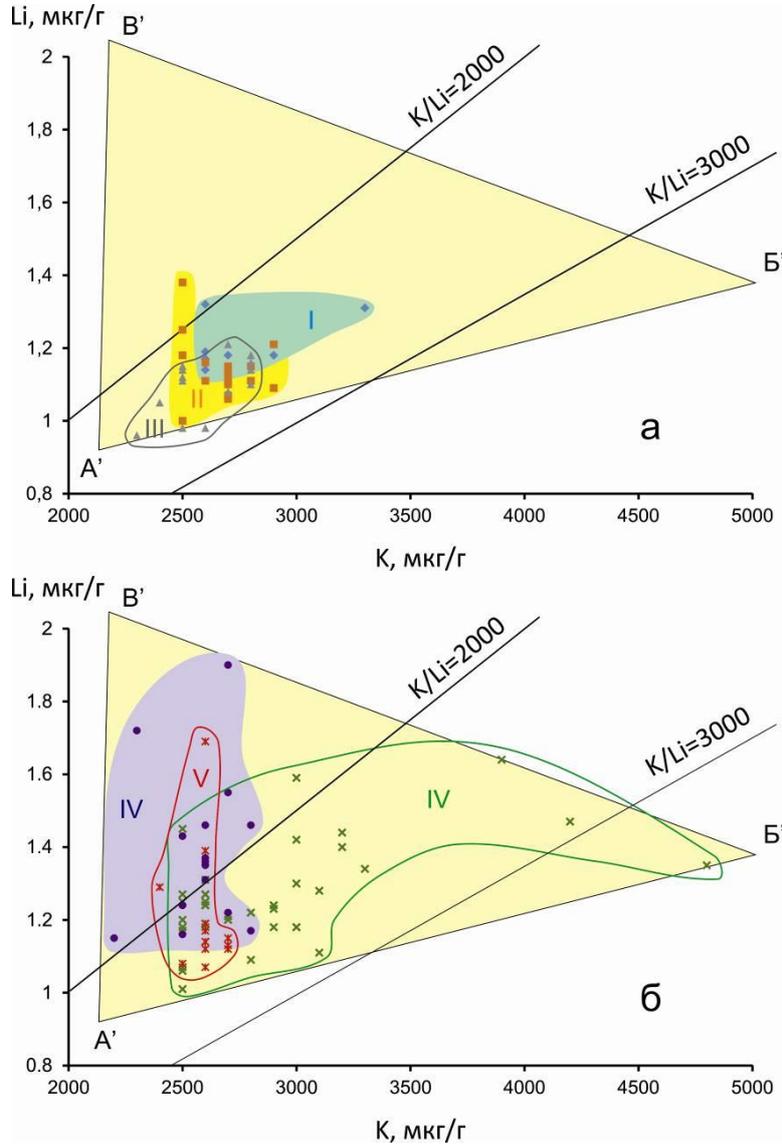


Рис. 10. Диаграммы Li – К для подземных вод мониторинговых интервалов I–III (а) и IV–VI (б) ст. 184. Усл. обозн. см. рис. 8. Изменения $Hg_{gw} - U$ и Li – К в подземных водах зависят от разных процессов, поэтому компоненты А', Б' и В' этих диаграмм не соответствуют компонентам А, Б и В диаграмм рис. 12.

Fig. 10. Diagrams Li vs K for groundwaters of monitoring intervals I–III (a) and IV–VI (б) from st. 184. Designations are as in Fig. 8. Variations of $Hg_{gw} - U$ and Li – К in groundwater depend on different processes, so components A', B', and C' of these diagrams do not correspond to components A, B, and C on diagrams of Fig. 12.

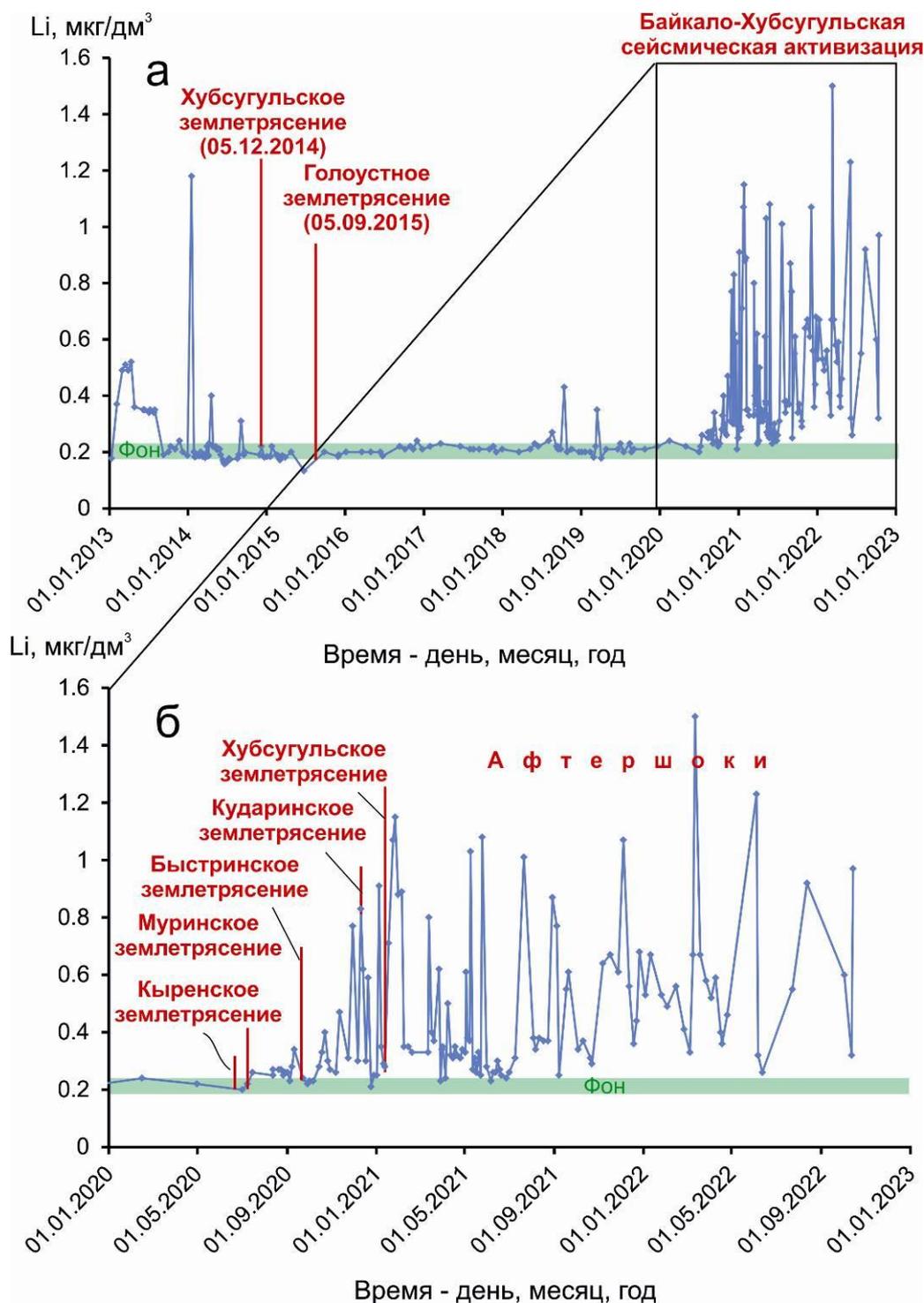


Рис. 11. Вариации концентрации Li в подземных водах ключевой ст. 27 Култукского полигона в течение всего временного интервала наблюдений 2013–2022 г. (а) и в течение последних трех лет (б).

Fig. 11. Variations in the Li concentration in groundwater from the key station 27 of the Kultuk polygon during the entire observation time interval of 2013–2022 (a) and during the last three years (b).

Всплески Li и их интерпретация как откликов на деформационные эффекты, распространяющиеся от очагов сейсмических толчков

В мониторинговом ряду ст. 27 Култукского полигона концентрация Li находится в 2013–2020 гг. в основном на уровне фона (около 0.2 мкг/дм³), последовательно возрастает (до 1.2 мкг/дм³) во время событий Байкало-Хубсугульской активизации: выходит выше фона после Муринского землетрясения, образует небольшой максимум перед Быстринским землетрясением, понижается до фона (около 0.2 мкг/дм³) и затем последовательно возрастает к Кударинскому землетрясению до 0.8 мкг/дм³. С этого времени концентрация Li варьируется от фоновых значений до 1.5 мкг/дм³. При Хубсугульском и Голоульном землетрясениях 2014–2015 гг. концентрация Li оставалась в пределах фоновых значений (рис. 11а). Поскольку поведение лития как одновалентного металла не зависит от ОВП подземных вод, возрастание концентрации Li во время Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации предполагает возрастание концентрации этого металла в связи с проявлением сейсмогенерирующих процессов. Эффект возрастания концентрации Li проявляется с запаздыванием по отношению к землетрясениям, произошедшим в ее начале; сначала происходят

землетрясения, затем возрастает концентрация Li в подземной воде. Таким образом, отклики Li – это следствие землетрясений.

По аналогии со ст. 27, на ст. 184 намечаются колебания концентрации Li, спровоцированные сейсмическими событиями. В подземных водах ст. 184 регулярно проявляются всплески Li в последовательном сочетании резких минимумов и максимумов, которые интерпретируются как отклики на деформационные эффекты, распространяющиеся от очага сейсмического толчка. Во время Байкало-Хубсугульской активизации сейсмические толчки происходят западнее Култукского полигона (в Тункинской долине и Хубсугульской впадине) и восточнее (в Южно-Байкальской впадине) (рис. 12а). Эпицентры толчков находятся на разном расстоянии от Култукского полигона. Эффекты от толчков в очагах, расположенных ближе к ст. 184, вызывают более ранний всплеск Li (рис. 12б), эффекты от толчков в очагах, расположенных дальше от ст. 184, – более поздний. Деформационные эффекты проявляются неоднократно. В результате распространения эффектов сейсмогенных деформаций к ст. 184 с двух сторон происходит их интерференция; всплески либо взаимно нивелируются, и устанавливаются интервалы стабильной концентрации Li (рис. 12в), либо всплески взаимно усиливаются, и образуются высокие максимумы (рис. 12г).

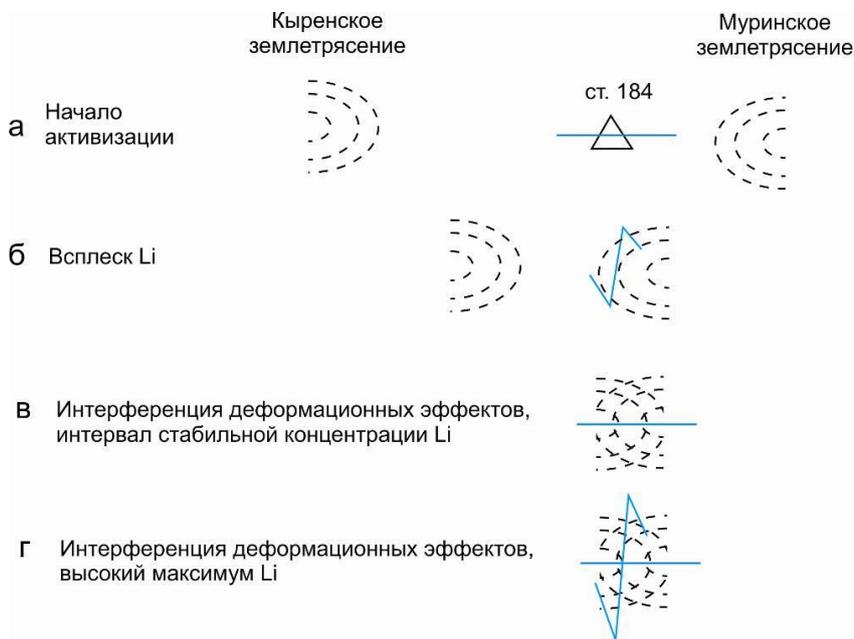


Рис. 12. Досейсмическое отсутствие всплесков Li (*a*) и разный характер откликов Li на деформационные эффекты (*b–z*). Синими линиями обозначен график Li: стабильная концентрация или всплеск.

Fig. 12. Preseismic absence of Li bursts (*a*) and different character of Li responses to deformational effects (*b–z*). Blue lines indicate Li graph: a stable concentration or a splash.

Для расшифровки характера всплесков Li ст. 184 показательна их регистрация в начальную фазу сейсмической активизации. Предполагается, что так же как на ст. 27, на этой станции в предсейсмическом временном интервале деформационные эффекты отсутствуют, и концентрация Li в подземных водах соответствует фону (см. рис. 5а и 11). 13 июня 2020 г. (в 15 ч. 36 мин.) происходит Кыренское землетрясение в центральной части Тункинской долины ($K=11.7$), затем, 06 июля (в 19 ч. 50 мин.), – Муринское землетрясение. Слабый минимум Li ст. 184, наблюдающийся 08 июля (в пробе, отобранной в 11 часов 20 минут), соотносится и с Кыренским, и с Муринским эпицентрами землетрясений. Расстояние от ст. 184 до эпицентра Кыренского землетрясения – 103 км, до эпицентра Муринского землетрясения – 61 км. По минимуму Li в распространении кыренского деформационного эффекта вдоль Тункинской долины получается сравнительно низкая скорость (0.165 км/час), а муринского, вдоль Южно-Байкальской впадины – более высокая скорость (1.151 км/час). Через одну промежуточную точку находится слабый максимум Li 21 июля. По нему получают скорости, соответственно, 0.110 и 0.167 км/час. Как видим, скорости с течением времени уравниваются. Деформационные эффекты, идущие с разных сторон, совмещаются между собой по фазе, и с 24 июля наблюдаются небольшие вариации Li, продолжающиеся более месяца, которые свидетельствуют о взаимном погашении кыренского и муринского деформационных эффектов механизмом интерференции (рис. 13а). На следующем идентифицированном минимуме 22 сентября (через 10 часов после Быстринского землетрясения) получают близкие между собой оценки скорости распространения кыренского и муринского эффектов (соответственно, 0.042 и 0.041

км/час). В отличие от дестабилизационного интервала, скорость распространения кыренского эффекта уже должна превышать скорость распространения муринского. В это время кыренский и муринский эффекты вряд ли имеют существенное влияние и уступают эффекту, который может породиться сильным Быстринским сейсмическим толчком. Концентрация Li 22 сентября находится ниже фона (см. рис. 5а), однако вызывает вопрос последующий длительный (почти месячный) монотонный подъем концентрации Li, трассированный 4-мя точками с 22 сентября до 18 октября. Такой подъем в целом не характерен для всплесков Li ст. 184 в 2020 г. и в первой половине 2021 г. и может отражать специфику начального отклика на Быстринское землетрясение. В данном случае, деформационный эффект Быстринского землетрясения сменяет деформационное состояние коры полигона, созданное эффектами Кыренского и Муринского землетрясений.

Сейсмогенные эффекты, распространяющиеся от очагов Кыренского и/или Муринского землетрясений, могли спровоцировать Быстринское землетрясение. Эпицентры этих землетрясений находятся почти на равном расстоянии от эпицентра Быстринского землетрясения (соответственно, 83 и 81 км). Быстринское землетрясение запускается в зоне оптимального взаимного наложения сейсмогенных деформаций, порожденных этими землетрясениями. Кыренское землетрясение происходит раньше и дестабилизирует очаг будущего Быстринского землетрясения на расстоянии около 80 км. Его эпицентр предопределен структурной неоднородностью коры; он пространственно соответствует среднемиоценовому Анчукскому вулкану. Муринское землетрясение происходит позже и усиливает дестабилизацию в этом очаге.

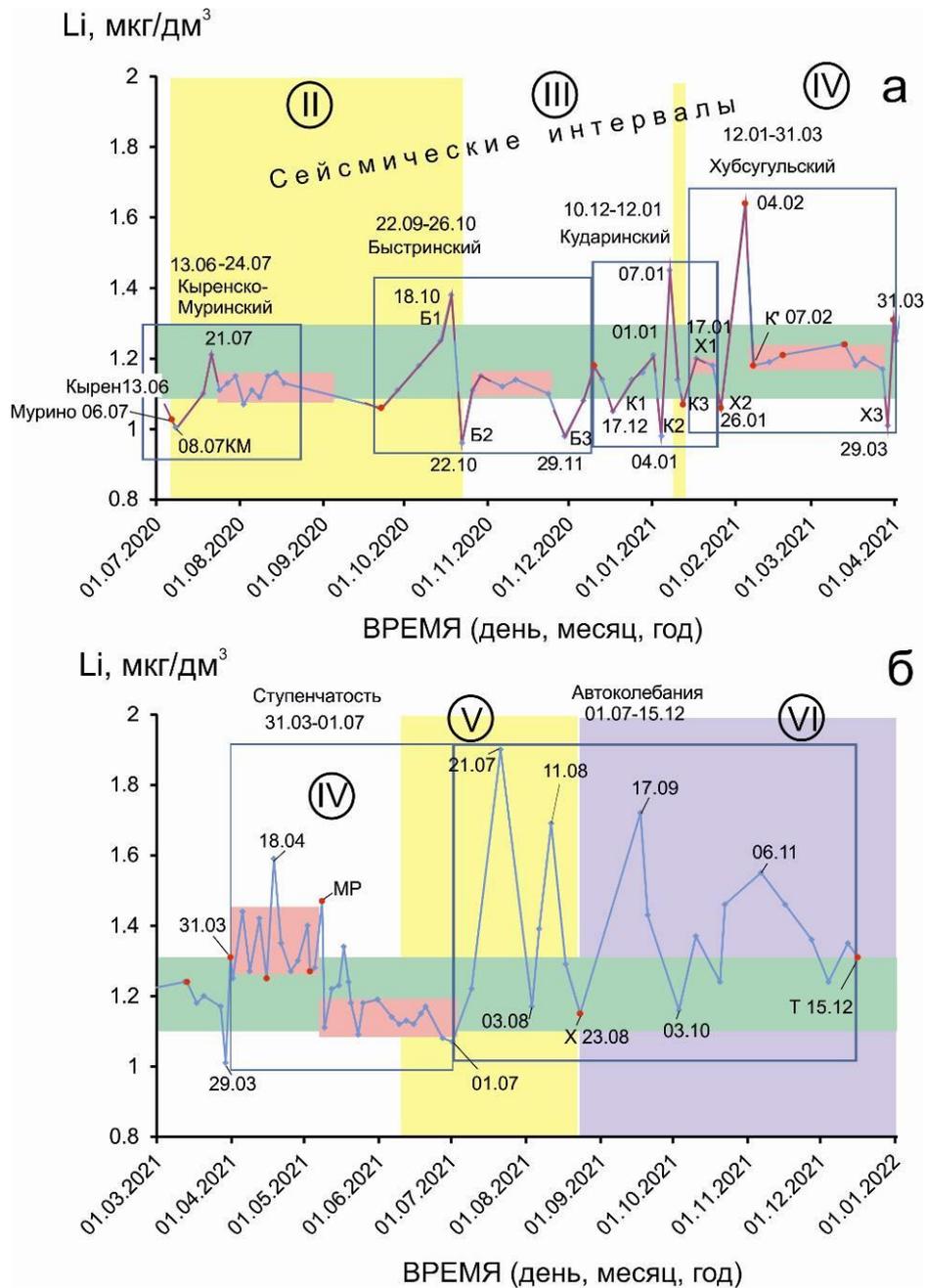


Рис. 13. Всплески и стабильные интервалы Li подземных вод ст. 184 в ходе развития Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации в 2020–2021 гг.: *a* – с 13 июня 2020 г. до 1 апреля 2021 г.; *б* – с 1 марта до конца 2021 г.

Fig. 13. Bursts and stable Li intervals of groundwater from st. 184 during the development of the Baikal-Khubsugul seismic reactivation in 2020–2021: *a* – from June 13, 2020 to April 1, 2021; *b* – from March 1 to the end of 2021.

Быстринское землетрясение происходит 22 сентября в 2 часа ночи в восточной части Тункинской долины дуплетом (с разрывом в 30 минут) при относительном смещении эпицентра второго (главного) толчка к востоку. За землетрясением следуют три всплеска Li , обозначенные как всплески Б1, Б2 и Б3. Всплеск Б1 образует минимум и максимум.

Минимум Li показывает проба, отобранная на ст. 184 через 10 часов после главного толчка. Эпицентр Быстринского землетрясения находится на расстоянии 19.7 км от ст. 184. Получается оценка скорости отклика минимума Li 1.97 км/час (более детальное опробование могло бы скорректировать эту скорость). По четырем последовательным

точкам концентрация L_i выходит на максимум 18 октября. Оценка скорости отклика максимума L_i – 0.03 км/час. Всплеск Б2 образует более глубокий минимум 22 октября с последующим выходом на уровень фоновых вариаций. Оценка скорости отклика минимума L_i – 0.026 км/час. За всплеском Б2 определяется 5 точек единого уровня концентрации L_i с 26 октября до 23 ноября, который свидетельствует о почти месячном отсутствии деформационных эффектов. Однако затем всплеск Б3 образует еще один глубокий минимум 29 ноября с выходом на максимум 10 декабря. Оценка скорости отклика минимума L_i – 0.012 км/час, максимума – 0.010 км/час. За исключением оценки скорости минимума 1.97 км/час, другие оценки скоростей деформационных эффектов, распространяющихся от эпицентра Быстринского землетрясения до ст. 184, находятся в диапазоне от 0.010 до 0.03 км/час.

Кударинское землетрясение происходит 10 декабря 2020 г. и обеспечивает 3 всплеска L_i , обозначенные как всплески К1, К2 и К3. Рассматривая Кударинское землетрясение как новую точку отсчета деформационных эффектов, определяем расстояние от ст. 184 до его эпицентра (213 км). Всплеск К1 образует минимум и максимум. Минимум показывает проба, отобранная 17 декабря 2020 г., максимум – проба 01 января 2021 г. Оценки скоростей откликов минимума и максимума L_i составляют, соответственно, 1.27 и 0.403 км/час. Всплеск К2 обозначается минимумом 04 января и максимумом 07 января, что отвечает оценкам скоростей откликов минимума и максимума L_i , соответственно, 0.355 и 0.317 км/час. Всплеск К3 представлен минимумом 12 января с соответствующей оценкой скорости отклика минимума 0.269 км/час. Оценки скоростей деформационных эффектов, распространяющихся от эпицентра Кударинского землетрясения до ст. 184, находятся в диапазоне от 0.269 до 1.27 км/час. Эти оценки существенно выше оценок скоростей деформационных эффектов, производных Быстринского землетрясения.

Хубсугульское землетрясение происходит 12 января 2021 г. Этому главному сейсмическому событию ($K=15.7$, $M=5.5$) можно приписать 3 деформационных эффекта ст. 184: X1, X2 и X3, хотя эти эффекты могли

искажаться афтершоками. Эффект X1 подобен эффекту КМ. Значительное расстояние от эпицентра Хубсугульского землетрясения до ст. 184 значительное (225 км) предполагает быстрое создание L_i -эффекта минимума сейсмической волной непосредственно в день землетрясения. L_i -эффект максимума создается 17 января также с высокой скоростью (1.9 км/час). После максимума концентрация L_i поддерживается несколько дней на одном уровне. Следует всплеск X2; минимум 26 января сменяется высоким максимумом 04 февраля. Эффект минимума распространяется со скоростью 0.67 км/час, эффект максимума – 0.41 км/час. Затем концентрация L_i снова стабилизируется на 50 дней (с 07 февраля до 27 марта). Новый всплеск X3 имеет минимум 29 марта и максимум 31 марта с близкими оценками скоростей (соответственно, 0.120 и 0.117 км/час).

Интервал с 31 марта до 01 июля 2021 г. характеризуется двумя спускающимися ступенями: сейсмоактивной и асейсмичной. С 01 июля до конца 2021 г. наблюдаются крупноамплитудные вариации L_i с квазипериодами около месяца. Эти вариации имеют автоколебательный характер (отсутствуют интервалы стабильного L_i). На минимуме 23 августа проявляется афтершок в Хубсугульском эпицентральном поле и в конце интервала, 15 декабря, Танхойский афтершок. Автоколебания наблюдаются при переходе от растяжения к сжатию.

Синтез

Гидрогеохимический ряд данных ст. 184 интерпретируется в связи с проявлением в ходе Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации разных процессов: растяжения–сжатия микротрещин, поднятия восстановленных–окисленных флюидов и деформационных эффектов, распространяющихся от очагов сейсмических толчков и образующихся вследствие возникновения на полигоне автоколебательных процессов.

Особенность ст. 184 – ее локализация в разломе северо-северо-восточного простирания, соединяющего активные части Главного Саянского и Обручевского разломов (рис. 14). Станция обозначила яркий отклик подземных вод на подготовку и реализацию Быстринского землетрясения П

(сейсмического) временного интервала в общих согласованных вариациях А4 и ОА4/8. Оба параметра последовательно возрастают и снижаются в течение 3-х месяцев вследствие усиления и ослабления растяжения микротрещин в активном разломе.



Рис. 14. Схема структурного положения ст. 184, откликнувшейся на подготовку и реализацию Быстринского землетрясения. Простираение соединительного разлома подобно простираению реконструированной субмеридиональной нодальной плоскости очага землетрясения. Другой реконструированной нодальной плоскости соответствует простираение Главного Саянского разлома. Приведен механизм землетрясения на нижней полусфере (Семинский и др., 2020).

Fig. 14. Scheme of structural setting of station 184 that responded to preparation and implementation of the Bystraya earthquake. A strike of the connecting fault is similar to the one of the reconstructed north-south nodal plane of the earthquake source. Another reconstructed nodal plane corresponds to the strike of the Main Sayan Fault. Given is the mechanism of an earthquake in the lower hemisphere after (Seminsky et al., 2020).

При подготовке других землетрясений таких эффектов не было. Во время Кударинского землетрясения в III (сейсмическом) временном интервале наблюдается минимум фона А4 и ОА4/8. За 5 дней до Хубсугульского землетрясения регистрируется лишь короткий импульс растяжения. IV (Хубсугульско-Маритуйский сейсмический) временной интервал характеризуется фоновым

состоянием разлома. В V (асейсмичном) временном интервале выявляются, однако, признаки растяжения. Они определяются в течение 2-х месяцев и сменяются более длительным VI (Хубсугул-Голоуспенским сейсмическим) интервалом сжатия конца 2021 – начала 2022 гг.

С одной стороны, уран и ртуть как переходные элементы зависят от окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) подземных вод, который может регулироваться потоками окисленных и восстановленных флюидов, инициируемыми в коре в ходе сейсмической активизации. С другой стороны, в окисленных условиях ртуть растворяется в воде в виде Hg^{2+} , а в восстановительных условиях Hg^+ удаляется из воды в виде газа. Уран также растворяется и переносится водой в высшей окисленной форме, но его восстановленная форма в воде не растворяется.

Аномальное (почти трехкратное) возрастание концентрации U после Муринского землетрясения с 06 июля до 22 сентября 2020 г. также воспринимается как отчетливый отклик подземных вод ст. 184 на подготовку и реализацию Быстринского землетрясения. Слабое (по сравнению с Быстринским) возрастание концентрации U 07 января 2021 г., возможно, показывает более слабый отклик, предшествовавший Хубсугульскому землетрясению, но подобные короткие отклики повторяются позже без сейсмических толчков, а сейсмические толчки не дают откликов концентрации U.

Важные выводы следуют из наблюдений поведения ртути, растворенной в подземных водах. Сейсмической активизации предшествуют потоки восстановленных флюидов, буферизующих атомарную Hg_{gas} . Сильные Быстринское и Кударинское землетрясения сопровождаются потоками восстановленных газов, а при Хубсугульском землетрясении начинают играть существенную роль окисленные флюидные потоки (рис. 15).

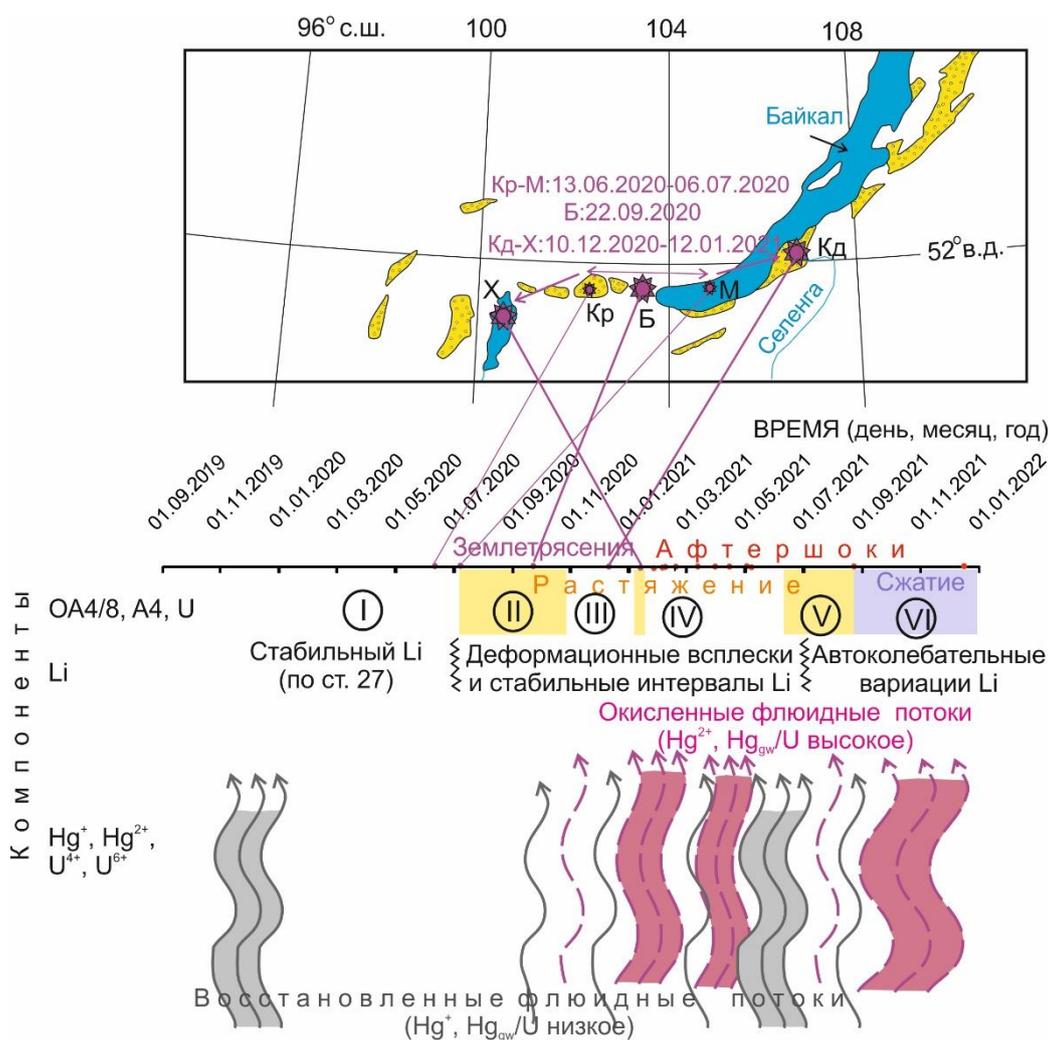


Рис. 15. Соотношение гидрогеохимических процессов, сопровождающих Байкало-Хубсугульскую сейсмическую активизацию в 2020–2021 гг.

Fig. 15. Correlation of hydrogeochemical processes accompanying the Baikal-Khubsugul seismic reactivation in 2020–2021.

После предсейсмической бухты Hg_{gw} подземных вод всех станций Култукского полигона второй половины 2019 г. подземные воды ст. 184 выходят на максимум Hg_{gw} с 18 июля 2020 г. до 17 августа 2020 г., что истолковывается как отклик, предшествующий сейсмогенному отклику максимума U этой станции на Быстринское землетрясение. Аномально низкая концентрация Hg_{gw} с 23 ноября до 28 декабря 2020 г. при нижнем пределе фона концентрации U может считаться откликом на подготовку и реализацию Кударинского землетрясения Южно-Байкальской впадины. Во время землетрясений КрМБКДХ в 2020 г. и в начале 2021 г. наблюдаются (с относительным запаздыванием) согласованные максимумы и минимумы U и Hg_{gw} , а

появление аномально высоких максимумов Hg_{gw} 31 марта 2021 г. ($Hg_{gw} = 0.2 \text{ мкг/дм}^3$) и 08 мая 2021 г. ($Hg_{gw} = 0.22 \text{ мкг/дм}^3$) в IV (сейсмическом) интервале обозначает перестройку на относительное запаздывание минимумов Hg_{gw} относительно максимумов U , которое проявляется и в первой половине V (асейсмического) интервала. Во второй половине V (асейсмического) интервала, однако, за высоким максимумом U следует максимум Hg_{gw} . При переходе к сжатию в VI (сейсмическом) интервале концентрации U и Hg_{gw} не выходят за пределы фона.

Наряду с предсейсмической бухтой 2019 г., фактор эффективного удаления Hg^+ из подземных вод проявляется при Быстринском и Кударинском землетрясениях, а также

при афтершоке Хубсугульского эпицентрального поля 12 марта 2021 г. и в начале IV (асейсмичного) временного интервала. Фактор максимального растворения Hg^{2+} в подземных водах в потоке окисленных флюидов характеризует один из афтершоков Хубсугульского эпицентрального поля в начале IV интервала и обстановку перехода от растяжения к сжатию V и VI интервалов. Максимальный контраст вариаций отношения $\text{Hg}_{\text{gw}}/\text{U}$ в IV (сейсмическом) временном интервале образуется за счет коротких эпизодов высоких концентраций ртути, растворенной в подземных водах в окисленных условиях, и удаления ртути в потоках восстановленных флюидов.

Запуск Быстринского землетрясения сопровождается потоком окисленных флюидов, Кударинского – восстановленных. Поведение Hg_{gw} и U согласовано. Запуск Хубсугульского землетрясения и ближних к нему афтершоков обозначается новым потоком окисленных флюидов, в котором роль Hg_{gw} возрастает относительно U . Можно предположить существование механизма обогащения ртути ее привнесением в виде Hg_{gas} в потоке восстановленных флюидов, который резко окисляется с растворением Hg_{gw} . О таком механизме свидетельствует возросшая контрастность проявления окисленных и восстановленных флюидных потоков в ходе развития афтершоковой активности. Затем частые сейсмические толчки завершаются, и в начале V (асейсмичного) интервала (в августе 2021 г.) доминирует поток восстановленных флюидов, в середине этого интервала – поток окисленных флюидов, в конце – вновь поток восстановленных флюидов. При переходе к VI (сейсмическому) интервалу генерируется поток восстановленных флюидов и имеет место новый афтершок в Хубсугульском эпицентральной поле, а затем обозначается тенденция к окислению, на фоне которого происходит Танхойское землетрясение Южно-Байкальской впадины.

Характер временных вариаций Li в подземных водах ст. 184 также несет информацию о запуске сейсмической активизации и необратимых изменениях, происходящих в ходе ее развития. Поведение этого элемента не связано с вариациями рН, но при угасании афтершоков в марте–июне 2021 г.

концентрация Li снижается одновременно с падением рН. Объясняя колебания концентрации Li деформационными сейсмогенными эффектами, мы различаем в начале сейсмической активизации всплески и стабильные интервалы Li , в первой половине 2021 г. – 2 стабильные ступени Li и во второй половине 2021 г. – крупноамплитудные автоколебания Li без интервалов стабильной концентрации Li .

Заключение

Ряд гидрогеохимических данных, полученный в 2020–2021 гг. на ст. 184 Култукского полигона, интерпретирован в связи с проявлением в ходе Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации разных процессов: поднятия восстановленных–окисленных флюидов, растяжения–сжатия микротрещин и деформационных эффектов, распространяющихся к полигону от очагов сейсмических толчков и образующихся на полигоне вследствие автоколебательных процессов. Установленные аномальные вариации $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, ^{234}U , U , Hg и Li , совпадающие по времени с Байкало-Хубсугульской сейсмической активизацией, могут использоваться как прогностические признаки будущих сильных землетрясений в центральной части Байкальской сейсмической зоны.

Благодарности

Состав воды анализировался на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500сe в ЦКП «Ультрамикроанализ» (ЛИН СО РАН, г. Иркутск). Методические подходы к анализу подземных вод частично разработаны в рамках темы Минобрнауки № 0279-2021-0008 (121032300186-9).

Литература

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 сейсмодатчика 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.

Карта эпицентров землетрясений. Иркутск: Байкальский Филиал Геофизической Службы, 2022. <http://www.seis-bykl.ru>.

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В., Чельницкий 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.

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

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

Чебыкин Е.П., 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., 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., 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. 7–19. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2022.1.7>.

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.V., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Chuvashova I.S., Chebykin E.P. Mercury hazard of earthquakes in the Baikal seismic zone // *Limnology and Freshwater Biology*. 2022b. No. 3. P. 1332–1334. DOI:10.31951/2658-3518-2022-A-3-1332.

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор,

664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет, геологический факультет,

заведующий кафедрой динамической геологии,

664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

Институт земной коры СО РАН,

заведующий лабораторией изотопии и геохронологии,

тел.: (3952) 51–16–59,

email: rassk@crust.irk.ru.

Rasskazov Sergei Vasilievich,

doctor of geological and mineralogical sciences, professor,

664003 Irkutsk, st. Lenina, 3,

Irkutsk State University, Faculty of Geology,

Head of Dynamic Geology Char,

664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128,
 Institute of the Earth's Crust SB RAS,
 Head of the Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies,
 tel.: (3952) 51–16–59,
 email: rassk@crust.irk.ru.

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

Цыасова Айгуль Маратовна,
 candidate of geological and mineralogical sciences, leading engineer,
 664033 Irkutsk, st. Lermontova, d. 128,
 Institute of the Earth's Crust SB RAS,
 email: ila@crust.irk.ru.

Борняков Сергей Александрович,
 кандидат геолого-минералогических наук,
 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
 Институт земной коры СО РАН,
 старший научный сотрудник,
 email: bonyak@crust.irk.ru.

Bornyakov Sergey Alexandrovich,
 candidate of geological and mineralogical sciences,
 664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128,
 Institute of the Earth's Crust SB RAS,
 Senior Researcher,
 email: bonyak@crust.irk.ru.

Снопков Сергей Викторович,
 кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
 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 универси-
 тет, ведущий научный сотрудник,
 email: snopkov_serg@mail.ru.

Snopkov Sergey Viktorovich,
 Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, assistant professor
 664003 Irkutsk, st. Lenina, 3, Irkutsk State University, Faculty of Geology
 664074, Irkutsk, st. Kurchatova, 3,
 Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University, Leading Researcher,
 email: snopkov_serg@mail.ru.

Чувашова Ирина Сергеевна,
 кандидат геолого-минералогических наук,
 664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
 Иркутский государственный университет, геологический факультет,
 доцент,
 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
 Институт земной коры СО РАН,
 старший научный сотрудник,
 тел.: (3952) 51–16–59,
 email: chuvashova@crust.irk.ru.

Chuvashova Irina Sergeevna,
 candidate of geological and mineralogical sciences,

664003 Irkutsk, st. Lenina, 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
assistant professor,
664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Senior Researcher,
tel.: (3952) 51–16–59,
email: chuvashova@crust.irk.ru.

Чебыкин Евгений Павлович,

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

Chebykin Evgeny Pavlovich,

Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher,
664033 Irkutsk, st. Lermontova, d. 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3,
Limnological Institute SB RAS,
email: epcheb@yandex.ru.
