

## Химическая гидрогеодинамика в Улан-Баторском резервуаре подземных вод в 2012–2023 годах: сопоставление с химической гидрогеодинамикой резервуаров побережья Байкала

С.В. Рассказов<sup>1,2</sup>, А.М. Ильясова<sup>1</sup>, С.А. Борняков<sup>1</sup>,  
Ц. Батсайхан<sup>3</sup>, С. Дэмбэрэл<sup>3</sup>, Е.П. Чебыкин<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>3</sup>Институт астрономии и геофизики МАН, Улан-Батор, Монголия

<sup>4</sup>Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

**Аннотация.** Сравнительные гидрогеохимические исследования подземных вод Улан-Баторского резервуара и резервуаров побережья Байкала свидетельствуют о существенных различиях гидрогеодинамических процессов этих территорий, о более ранней генерации U-изотопных и Si–Na–Li-температурных аномалий резервуаров подземных вод Улан-Баторского резервуара и более поздней – резервуаров побережья Байкала.

**Ключевые слова:** подземные воды, мониторинг, Si, Na, Li,  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ , землетрясение, глина трения, Байкал, Монголия.

## Chemical hydrogeodynamics in the Ulaanbaatar groundwater reservoir in 2012–2023: comparison with chemical hydrogeodynamics in the reservoirs of the Baikal coast

S.V. Rasskazov<sup>1,2</sup>, A.M. Ilyasova<sup>1</sup>, S.A. Bornyakov<sup>1</sup>,  
Ts. Batsaihan<sup>3</sup>, S. Demberel<sup>3</sup>, E.P. Chebykin<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup>Institute of Astronomy and Geophysics MAN, Ulaanbaatar, Mongolia

<sup>4</sup>Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

**Abstract.** Comparative hydrogeochemical studies of groundwater in the Ulaanbaatar reservoir and those in the coast of Lake Baikal show significant difference between hydrogeodynamic processes of these areas, the earlier generation of U-isotopic and Si–Na–Li-temperature anomalies in the Ulaanbaatar groundwater reservoir and the later in those of the Baikal coast.

**Keywords:** groundwater, monitoring, Si, Na, Li,  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ , earthquake, friction clay, Baikal, Mongolia.

### Введение

Смена гидрогеохимических параметров резервуара подземных вод может сопоставляться с накоплением сейсмической энергии при подготовке землетрясений. Для прогноза сильных событий на основе гидрогеохимических данных важно определить характер изменений, происходящих в резервуаре подземных вод. Меняются ли гидрогеохимические характеристики в одном направле-

нии (что может свидетельствовать о процессах изменения земной коры, которые приводят к сильному сейсмическому событию) или гидрогеохимические характеристики не меняются и, в этом случае, накопление сейсмической энергии отсутствует, а, следовательно, нет угрозы генерации сильного землетрясения.

В рядах гидрогеохимических данных, полученных в 2012–2023 гг. на станциях Култукского резервуара подземных вод запад-

ного побережья Байкала и на станциях Максимихинского резервуара подземных вод юго-восточного побережья Среднего Байкала, в рамках полного сейсмогеодинамического цикла центральной части Байкальской рифтовой системы (БРС) 2008–2020 гг. прослеживаются существенные вариации термofilных элементов Na и Li и Na/Li отношения в связи с изменениями отношения активностей  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  (ОА4/8) и активности  $^{234}\text{U}$  (А4), отражающих открытие и закрытие микротрещин для циркулирующих подземных вод. Рассчитанные значения  $T(\text{Na/Li})$  в резервуаре подземных вод меняются в интервале от 8 до 122 °С (Рассказов и др., 2023).

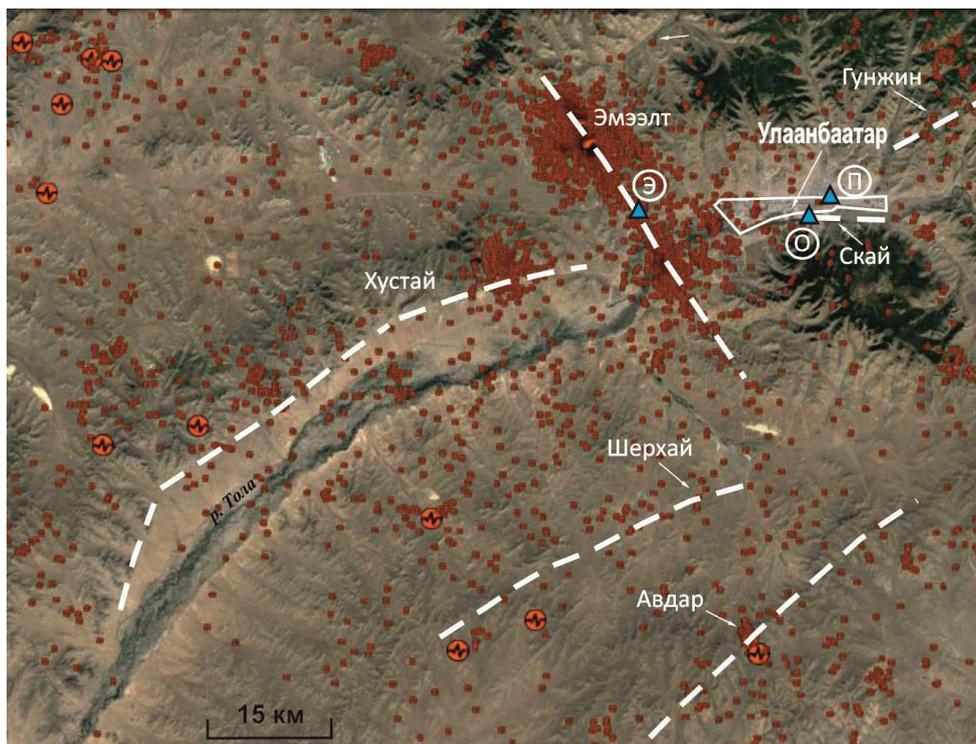
Улан-Батор находится в сейсмически активной области Центральной Монголии. Здесь проводятся работы, связанные с поисками подходов к прогнозу землетрясений (Семинский и др., 2016, 2019; Miroshnichenko et al., 2018; и др.). В настоящей статье приводятся результаты гидрогеохимических наблюдений, полученных на станциях Улан-Батора, которые заметно отличаются от гидрогеохимических данных БРС.

### Станции гидрогеохимического мониторинга

Повторное опробование проводится на трех станциях Улан-Батора: Эмээлт (координаты: N47°53'57.3", E106°34'12.48"), Планетарий (координаты: N47°55'16.08", E106°57'15.12") и Оргил (координаты: N47°53'49.23", E106°54'47.04") (рис. 1).

Ст. Эмээлт – скважина базы Института астрономии и геофизики Монгольской академии наук глубиной несколько десятков м, расположенная в 9 км западнее Улан-Батора. Ст. Планетарий – скважина планетария Института астрономии и геофизики МАН глубиной 80 м, пройденная при строительстве планетария рядом с Институтом в центре Улан-Батора. Ст. Оргил – скважина углекислых газирующих вод глубиной 90 м. На основе этой скважины функционирует санаторий в центре Улан-Батора.

Станции Оргил и Планетарий находятся в зоне активного разлома Скай, заложенного вдоль субширотного отрезка долины р. Тола. Ст. Эмээлт располагается в зоне одноименного разлома ССЗ простирания, который трассируется роом эпицентров землетрясений (рис. 1).



**Рис. 1.** Расположение станций гидрогеохимических исследований в районе Улан-Батора. Синие треугольники – станции, обозначенные буквами в кружках: Э – Эмээлт, П – Планетарий, О – Оргил. Белыми штриховыми линиями обозначены активные разломы. Темно-коричневыми значками показаны эпицентры землетрясений с магнитудой, меньшей (малые квадраты) и большей (кружки с синусоидой) трёх. В качестве основы использована схема из работы К.Ж. Семинского и др. (2019).

**Fig. 1.** Location of hydrogeochemical research stations in the Ulaanbaatar area. Blue triangles are stations, indicated by letters in circles: Э – Emeelt, П – Planetarium, О – Orgil. White dashed lines indicate active faults. Dark brown icons show earthquake epicenters with a smaller magnitude ( $M < 3$ , small squares) and larger one ( $M > 3$ , circles with a sine wave). The map is used after Seminsky et al. (2019).

### Методика

Методика отбора, хранения и аналитических исследований проб воды подробно охарактеризована в работах (Чебыкин и др., 2007; Чебыкин, Рассказов, 2023).

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

Изотопы урана определяются после выделения этого металла на ионно-обменной колонке из отдельной пробы воды (до 400 мл). При низкой концентрации U в пробе воды, металл извлекается из большего объема пробы.

### Результаты

На ст. Оргил минеральные углекислые газифирующие воды имеют общую минерализацию около 1 г/дм<sup>3</sup>. На двух других станциях представлены пресные холодные подземные

воды с общей минерализацией около 350–500 мг/дм<sup>3</sup>.

### Уран

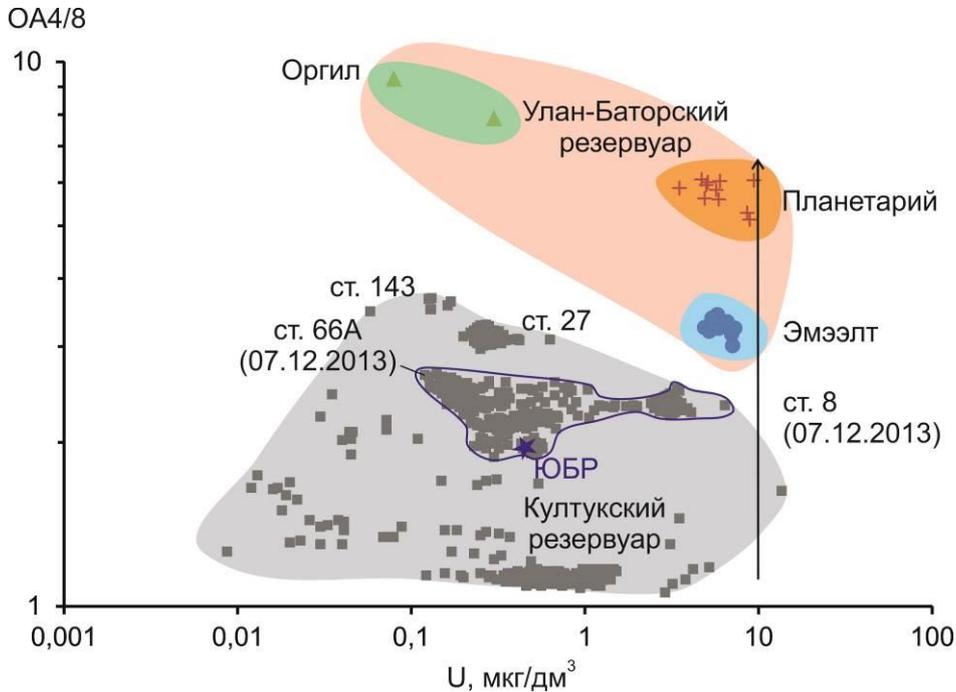
Вариации концентрации и изотопов урана анализируются в связи с эффектом Чердынцева–Чалова – образованием неравновесия между материнским <sup>238</sup>U и продуктом его радиоактивного распада <sup>234</sup>U (Чердынцев, 1969, 1973; Чалов, 1975; Чалов и др., 1980, 1990; Фор, 1989). При радиоактивном распаде в лабораторных условиях отношение активностей <sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U (ОА4/8) соответствует 1. В природных условиях при взаимодействии вода–порода ОА4/8 отличается от 1. В подземных водах активных разломов ОА4/8 существенно варьирует и при землетрясениях возрастает на порядок вследствие их циркуляции через открывающиеся микротрещины или, наоборот, заметно снижается из-за затрудненной циркуляции подземных вод через сжатые микротрещины.

На диаграмме ОА4/8 – U (рис. 2) в центре фигуративного поля подземных вод Култукского резервуара находится состав глубоководной воды Южно-Байкальского резервуара (ЮБР): U = 0.45 мкг/дм<sup>3</sup>; ОА4/8 = 1.96. В резервуаре преобладают составы, образующие непрерывную совокупность от точки ЮБР с возрастанием ОА4/8 до 2.67, снижением концентрации U до 0.12 мкг/дм<sup>3</sup> на ст. 66А (7 декабря 2013 г.) и с возрастанием ОА4/8 до 2.34, возрастанием концентрации U до 6.4 мкг/дм<sup>3</sup> на ст. 8 (7 декабря 2013 г.). В целом концентрация U в подземных водах Култукского резервуара меняется на 3 порядка, ОА4/8 – от почти равновесного (ОА4/8 ~ 1) до 3.68.

Фигуративное поле подземных вод Улан-Баторского резервуара смещается выше фигуративного поля подземных вод Култукского резервуара. ОА4/8 в подземных водах ст. Эмээлт Улан-Батора составляет 3.0–3.4 и сопоставляется с наиболее высокими значениями ОА4/8, полученными для подземных вод Култукского резервуара (2.97–3.68, ст. 27 и 143). Максимальная концентрация U в

группе подземных вод Култукского резервуара с высоким ОА4/8, однако, не превышает  $0.63 \text{ мкг/дм}^3$ , а в подземных водах ст. Эмээлт А4 находится в интервале 4.9–7.3 е.а. (рис. 2). При одном и том же ОА4/8 в подземных водах станций Эмээлт и Култукского полигона в первых содержится больше изотопов материнского  $^{238}\text{U}$ , составляющего 99,2743 % от общего урана. При одной и той же кон-

центрации U в подземных водах станций Эмээлт и Култукского полигона в подземных водах ст. Эмээлт имеется больше изотопа  $^{234}\text{U}$ , чем в подземных водах Култукского полигона. В подземных водах ст. Планетарий Улан-Баторского резервуара эта тенденция усиливается (ОА4/8 возрастает).



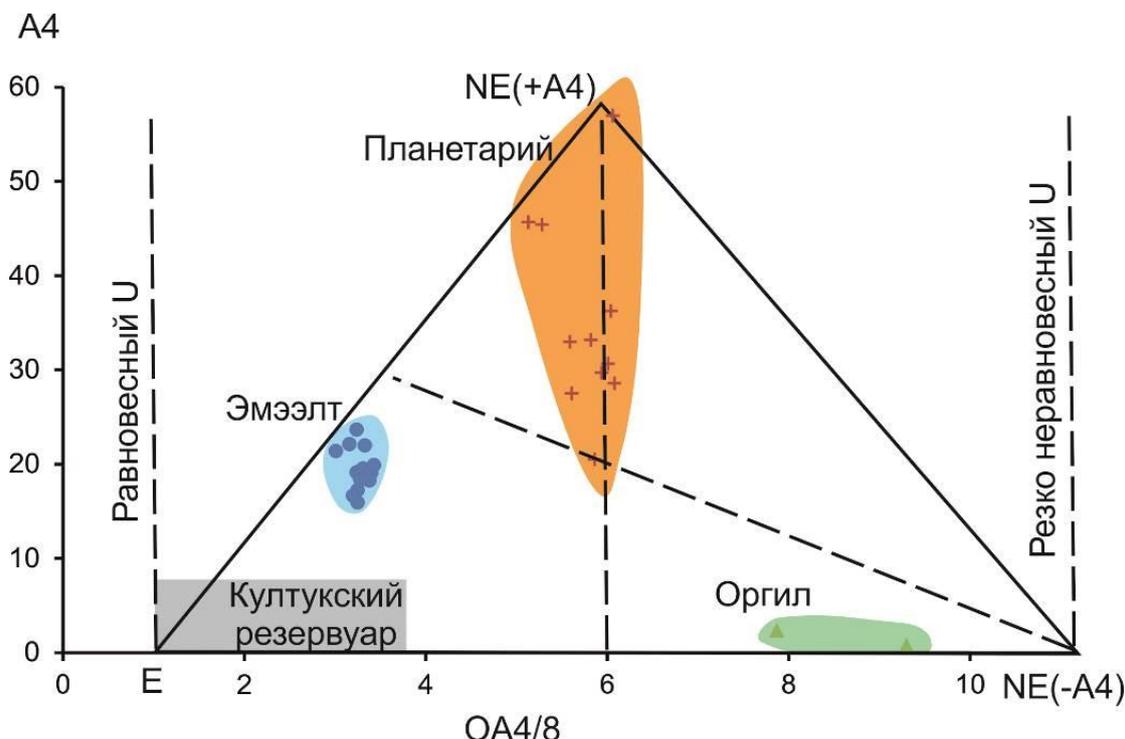
**Рис. 2.** Диаграмма ОА4/8 – U подземных вод Улан-Баторского резервуара (Монголия) в сопоставлении с подземными водами Култукского резервуара (Байкал). ОА4/8 – изотопное отношение  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в подземных водах в единицах активностей.

**Fig. 2.** Diagram OA4/8 vs U of groundwater in the Ulaanbaatar reservoir (Mongolia) compared with groundwater in the Kultuk reservoir (Baikal). AR4/8 (activity ratio) – isotope ratio  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  in groundwater in activity units.

На диаграмме А4 – ОА4/8 (рис. 3) изотопный состав урана подземных вод Улан-Баторского резервуара характеризуется в рамках соотношений трех компонентов: 1) равновесного (Е, equilibrium, ОА4/8=1), 2) неравновесного с генерацией избыточного  $^{234}\text{U}$  (NE(+A4), non-equilibrium ОА4/8=6) и 3) сильно неравновесного с понижением  $^{234}\text{U}$  (NE(-A4), non-equilibrium ОА4/8=11).

Наиболее близок к равновесию изотопный состав урана подземных вод Култукского резервуара, который характеризует компонент Е. Концентрация  $^{234}\text{U}$  в единицах ак-

тивности (А4, е.а.) подземных вод ст. Эмээлт А4 составляет 16–24. В подземных водах ст. Планетарий Улан-Батора производится интервал значений А4 от 20.5 до 60 е.а. при возрастании ОА4/8 до интервала 5.1–6.1. Максимальное значение этой станции характеризует компонент NE(+A4). На нижнем пределе значения А4 подземных вод ст. Планетарий попадают в интервал значений А4 ст. Эмээлт. В подземных водах ст. Оргил ОА4/8 возрастает при снижении А4 на 2 порядка. Эта станция характеризует компонент NE(-A4).



**Рис. 3.** Диаграмма А4 – ОА4/8 подземных вод Улан-Баторского резервуара (Монголия) в сопоставлении с подземными водами Култукского резервуара (Байкал). Выделяются 3 компонента подземных вод: 1) Е – равновесный, ОА4/8=1, 2) NE(+A4) – неравновесный с генерацией избыточного <sup>234</sup>U, ОА4/8=6 и 3) NE(-A4) – сильно неравновесный с низким <sup>234</sup>U, ОА4/8=11 (объяснение в тексте).

**Fig. 3.** Diagram A4 - OA4/8 groundwater of the Ulaanbaatar reservoir (Mongolia) compared with groundwater of the Kultuk reservoir (Baikal). There are 3 components of groundwater: 1) E – equilibrium, OA4/8=1, 2) NE(+A4) – non-equilibrium with the generation of excess <sup>234</sup>U, OA4/8=6 and 3) NE(-A4) – strongly non-equilibrium with low <sup>234</sup>U, OA4/8=11 (explanation in the text).

#### Термофильные элементы Si, Na и Li

Для оценки термального состояния источников подземных вод используются Si и Na/Li геотермометры.

Поскольку оценки температур в подземных водах по кремниевым геотермометрам не превышают 100 °С, принимаются значения температуры в резервуаре по халцедоновой модификации геотермометра (Arnorsson et al., 1983):

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

где С – концентрация SiO<sub>2</sub> в мг/дм<sup>3</sup>; T(Si) – температура в °С. Учитывая фактор разбавления подземных вод слабо минерализованными (метеорными) водами, полученные значения рассматриваются как минимальные оценки температуры глубинного резервуара (Ильясова, Снопков, 2023).

Для определения температуры T(Na/Li) подземных вод используется геотермометр (Fouillac, Michard, 1981), представленный уравнениями:

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

действительном для концентраций Cl > 0.3 моль/кг (>11 г/кг Cl), и

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

действительном для концентраций Cl < 0.3 моль/кг (Cl < 11 г/кг). В обоих уравнениях используются концентрации элементов в молях (mNa и mLi).

При расчете температуры в резервуаре подземных вод концентрации Na и Li в подземных водах не учитываются, а имеет значение только отношение этих элементов, которое проецируется из резервуара на по-

верхность. При отсутствии тектонических движений Na/Li геотермометр в общем дает температуры подземных вод резервуара, возрастающие с глубиной, подобные температурам Si геотермометра. В плоскости активного разлома развиваются различные глинистые минералы (Moore, Lockner, 2007; Ikari et al., 2009; Karingithi, 2009; Kocserha, Gömze, 2010; Tembe et al., 2010), что отражается в несоответствии оценок T(Na/Li) и T(Si). Предполагается, что Na/Li геотермометр дает кажущиеся температуры подземных вод, создающиеся в плоскости активного разлома с синтетектоническим выделением тепла и образованием глинки трения.

При мониторинге холодных подземных вод на Култукском полигоне в бортовых активных разломах Южно-Байкальской впадины (Обручевском и ЮЗ Бортовом) получены тренды T(Na/Li) с повышенной концентрацией Li, а на Култукской ступени – тренды T(Na/Li) с низкой концентрацией Li (Чебыкин, Рассказов, 2023). Различие трендов объясняется включением фактора температурной зависимости Li в реакции катионного обмена вод с глинами и цеолитами (Fouillac, Michard, 1981; Sanjuan et al., 2014):



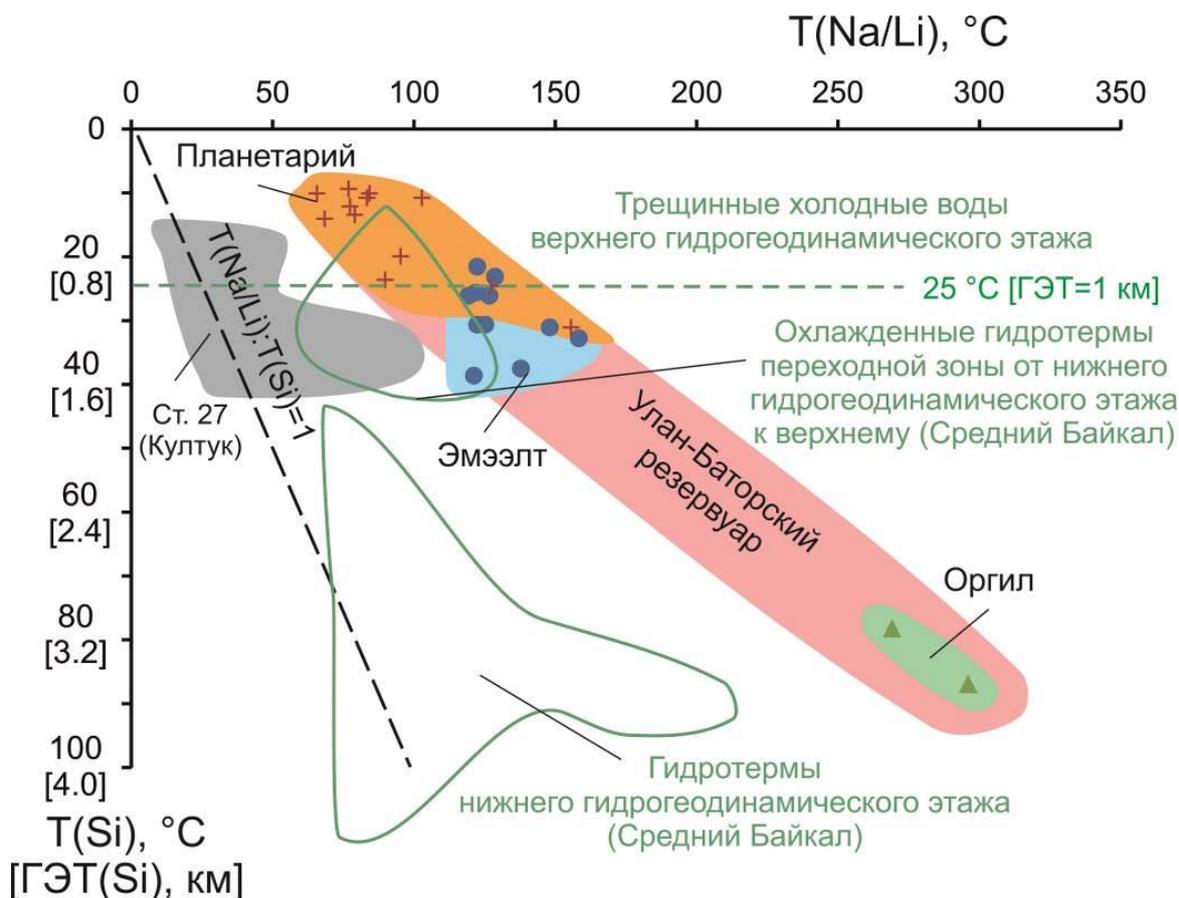
Реакция с обогащением подземных вод литием идет, если 1) в области дренажа подземных вод присутствуют глинистые минералы и 2) на глину воздействует протон водорода, т.е. кислотность среды возрастает. Чем кислее среда (ниже pH), тем больше концентрация протона в среде, тем интенсивнее идет реакция ионного обмена (больше выход Li в воду).

На диаграмме T(Si) – T(Na/Li) (рис. 4) подземные воды Улан-Баторского резервуара

образуют тренд существенно смещенный правее линии равных температур (T(Na/Li): T(Si)=1), тогда как подземные воды БРС лежат на этой линии, но частично смещаются и правее ее. В Култукском резервуаре находятся только холодные подземные воды, на восточном побережье Среднего Байкала – не только холодные, но и горячие.

С одной стороны, фигуративное поле охлажденных гидротерм восточного побережья Среднего Байкала занимает промежуточное положение между фигуративными полями холодных вод Култукского резервуара и фигуративными полями подземных вод станций Планетарий и Эмээлт по температуре трения T(Na/Li) в одном диапазоне температуры растворения T(Si). С другой стороны, фигуративное поле гидротерм восточного побережья Среднего Байкала смещается левее фигуративного поля подземных вод ст. Оргил.

Следовательно, минеральные воды ст. Оргил, в сущности, имеют связь с источником термальных вод Улан-Баторского резервуара. Прямолинейный тренд подземных вод Улан-Баторского резервуара может рассматриваться в последовательности нарастания активизации с повышением температуры трения в плоскостях активных разломов. Гидрогеохимические характеристики составляют ряд нарастания активизации от слабых гидрогеодинамических процессов с холодными водами Култукского резервуара через более продвинутые процессы с холодными и термальными водами резервуара побережья Среднего Байкала до максимального выражения гидрогеодинамических процессов с холодными и термальными водами Улан-Баторского резервуара.



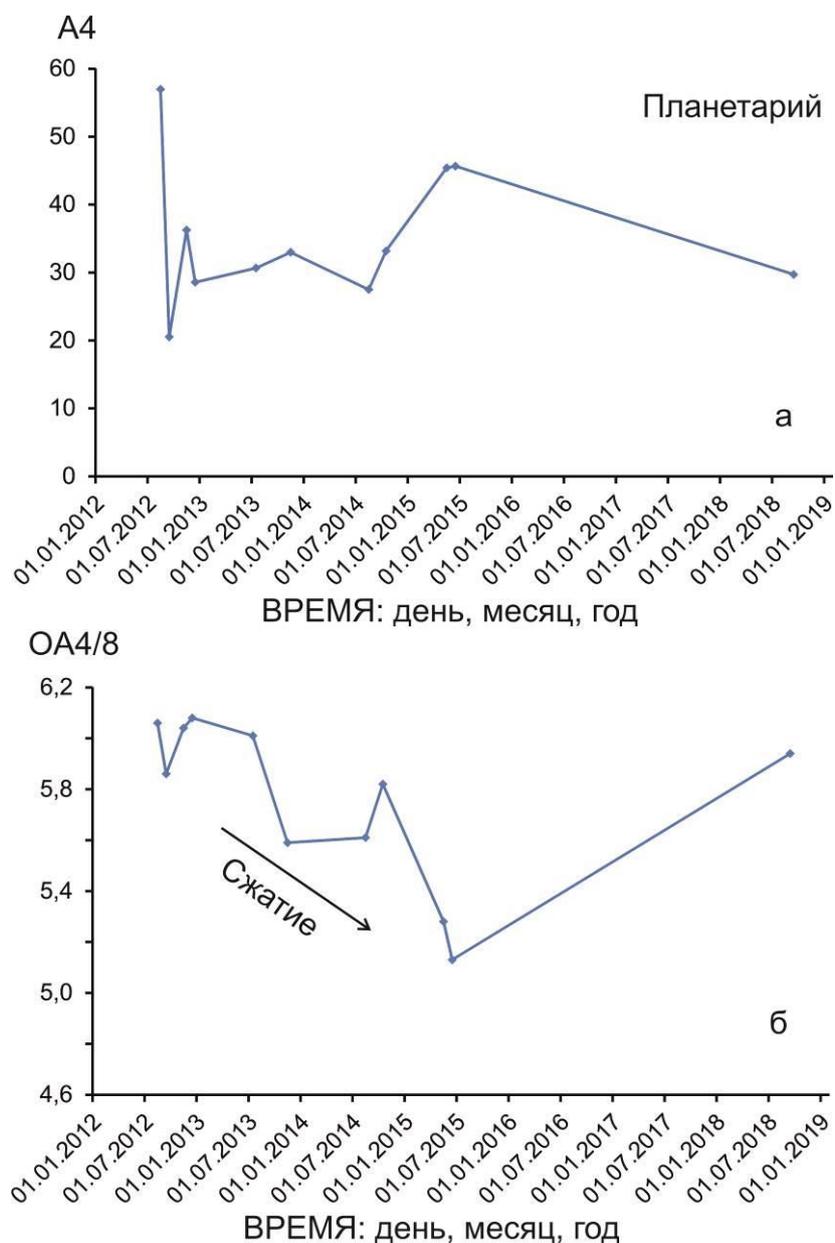
**Рис. 4.** Диаграмма  $T(Si) - T(Na/Li)$ . Условные обозначения см. рис. 2. Фигуративные поля подземных вод БРС приведены по данным из работы (Рассказов и др., 2023).

**Fig. 4.** Diagram  $T(Si) - T(Na/Li)$ . Symbols are as in Fig. 2. Data fields of groundwater in the BRS are given after (Rasskazov et al., 2023).

*Временные вариации гидрогеодинамических параметров ст. Планетарий*

А4 ст. Планетарий имеет максимальное значение (57 е.а.) в начальной точке опробования 2012 г., но резко опускается в 2 раза и выдерживается на уровне около 30 е.а. до 2014 г., но затем, в 2015 г., возрастает до 45 е.а. Единичное измерение в 2018 г. показывает значение на уровне 2012–2014 гг. На ст.

Планетарий ОА4/8 в 2012–2015 гг. последовательно снижается от 6.0 до 5.2. Единичное измерение 2018 г. показывает относительное возрастание этого параметра. Такой характер смены ОА4/8 свидетельствует о последовательном усилении сжатия коры, затрудняющем циркуляцию подземных вод под ст. Планетарий в 2012–2015 гг., и о последующем нивелировании этого эффекта к 2018 г. (рис. 5).

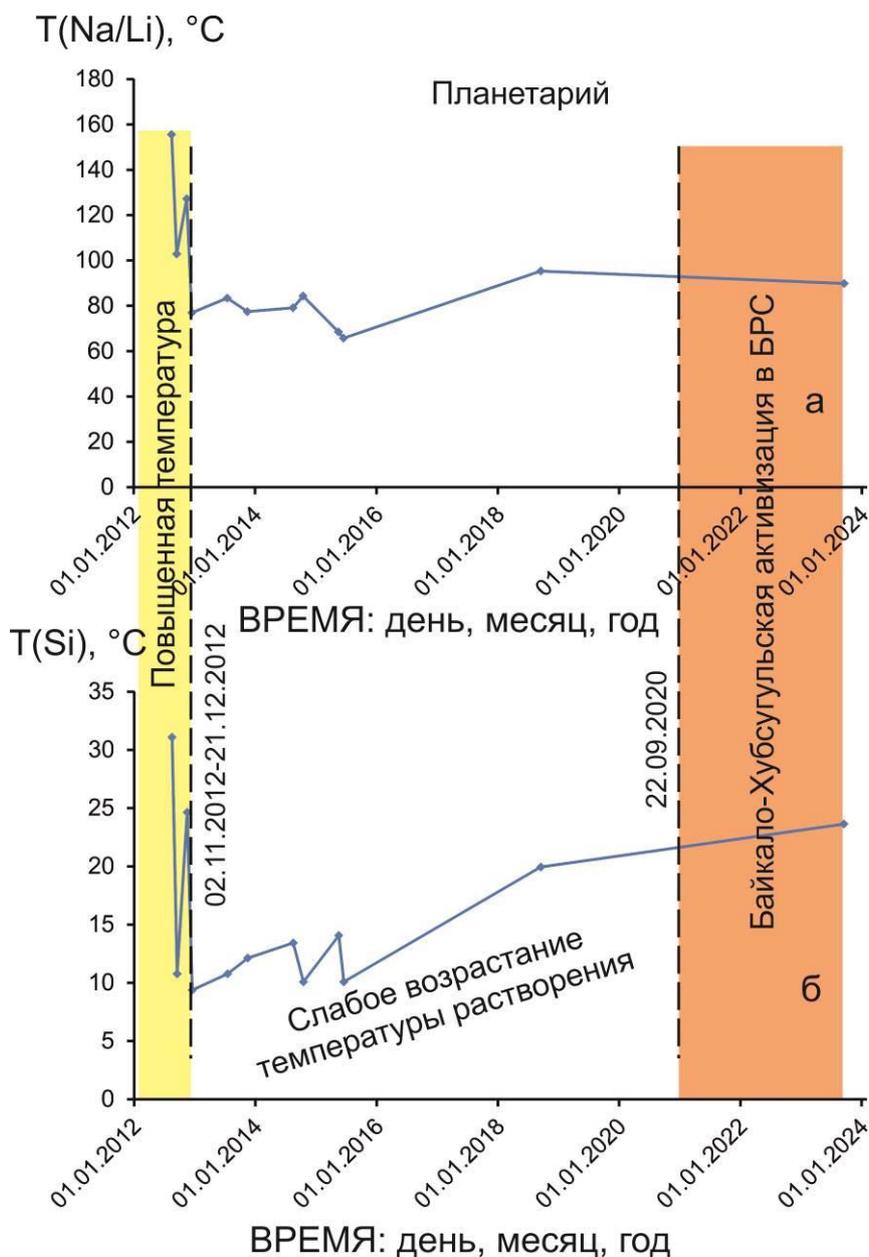


**Рис. 5.** Временные вариации А4 (а) и ОА4/8 (б) в подземных водах ст. Планетарий в 2012–2018 гг.

**Fig. 5.** Temporal variations of A4 (a) and AR4/8 (b) in groundwater at station Planetarium in 2012–2018.

В 2012 г. рассчитывается повышенная температура растворения  $T(\text{Si})$  подземных вод ст. Планетарий (до  $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). В конце 2012 г. (02–21 декабря)  $T(\text{Si})$  снижается и остается на уровне  $10\text{--}14\text{ }^{\circ}\text{C}$  до 2015 г. Единичные пробы 2018 и 2023 гг. показывают возраста-

ние  $T(\text{Si})$  подземных вод до интервала  $20\text{--}22\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура трения  $T(\text{Na/Li})$  в общем меняется с течением времени в соответствии с вариациями  $T(\text{Si})$ , но с более высокими значениями.



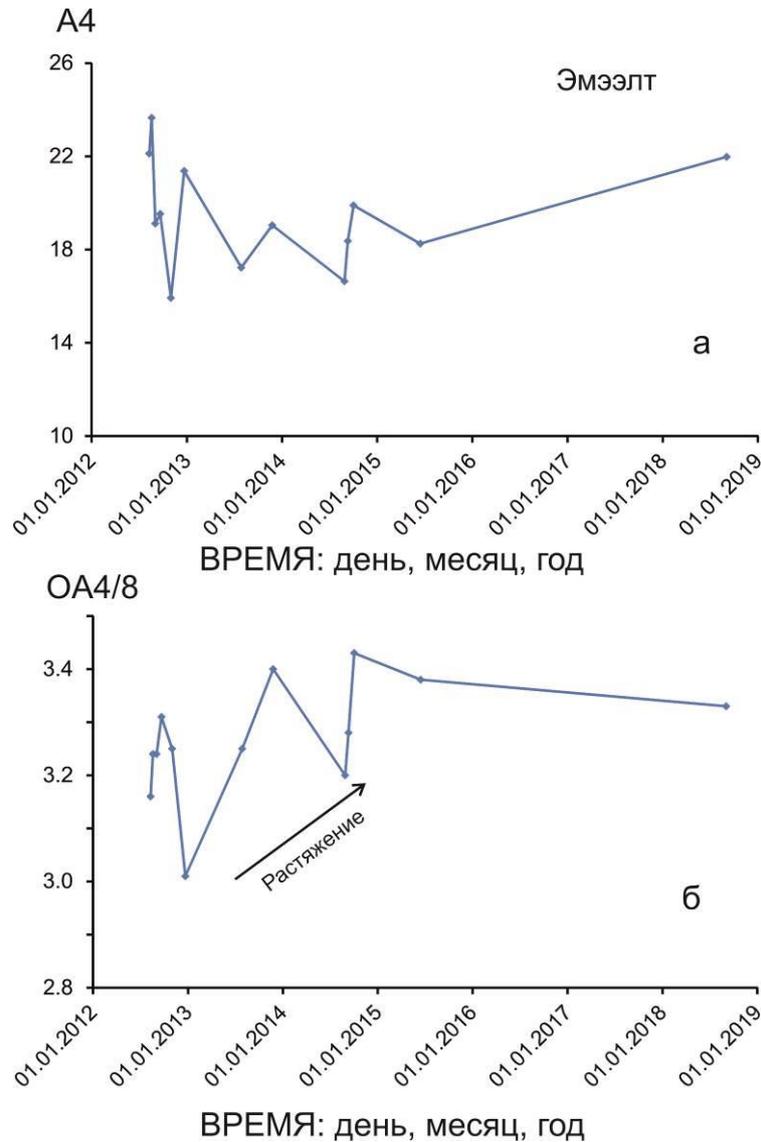
**Рис. 6.** Временные вариации T(Na/Li) (а) и T(Si) (б) в подземных водах ст. Планетарий в 2012–2023 гг.

**Fig. 6.** Temporal variations of T(Na/Li) (a) and T(Si) (b) in groundwater at station Planetary in 2012–2023.

*Временные вариации гидрогеодинамических параметров ст. Эмээлт*

В 2012 г. в резервуаре подземных вод ст. Эмээлт определяется повышенная концентрация изотопа  $^{234}\text{U}$  (А4), но в дальнейшем

его концентрация снижается. Значения ОА4/8 в 2012–2015 гг. возрастают и в 2018 г. находятся на высоком уровне. Возрастание ОА4/8 свидетельствует об усилении растяжения в резервуаре подземных вод под ст. Эмээлт (рис. 7).

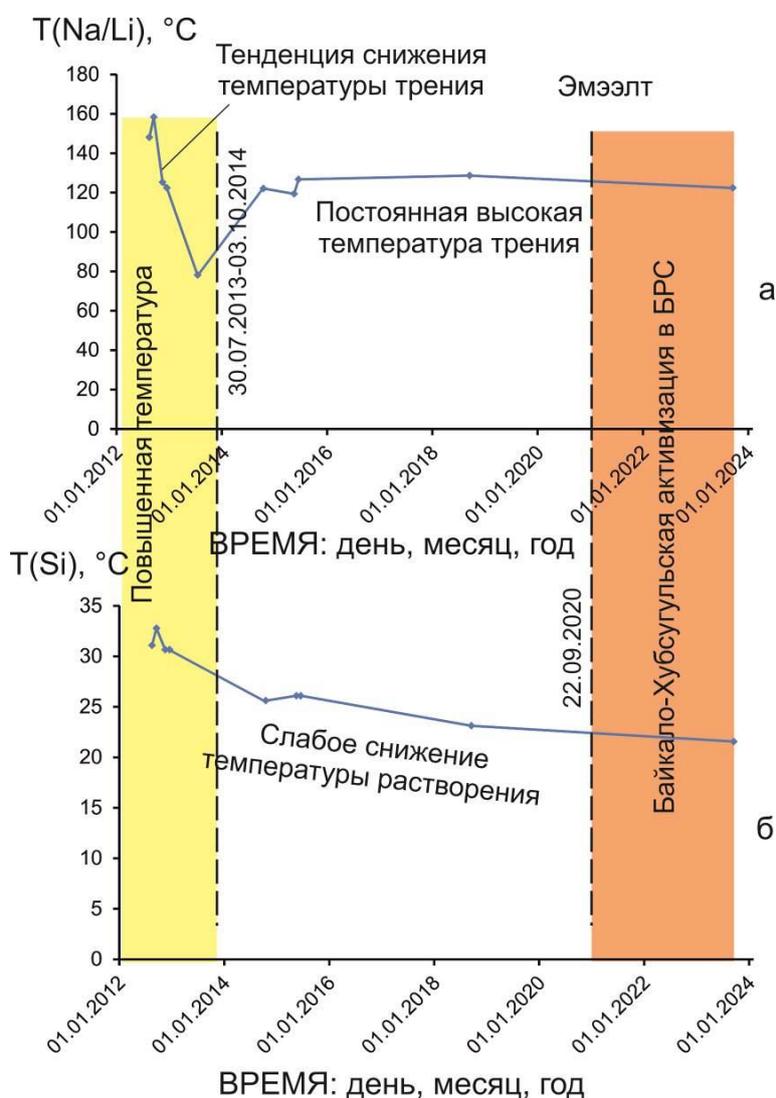


**Рис. 7.** Временные вариации А4 (а) и ОА4/8 (б) в подземных водах ст. Эмээлт в 2012–2018 гг.

**Fig. 7.** Temporal variations of A4 (a) and AR4/8 (b) in groundwater at station Emeelt in 2012–2018.

В 2012 г. в резервуаре подземных вод под ст. Эмээлт рассчитывается повышенная температура растворения  $T(\text{Si})$  (30–33 °C), которая постепенно снижается к 2018–2023 гг. приблизительно на 10 °C. Температура трения  $T(\text{Na/Li})$  в интервале 2012–2014 гг.

быстро падает от 158 до 78 °C. Затем, в интервале с 30 июля 2013 г. до 03 октября 2014 г.,  $T(\text{Na/Li})$  увеличивается до 120 °C и выдерживается на этом уровне в 2018 и 2023 гг.



**Рис. 8.** Временные вариации  $T(\text{Na/Li})$  (а) и  $T(\text{Si})$  (б) в подземных водах ст. Эмээлт в 2012–2023 гг.

**Fig. 8.** Temporal variations of  $T(\text{Na/Li})$  (a) and  $T(\text{Si})$  (b) in groundwater of station Emeelt in 2012–2023.

### Обсуждение

Вариации гидрогеодинамических параметров подземных вод Улан-Баторского резервуара, по аналогии с вариациями параметров Култукского резервуара подземных вод БРС, можно связать с подготовкой и реализацией землетрясений в районе Улан-Батора. Разработка подходов к такой интерпретации данных требует более детального опробования станций (по меньшей мере, один раз в 2 недели). Тем не менее, полученные данные по трем станциям Улан-Баторского резервуара подземных вод дают представление об общих закономерностях химической гидрогеодинамики в Улан-Баторском резервуаре.

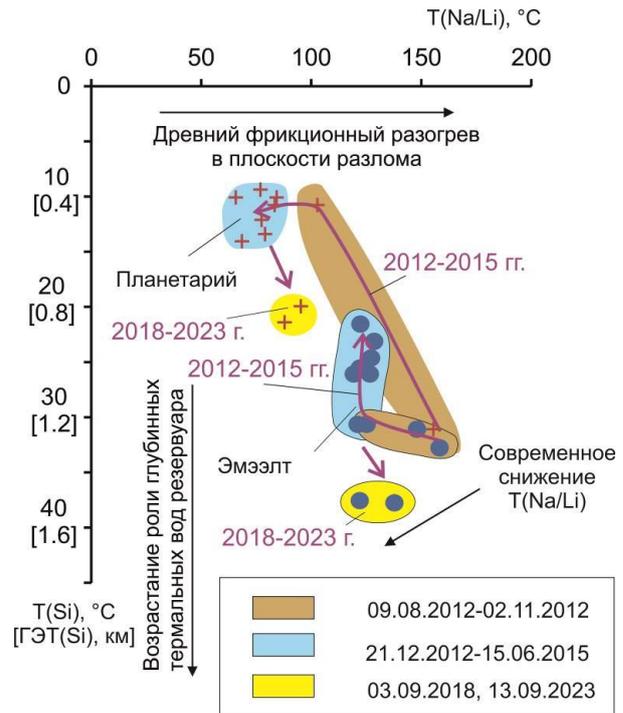
Прежде всего, обращает на себя внимание существенное различие подземных вод резервуаров Улан-Батора и побережья Байкала и по изотопам U, и по сочетанию термфильных элементов Si, Na и Li. Более высокие значения  $\text{OA}_{4/8}$  подземных вод Улан-Батора свидетельствуют о более долгом (или более эффективном) аддитивном накоплении изотопа  $^{234}\text{U}$  в подземных водах Центральной Монголии, чем в подземных водах побережья Байкала. В условиях доминирующего растяжения коры (в структуре Южно-Байкальской впадины) потенциал создания неравновесного эффекта U ниже, чем в условиях отсутствия ярко выраженных структур растяжения (в структуре Центральной Монголии). Высокие косейсмиче-

ские значения ОА4/8 (5–6) подземных вод установлены, например, в зоне разломов Сан-Андреас (Finkel, 1981). Возрастание ОА4/8 (см. рис. 2) с трех-компонентным выражением состава подземных вод в Улан-Баторском резервуаре (см. рис. 3) еще требует расшифровки конкретных способов генерации этих компонентов. Здесь отметим, что величина ОА4/8 подземных вод может служить одним из косвенных показателей степени нарушенности микротрещинами коры в резервуарах подземных вод и, следовательно, может отражать сейсмический потенциал территории в связи с современной геодинамической обстановкой. Высокие значения ОА4/8 и А4 в подземных водах Центральной Монголии могут нести также древнюю возрастную характеристику. В возрастании ОА4/8 подземных вод возможно участие процессов, не связанных с тектонической генерацией микротрещин.

Независимо от изотопного состава U, совокупность термофильных элементов Si, Na и Li также свидетельствует о смещении температурных косейсмических характеристик трения в подземных водах Улан-Баторского резервуара в область более высоких температур по сравнению с температурами холодных и термальных вод побережья Байкала (см. рис. 4). Сходные температуры кремниевого и Na–Li геотермометров отвечают полю температур резервуара, не нарушенного сейсмогенными подвижками. Эти условия частично соблюдаются в условиях растяжения коры под побережьем Байкала. Развитие плоскостей разломов с активными смещениями, сопровождающимися образованием глинки трения, ведет к возрастанию T(Na/Li). Породы резервуара улан-баторских подземных вод были подвержены существенным деформациям с генерацией глинки трения и ростом Na/Li температуры.

В 2012–2018 гг. на станциях Эмээлт и Планетарий T(Na/Li) не возрастает, а снижается (рис. 9). Если рассматривать это изменение как основную тенденцию настоящего времени, можно предположить, что T(Na/Li) аномалия, сгенерированная глиной трения, образовалась на предшествующем деформационном этапе. Продолжится ли эта тенденция, покажет время. Сейчас она восприни-

мается как показатель относительного снижения роли сейсмогенерирующих деформаций.



**Рис. 9.** Диаграмма T(Si) – T(Na/Li). Показаны временные тренды температур растворения T(Si) и температур трения T(Na/Li) в подземных водах. Глубина резервуара оценивается по глубинному эквиваленту температуры (ГЭТ) Монголо-Байкальского региона 25 °С на 1 км (Голубев, 2007).

**Fig. 9.** Diagram T(Si) vs T(Na/Li). Timing trends of dissolution temperatures T(Si) and friction temperatures T(Na/Li) in groundwater are shown. The depth of the reservoir is estimated from depth equivalent temperature (DET) for the Mongolian-Baikals region of 25 °C per 1 km (Golubev, 2007).

Снижение ОА4/8 в подземных водах ст. Эмээлт в 2012–2015 гг. прямо противоположно возрастанию ОА4/8 в подземных водах ст. Планетарий в это же время (см. рис. 5б и 7б). Одновременно с усилением сжатия в зоне ССЗ разлома Эмээлт в зоне субширотного разлома Скай развивается растяжение. Такие соотношения ОА4/8 свидетельствуют о сопряженном характере деформаций в разломах Скай и Эмээлт. Нарастание сжатия согласуется с общим последовательным снижением T(Si) ст. Эмээлт, свидетельствующем об уменьшении глубины подъема подземных вод резервуара. С 2012 г. до 2023

г. глубина уменьшается с 1.3 км до 0.8 км. На ст. Планетарий в 2012 г. T(Si) резко снижается (источник в резервуаре смещается с глубины около 1.3 км до глубины 0.4 км). В дальнейшем температура возрастает (источник в резервуаре смещается на глубину около 0.8 км). В отличие от зоны разлома Эмээлт, имеющей однонаправленный характер развития по T(Si), зона разлома Скай имеет импульсный характер развития, который отражается не только в смене направленности изменений T(Si) ст. Планетарий, но и в смене направленности T(Na/Li) (см. рис. 6а,б). Между тем, ст. Эмээлт, дает отклик понижения значений T(Na/Li) в 2012–2013 гг. и, таким образом, отражает общую реакцию обеих станций по этой температурной характеристике.

### **Заключение**

Выполненные сравнительные гидрогеохимические исследования подземных вод Улан-Баторского резервуара и резервуаров побережья Байкала свидетельствуют о существенном различии гидрогеодинамических процессов этих территорий. В основе таких различий, скорее всего, лежит разный возраст генерации U-изотопных и Si–Na–Li-температурных характеристик резервуаров подземных вод; более ранней – в Центральной Монголии и более поздней – на побережье Байкала. Ранняя генерация улан-баторских гидрогеодинамических аномалий привела к тому, что на современном этапе эти аномалии с течением времени снижаются, тогда как байкальские гидрогеодинамические аномалии усиливаются.

В процессе мониторинга на станциях Эмээлт и Планетарий установлена смена направленности изменения гидрогеодинамических параметров от интервала 2012 г. – начала 2013 г. к интервалу 2013–2023 гг. Какие-либо гидрогеодинамические отклики на Байкало-Хубсугульскую сейсмическую активизацию 2020–2023 гг. в подземных водах Улан-Баторского резервуара подземных вод не обнаружены.

### **Благодарности**

Авторы благодарят К.Ж. Семинского за представленную иллюстрацию активных

разломов и распределения эпицентров землетрясений в районе Улан-Батора. Проба минеральных вод санатория Оргил в 2014 г. была отобрана А.И. Оргильяновым. Состав подземных вод анализировался на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500ce в ЦКП «Ультрамикроанализ» (ЛИН СО РАН, г. Иркутск).

### **Литература**

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

Ильясова А.М., Снопков С.В. Косейсмические вариации термофильного элемента Si подземных вод на западном побережье оз. Байкал // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 72–105. doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.72

Рассказов С.В., Ильясова А.М., Борняков С.А., Чебыкин Е.П. Горячинская активизация Ямбуйской зоны трансенсии в 2013–2015 гг.: Косейсмическая химическая гидрогеодинамика подземных вод на ЮВ побережье Среднего Байкала // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 4.

Семинский К.Ж., Бобров А.А., Дэмбэрэл С. Соотношение радоновой и тектонической активности разломов Центральной Монголии // Доклады академии наук. 2019. Т. 487, № 5. С. 60–64.

Семинский К.Ж., Дэмбэрэл С., Бобров А.А., Мунгунсурен Д., Борняков С.А., Турутанов Е.Х. Стиль современного разломообразования в окрестностях г. Улан-Батора (Монголия) // География и природные ресурсы. 2016. № 6. С. 76–80. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(76-80)

Фор Г. Основы изотопной геологии // М.: Мир (перевод с англ.), 1989. 590 с.

Чалов П.И. Изотопное фракционирование природного урана // Фрунзе: Илим, 1975. 236 с.

Чалов П.И., Тузова Т.В., Алехина В.М. Изотопные параметры вод разломов земной коры в сейсмически активной зоне // Фрунзе: Илим, 1980. 105 с.

Чалов П.И., Киселев Г.П., Тихонов А.И., Васильев И.А., Светличная Н.А. О пространственной корреляции аномального избытка  $^{234}\text{U}$  в подземных водах и ртутно-сурмяного оруденения телетермального типа // Доклады академии наук СССР. 1990. С. 580–583.

Чебыкин Е.П., Рассказов С.В. Сравнительные исследования косейсмических изменений концентраций термофильных элементов Si, Na и Li в подземных водах ст. 27 на Култукском полигоне, оз. Байкал // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 124–140. DOI 10.26516/2541-9641.2023.1.124

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.

Чердынцев В.В. Уран-234 // М.: Атомиздат, 1969. 308 с.

Чердынцев В.В. Ядерная вулканология // М.: Наука, 1973. 208 с.

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

Finkel R.C. Uranium concentrations and  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  activity ratios in fault-associated groundwater as possible earthquake precursors // Geophysical Research Letters. 1981. Vol. 8, No. 5. P. 453–456.

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

Ikari M. J., Saffer D. M., Marone C. Frictional and hydrologic properties of clay-rich fault gouge // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. P. B05409. doi:10.1029/2008JB006089.

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

Kocserha I., Gömze L.A. Friction properties of clay compounds // Applied Clay Science. 2010. Vol. 48. P. 425–430.

Miroshnichenko A.I., Radziminovich N.A., Lukhnev A.V., Zuev F.L., Demberel S., Erdenezul D., Ulziibat M. First results of GPS measurements on the Ulaanbaatar geodynamic testing area // Russian Geology and Geophysics. 2018. V. 59. P. 1049–1059.

Moore D. E., Lockner D.A. Friction of the smectite clay montmorillonite: A review and interpretation of data / The Seismogenic Zone of Subduction Thrust Faults, MARGINS Theor. Exp. Earth Sci. Ser., vol. 2, edited by T. H. Dixon and J. C. Moore,

Columbia Univ. Press, New York. 2007. P. 317–345.

Sanjuan B., Millot R., Brach M., Asmundsson R., Giroud N. Use of two new Na/Li geothermometric relationships for geothermal fluids in volcanic environments // Chemical Geology. 2014. V. 389. P. 60–81.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.09.011>

Tembe S., Lockner D.A., Wong T.-F. Effect of clay content and mineralogy on frictional sliding behavior of simulated gouges: Binary and ternary mixtures of quartz, illite, and montmorillonite // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. P. B03416. doi:10.1029/2009JB006383.

## References

Chalov P.I., 1975. Isotopic fractionation of natural uranium // Frunze: Ilim, 236 p.

Chalov P.I., Tuzova T.V., Alekhina V.M., 1980. Isotopic parameters of water from faults of the Earth's crust in a seismically active zone. Ilim, Frunze, 105 p.

Chalov P.I., Kiselev G.P., Tikhonov A.I., Vasiliev I.A., Svetlichnaya N.A., 1990. On the spatial correlation of anomalous excess  $^{234}\text{U}$  in groundwater and mercury mineralization of telethermal type // Doklady Akademii Nauk USSR, 580–583.

Chebykin E.P., Rasskazov S.V. Comparative studies of coseismic changes in concentrations of thermophilic elements Si, Na, and Li in groundwaters from station 27 in the Kultuk polygon, Lake Baikal // Geology and Environment. 2023. Vol. 3, No. 1.

Chebykin E.P., Goldberg E.L., Kulikova N.S., Zhuchenko N.A., Stepanova O.G., Malopevnaya Yu.A., 2007. Method of determination of the isotopic composition of authigenic uranium in the bottom sediments of the lake Baikal // Geology and Geophysics. Vol. 48, No. 6. P. 604–616.

Cherdyntsev V.V. Uranium-234. Atomizdat Press, Moscow, 1969. 308 p.

Cherdyntsev V.V. Nuclear volcanology. Science, Moscow, 1973. 208 p.

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

Faure G. Principles of isotope geology // Mir Publisher (translated from English), Moscow, 1989. 590 p.

Ilyasova A.M., Snopkov S.V. Coseismic variations of the thermophilic element Si of groundwater on the western coast of Lake Baikal // Geology and Environment. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 72–105. doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.72

Rasskazov S.V., Pyasova A.M., Bornyakov S.A., Chebykin E.P. Goryachinsk reactivation of the Yambuy transtension zone in 2013–2015: Coseismic chemical hydrogeodynamics of groundwater on the southeastern coast of Middle Baikal // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 4.

Seminsky K.Zh., Bobrov A.A., Dembarrel S. Correlation of radon and tectonic activity of faults in

Central Mongolia // *Reports of the Academy of Sciences*. 2019. T. 487, no. 5. pp. 60–64.

Seminsky K.Zh., Demberel S., Bobrov A.A., Mungunsuren D., Bornyakov S.A., Turutanov E.Kh. Style of modern faulting in the vicinity of Ulaanbaatar (Mongolia) // *Geography and Natural resources*. 2016. No. 6. P. 76–80. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(76-80)

**Рассказов Сергей Васильевич,**  
доктор геолого-минералогических наук, профессор,

664025 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,

664025 Irkutsk, Lenin st., 3,  
Irkutsk State University, Faculty of Geology,  
Head of Dynamic Geology Char,  
664033 Irkutsk, Lermontov st., 128,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
Head of Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies,

tel.: (3952) 51–16–59,

email: rassk@crust.irk.ru.

**Ильясова Айгуль Маратовна,**

кандидат геолого-минералогических наук,

664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

Институт земной коры СО РАН,

email: ila@crust.irk.ru.

**Pyasova Aigul Maratovna,**  
candidate of geological and mineralogical sciences,

664033 Irkutsk, Lermontov st., 128,

Institute of the Earth's Crust SB RAS,

Leading engineer,

email: ila@crust.irk.ru.

**Борняков Сергей Александрович,**

кандидат геолого-минералогических наук,

664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

Институт земной коры СО РАН,

ведущий научный сотрудник,

email: bornyak@crust.irk.ru.

**Bornyakov Sergey Alexandrovich,**  
candidate of geological and mineralogical sciences,

664033 Irkutsk, Lermontov st., 128,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
Leading Researcher,  
email: bornyak@crust.irk.ru.

**Батсайхан Цэрэнпил,**

кандидат геолого-минералогических наук,  
Институт астрономии и геофизики МАН,  
Улан-Батор, Монголия,  
научный сотрудник,  
email: batsaihan523@yahoo.com.

**Batsaihan Tserenpil,**  
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,

Institute of Astronomy and Geophysics MAN,  
Ulaanbaatar, Mongolia,  
Researcher,

email: batsaihan523@yahoo.com.

**Дэмбэрэл Содномсамбуу,**

доктор наук, академик МАН,  
управляющий директор Института астрономии и геофизики Монгольской академии наук,  
email: demberel@iag.ac.mn.

**Demberel Sodnomsambuу,**

Doctor of Science, the Academician of MAS,  
Managing Director at Institute of Astronomy,  
and Geophysics of Mongolian Academy of Sciences,

email: demberel@iag.ac.mn.

**Чебыкин Евгений Павлович,**

кандидат химических наук,

664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

Институт земной коры СО РАН,

664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,

Лимнологический институт СО РАН,

старший научный сотрудник,

email: epcheb@yandex.ru.

**Chebykin Evgeny Pavlovich,**

Candidate of Chemical Sciences,

664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128,

Institute of the Earth's Crust SB RAS,

664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3,

Limnological Institute SB RAS,

Senior Researcher,

email: epcheb@yandex.ru.