

ГИДРОГЕОХИМИЯ

УДК 550.42:546.21+632.126

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2026.2.215>

EDN: FTAWLX

Концентрации лития в подземных водах Тункинской долины: от вмещающих сейсмогенных милонитов к вмещающим Li –гранитам с литиегенным ^3He

С.В. Рассказов^{1,2}, Е.П. Чебыкин¹, А.М. Ильясова¹, И.С. Чувашова^{1,2}, С.В. Снопков^{2,3}¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия³Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Концентрация Li подземных вод Тункинской долины меняется на 5 порядков. Низкой концентрацией Li характеризуются подземные воды сейсмогенных милонитов Главного Саянского разлома, высокой – подземные воды Li-гранитов. Возрастание температуры трения от 9 до 116 °С в низко-Li резервуаре подземных вод сейсмоактивного разлома обеспечивает обменные реакции глинистых минералов и цеолитов с возрастанием концентрации Li и снижением отношения Na/Li. Температурная зависимость отношения Na/Li в высоко-Li резервуаре подземных вод из Li-гранитов сочетается с растворением Li вместе с Rb и удалением Na из раствора. Предполагается, что в высоко-Li резервуаре подземных вод бомбардировкой нейтронами обеспечивается генерация ^3He с возрастанием $^3\text{He}/^4\text{He}$ до значения 1.1×10^{-5} , аномального для коровых резервуаров подземных вод.

Ключевые слова: подземные воды, гидрогеохимия, землетрясения, Байкал

Lithium Concentration in Groundwaters of the Tunka Valley: From Host Seismogenic Mylonites to Host Li-Granites with Lithium-Induced ^3He Generation

S.V. Rasskazov^{1,2}, E.P. Chebykin¹, A.M. Ilyasova¹, I.S. Chuvashova^{1,2}, S.V. Snopkov^{2,3}¹Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia³Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The Li concentration in groundwater from the Tunka Valley varies by five orders of magnitude. Low Li concentration is characteristic of groundwater from seismogenic mylonites of the Main Sayan Fault, high Li concentration is specific for groundwater from Li-granites. An increase in friction temperature from 9 to 116 °C in the low-Li groundwater reservoir of the seismically active fault facilitates exchange reactions of clay minerals and zeolites, increasing Li concentration and decreasing the Na/Li ratio. The temperature dependence of the Na/Li ratio in a high-Li groundwater reservoir from Li-granites is associated with the dissolution of Li (along with Rb) and the removal of Na. It is suggested that neutron bombardment in the high-Li groundwater reservoir provides the generation of ^3He with increasing $^3\text{He}/^4\text{He}$ to a value of 1.1×10^{-5} , anomalous for crustal groundwater reservoirs.

Keywords: groundwater, hydrogeochemistry, earthquakes, Baikal

Введение

Литий – щелочной металл, имеющий стратегическое значение для развития общества. Достаточно сказать, что без литиевых батарей немыслимо развитие современного транспорта. Впрочем, литий имеет широкое применение в различных областях современного производства: в авиастроении, атомной энергетике, керамическом производстве и др. Промышленными источниками лития могут быть рассолы (Михеева, Егоров, 2022), но с точки зрения экологии добычи могут представлять интерес и обогащенные литием менее минерализованные подземные воды.

В терминах химической гидрогеодинамики подземные воды Тункинской долины Байкальской рифтовой системы (БРС) разделяются, прежде всего, по отношению активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (ОА4/8), поскольку возрастание этого параметра отражает усиление циркуляции подземных вод при растяжении микротрещин, а его уменьшение, наоборот, затруднение циркуляции при их сжатии. Концентрация лития в подземных водах также рассматривается как один из ключевых параметров химической гидрогеодинамики. При сейсмогенных подвижках в активном разломе возрастает температура трения $T(\text{Na}/\text{Li})$ (Rasskazov et al., 2020; Чебыкин, Рассказов, 2023; Чебыкин, Чувашова, 2023; Рассказов и др., 2024а, 2025). При общем анализе распределения лития в подземных водах территории были выявлены изменения концентрации лития на пять порядков. Возникает вопрос – контролируется ли весь диапазон концентрации лития меняющейся температурой трения сейсмоактивного разлома или вмешиваются другие факторы, определяющие распределение этого элемента в подземных водах? Определение в подземных водах Тункинской долины высокой концентрации Li требует оценки возможной литиегенной генерации ^3He и создает предпосылки объяснения феномена отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ (1.1×10^{-5}) – самого высокого гелиевого изотопного отношения в подземных водах Азии (Polyak, 2003).

Цель настоящей работы – выполнить сравнительное исследование компонентов с низкой и высокой концентрациями Li в подземных водах Тункинской долины в связи со

сменой вмещающих пород от сейсмогенных милонитов к литиевым гранитам.

Опробование, хранение и аналитические исследования подземных вод

Систематические работы по определению химического состава подземных вод Тункинской долины БРС проводятся с 2012 г. для разработки гидрогеохимических подходов к прогнозу землетрясений. Для определения элементного состава природная вода фильтруется непосредственно при отборе на месте опробования через шприц-насадку с диаметром пор 0.45 мкм (Minisart 16555-K, ацетат целлюлозы, Sartorius Stedim Biotech GmbH, Германия) в предварительно взвешенную 2 мл полипропиленовую пробирку Эппендорфа (Axygen Scientific, Cat.-No. MCT-200-C, США, Мексика), содержащую 40 мкл консерванта. В качестве консерванта используется концентрированная азотная кислота (70%), дважды очищенная с помощью суббойлинговой системы перегонки кислот (Saville DST-1000 sub-boiling distillation system, Япония), в которую добавляется индий (типично 1000 ppb) в качестве внутреннего стандарта. Законсервированная проба хранится в холодильнике.

Аликвота консерванта взвешивается при добавлении в пробирку. Пробирка с отобраным образцом воды взвешивается. Рассчитывается точное содержание азотной кислоты (типично 2 %) и индия (типично 30 ppb). В подготовленном растворе определяются содержания 72 химических элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 (Чебыкин и др., 2012). Изотопы урана определяются после его выделения на ионно-обменной колонке из отдельной пробы воды. Обычно достаточно 400 мл. Детали методики приведены в работах (Чебыкин и др., 2007, 2015).

Результаты

Зональность подземных вод Тункинской долины по изотопному составу U

В Тункинской долине преобладают подземные воды со значениями ОА4/8 1.1–1.9,

имеющие фоновое значение. Локально проявляются повышенные ОА4/8 (в интервале от 2 до 3.7) и пониженные (в интервале от 0.77 до 0.80).

Самая западная аномалия повышенных значений ОА4/8 в Тункинской долине была обнаружена в скважине Мондинской впадины (ст. Мон-D). Подобные местонахождения подземных вод с высоким ОА4/8 (2.0–3.7) образуют Торско-Ургудей-Ниловскую дугу, ограничивающую с востока, юга и запада ядро Тункинской геотермальной аномалии низкого ОА4/8 (менее 1.8). Дуга протягивается от Ниловского отрога и Туранской впадины (станции 97, 129, 53) через северные

отроги Ургудеевского хребта (родники Шармаг и Хонгор-Уула) на юго-восточный (Зактуйский) край Тункинской впадины (ст. 58, 59) и далее в район структурного сочленения Тункинского и Главного Саянского разломов (ст. 121). Вдоль этой трассы располагаются радоновые воды Ниловского отрога (станции NP1–NP3) и пресные холодные воды скважины Кырена (ст. 71), попадающие в интервал высоких значений ОА4/8 (3.0–3.75). На западном окончании Торско-Ургудей-Ниловской дуги находятся подземные воды Аршан-Зактуй-Северо-Торского сегмента с ОА4/8 < 1 (рис. 1).

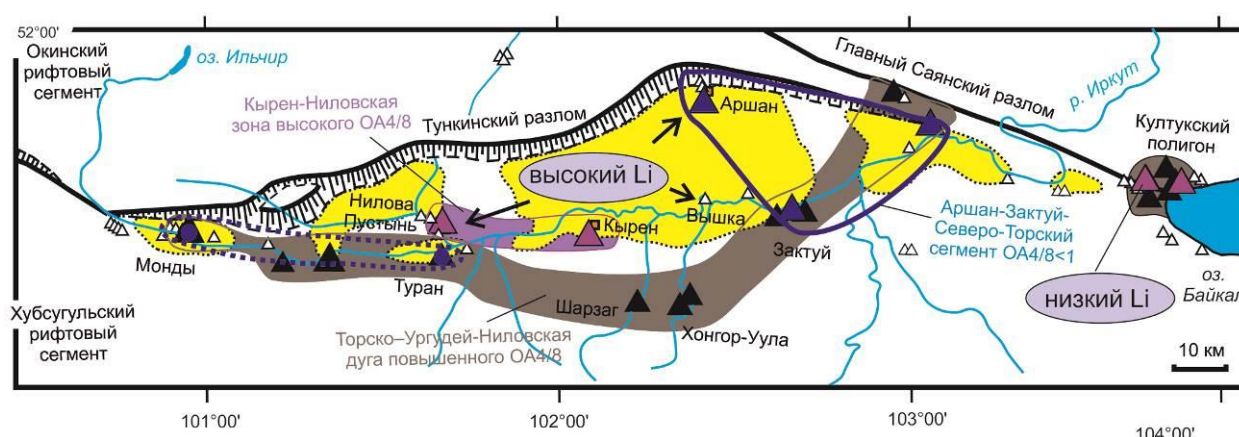


Рис. 1. Схема пространственных соотношений Торско-Ургудей-Ниловской дуги повышенного ОА4/8 (2–3), Кырен-Ниловской зоны высокого ОА4/8 (3.0–3.7) и Аршан-Зактуй-Северо-Торского сегмента низкого ОА4/8 (<1) (Рассказов и др., 2026, в печати). Стрелками показаны три местонахождения подземных вод Тункинской долины с высокой концентрацией Li: Аршан, Вышка и Ниловская Пустынь. Для сопоставления рассматриваются подземные воды с низким содержанием Li из милонитов в зоне Главного Саянского разлома (Култукский полигон).

Fig. 1. Sketch map of spatial relations between the Tory-Urgudey-Nilovka arc of elevated ОА4/8 (2–3), the Kyren-Nilovka zone of high ОА4/8 (3.0–3.7), and the Arshan-Zaktuy-North-Tory segment with low ОА4/8 (<1) (Rasskazov et al., 2026, in press). Arrows indicate three groundwater locations in the Tunka Valley with high Li concentrations: Arshan, Vyshka, and Nilova Pustyn. Groundwater with low Li concentrations from mylonites in the Main Sayan Fault zone (Kultuk area) is considered for comparison.

Отдельная аномалия повышенных и высоких значений ОА4/8 находится на восточном окончании Тункинской долины, соединяющемся с Южно-Байкальской впадиной. ОА4/8 возрастает в структурном сочленении Главного Саянского и Обручевского разлома. Главный Саянский разлом является швом между архейским Шарыжалгайским блоком фундамента Сибирского палеоконтинента и неопротерозой-раннепалеозойским Слюдянским метаморфическим субтеррейном

Хамардабанского террейна. Обручевский разлом проходит по Шарыжалгайскому блоку, отделяя от него фрагмент ложа Южно-Байкальской впадины, опущенного не менее чем на 4 км. В пределах шовной зоны Главного Саянского разлома значения ОА4/8 не превышают 3.29. Наиболее высокое значение определено 04 февраля 2013 г. на ст. 27 Култукского полигона. При продвижении в Шарыжалгайский блок вдоль Обручевского

разлома в роднике ст. 143А выявлены еще более высокие значения ОА4/8 (до 3.68).

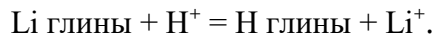
Повышенные значения ОА4/8 (в интервале 2–3) определены в Еловско-Култукской и Ниловско-Мондинской инверсионных секциях. В первой из них обозначены Култукская, Северо-Торская и Зактуйская аномалии ОА4/8, расположенные по периферии этой секции, во второй находятся внутренние Ниловская и Туранская аномалии. Кыренская аномалия с высоким значением ОА4/8 (ст. 71) приходится на южный край Тункинской впадины.

Подземные воды с низкой концентрацией Li: Вариации температуры трения T(Na/Li) в милонитах Главного Саянского разлома

Ключевое значение имеет мониторинг подземных вод ст. 27, для которых определены фоновые составы с наиболее низкой концентрацией Li (0.2 мкг/г) для всей Тункинской долины. Эти подземные воды имеют наиболее высокое изотопное отношение $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ и наиболее низкое изотопное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. В совокупности составов подземных вод из милонитов Главного Саянского разлома подземные воды ст. 27 характеризуют конечный компонент NE (nonequilibrium). Подземные воды других станций Култукского полигона имеют компонентный состав смешения компонента NE с компонентом E (equilibrium), характеризующимся изотопным отношением $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, близким к равновесному (около 1) при наиболее высоком изотопном отношении $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (около 0.709) (Рассказов и др., 2015; Чебыкин, Чувашова, 2023).

Для химической гидрогеодинамики БРС первостепенное значение имеют термофильные элементы Li и Na. Изменениям концентрации Li во времени соответствует изменение температуры трения T(Na/Li). Она возрастает при переходе механической энергии в тепловую вследствие движения в плоскости активного разлома. После тектонической подвижки и разогрева в источнике резервуара подземных вод движение замедляется. Порция тепла перераспределяется циркулирующей водой из активной плоскости разлома в окружающие холодные породы. Новая тектоническая подвижка дает новую порцию тепла.

Эмпирический Na/Li геотермометр (Fouillac et al. 1981) основан на температурной зависимости реакции катионного обмена вод с глинами и цеолитами:



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

Уравнение

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

действительно для концентраций Cl > 0.3 моль/кг. Уравнение

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

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

Li-деформационные отклики проявляются в подземных водах ст. 27 в 2013–2015 гг., перед Северо-Хубсугульским и Голоустным землетрясениями, произошедшими, соответственно, 05 декабря 2014 г. и 05 сентября 2015 г. После этих сейсмических событий, во время Муринской, Голоустной с линейным распределением эпицентров землетрясений и Муринской с такой же линейной сейсмической активизацией в 2015–2020 гг., концентрация Li находится в основном на уровне фона (около 0.2 мкг/дм³). С началом Байкало-Хубсугульской активизации в 2020 г. концентрация Li последовательно возрастает и меняется с большой амплитудой (рис. 2а,б).

В 2021–2025 гг. намечается пять максимумов Li, приходящихся на первые 5 месяцев каждого года (в период с января до мая): I – 26 января 2021 г., II – 12 марта 2022 г., III – 1 мая 2023 г., IV – 05 апреля 2024 г. и V – 16 января 2025 г. После максимума I (26.01.2021) через 9 месяцев образуется минимум Li (22.10.2021), от которого до следующего максимума II проходит около 5 месяцев. После максимума II (12.03.2022) через 8 месяцев образуется минимум Li (13.11.2022),

от которого до следующего максимума III проходит около 6 месяцев. Между максимумами I и III имеется сходство по продолжительности вариационных интервалов,

составляющих около 14 месяцев. В дальнейшем интервалы между максимумами и минимумами сокращаются до 11 и 9 месяцев (рис. 2б).

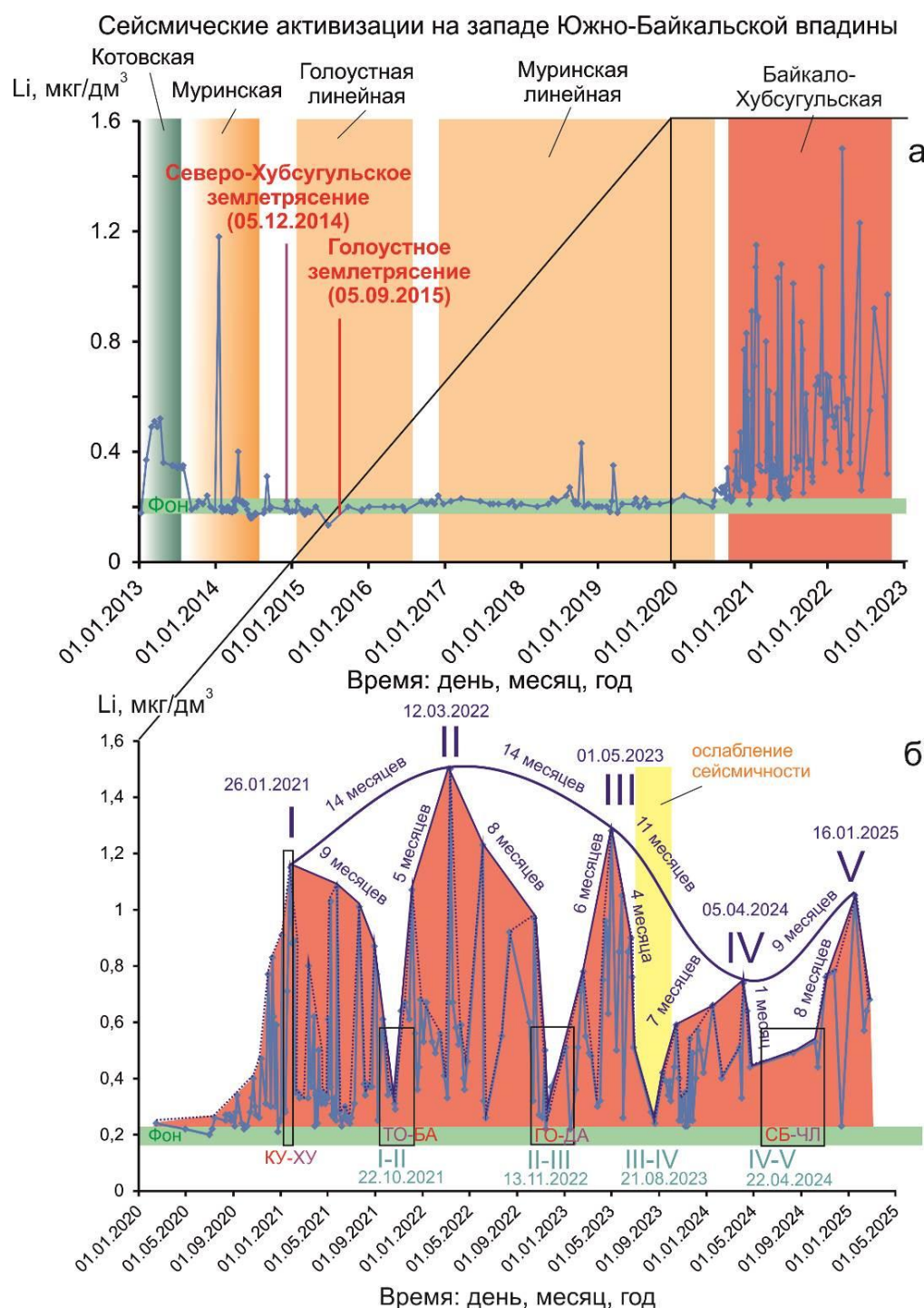


Рис. 2. Диаграммы вариаций концентрации Li в подземных водах ст. 27 Култукского полигона в 2013–2022 гг. (а) и в 2020–2025 гг. (б) (Рассказов и др., 2025). Сейсмическая перестройка КУ–ХУ соответствует максимуму Li, другие сейсмические перестройки (ТО–БА, ГО–ДА, ДА–СБ и СБ–ЧЛ) соответствуют минимумам Li. Отрезки временной шкалы на панели а – 1 год, на панели б – 4 месяца.

Fig. 2. Diagrams of Li variations in groundwaters from station 27 of the Kultuk area during the entire observation time interval of 2013–2022 (а) and in 2020–2025 (б) (Rasskazov et al., 2025). The seismic

reorganization KY–XY corresponds to the maximum of Li, while other seismic reorganizations (TO–BA, GO–DA, DA–CB, and CB–CL) correspond to the minimum of Li. The time scale segments in panel *a* are 1 year, in panel *b* – 4 months.

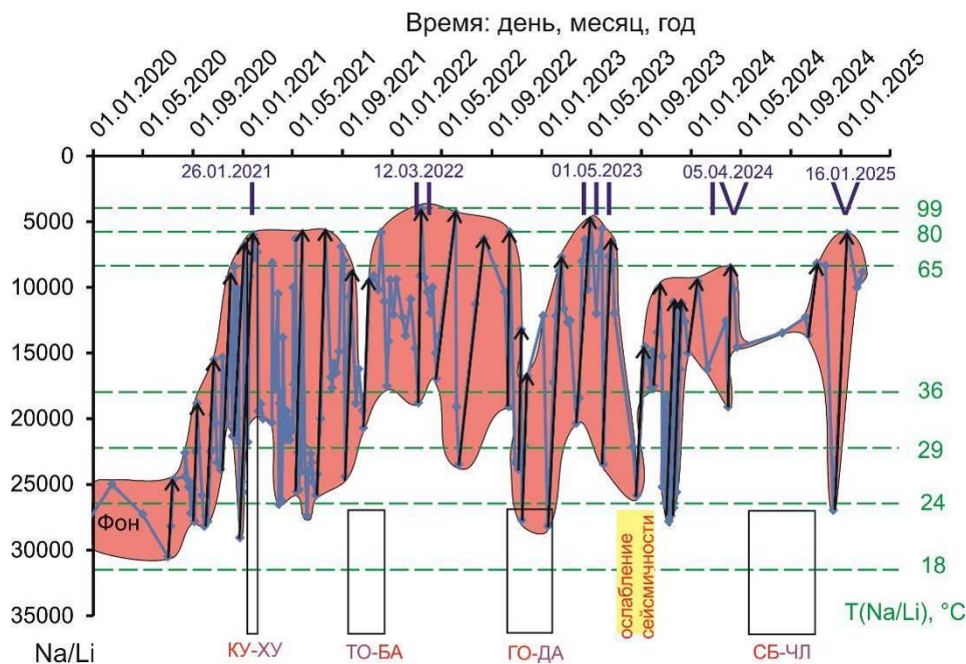


Рис. 3. Диаграмма временных вариаций отношения Na/Li в подземных водах ст. 27 Култукского полигона в 2020–2025 гг. (Рассказов и др., 2025). Зелеными штриховыми линиями показаны температуры, рассчитанные по Na/Li геотермометру (Fouillac et al. 1981). Используется уравнение при $Cl > 11$ г/кг ($Cl > 0.3$ моль/кг). Черными субвертикальными стрелками выделяются диапазоны резкого возрастания температуры трения $T(Na/Li)$. Отрезки временной шкалы – 4 месяца.

Fig. 3. Diagram of temporal Na/Li variations in groundwater at station 27 of the Kultuk area in 2020–2025 (Rasskazov et al., 2025). Green dashed lines show temperatures calculated using the Na/Li geothermometer (Fouillac et al. 1981). The equation is used for $Cl > 11$ g/kg ($Cl > 0.3$ mol/kg). The black sub-vertical arrows highlight the ranges of sharp increases in friction temperature $T(Na/Li)$. Time scale segments are 4 months.

Временные вариации отношения Na/Li в подземных водах ст. 27 характеризуются вариациями, подобными временным вариациям концентрации Li. Максимумам Li соответствуют минимумы отношения Na/Li (рис. 3).

От подземных вод с низкой концентрацией Li к подземным водам с его высокой концентрацией

На диаграммах Rb – Li и Na/Li – Li (рис. 4а,б) фигуративные точки подземных вод ст. 27 расположены в левых частях, т.е. подземные воды этой станции характеризуются наиболее низкой концентрацией Li. На панели *a* тренд Li протягивается параллельно оси абсцисс. Концентрация Li зависит от

температуры, тогда как концентрация Rb не имеет температурной зависимости. На панели *б* ярко выражен тренд снижения отношения Na/Li с возрастанием концентрации Li. По геотермометру (Fouillac et al. 1981) температура возрастает от начала тренда до конца от 9 до 116 °C. Кроме подземных вод ст. 27, тренды снижения отношения Na/Li с возрастанием концентрации Li дают подземные воды других мониторинговых станций Култукского полигона (на рис. 4б, показаны обобщенные тренды составов с концентрациями Li 0.1–1 и 1–10 мкг/дм³). Отчетливый тренд, параллельный тренду подземных вод ст. 27, образуют подземные воды Турана и Монд.

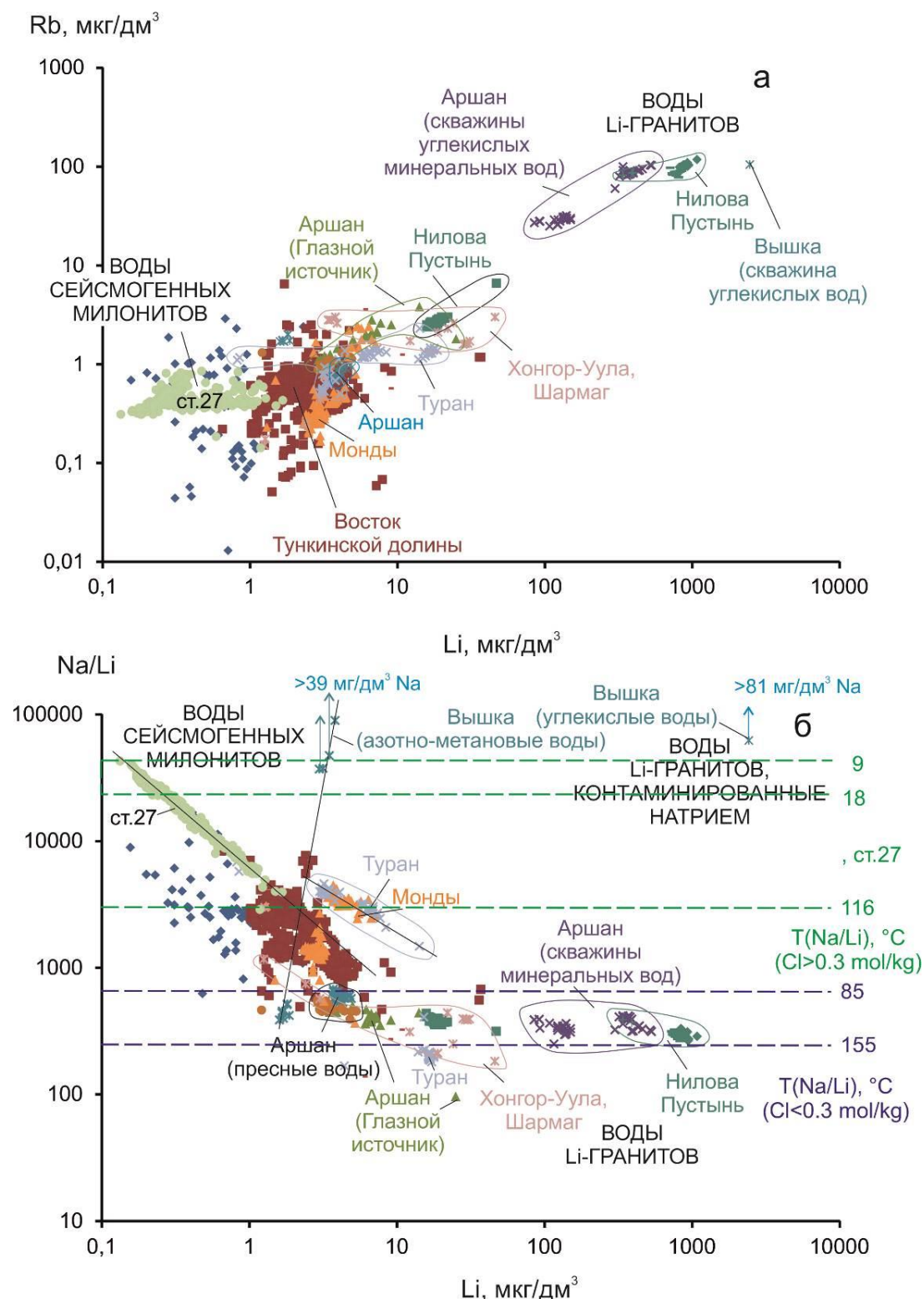


Рис. 4. Диаграммы Rb – Li (а) и Na/Li – Li (б) подземных вод Тункинской долины.

Fig. 4. Diagrams of Rb – Li (а) and Na/Li – Li (б) of groundwater in the Tunka Valley.

В минеральных и термальных водах Тункинской впадины (Аршан, Вышка, Хонгор-Уула, Шармаг), Турана и Ниловой Пустыни концентрация Li возрастает одновременно с возрастанием концентрации Rb (рис. 4а). Это

свидетельствует о контроле растворения обоих компонентов вмещающим гранитом, содержащим высокие концентрации лития и рубидия. Отношение Na/Li в этих подземных водах в целом ниже отношения в подземных

водах из милонитов Главного Саянского разлома и выдерживается приблизительно на одном уровне при варьирующей концентрации Li. Расчет $T(\text{Na/Li})$ с использованием уравнения ($\text{Cl} < 0.3 \text{ mol/kg}$) (Fouillac et al. 1981) дает оценку температуры подземных вод в глубинном резервуаре выше 85°C . Для ст. 2 Аршана (Мальчик) рассчитывается $T(\text{Na/Li})$ до 155°C (Рассказов и др., 2024а).

Особый состав определяется в термальных водах скважин Вышки: в азотно-метановых водах сравнительно низкая концентрация Li ($3.5\text{--}3.9 \text{ мкг/дм}^3$), в углекислых водах – высокая концентрация Li (2500 мкг/дм^3). Термальные воды обеих скважин имеют аномально высокое отношение Na/Li за счет высокой концентрации Na. По-видимому, скважинами был нарушен горизонт осадочного наполнения Тункинской впадины, содержащий NaCl. Соль этого горизонта контаминирует термальные воды обеих скважин.

Обсуждение результатов

Сопоставление концентрации Li в подземных водах Тункинской долины с рудными концентрациями рассолов

С учетом наметившейся тенденции возрастания концентрации Li в минеральных и термальных водах Тункинской долины, сравним концентрации этого компонента с его концентрациями в рассолах, считающимися перспективными для добычи. В Республике Дагестан рассолы с общей минерализацией $62\text{--}202 \text{ г/дм}^3$ имеют $28\text{--}57 \text{ мг/дм}^3$ (на Тарумовской площади $196\text{--}200 \text{ мг/дм}^3$). В рассолах Сибирской платформы (Иркутская область) с общей минерализацией от 162 до 459 г/дм^3 содержится от 30 до 105 мг/дм^3 Li (Пиннекер, 1966; Вахромеев, 2009; Алексеев и др., 2012; Михеева, Егоров, 2022).

Подземные воды Тункинской долины с общей минерализацией первые граммы на дм^3 содержат до 2.5 мг/дм^3 Li, т.е. на порядок ниже концентраций в рассолах, считающихся перспективными для добычи. Извлечение Li из слабоминерализованных подземных вод имеет преимущество перед его добычей из

рассолов, так как не будет иметь экологических последствий.

$^3\text{He}/^4\text{He}$ подземных вод как показатель поступления мантийных газов

Изотопное отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ широко применяется в качестве мантийного трассера в фумаролах вулcano-гидротермальных систем (Hilton et al., 2002; Sano, Fischer, 2013; Sano et al., 2015; Ohba et al., 2019; Daita et al., 2021), а в более продвинутых интерпретациях изотопное отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ в подземных водах рассматривается как показатель вовлеченности мантийных газов на любой континентальной территории (Qin et al., 2022).

Отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ снижалось в фумаролах при угасании активности вулкана Шоушинзян в Японии. В период с 1958 до 1977 гг. семь образцов газа показали снижение отношений $^3\text{He}/^4\text{He}$ и $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$, соответственно, от 7.6×10^{-6} и 130 до 3.1×10^{-6} и 0.61, что свидетельствовало о контаминации гидротерм атмосферными газами (Nagao et al., 1980). На вулкане Идзу-Осима в Японии была обнаружена корреляция между вековыми вариациями изотопов He и интенсивностью вулканической активности (Sano et al., 1995). Последующие исследования подтвердили, что аномалии изотопного отношения He отражают изменения вулканической активности на вулкане Галерас в Колумбии (Sano et al., 1997), вулкане Стромболи в Италии (Capasso et al., 2005), горе Этна в Италии (Rizzo et al., 2006) и вулкане Поас в Коста-Рике (Hilton et al., 2010). При извержении на горе Хаконэ в Японии 29 июня 2015 г. был установлен быстрый рост изотопного отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ с мая по август 2015 г. с его постепенным снижением до февраля 2018 г., тогда как сейсмическая активность начала усиливаться в марте 2015 г., достигла максимума в мае и снижалась быстрее снижения изотопного отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ (Kagoshima et al., 2019).

Гипотеза мантийного происхождения высокого $^3\text{He}/^4\text{He}$ в подземных водах Тункинской долины

Происхождение минеральных и термальных вод Тункинской обсуждалось в многочисленных работах. При первом обследовании углекислых минеральных вод Аршана в конце 19-го столетия их происхождение связывалось, предположительно, с вулканизмом Тункинской впадины (Львов, Кропачев, 1909). Возможная связь минеральных вод с вулканизмом констатировалась почти в каждой последующей работе (Пиннекер и др., 1968; Кашина, 1971; Ломоносов, 1974; Ломоносов и др., 1976; Поляк и др., 1992; Pinneker et al., 1995; Лаврушин и др., 1999; Polyak, 2003; Кустов и др., 2002; Кустов, Сонголов, 2005; Павлов и др., 1995, 2018; Рассказов и др., 2024а).

В аршанских холодных минеральных водах проводились измерения отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ в скважинах 26, 28 и Глазном источнике, а также в термальных минеральных водах из скв. 39 (43 °C на глубине 750 м) (Ломоносов и др., 1976; Поляк и др., 1992; Pinneker et al., 1995; Polyak, 2003). Получены высокие значения этого отношения (до 1.1×10^{-5}). Минеральная вода Глазного источника содержит в основном урановый компонент пресных вод из зоны Тункинского разлома (Рассказов и др., 2024а). Высокое изотопное отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ в воде этого источника отражает состав газовой фазы при отсутствии признаков снижения $^3\text{He}/^4\text{He}$, что свидетельствует об отсутствии зависимости распределения газовой фазы от растворов подземных вод.

Мантийное происхождение гелия предполагалось, поскольку значения этого показателя аршанских вод близки к величине

$^3\text{He}/^4\text{He}$ в резервуаре MORB (Polyak, 2003). Такие же гелиевые изотопные отношения определены в оливинах порфировых вкрапленников и ксенолитов шпинелевых лерцолитов из позднекайнозойских вулканических пород юга Сибири и Монголии. Исходя из сходства отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ с этим показателем в резервуаре мантии и коромантийного перехода, связь гелия аршанских вод с глубинной дегазацией авторам настоящей статьи также представлялась реальной. Казалось бы, выходы газов в Аршанском месторождении минеральных вод с проявлением мантийного отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ должны были обозначать зарождение нового вулканического импульса. В таком контексте высокое изотопное отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ в Аршанском месторождении минеральных вод (Polyak, 2003) должно было рассматриваться как предвестник будущего вулканического извержения в Тункинской впадине (Рассказов и др., 2024а).

Гипотеза образования высокого $^3\text{He}/^4\text{He}$ за счет генерации литиегенного ^3He

Мантийной интерпретации высокого отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ противоречит его воспроизводство на протяжении длительного времени, с 1972 до 1995 гг. (рис. 5). Эти данные свидетельствуют о постоянной генерации изотопов гелия, тогда как потоки мантийного гелия предвещают вулканические извержения за год или несколько месяцев, а после вулканического извержения, как правило, прекращаются. С точки зрения позднекайнозойской эволюции источников вулканизма можно ожидать проявление потока глубинных флюидов, восходящего из мантии, на востоке БРС в связи с изменением корневой части Витимской расплавной аномалии (Рассказов и др., 2024б).

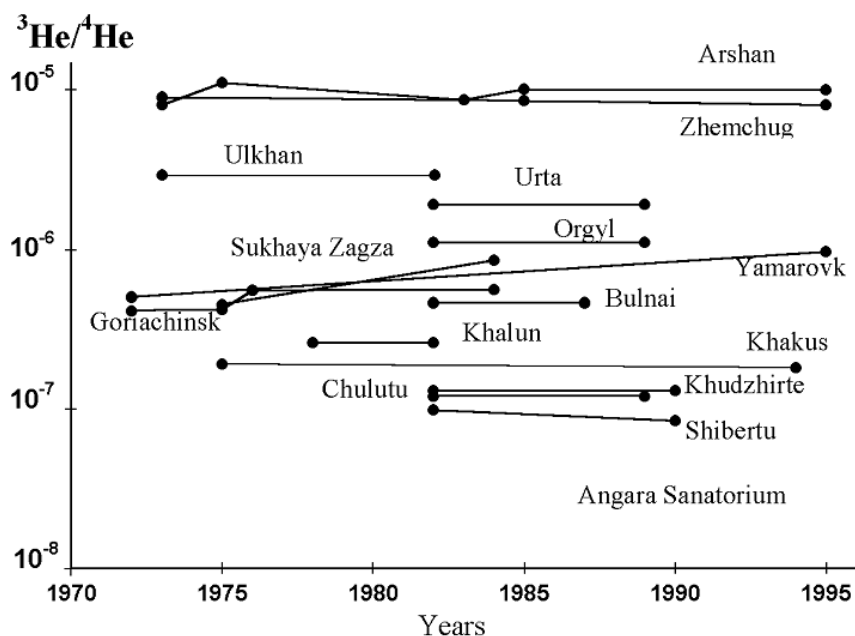


Рис. 5. Диаграмма временных вариаций отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ в подземных флюидах (Polyak, 2003). Места отбора проб: район санатория «Ангара», скважина (Иркутский амфитеатр); источник Шиберту (Хангай), источник Чулуту (Хангай); источник Худжирте (Хангай); Хакусский источник (Северо-Байкальский бассейн); источник Халун-Ус (Хангай); источник Хульджи (Хангай); источник Булнай (бассейн Хубсугула); Горячинский источник (бассейн Среднего Байкала); район Сухая Загза, скважина (бассейн Среднего Байкала); источник Худжирте (Хангай); Зона санатория «Ямаровка», скважина 110 (Забайкалье); Источник Оргыл (зона Хэнтэя-Керулена); Источник Урта (зона Хэнтэя-Керулена); источник Улхен (бассейн Хубсугула), участок Жемчуг, скважины Р-1 и Г-1 (Тункинская впадина); курорт Аршан, скважины 26, 28, 39 и источник Глазной (Тункинская впадина).

Fig. 5. Variations of the $^3\text{He}/^4\text{He}$ ration in the ground fluids with time (Polyak, 2003). Sampling sites: Angara Health Resort area, hole (Irkutsk amphitheater); Shibertu Spring (Khangai), Chulutu Spring (Hangay); Khudzhirte Spring (Hangay); Khakusskii Spring (North Baikal Basin); Khalun-Us Spring (Hangay); Khuldzhi Spring (Hangay); Bulnai Spring (Khubsugul Basin); Goryachinskii Spring (Middle Baikal Basin); Sukhaya Zagza area, hole (Middle Baikal Basin); Khudzhirte Spring (Hangay); Yamarovka Health Resort area, Hole 110 (Trans Baikal area); Orgyl Spring (Hentey-Kerulen Zone); Urta Spring (Khentei Kerulen Zone); Ulkhen Spring (Khubsugul Basin), Zhemchug area, Holes R-1 and G-1 (Tunka Basin); Arshan Resort Area, Holes 26, 28, 39, and Glaznoi Spring (Tunka Basin).

При радиоактивном распаде урана-238 в конечный стабильный изотоп ^{206}Pb образуется восемь атомов ^4He . Хотя, кроме распада ^{238}U , ^4He генерируется при радиоактивном распаде ^{235}U и ^{232}Th , распределение радиогенного ^4He связано главным образом с радиоактивным распадом ^{238}U . Изотопы гелия могут быть производными разных процессов, которые должны учитываться при анализе данных конкретных территорий. В результате ядерных реакций образуется не только тяжелый изотоп гелия (^4He), но и легкий изотоп (^3He).

Конкурирующая гипотеза образования высокого отношения изотопов гелия вытекает

из высокой концентрации Li в подземных водах. Литий имеет два стабильных изотопа: ^6Li и ^7Li . При нейтронном облучении лития, однако, образуется ^3He через тритий (реакция Хилла) – $^6\text{Li} (n, \alpha) \text{T}$. Нейтроны – продукт спонтанного расщепления атомов урана. Источником нейтронов в литосфере может быть также бомбардировка бериллия α -лучами. Существуют общие оценки скорости образования ^3He в коре и мантии, составляющие 0.002 % от скорости образования ^4He . Число атомов ^3He , образующихся на 1 атом ^4He при облучении лития в типичных гранитах, составляет $^3\text{He}/^4\text{He} = 1 \pm 0.5 \times 10^{-7}$ (примерно в

10 раз ниже соотношения изотопов гелия в атмосферном воздухе) (Якуцени, 1968).

Литийсодержащие минералы (сподумен, лепидолит) создают газы с повышенным содержанием легкого изотопа гелия, которые окклюдированы (поглощаются) сподуменом. В таком литиевом минерале отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ составляет 1.20×10^{-5} , т.е. на 2 порядка превышает соотношение изотопов гелия в типичных гранитах (Якуцени, 1968). Литиевые минералы генерируют аномально-высокое отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ (Dickin, 2005). Присутствие литиевых минералов в эволюционированных литиевых гранитах, таким образом, приводит к возрастанию отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$.

В подземных водах Тункинской долины концентрация Li в минеральных и термальных водах Тункинской впадины и Ниловского отрога возрастает на 3–4 порядка относительно концентраций этого элемента в преобладающих подземных водах Тункинской долины. Возрастающий Rb служит показателем вмещающих пород, образовавшихся в

результате дифференциации гранитных магм с обогащением редкими металлами, в том числе литием. Пример – Хушагольский массив щелочных (эгирин-рибекитовых) сиенитов и гранитов, который относится к Хушагол-Билютинской цепочке палеозойских тел щелочных пород, образующих зоны в юго-восточной части Восточного Саяна, протягивающиеся параллельно Главному Саянскому разлому (Рассказов и др., 2013). Подобные гранитные тела, по-видимому, эволюционировали под Тункинской впадиной и Ниловским отрогом. Пространственное положение этих тел предварительно определяется по выходам подземных вод, обогащенных литием.

Обогащенные литием подземные воды содержат от 1 до 10 мкг/дм³ урана (рис. 6). Уран обеспечивает нейтронное облучение лития. ^3He генерируется из ^6Li . Радиоактивность ^{238}U отражается в высокой концентрации радона ниловских подземных вод. Существенное смещение изотопного состава гелия относительно коровых значений предполагает радиогенное выделение тепла.

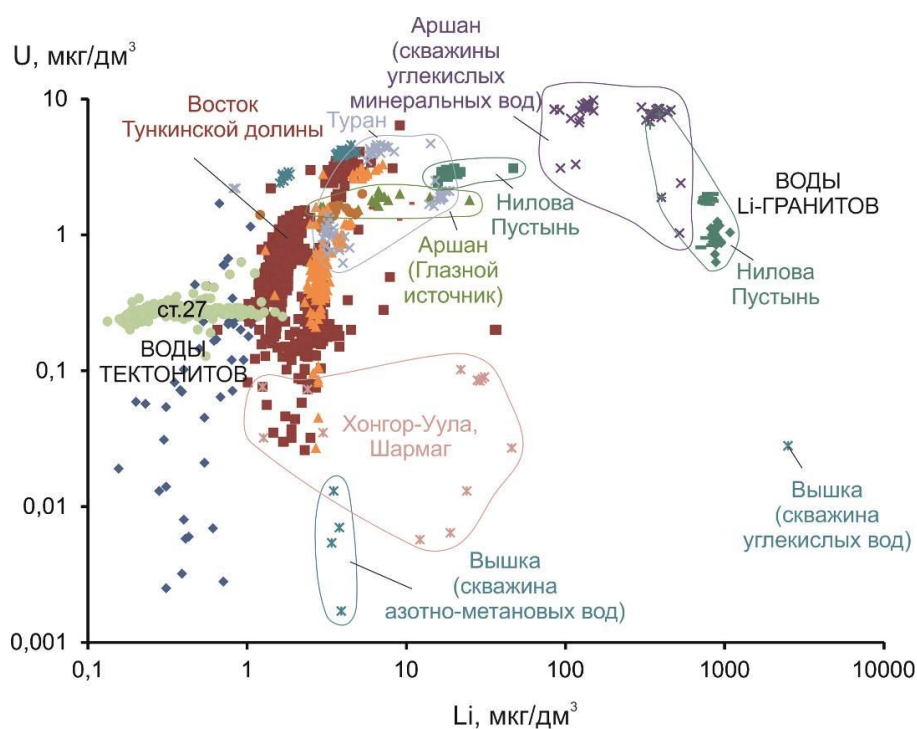


Рис. 6. Диаграмма U – Li подземных вод Тункинской долины.

Fig. 6. Diagram of U versus Li for groundwater from the Tunka Valley.

Заключение

В подземных водах Тункинской долины концентрация Li меняется на 5 порядков. Низкую концентрация характерна для подземных вод сейсмогенных милонитов Главного Саянского разлома, высокая – для подземных вод Li-гранитов (Li-F гранитов). Возрастание температуры трения в низко-Li резервуаре подземных вод сейсмоактивного разлома обеспечивает обменные реакции глинистых минералов и цеолитов с возрастанием концентрации Li и снижением отношения Na/Li, тогда как температурная зависимость отношения Na/Li в высоко-Li резервуаре подземных вод из Li-гранитов сочетается с растворением Li и удалением из раствора Na.

Гипотеза о мантийном происхождении газов с высоким изотопным отношением $^3\text{He}/^4\text{He}$ (до 1.1×10^{-5}) на вулканической территории представляется сомнительной из-за стабильного существования этой характеристики в подземных водах Тункинской впадины на протяжении десятков лет. Такой эффект может достигаться в стабильном режиме при бомбардировке нейтронами высоко-Li резервуара подземных вод с генерацией ^3He . Конкурирующая гипотеза происхождения высокого изотопного отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ за счет литиегенной генерации ^3He в минеральных и термальных подземных водах Тункинской долины (рис. 7) открывает перспективу общей увязки химической гидрогеодинамики подземных вод Тункинской долины со строением докайнозойского фундамента.

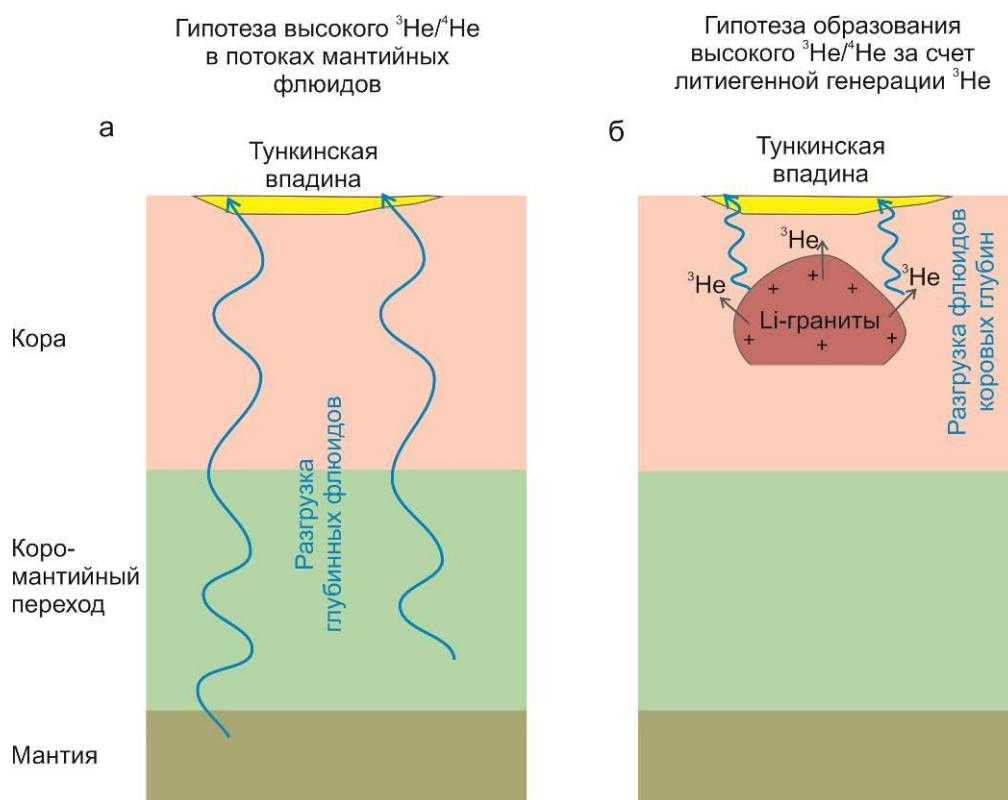


Рис. 7. Конкурирующие гипотезы происхождения высокого $^3\text{He}/^4\text{He}$ в подземных водах Тункинской долины: *а* – в потоках мантийных флюидов и *б* – за счет литиегенной генерации ^3He .

Fig. 7. Competing hypotheses for the origin of high $^3\text{He}/^4\text{He}$ in the groundwater of the Tunka Valley: *a* – in mantle fluid flows and *b* – due to lithium-induced generation of ^3He .

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации проекта Института земной коры СО РАН FWEF-2026-0010. Аналитические

исследования выполнялись на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500se в центре коллективного пользования «Ультрамикрoанализ» (ЛИН СО РАН, г. Иркутск). В работе использованы данные о землетрясениях,

полученные на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckprf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>). (Карта..., 2026).

Литература

- Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Вахромеев А.Г., Шмаров Г.П. Литиеносные подземные воды Иркутской области и Западной Якутии // Горный журнал. 2012. № 2. С. 8–13.
- Вахромеев А. Г. Закономерности формирования и концепция освоения промышленных рассолов (на примере юга Сибирской платформы): автореф. дисс. ... д-ра геол.-минерал. наук. Иркутск, 2009. 36 с.
- Ильясова А.М., Снопков С.В. Косейсмические вариации термфильного 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
- Карта эпицентров последних десяти землетрясений. Иркутск: Байкальский Филиал Геофизической Службы, 2026. <http://www.seis-bykl.ru/index.php?ma=1>.
- Кашина М.А. Углекислые термы Аршанского месторождения минеральных вод // Геология и полезные ископаемые Восточной Сибири. Матлы конференции молодых научных сотрудников. Иркутск: ИЗК СО АН СССР, 1971. С. 114–117.
- Кустов Ю.И., Пиннекер Е.В., Сонголов В.И., Мурашова Т.В., Сизых Т.П. Углекислые минеральные воды курорта «Аршан Тункинского» и состояние его гидроминеральных ресурсов // Сибирский медицинский журнал. 2002. № 6. С. 35–42.
- Кустов Ю.И., Сонголов В.И. Гидроминеральная база курорта «Аршан Тункинский» и использование ее компонентов в практических целях // Сибирский медицинский журнал. 2005. <https://cyberleninka.ru/article/n/gidromineralnaya-baza-kurorta-arshan-tunkinskiy-i-ispolzovanie-ee-komponentov-v-prakticheskikh-tselyah>
- Лаврушин В.Ю., Поляк Б.Г., Каменский И.Л. Изотопный состав гелия в термоминеральных флюидах Забайкалья // Литология и полезные ископаемые. 1999. № 2. С. 146–157.
- Ломоносов И.С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Наука. Новосибирск, 1974, 160 с.
- Ломоносов И. С., Мамырин Б. А., Прасолов Э. М., Толстухин И. Н., Изотопный состав гелия и аргона в некоторых гидротермах Байкальской рифтовой зоны. // Геохимия. 1976. № 11. С. 1743–1746.
- Львов А.В., Кропачев Г.И. Краткий отчет о результатах исследования источника «Аршана», произведенного по поручению Вост.-Сиб. отд. Российского геогр. Общ. и Общ. врачей // Изв. Вост.-Сиб. отд. РГО. 1909. Т. 40. С. 41–47.
- Михеева Е.Д., Егоров Я.А. К вопросу о содержаниях лития и попутных компонентов в подземных водах перспективных площадей территории России // Науки о Земле: добыча и переработка. 2022. С. 29–35.
- Павлов С.Х., Пиннекер Е.В., Писарский Б.И. Углекислые воды Тункинской впадины (Восточный Саян) // Геология и геофизика. 1995. Т. 36, № 9. С. 28–35.
- Павлов С.Х., Чудненко К.В., Голубев В.А., Оргильянов А.И., Бадминов П.С., Крюкова И.Г. Геологические факторы и физико-химические процессы формирования подземных вод Тункинской впадины // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 1. С. 221–248. doi:10.5800/GT-2018-9-1-0346.
- Пиннекер Е. В. Рассолы Ангара-Ленского артезианского бассейна. М.: Наука, 1966. 332 с.
- Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Ломоносов И.С., Колдышева Р.Я., Диденко А.А., Шерман С.И. Гидрогеология Прибайкалья. Москва: изд-во Наука, 1968. 170 с.
- Поляк Б.Г., Прасолов Э.М., Толстухин И.Н. и др. Изотопы гелия во флюидах Байкальской рифтовой зоны // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1992. № 10. С. 18–33.
- Рассказов С.В., Ильясова А.М., Сунь Йи-минь, Снопков С.В., Чебыкин Е.П. Вариации U компонентов и Si–Na/Li температур в резервуарах подземных вод на южном фланге Южно-Байкальской впадины и Тункинской долины в 2012–2024 гг.: соотношение осевых и фланговых сейсмогенных деформаций в Байкальской рифтовой системе // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 2. С. 124–149. DOI 10.26516/2541-9641.2025.2.124
- Рассказов С.В., Меньшагин Ю.В., Ясныгина Т.А., Ильясова А.М., Саранина Е.В., Скопинцев В.Г. Хушагольский полихронный массив: гетерогенность источников палеозойских щелочных сиенитов и гранитов в Восточном Саяне, Юг Сибири // Литосфера. 2013. № 4. С. 88–109.

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Снопков С.В., Чувашова И.С. От эволюции кайнозойского вулканизма к вариациям изотопного состава урана в подземных водах: определение кайнозойских и современных зон растяжения и сжатия в Тункинской долине Байкальской рифтовой системы // Геодинамика и тектонофизика. 2026 (в печати).

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Чувашова И.С., Ильясова А.М., Снопков С.В., Сунь Йи-минь Мониторинг урановых компонентов в подземных водах Аршана в 2012–2024 гг.: отслеживание парагенетических (гидрогеохимических и сейсмических) процессов в Байкальской рифтовой системе // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 3. С. 65–112. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.3.65>

Рассказов С.В., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Саранина Е.В. Корневые структуры Даригангского и Витимского вулканических полей Японско-Байкальского геодинамического коридора: Соотношения источников позднекайнозойских магматических расплавов и современных локальных низкоскоростных аномалий в верхней мантии // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 2. С. 16–78. DOI 10.26516/2541-9641.2024.2.16

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., Чувашова И.С. Косейсмическая химическая гидрогеодинамика Култукского резервуара подземных вод: индикаторные роли Na/Li, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ и ^{234}U // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 141–171. DOI 10.26516/2541-9641.2023.1.141.

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., Сорокикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В.,

Грачёв М.А. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20, № 5. С. 613–631.

Якуцени В.П. Геология гелия. Л.: Недра, 1968. 232 с.

Capasso G., Carapezza M.L., Federico C., Inguaggiato S., Rizzo A. Geochemical monitoring of the 2002–2003 eruption at Stromboli volcano (Italy): Precursory changes in the carbon and helium isotopic composition of fumarole gases and thermal waters // Bulletin of Volcanology. 2005. Vol. 68. P. 118–134.

Daita Y., Ohba T., Yaguchi M., Sgo T., Harada M. Volcanic activity forecast based on volcanic gas composition of Hakone Volcano, Japan: Utilization for volcanic disaster prevention // Journal of Geography. 2021. Vol. 130, No. 6. P. 783–796. DOI:10.5026/jgeography.130.783

Dickin A. Radiogenic isotope geology. Cambridge university press, New York. 2005. Second edition. 492 p.

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

Hilton D.R., Fischer T.P., Marty B. Noble gases in subduction zones and volatile recycling // In D. Porcelli, C. Ballentine, & R. Wieler (Eds.). Reviews in Mineralogy and Geochemistry: Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry. 2002. Vol. 47. P. 319–362. Washington, DC: The Mineralogical Society of America.

Hilton D.R., Ramírez C.J., Mora-Amador R., Fischer T.P., Füre E., Barry P.H., Shaw A.M. Monitoring of temporal and spatial variations in fumarole helium and carbon dioxide characteristics at Poás and Turrialba volcanos, Costa Rica (2001–2009) // Geochemical Journal. 2010. Vol. 44. P. 431–440.

Kagoshima T., Sano Y., Takahata N., Lee H., Lan, T., Ohba T. Secular variations of helium and nitrogen isotopes related to the 2015 volcanic unrest of Mt. Hakone, central Japan // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2019. <https://doi.org/10.1029/2019GC008544>

Nagao K., Takaoka N., Matsuo S., Mizutani y., Matsubayashi O. Change in rare gas composition of the fumarolic gases from the Showashinzan volcano // Geochim. J. 1980. Vol. 14, No. 3. P. 139–143.

Ohba T., Yaguchi M., Nishino K., Numanami N., Daita Y., Sukigara C., Ito M., Tsunogai U. Time variations in the chemical and isotopic composition of fumarolic gases at Hakone volcano, Honshu Island, Japan, over the earthquake swarm and eruption in 2015, interpreted by magma sealing model //

Earth, Planets and Space. 2019. Vol. 71. P. 48. <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1027-5>

Pinneker E.V., Pissarskiy B.I., Pavlova S.E. Helium isotope data for groundwater in the Baikal rift zones // *Isotopes Environ. Health Studies*. 1995. Vol. 31. P. 97–106.

Polyak B.G. Helium isotopes in the ground fluids of the Baikal Rift and its surroundings: Contribution to continental rifting geodynamics // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2003. Vol. 5, No. 1. P. 45–66.

Rizzo A., Caracausi A., Favara R., Martelli M., Paonita A., Paternoster M. et al. New insights into magma dynamics during last two eruptions of Mount Etna as inferred by geochemical monitoring from 2002 to 2005 // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2006. Vol. 7. P. Q06008. <https://doi.org/10.1029/2005GC001175>

Sano Y., Fischer T.P. The analysis and interpretation of noble gases in modern hydrothermal systems // In P. Burnard (Ed.) *The Noble Gases as Geochemical Tracers* 2013. P. 249–317. Berlin, Heidelberg: Springer.

Sano Y., Gamo T., Notsu K., Wakita H. Secular variations of carbon and helium isotopes at Izu-Oshima Volcano, Japan // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1995. Vol. 64. P. 83–94.

Sano Y., Gamo T., Williams S.N. Secular variations of helium and carbon isotopes at Galeras volcano, Colombia // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1997. Vol. 77. P. 255–266.

Sano Y., Kagoshima T., Takahata N., Nishio Y., Roulleau E., Pinti D.L., Fischer T.P. Ten-year helium anomaly prior to the 2014 Mt Ontake eruption // *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5. P. 13069.

References

Alekseev S.V., Alekseeva L.P., Vakhromeev A.G., Shmarov G.P. Lithium-bearing groundwater of the Irkutsk region and Western Yakutia // *Mining magazine*. 2012. No. 2. pp. 8–13.

Capasso G., Carapezza M.L., Federico C., Inguaggiato S., Rizzo A. Geochemical monitoring of the 2002–2003 eruption at Stromboli volcano (Italy): Precursory changes in the carbon and helium isotopic composition of fumarole gases and thermal waters // *Bulletin of Volcanology*. 2005. Vol. 68. P. 118–134.

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

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

Chebykin E.P., Yimin Sun, Rasskazov S.V., Zhenhua Xie, Chen Yang, Ilyasova A.M. Chemical elemental and U-isotopic compositions of ground water in the central part of the Tunka valley (Buryatia, Russia) // *Rifting, orogenesis, and accompanied processes. Proceedings of the IV All-Russian Symposium with the participation of foreign scientists, dedicated to the 90th anniversary of the birth of N.A. Logatchev*. Irkutsk, Institute of the Earth Crust SB RAS, October 14–15, 2019. P. 240–242.

Daita Y., Ohba T., Yaguchi M., Sgo T., Harada M. Volcanic activity forecast based on volcanic gas composition of Hakone Volcano, Japan: Utilization for volcanic disaster prevention // *Journal of Geography*. 2021. Vol. 130, No. 6. P. 783–796. DOI:10.5026/jgeography.130.783

Dickin A. *Radiogenic isotope geology*. Cambridge university press, New York. 2005. Second edition. 492 p.

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

Hilton D.R., Fischer T.P., Marty B. Noble gases in subduction zones and volatile recycling // In D. Porcelli, C. Ballentine, & R. Wieler (Eds.). *Reviews in Mineralogy and Geochemistry: Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry*. 2002. Vol. 47. P. 319–362. Washington, DC: The Mineralogical Society of America.

Hilton D.R., Ramírez C.J., Mora-Amador R., Fischer T.P., Füre E., Barry P.H., Shaw A.M. Monitoring of temporal and spatial variations in fumarole helium and carbon dioxide characteristics at Poás and Turrialba volcanos, Costa Rica (2001–2009) // *Geochemical Journal*. 2010. Vol. 44. P. 431–440.

Ilyasova A.M., Snopkov S.V. Coseismic variations of the thermophilic element Si in 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

Kagoshima T., Sano Y., Takahata N., Lee H., Lan, T., Ohba T. Secular variations of helium and nitrogen isotopes related to the 2015 volcanic unrest of Mt. Hakone, central Japan // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2019. <https://doi.org/10.1029/2019GC008544>

Kashina M.A. Carbon dioxide baths of the Arshan mineral water deposit // *Geology and useful minerals of Eastern Siberia. Proceedings of the conference of*

- young researchers. Irkutsk: IZK SB RAS USSR, 1971. P. 114–117.
- Kustov Yu.I., Pinneker E.V., Songolov V.I., Murashova T.V., Sizykh T.P. Carbonated mineral waters of the Arshan-Tunkinsky resort and the state of its hydromineral resources // *Siberian Medical Journal*. 2002. No. 6. P. 35–42.
- Kustov Yu.I., Songolov V.I. Hydromineral base of the resort "Arshan-Tunkinsky" and the use of its components for practical purposes // *Siberian Medical Journal*. 2005. <https://cyberleninka.ru/article/n/gidromineralnaya-baza-kurorta-arshan-tunkinskiy-i-ispolzovanie-ee-komponentov-v-prakticheskikh-tselyakh>
- Lavrushin, V.Yu., Polyak, B.G., Kamenskiy, I.L.. Helium isotopic composition of thermomineral fluids in Transbaikalia // *Lithology and Mineral Resources*. 1999. Vol. 34, No. 2. P. 123–133.
- Lomonosov I.S. Geochemistry and formation of modern hydrotherms of the Baikal rift zone. Science. Novosibirsk, 1974, 160 p.,
- Lomonosov I.S., Mamyrin B.A., Prasolov E.M., Tolstikhin I.N., Isotopic composition of helium and argon in some hydrotherms of the Baikal rift zone. // *Geochemistry*. 1976. No. 11. P. 1743–1746.
- Map of earthquake epicenters in the last ten days, 2026. The Baikal Branch of the Geophysical Survey, Irkutsk. <http://www.seis-bykl.ru/index.php?ma=1>
- Miheeva E.D., Egorov Y.A. To the question of the content of lithium and associated components in groundwater of promising areas the territory Russia // *Earth Sciences: Mining and processing*. 2022. P. 29–35.
- Nagao K., Takaoka N., Matsuo S., Mizutani y., Matsubayashi O. Change in rare gas composition of the fumarolic gases from the Showashinzan volcano // *Geochim. J.* 1980. Vol. 14, No. 3. P. 139–143.
- Ohba T., Yaguchi M., Nishino K., Numanami N., Daita Y., Sukigara C., Ito M., Tsunogai U. Time variations in the chemical and isotopic composition of fumarolic gases at Hakone volcano, Honshu Island, Japan, over the earthquake swarm and eruption in 2015, interpreted by magma sealing model // *Earth, Planets and Space*. 2019. Vol. 71. P. 48. <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1027-5>
- Pavlov S.Kh., Pinneker E.V., Pisarsky B.I. Carbon dioxide waters of the Tunka basin (Eastern Sayan) // *Geology and Geophysics*. 1995. Vol. 36, No. 9. P. 28–35.
- Pavlov S.Kh., Chudnenko K.V., Golubev V.A., Orgilyanov A.I., Badminov P.S., Kryukova I.G., 2018. Geological factors and physico-chemical processes of groundwater formation in the Tunka depression. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (1), 221–248. doi:10.5800/GT-2018-9-1-0346.
- Pinneker E.V. Pickles of the Angara-Lena artesian basin. Moscow: Nauka, 1966. 332 p.
- Pinneker E.V., Pisarsky B.I., Lomonosov I.S., Koldysheva R.Ya., Didenko A.A., Sherman S.I. Hydrogeology of the Baikal region. Moscow: Nauka publishing house, 1968. 170 p.
- Pinneker E.V., Pissarskiy B.I., Pavlova S.E. Helium isotope data for groundwater in the Baikal rift zones // *Isotopes Environ. Health Studies*. 1995. Vol. 31. P. 97–106.
- Polyak B.G. Helium isotopes in the ground fluids of the Baikal Rift and its surroundings: Contribution to continental rifting geodynamics // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2003. Vol. 5, No 1. P. 45–66.
- Polyak B.G., Prasolov E.M., Tolstikhin I.N. et al. Helium isotopes in fluids of the Baikal rift zone // *Izvestiya Academy of Sciences of the USSR. Ser. geol.* 1992. No. 10. P. 18–33.
- Qin S., Xu D., Li J. Zhou Z. Genetic Types, Distribution Patterns and Enrichment Mechanisms of Helium in China's Petroliferous Basins // *Front. Earth Sci.* 2022. Vol. 10, 675109. doi: 10.3389/feart.2022.675109
- Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Chuvashova I.S., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Sun Yi-min Monitoring of uranium components and Si – Na/Li temperatures in the Arshan groundwater reservoir of Tunka Valley in 2012–2024: Tracing paragenetic relationships between hydrogeochemical and seismic processes in the Baikal Rift System // *Geology and Environment*. 2024a. Vol. 4, No. 3. P. 65–112. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.3.65>
- Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Chuvashova I.S. From volcanic evolution to variations in uranium isotope compositions in groundwater: definition of Cenozoic and present-day extensional and compressional zones in the Tunka Valley of the Baikal Rift System // *Geodynamics and tectonophysics*. 2026 (in press).
- Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Yasnygina T.A., Saranina E.V. Root structures of the Dariganga and Vitim volcanic fields of the Japan-Baikal geodynamic corridor: Relationships between sources of late Cenozoic magmatic melts and modern local low-velocity anomalies in the upper mantle // *Geology and Environment*. 2024b. Vol. 4, No. 2. pp. 16–78. DOI 10.26516/2541-9641.2024.2.16
- Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Sun Yi-Min, Snopkov S.V., Chebykin E.P. Variations of U components and Si–Na/Li temperatures in groundwater reservoirs on the southern flank of the South Baikal Basin and Tunka Valley in 2012–2024: relationship between axial and flank seismogenic deformations in the Baikal Rift System // *Geology and Environment*. 2025. Vol. 5, No. 2. P. 124–149. DOI 10.26516/2541-9641.2025.2.124.

Rasskazov S.V., Menshagin Yu.V., Yasnygina T.A., Ilyasova A.M., Saranina E.V., Skopintsev V.G. Khushagol polychronic massif: heterogeneity of sources for Paleozoic alkaline syenites and granites in the Eastern Sayan, Southern Siberia // *Lithosphere*. 2013. No. 4. P. 88–109.]

Rizzo A., Caracausi A., Favara R., Martelli M., Paonita A., Paternoster M. et al. New insights into magma dynamics during last two eruptions of Mount Etna as inferred by geochemical monitoring from 2002 to 2005 // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2006. Vol. 7. P. Q06008. <https://doi.org/10.1029/2005GC001175>

Sano Y., Fischer T.P. The analysis and interpretation of noble gases in modern hydrothermal systems // In P. Burnard (Ed.) *The Noble Gases as Geochemical Tracers* 2013. P. 249–317. Berlin, Heidelberg: Springer.

Sano Y., Gamo T., Notsu K., Wakita H. Secular variations of carbon and helium isotopes at Izu-Oshima Volcano, Japan // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1995. Vol. 64. P. 83–94.

Sano Y., Gamo T., Williams S.N. Secular variations of helium and carbon isotopes at Galeras volcano, Colombia // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1997. Vol. 77. P. 255–266.

Sano Y., Kagoshima T., Takahata N., Nishio Y., Roulleau E., Pinti D.L., Fischer T.P. Ten-year helium anomaly prior to the 2014 Mt Ontake eruption // *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5. P. 13069.

Vakhromeev A.G. Patterns of formation and concept of development of industrial brines (using the southern Siberian platform as an example): Abstract of a Doctor of Geological and Mineral Sciences dissertation. Irkutsk, 2009. 36 p.

Yakutseni V.P. *Geology of helium*. Leningrad: Nedra, 1968. 232 p.

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор,

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
заведующий лабораторией изотопии и геохронологии,

664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет,
геологический факультет,
заведующий кафедрой динамической геологии,
тел.: (3952) 51–16–59,
email: rassk@crust.irk.ru

Rasskazov Sergei Vasilevich,

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 str., 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

Чебыкин Евгений Павлович,

кандидат химических наук,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
ведущий специалист,
тел.: (3952) 51–16–59,
email: cheb@lin.irk.ru

Chebykin Eugenyi Pavlovich,

Candidate of Chemistry,
664003 Irkutsk, Lermontov st., 128,
Institute of Earth's crust, SB RAS,
Leading specialist,
tel.: (3952) 51–16–59,
email: cheb@lin.irk.ru

Ильясова Айгуль Маратовна,

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

Ilyasova 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

Чувашова Ирина Сергеевна,

кандидат геолого-минералогических наук,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
старший научный сотрудник,
664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет, геологический факультет,
доцент кафедры динамической геологии,
email: chuvashova@crust.irk.ru

Chuvashova Irina Sergeevna,

candidate of geological and mineralogical sciences
664033, Irkutsk, st. Lermontova, 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Senior Researcher,
664025, Irkutsk, st. Lenina, 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Associate Professor of Dynamic Geology Char,

email: chuvashova@crust.irk.ru

Снопков Сергей Викторович,

кандидат геолого-минералогических наук,
664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет,
геологический факультет,
доцент,
664074, г. Иркутск, ул. Курчатова, 3,
Сибирская школа геонаук, Иркутский национальный исследовательский технический университет,
ведущий научный сотрудник,

email: snopkov_serg@mail.ru.

Snopkov Sergei Viktorovich,

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
664025, Irkutsk, Lenin sr., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Associate Professor,
664074, Irkutsk, Kurchatov st., 3,
Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University,
Leading Researcher,
email: snopkov_serg@mail.ru.
