

НЕОТЕКТОНИКА, ГЕОМОРФОЛОГИЯ

УДК 550.42 + 550.845 (51)

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2025.1.129>EDN: [DGSNRD](https://www.edn.ru/)**Современное вовлечение в деформации края Сибирского палеоконтинента в Байкальской рифтовой системе: данные U-H-O-изотопной систематики подземных вод**С.В. Рассказов^{1,2}, А.М. Ильясова¹, Е.П. Чебыкин^{1,3}, О.С. Гутарева¹, С.В. Снопков^{2,4}¹Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия³Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. По изотопам урана, водорода и кислорода подземных вод выявляется разный характер процессов взаимодействия вода–порода в структурах Байкальской рифтовой системы (БРС), унаследовавших зону Главного Саянского разлома (ГСР) и получившего развитие в сопредельном архейском Шарыжалгайском блоке фундамента Сибирского палеоконтинента. Для пресных холодных подземных вод верхнего гидрогеодинамического этажа, в Култукском резервуаре зоны ГСР, обосновывается модель двух-компонентного смешения, первоначально полученная по изотопам U и Sr и подтвержденная в настоящей работе по изотопам H и O. Значения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ возрастают с повышением содержания растворенного кремния. Тренд нижнего гидрогеодинамического этажа представлен термальными водами Баунтовской впадины, в которых значения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ снижаются с повышением содержания растворенного кремния. В U-H-O-изотопной систематике на станциях гидрогеохимического мониторинга сейсмической угрозы в БРС подчеркивается особое значение геохимических характеристик подземных вод, полученных для родника ст. 143А Култукского полигона. В водах этой станции определено более высокое отношение активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (ОА4/8), чем в подземных водах ГСР Култукского резервуара. Геохимические характеристики вод ст. 143А частично соответствуют геохимическим характеристикам подземных вод Култукского резервуара в зоне ГСР, а частично – геохимическим характеристикам подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища. Предполагается, что в подземные воды этих территорий входит компонент глубинных вод Южно-Байкальского резервуара (ЮБР). Отличие U-H-O-изотопных характеристик вод родника ст. 143А от характеристик подземных вод Култукского полигона в зоне ГСР объясняется структурным контролем выхода этого родника дуговым разломом КБЖД, заложенным в архейском Шарыжалгайском блоке края Сибирского палеоконтинента, вдоль Обручевского разлома. Выявленное с течением времени снижение значений ОА4/8 в водах родника ст. 143А свидетельствует о нарастании сжатия в глубинной части дугового разлома, происходящем в настоящее время. Продолжение этого процесса может иметь катастрофические последствия – сход крупного оползня в Южно-Байкальскую впадину по плоскости дугового разлома.

Ключевые слова: Байкал, Тункинская долина, подземные воды, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, эффект Чердынцева–Чалова

Статья получена: 04.03.2025; исправлена: 20.03.2025; принята: 28.03.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рассказов С.В., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П., Гутарева О.С., Снопков С.В. Современное вовлечение в деформации края Сибирского палеоконтинента в Байкальской рифтовой системе: данные U-H-O-изотопной систематики подземных вод // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 1. С. 129-158. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.129. EDN: [DGSNRD](https://www.edn.ru/)

Article received: 04.03.2025; corrected: 20.03.2025; accepted: 28.03.2025.

FOR CITATION: Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chebykin E.P., Gutareva O.S., Snopkov S.V. Present-Day involvement in deformations of the Siberian Palecontinent margin in the Baikal Rift System: evidence from U-H-O-isotope systematics of groundwater // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 129-158. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.129. EDN: [DGSNRD](https://www.edn.ru/)

Present-Day Involvement in Deformations of the Siberian Palecontinent Margin in the Baikal Rift System: evidence from U-H-O isotope Systematics of Groundwater

S.V. Rasskazov^{1,2}, A.M. Ilyasova¹, E.P. Chebykin^{1,3}, O.S. Gutareva¹, S.V. Snopkov^{2,4}

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

²*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

³*Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia*

⁴*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

Abstract. Uranium, hydrogen, and oxygen isotopes in groundwater reveal different nature of water-rock interaction processes in structures of the Baikal Rift System (BRS) inherited the Main Sayan Fault (MSF) zone and developed in the adjacent Archean Sharyzhalgay block of the Siberian paleocontinent basement. For fresh cold groundwater of the upper hydrogeodynamic floor, in the Kultuk reservoir of the MSF zone, a two-component mixing model is substantiated, initially obtained from U and Sr isotopes and confirmed by H and O ones in this work. The $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values increase with increasing content of dissolved silicon. The trend of the lower hydrogeodynamic floor is exhibited by thermal waters of the Baunt basin, in which the $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values decrease with increasing content of dissolved silicon. In the U-H-O isotope systematics at the stations of hydrogeochemical monitoring of seismic hazard in the BRS, the special significance of the geochemical signatures of groundwater obtained for the spring at station 143A of the Kultuk area is emphasized. A higher activity ratio of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (AR4/8) was determined for waters from this station as compared with groundwater from the MSF of the Kultuk reservoir. The geochemical signatures of water from station 143A partially correspond to those from the Kultuk reservoir in the MSF zone, and partially to geochemical signatures of the groundwater from the northwestern coast of Lake Baikal and the eastern coast of the Irkutsk reservoir. It is proposed that the groundwater of these areas includes a component of the deep water from the South Baikal reservoir (SBR). The difference in the U-H-O isotope signatures of water from the spring of station 143A and the Kultuk reservoir in the MSF is explained by the structural control of this spring by an arc fault of the Circum-Baikal Railway, arranged in the Archean Sharyzhalgai block of the Siberian paleocontinent margin, along the Obruchev fault. The revealed temporal decreasing in the OA4/8 values in water of the spring indicates present-day increasing in compression in the deep part of the arc fault. Continuation of this process can have catastrophic consequences – a large landslide into the South Baikal basin along the plane of the arc fault.

Keywords: Baikal, Tunka Valley, groundwater, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, Cherdyntsev-Chalov effect

Постановка вопроса

Основной подход к прогнозу землетрясений в настоящее время заключается в отслеживании вариаций интенсивности сейсмического процесса для выявления неустойчивости в его режиме. При значительном объеме опубликованной литературы, ее ценность неодинакова. Во многих работах описываются последствия землетрясений и поведение тех или иных параметров после разгрузки упругих напряжений в коре. Для прогноза же необходимы данные об изменении параметров в процессе подготовки землетрясения, а не после него. М.А. Садовский подчеркивал, что однозначно решить вопрос о прогнозе времени землетрясений можно лишь при постановке режимных наблюдений за

комплексом известных предвестников на широкой сети станций, а также при выяснении механизма сейсмического процесса и физической природы предвестников. Он писал: «...для предсказания сильного землетрясения площадь, покрытая постами наблюдений, должна занимать сотни тысяч квадратных километров... расстояние между пунктами наблюдений не должно превышать 50–100 км» (Садовский, 1978; с. 7). Устойчивый пессимизм, сложившийся к настоящему времени в отношении создания теоретических основ прогноза землетрясений (Geller, 1997; Rodkin, 2008; Koronovskiy, Naimark, 2012, 2013), вовсе не означает, что практика прогноза возможных сейсмических катастроф (Sobolev, 1993; и др.) должна быть приостановлена.

Как правило, какой-либо предвестник является для конкретного сильного землетрясения. Следующее сильное землетрясение происходит без заявленного предвестника. Авторами настоящей работы, вместо бесполезного ожидания «предвестников», принята практика анализа гидрогеохимических изменений в резервуаре подземных вод сейсмоактивной структуры. Для полученных закономерностей эволюции резервуара подземных вод устанавливаются парагенетические отношения с событиями подготовки и реализации сильных землетрясений. Иными словами, проводится гидрогеохимическое исследование резервуара подземных вод, доступного для изучения в верхней части коры, и в случае, если определяются перестройки в его эволюции с пониманием будущих событий в таком резервуаре, рубежи гидрогеохимических перестроек резервуара с элементами прогноза проецируются в информационное поле о пространственно-временном распределении землетрясений различной силы, происходящих в средней части коры. После такого перехода делается прогноз будущих сейсмических событий. Кора рассматривается как объект прямого непрерывного мониторингового исследования подземных вод в ее доступной верхней части с выходом на подготовку и реализацию сейсмических процессов в ее средней части, фактически недоступной для получения прямой информации (Rasskazov et al., 2022; 2024).

Современная изотопная геохимия располагает широким набором методов для изучения природных процессов с констатацией причин их возникновения и определением направленности эволюции. Важнейшую генетическую информацию для подземных и поверхностных вод несут изотопы урана. В результате радиоактивного распада ^{238}U в лабораторных условиях атомное отношение $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 5.47 \times 10^{-5}$ соответствует циклическому равновесию между изотопами ^{234}U и ^{238}U с отношением активностей (ОА4/8) около 1. В природных условиях наблюдаются отклонения от равновесия, известные как эффект Чердынцева-Чалова (Чердынцев, 1969; Чалов и др., 1980). В разных геологических условиях предлагаются различные объяснения этого эффекта. Так, значения ОА4/8 резко увеличиваются или снижаются при землетрясениях (Zverev et al., 1975; Finkel, 1979). Учитывая возможность возникновения такого эффекта в подземных водах активных разломов Байкальской рифтовой системы, в 2012 г. был организован гидрогеохимический

мониторинг сейсмической угрозы на Култукском полигоне. В процессе наблюдений, кроме ОА4/8, определялся широкий спектр химических элементов, а также изотопные отношения Sr (Рассказов и др., 2015; Чебыкин и др., 2015).

По расположению в оси рифтовой структуры эта территория выбрана нами в качестве опорного полигона. Мониторинговые станции находятся в основном в тектонитах Главного Саянского разлома (ГСР) – шовной структуры между архейским Шарыжалгайским блоком фундамента Сибирского палеоконтинента и неопротерозойским Слюдянским метаморфическим субтеррейном Хамардабанского террейна – и частично выходят на фланги этой шовной зоны. В пределах шовной зоны ГСР Култукского полигона значения ОА4/8 не превышают 3.29. Такое максимальное значение определено 04 февраля 2013 г. на ст. 27. При продвижении в Шарыжалгайский блок вдоль Обручевского разлома в роднике ст. 143А выявлены более высокие значения ОА4/8 (до 3.68). Концентрация Si в водах родника ст. 143А с течением времени возрастает подобно возрастанию содержания этого компонента в подземных водах других мониторинговых станций Култукского полигона, поэтому предполагается, что высокие значения ОА4/8 в водах родника ст. 143А имеют тектоническую причину (Ильясова, Снопков, 2023).

Существует, однако, еще одна особенность размещения родника ст. 143А. Он пространственно приурочен к распадку берега Байкала, из которого обломочный материал поступает в виде конуса выноса в прибрежную акваторию озера. Зимой на берегу Байкала образуется наледь. Нельзя исключить вероятности того, что выемка материала из распадка с родником ст. 143А осуществляется в тектонически ослабленной зоне с участием многолетнемерзлых пород. В северных регионах России при таянии древних мерзлых пород ОА4/8 возрастает до 15.7 с возрастанием общей минерализации (Yakovlev et al., 2021).

Если этот процесс действительно имеет место и повышенные значения ОА4/8 в водах родника ст. 143А маркируют остатки многолетнемерзлых пород в распадке на берегу Байкала, эта конкурирующая гипотеза должна быть проверена независимыми гидрогеохимическими данными. О возможном участии компонента многолетнемерзлых пород в подземных водах ст. 143А можно судить по изотопам водорода и кислорода. Для

изучения подземных и поверхностных вод используются сдвиги масс стабильных изотопов, входящих в молекулу воды – дейтерия ($\delta^2\text{H}$) относительно протия (^1H) – $\delta^2\text{H}$ и кислорода-18 (^{18}O) относительно кислорода-16 (^{16}O) – $\delta^{18}\text{O}$.

В настоящей работе определяется изотопный состав водорода и кислорода в воде с наиболее неравновесным ураном ст. 143А в сопоставлении с изотопными данными по водороду и кислороду, полученными для подземных вод других мониторинговых станций опорного Култукского полигона и сопредельных территорий Предбайкалья и Тункинской долины. Для интерпретации привлекаются данные по изотопам U, а также по общей минерализации (ОМ) и содержанию Si в подземных водах.

Объекты и методика исследований

На территории Предбайкалья и Тункинской долины в U-H-O-изотопные исследования вовлечены пробы подземных вод,

отобранные в основном летом и осенью 2022 г. (с 21 июля до 13 ноября). Опробование вод родников и скважин в Больших Котах проводилось годом раньше (17 октября 2021 г.). В отдельную группу объединяются пробы Култукского полигона, в зоне ГСР. По близости к Байкалу эта группа сопоставляется с группой водопунктов, опробованных вдоль северо-западного берега этого озера и берегов Иркутского водохранилища (ст. 136 (Бугульдейка), ст. ВК-2, ВК-11 (Большие Коты), ст. 108 (Большая Речка), ст. 194 (Иркутск, Радищево). Родник ст. 143А, с одной стороны, относится к Култукскому полигону, с другой стороны, он находится за пределами шовной зоны ГСР, в архейском Шарыжалгайском блоке фундамента Сибирского палеоконтинента. Этот родник расположен на берегу Байкала и рассматривается как водопункт из группы СЗ берега Байкала и берегов Иркутского водохранилища. Для сопоставления приводятся данные, полученные для подземных вод территорий, удаленных от Байкала и Иркутского водохранилища (рис. 1).

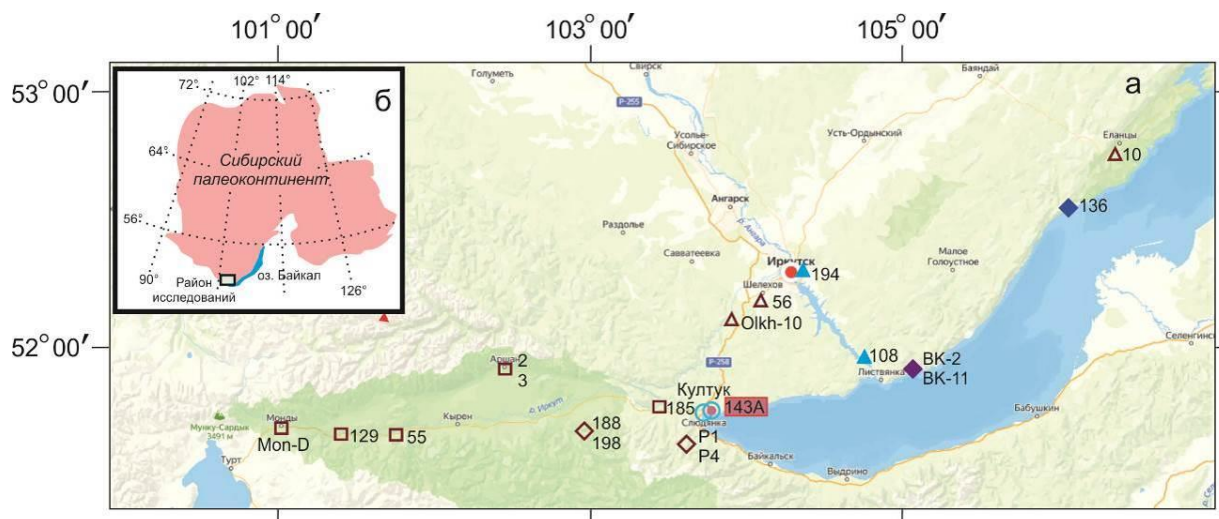


Рис. 1. Схема пространственного положения мониторингового полигона Култук (включая ст. 143А) и распределения опробованных подземных вод Предбайкалья и Тункинской долины (а) и положение района исследований на краю Сибирского палеоконтинента (б). Для обозначения местоположения проб используются значки групп, выделенных на диаграммах рис. 2.

Fig. 1. Schematic map of the location of the Kultuk monitoring area (including station 143A) and the distribution of sampled groundwater in the Pre-Baikal region and Tunka Valley (a) and the position of the research area on the edge of the Siberian paleocontinent (b). The location of samples is indicated by the icons of the groups highlighted in the diagrams of Fig. 2.

Для определения химического элементного состава природная вода фильтруется 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 взвешивают и рассчитывают точное содержание азотной кислоты (типично 2 %) и индия (типично 30 ppb). В подготовленных растворах определяют содержание 72 химических элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСПР-МС) на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 (Чебыкин и др., 2007, 2012). Изотопы урана определяются после его выделения на ионно-обменной колонке из отдельной пробы воды. Обычно достаточно 400 мл. Детали методики приведены в работе (Чебыкин и др., 2015).

Для исследований изотопного состава водорода и кислорода пробы воды фильтруются через мембранные фильтры 0.45 мкм в пробирки 2 мл. Пробы измеряются на изотопном анализаторе WS-CRDS Picarro L2140-i по методике спектроскопии поглощения света в многопоточных неаксиальных кюветках при сканировании по длинам волн (WS-CRDS, Wavelength Scanned Cavity Ring-Down Spectroscopy). Используется методика ААНИИ (Екайкин, 2016). В качестве стандарта используется иркутская водопроводная вода "Irk", откалиброванная по стандартам воды USGS-46, USGS-47 и стандартам института Арктики и Антарктики (ААНИИ, Санкт-Петербург) VOS-4 и SPB-2. Значения рабочего стандарта Irk: $\delta^{18}\text{O}$ -15.727, $\delta^2\text{H}$ -122.461. Погрешность измерений: $\delta^{18}\text{O}$ не более 0.05 ‰, $\delta^2\text{H}$ не более 0.8 ‰. Полученные данные приводятся в δ -обозначении относительно Венского стандарта средней океанической воды (VSMOW) (табл. 1).

Таблица 1

Гидрогеохимические данные для подземных вод станций мониторинга БРС

Table 1

Hydrogeochemical data for groundwater of BRS monitoring stations

Станция (номер серии)	Дата отбора	Координаты		ОМ, мг/дм ³	U, мкг/дм ³	Si, мг/дм ³	ОА4/8	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰
8 (191)	02.10.22	N51°43'34.2"	E103°41'55.86"	200	3.2	8.6	2.38	-14.12	-109.11
8 (192)	12.10.22	N51°43'34.2"	E103°41'55.86"	290	3.3	8.6	2.38	-14.39	-109.74
8 (193)	14.10.22	N51°43'34.2"	E103°41'55.86"	200	3.2	8.7	2.39	-14.40	-109.80
8 (194)	27.10.22	N51°43'34.2"	E103°41'55.86"	290	3.2	8.8	2.39	-14.43	-109.60
8 (196)	13.11.22	N51°43'34.2"	E103°41'55.86"	310	3.3	9	2.33	-14.40	-109.70
27 (191)	02.10.22	N51°43'31.26"	E103°42'23.04"	200	0.28	9.5	3.08	-14.56	-110.48
27 (192)	12.10.22	N51°43'31.26"	E103°42'23.04"	260	0.26	8.6	3.07	-14.53	-110.81
27 (193)	14.10.22	N51°43'31.26"	E103°42'23.04"	170	0.26	7.9	3.05	-14.63	-110.94
27 (194)	27.10.22	N51°43'31.26"	E103°42'23.04"	270	0.27	8.5	3.10	-14.55	-110.78
27 (196)	13.11.22	N51°43'31.26"	E103°42'23.04"	260	0.28	8.4	3.12	-14.47	-110.38
40 (191)	02.10.22	N51°43'18"	E103°42'17.46"	350	0.21	12.1	2.39	-13.60	-104.31
40 (193)	14.10.22	N51°43'18"	E103°42'17.46"	350	0.29	12.1	2.35	-13.63	-104.60
40 (194)	27.10.22	N51°43'18"	E103°42'17.46"	350	0.23	12.3	2.36	-13.65	-104.85
40 (196)	13.11.22	N51°43'18"	E103°42'17.46"	350	0.22	12.5	2.33	-13.56	-104.42
184 (191)	02.10.22	N51°43'25.94"	E103°42'00.89"	350	0.33	9.8	2.12	-13.78	-105.71
184 (193)	14.10.22	N51°43'25.94"	E103°42'00.89"	330	0.28	9.1	2.13	-13.78	-105.78
184 (194)	27.10.22	N51°43'25.94"	E103°42'00.89"	350	0.34	10.3	2.14	-13.73	-105.59
184 (196)	13.11.22	N51°43'25.94"	E103°42'00.89"	340	0.33	10.2	2.13	-13.85	-106.11
38 (144)	21.07.21			260	0.32	8.9	1.99	-14.63	-110.32
38 (196)	13.11.22			260	0.31	8.7	1.99	-14.65	-110.81

45 (196)	13.11.22			550	0.5	6.3	1.1	-13.96	-105.56
66A (132)	14.10.20	N51°44'20.28"	E103°41'46.92"	120	0.032	7	2.64	-14.96	-114.54
14к (193)	14.10.22	N51°44'0.06"	E103°39'30"	210	0.77	5.1	1.30	-15.84	-118.51
14к (194)	27.10.22	N51°44'0.06"	E103°39'30"	210	0.86	4.7	1.14	-15.86	-118.47
14к (196)	13.11.22	N51°44'0.06"	E103°39'30"	200	0.94	4.6	1.14	-15.92	-118.72
143A (196)	13.11.22			210	0.086	9	3.51	-15.10	-114.50
ВК-2	17.10.21	N51°54'33.54"	E105°04'31.38"	140	0.188	7	2.53	-15.23	-119.05
ВК-11	17.10.21	N51°54'32.51"	E105°4'24.96"	130	0.141	7.7	1.65	-16.27	-125.48
136 (190)	16.09.22	N52°32'55.44"	E106°04'18.6"	410	11.4	5.2	2.98	-16.32	-122.77
136 (193)	25.10.22	N52°32'55.44"	E106°04'18.6"	410	11.5	5.2	2.98	-16.34	-122.77
D (125-1)	12.05.20	N51°40'31.74"	E101°00'28.86"	170	0.41	2.8	1.61	-14.57	-111.89
129 (160)	17.12.21	N51°38'46.44"	E101°25'11.58"	300	2.1	5.4	1.87	-14.51	-107.91
55 (160)	17.12.21	N51°38'18.12"	E101°43'6.18"	290	4.6	9.5	1.81	-14.78	-109.08
3 (194)	27.10.22	N51°55'19.68"	E102°25'33.06"	220	1.45	2.7	1.28	-17.03	-125.66
2 (194)	27.10.22	N51°55'12.84"	E102°25'32.52"	3 500	7	40	1	-17.25	-126.45
185 (154)	22.10.21	N51°44'16.92"	E103°25'45.78"	210	0.0069	6.8		-15.84	-116.73
188 (131)	06.10.20	N51°37'39.90"	E102°58'26.20"	54	0.073	4.8	1.42	-13.96	-106.81
198 (151)	19.09.21			65	0.012	7		-16.09	-118.22
P4	08.08.22			130	0.166	4	1.20	-16.64	-121.38
P1	08.08.22			18	0.013	1.9		-16.91	-124.27
56 (185)	21.06.22			3 100	0.53	5	15.66	-17.68	-132.84
Oikh-10	01.07.22	N52°02'52.5"	E103°56'11.4"	89	0.024	3.9		-16.47	-122.41
194 (161)	29.12.21	N52°16'59.46"	E104°23'12.9"	410	0.0015	4.8		-16.70	-127.41
108_down(160)	20.12.21			140	0.014	6.8	2.02	-17.31	-128.91
108_up(160)	14.05.22			120	0.014	6.3	1.79	-17.33	-128.92
10 (190)	16.09.22	N52°44'25.74"	E106°18'25.26"	470	10.5	10.7	1.70	-15.72	-119.97
10 (193)	25.10.22	N52°44'25.74"	E106°18'25.26"	470	10.5	10.7	1.66	-15.76	-120.14
ЮБР*				100	0.5	0.6	1.95	-15.88	-126.21

К Култукскому полигону относятся станции: 8, 27, 40, 184, 38, 45, 66A, 14к и 143A.

*Состав ЮБР приводится для района Култука по данным (Оганесянц и др., 2021).

Результаты

Значения ОА4/8 для основных станций Култукского полигона (зона ГСР) меняются от 1.1 (ст. 14к) до 3.3 (ст. 27). В октябре и ноябре 2022 г. значения этого показателя не меняются, за исключением ст. 14к, для которой 14 октября 2022 г. получено значение 1.30, а позже, 27 октября и 13 ноября – более низкое значение (1.14). Эта станция представляет собой родник в палеосейсмодислокации ГСР, в котором наблюдаются сезонные вариации концентрации U и ОА4/8 (Ильясова и др., 2022).

Значения $\delta^{2}\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ также существенно меняются от станции к станции, но на каждой станции остаются на одном уровне в октябре и ноябре 2022 г. Максимальные величины обоих параметров получены для ст. 40, минимальные – для ст. 14к. Между изотопными составами урана и водорода–кислорода станций 8, 27, 40 и 184 соответствия в относительных вариациях не наблюдается, тогда как минимальное значение ОА4/8 для ст. 14к для всего Култукского полигона соответствует минимальным значениям $\delta^{2}\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ этой станции (рис. 2).

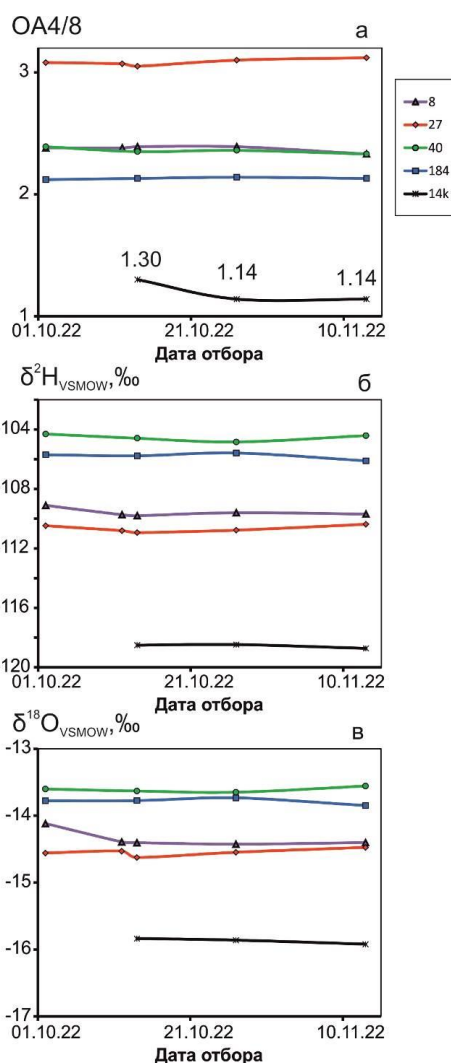


Рис. 2. Диаграммы значений $OA4/8$, δ^2H и $\delta^{18}O$ на шкале времени. Данные получены для основных мониторинговых станций подземных вод Култукского полигона в октябре и ноябре 2022 г. Характеристика станций приведена в работах (Рассказов и др., 2015, 2022).

Fig. 2. Diagrams of $AR4/8$, δ^2H , and $\delta^{18}O$ values on a time scale. The data are obtained for the main groundwater monitoring stations of the Kultuk area in October and November 2022. The stations are described in (Rasskazov et al., 2015, 2022).

Для подземных вод Култукского полигона получены в целом более высокие значения δ^2H и $\delta^{18}O$ чем для подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища. На диаграммах $\delta^2H - OA4/8$ и $\delta^{18}O - OA4/8$ (рис. За,в) для подземных вод Култукского полигона обозначаются компоненты E (с равновесным ураном, equilibrium U) и NE (с неравновесным ураном, nonequilibrium U). Первый из них представлен низким значением δ^2H подземных вод ст. 14к (около -120 ‰) и более высоким значением подземных вод ст. 45 (около -105 ‰), второй имеет

промежуточное значение δ^2H подземных вод ст. 27 (около -110 ‰).

Фигуративная точка пробы воды ст. 143А выходит за пределы фигуративных поля подземных вод Култукского полигона (зоны ГСР) и находится на верхнем окончании тренда подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища. Нижнему окончанию тренда соответствуют точки подземных вод ст. 108 (Большая Речка). К тренду относятся точки подземных вод Больших Котов (ст. БК-2 и БК-11) и Бугульдейки (ст. 136).

На диаграммах $\delta^2H - OA4/8$ и $\delta^{18}O - OA4/8$ (рис. 3б,г) для подземных вод Тункинской

долины и удаленных от оз. Байкал и Иркутского водохранилища, получены группы точек с повышенными значениями $\delta^2\text{H}$ (–107–112 ‰) и $\delta^{18}\text{O}$ (–14–15 ‰) при умеренном значении ОА4/8 (1.4–2.0) и с низкими значениями $\delta^2\text{H}$ (–115–120 ‰) и $\delta^{18}\text{O}$ (–16.0–16.5 ‰) при более низких значениях ОА4/8 (0.97–1.3). Отдельно располагаются фигуративные точки подземных вод Предбайкалья (ст. 56 и

10). Высокое значение ОА4/8 (около 15) минеральной воды ст. 56 (Олхинская скважина) отражает особый состав ее источника. Для этой воды получены наиболее низкие значения $\delta^2\text{H}$ (–132.84 ‰) и $\delta^{18}\text{O}$ (–17.68 ‰) среди всех исследованных подземных вод территории исследований.

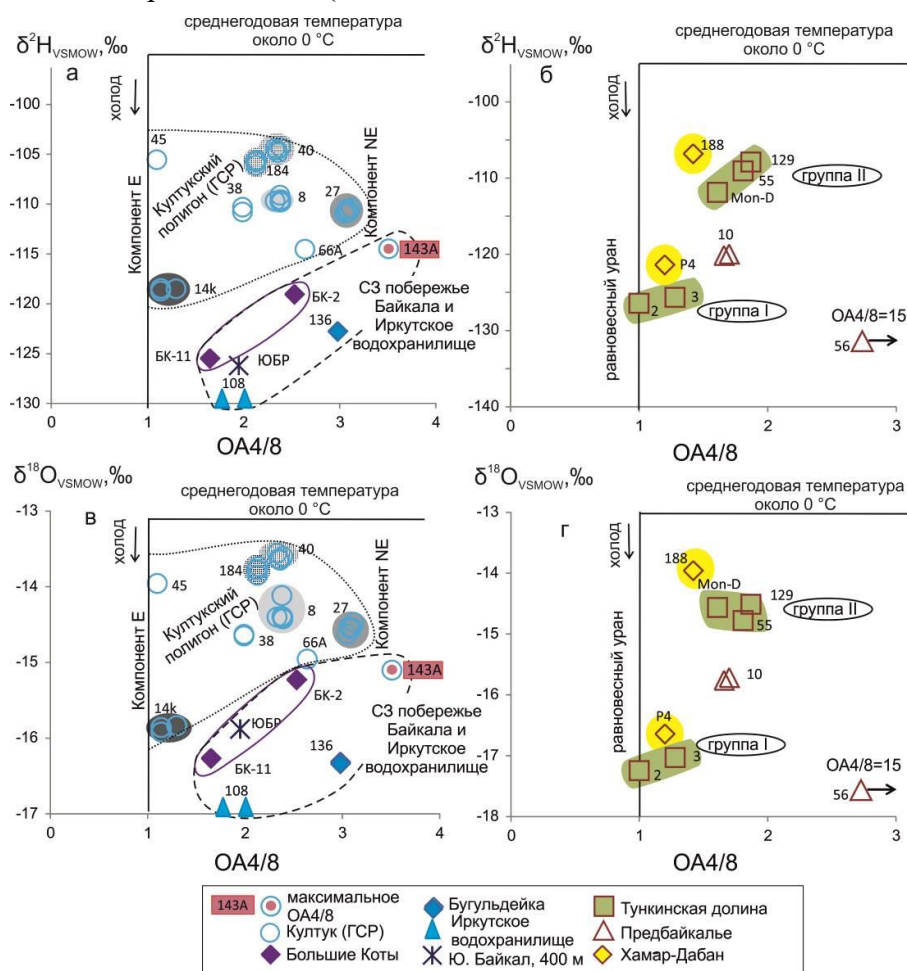


Рис. 3. Диаграммы $\delta^2\text{H}$ – ОА4/8 (а) и $\delta^{18}\text{O}$ – ОА4/8 (в) для подземных вод Культукского полигона, северо-западного побережья Байкала и восточного берега Иркутского водохранилища и сопредельных территорий Предбайкалья и Тункинской долины, удаленных от оз. Байкал и Иркутского водохранилища, и диаграммы $\delta^2\text{H}$ – ОА4/8 (б) и $\delta^{18}\text{O}$ – ОА4/8 (г) для подземных вод, соответственно, этих же территорий (выделены группы I и II). Точки опробования см. на рис. 1. Значения $\delta^2\text{H} = -126.21 \pm 0.08$ и $\delta^{18}\text{O} = -15.88 \pm 0.17$ глубинной воды ЮБР приняты по результату измерения пробы байкальской воды с глубины 400 м в районе Культука (Оганесянц и др., 2022).

Fig. 3. Diagrams $\delta^2\text{H}$ vs AR4/8 (a) and $\delta^{18}\text{O}$ – AR4/8 (в) for groundwater of the Kultuk are, northwest coast of Lake Baikal, and eastern shore of the Irkutsk Reservoir and adjacent territories of the Pre-Baikalia region and Tunka Valley, remote from Lake Baikal and the Irkutsk Reservoir, and diagrams $\delta^2\text{H}$ vs AR4/8 (б) and $\delta^{18}\text{O}$ – AR4/8 (г) for groundwater, respectively, of the same territories (groups I and II are highlighted). Sampling sites are shown on Fig. 1. The values of $\delta^2\text{H} = -126.21 \pm 0.08$ and $\delta^{18}\text{O} = -15.88 \pm 0.17$ of the deep water composition of the South Baikal Reservoir are plotted for the Baikal water sample taken from a depth of 400 m in the Kultuk area (Oganesyants et al., 2022).

На диаграмме $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ (рис. 4а) фигуративные точки подземных вод Култукского полигона относятся к единому тренду от состава ст. 14к до состава ст. 40. Тренд смещен ниже глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) с некоторым наклоном. Подземные воды полигона объединяются в единую генетическую совокупность. Точки подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища также смещены ниже линии ГЛМВ. Самые низкие значения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$, соответствующие ГЛМВ, имеет вода ст. 108 (Большая Речка берега Иркутского водохранилища). Вблизи точки этой станции на диаграмме рис. 4а находится точка ст. 194 – родника, газифицирующего сероводородом (Радищево, г. Иркутск). Точки подземных вод северо-западного побережья Байкала сдвинуты вверх и вправо. В целом точки подземных вод

северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища рассеяны между составами ЮБР и ГЛМВ. Составу ЮБР наиболее близок состав подземной воды ст. БК-11 (Большие Коты). Точка воды ст. 143А принадлежит тренду подземных вод Култукского полигона и в то же время может интерпретироваться в рамках гипотезы общего рассеяния точек подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища.

На рис. 4б точки подземных вод территорий Предбайкалья и Тункинской долины, удаленных от оз. Байкал образуют две группы с относительным смещением вдоль ГЛМВ (I и II). Для проб, отобранных в районе Олхи (ст. Olkh-10 и 56), проявляется тенденция смещения точек правее ГЛМВ.

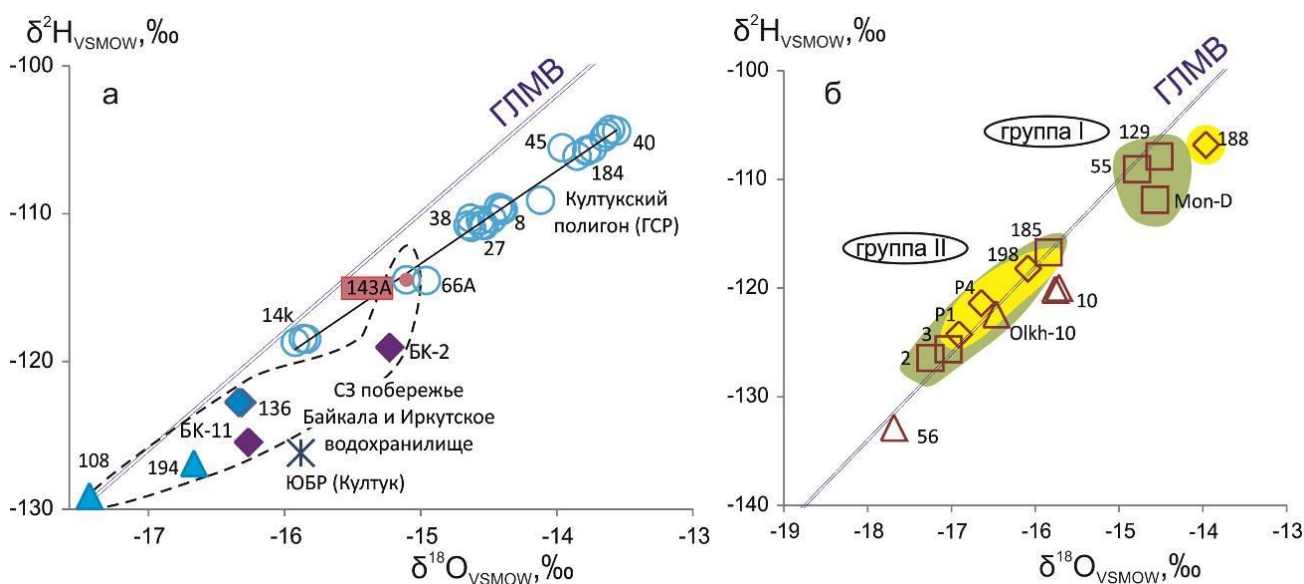


Рис. 4. Диаграммы $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ для подземных вод Култукского полигона, северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища (а) и сопредельных территорий Предбайкалья и Тункинской долины, удаленных от оз. Байкал (б). Точки опробования см. на рис. 1, условные обозначения – на рис. 3. Положение глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) из работы (Craig, 1961).

Fig. 4. Diagrams $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ for groundwater of the Kultuk area, northwestern coast of Lake Baikal, and eastern coast of the Irkutsk reservoir (a) and adjacent territories of the Pre-Baikal region and Tunka Valley, remote from Lake Baikal (b). Sampling sites are shown in Fig. 1, symbols – in Fig. 3. The Global Line of Meteoric Waters (GLMW) is shown after (Craig, 1961).

На диаграмме ОА4/8 – ОМ (общая минерализация) (рис. 5а) значения ОМ меняются в подземных водах Култукского полигона (в

зоне ГСР) от 130 до 560 мг/дм³ при вариациях значений ОА4/8 от 1.1 до 3.2. Максимальный разброс значений ОМ дает компонент Е. С

возрастанием ОА4/8 разброс значений ОМ последовательно уменьшается и в компоненте NE (ст. 27) составляет интервал от 180 до 280 мг/дм³. В этот интервал попадает значение ОМ воды ст. 143А (200 мг/дм³). Точка этой станции фактически продолжает тренд ОА4/8 – ОМ подземных вод Култукского полигона (зоны ГСР). Точки подземных вод Иркутского водохранилища (ст. 108) и Больших Котов (ст. БК-2 и БК-11) смещены левее фигуративного поля подземных вод Култукского полигона, к составу ЮБР, а точка воды Бугульдейки (ст. 136) смещена, наоборот, правее этого фигуративного поля.

На диаграммах $\delta^2\text{H}$ – ОМ и $\delta^{18}\text{O}$ – ОМ (рис. 5в,д) точки подземных вод имеют иной характер распределения, что подчеркивает резкие различия генетической информации ОА4/8 (изотопов U, растворенного в воде) и параметров $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ (термального фракционирования изотопных компонентов молекулы воды). Значение ОМ в резервуаре Южного Байкала минимальное (около 100 мг/дм³). Тренды возрастания ОМ с повышением $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в подземных водах Култукского полигона начинаются от состава ЮБР и образуют дуги. С началом тренда совпадают точки подземных вод Больших Котов (ст. БК-2 и БК-11). Точки подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища рассеяны правее состава ЮБР с относительным возрастанием ОМ при снижении $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$. Точка воды ст. 143А занимает

промежуточное положение. Она входит не только в фигуративные поля подземных вод Култукского полигона (зоны ГСР), но и в фигуративные поля подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища.

На диаграмме ОА4/8 – ОМ подземных вод территорий Предбайкалья и Тункинской долины, удаленных от Байкала и Иркутского водохранилища (рис. 5в), минимальной минерализаций характеризуются воды Хамар-Дабана (ст. 188 и Р4). В Тункинской долине и Олхинском Предбайкалье ОМ подземных вод возрастает. В измерения изотопов включены пробы минеральной воды курорта Аршан в Тункинской долине (ст. 2) с почти изотопно-равновесным U (ОА4/8 = 0.97) и высоким значением ОМ (3.5 г/дм³), а также минеральной воды Олхинской скважины с резко неравновесным U (ОА4/8 = 15) и высоким значением ОМ (3.1 г/дм³).

На диаграммах $\delta^2\text{H}$ – ОМ и $\delta^{18}\text{O}$ – ОМ подземных вод территорий Предбайкалья и Тункинской долины, удаленных от Байкала и Иркутского водохранилища (рис. 5г,е), наблюдается рассеяние фигуративных точек групп I и II. Распределение точек подземных вод группы I в целом подобно рассеянию точек подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища. Распределение точек подземных вод группы II частично совпадает с трендом подземных вод Култукского полигона.

Сопоставления

Фигуративные точки изотопных составов кислорода и водорода поверхностных и подземных вод Тункинской долины в целом соответствуют направлению ГЛМВ (рис. 7). По данным, приведенным в работе (Дриль и др., 2005), речные воды этой долины условно разделяются на 2 группы по преобладающему типу питания – существенно дождевого (группа I) и существенно ледникового (группа II). Для группы I характерны более

высокие значения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$, что связано с преобладанием в их питании дождевых вод. К этой группе относятся поверхностные воды р. Иркут и его притоков на абсолютных высотах 700–900 м. Группа речных вод II отличается более низкими значениями $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$, которые объясняются значительной ролью талых ледниковых вод в их питании. К ним относятся воды р. Иркут и его притоков в верхнем течении, на абсолютных высотах 1000–2000 м.

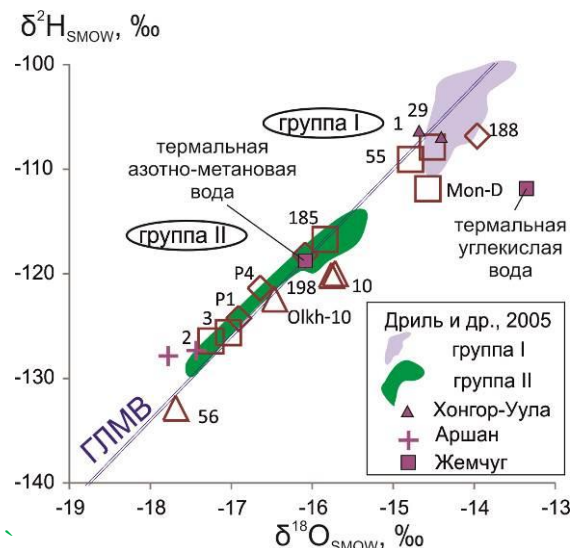


Рис. 7. Диаграмма $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ сравнения данных, полученных для подземных вод территорий Предбайкалья и Тункинской долины, удаленных от оз. Байкал с данными о поверхностных и минеральных водах Тункинской долины Байкальской рифтовой системы. Группы изотопных составов поверхностных вод (реки: Иркут, Ихе-Угунь, Кынгарга, Халагун, Большой и Малый Зангисан, Харагун, Зун-Мурин) на различных гипсометрических уровнях (I – 700–900 м и II – 1000–2000 м) (Дриль и др., 2005) дополняются новыми данными авторов по подземным водам. Точки опробования см. на рис. 1, условные обозначения – на рис. 3.

Fig. 7. Diagram $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ comparing the data obtained for groundwater in the Pre-Baikal region and the Tunka Valley, located far from Lake Baikal with the data on surface and mineral waters in the Tunka Valley of the Baikal Rift System. The groups of isotope compositions of surface waters (rivers: Irkut, Ikhe-Ugun, Kyngarga, Khalagun, Bolshoi and Maly Zangisan, Kharagun, Zun-Murin) at different hypsometric levels (I – 700–900 m and II – 1000–2000 m) (Dril' et al., 2005) are supplemented by the authors' new data. Sampling sites are shown in Fig. 1, symbols – in Fig. 3.

Минеральные источники обнаруживают отчетливую связь с поверхностными водами в зоне разгрузки. Например, воды родников Хонгор-Ула («Почечный» и «Общеукрепляющий») принадлежат к группе I поверхностных вод, а подземные воды месторождения Аршан принадлежат к группе II (см. рис. 6). Воды месторождения Жемчуг характеризуются резко различным изотопным составом воды. Азотно-метановая термальная вода имеет изотопный состав, соответствующий группе II поверхностных вод, тогда как

углекислая термальная вода имеет более высокие значения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$. Существенный сдвиг вправо от линии метеорных вод точки углекислого состава интерпретируется как результат изотопного обмена при повышенной температуре с карбонатными породами, для которых определен интервал значений $\delta^{18}\text{O}$ от +17.6 до +27.2 ‰ (Дриль и др., 2005).

Группирование поверхностных вод по преобладающему типу питания в целом подтверждается представленными результатами определений изотопного состава водорода и

кислорода в подземных водах станций Предбайкалья и Тункинской долины, удаленных от оз. Байкал. В подземных водах отсутствуют аналоги речных вод с наиболее легкими изотопными составами водорода и кислорода. Минеральная вода ст. 56 (Олхинской скважины) не имеет изотопного аналога в поверхностных водах.

Новые данные характеризуют в основном подземные воды верхнего гидрогеодинамического этапа коры на глубинах до 1.6 км. В работу включена единственная проба ст. 2 с большей глубины (с нижнего

гидрогеодинамического этапа) – проба холодной углекислой минеральной воды курорта Аршан. Фигуративная точка этой минеральной воды соответствует тренду термальных вод Баунтовской впадины БРС. В отличие от трендов возрастания $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ с возрастанием Si (т.е. с повышением температуры) в Култукском резервуаре верхнего гидрогеодинамического этапа, в Баунтовском резервуаре термальных вод нижнего гидрогеодинамического этапа наблюдаются тренды падения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ с возрастанием Si (т.е. с повышением температуры) (рис. 8).

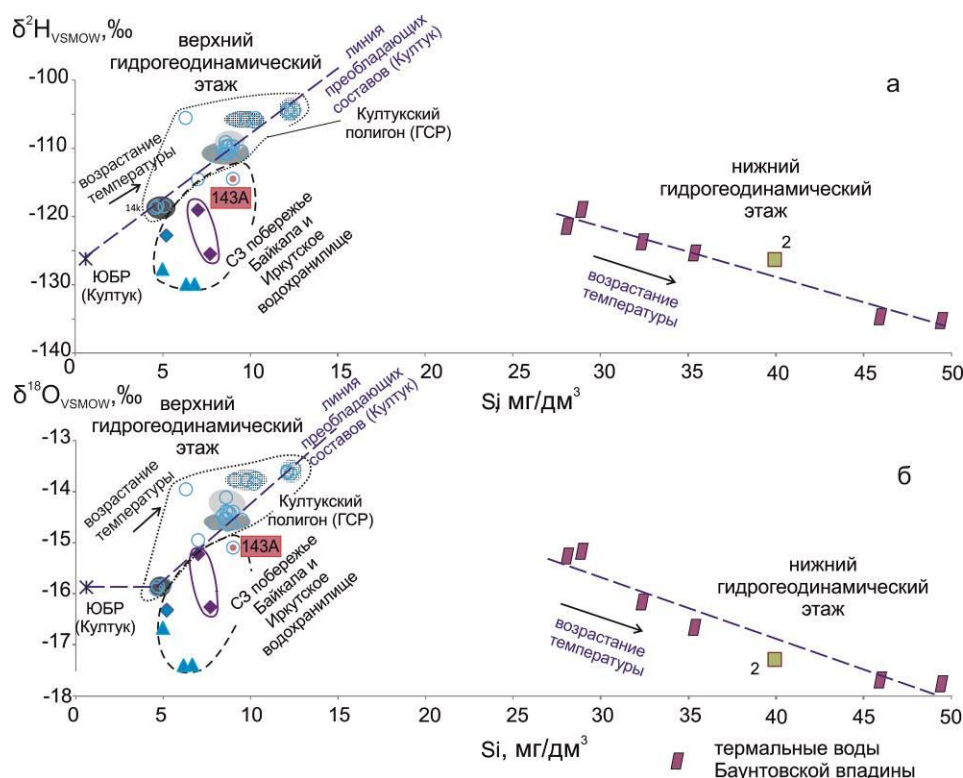


Рис. 8. Диаграммы $\delta^2\text{H}$ – Si (а) $\delta^{18}\text{O}$ – Si (б) сравнения данных, полученных для подземных вод Култукского полигона, северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища (см. рис. 5а) с данными о термальных водах Баунтовской впадины БРС (Замана, 2011). Условные обозначения см. на рис. 3.

Fig. 8. Diagrams $\delta^2\text{H}$ vs Si (а) $\delta^{18}\text{O}$ vs Si (б) comparing the data obtained for groundwater of the Kultuk area, northwest coast of Lake Baikal, and Irkutsk reservoir (Fig. 5а) with the data on thermal waters of the Baunt basin of the BRS (Zamana, 2011). Sampling sites are shown in Fig. 1, symbols – in Fig. 3.

Обсуждение результатов

Подземные воды ст. 143А частично соответствуют геохимическим параметрам Култукского резервуара подземных вод, а частично – геохимическим параметрам подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского

водохранилища. В подземные воды этих территорий предполагается вхождение компонента ЮБР (Рассказов и др., 2020а). В обсуждении результатов дается определение двухкомпонентного смешения подземных вод Култукского резервуара с выделением роли состава ЮБР, особо подчеркивается приложение результатов определения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$

для интерпретации происхождения подземных вод Култукского полигона в сопоставлении с подземными водами сопредельных территорий БРС и приводится обоснование специфики изотопных характеристик подземных вод ст. 143А с позиций определения их структурного контроля дуговым разломом.

Модель двух-компонентного смешения подземных вод Култукского резервуара

В результате существенных тектонических движений берегов шовной зоны ГСР ее породы переработаны с усреднением состава тектонитов, поэтому растворы взаимодействия вода–порода Култукского резервуара в этой зоне характеризуются смешением двух компонентов, один из которых имеет

высокое $OA4/8$ (3.3) и низкое отношение $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.70534), другой дает равновесное значение $OA4/8$, близкое к 1 при высоком отношении $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.7205). С выходом на фланги шовной зоны ГСР модель смешения изотопов U и Sr в подземных водах меняется из-за резкого возрастания отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ в древнейших метаморфических породах (гнейсах) Шарыжалгайского блока и относительного снижения этого отношения в более молодых породах Слюдянского блока. В качестве одного из компонентов в Култукский резервуар подземных вод входит глубинная вода Южно-Байкальского резервуара (ЮБР) с характеристиками: $OA4/8 = 1.96$, $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.708629$ (рис. 9).

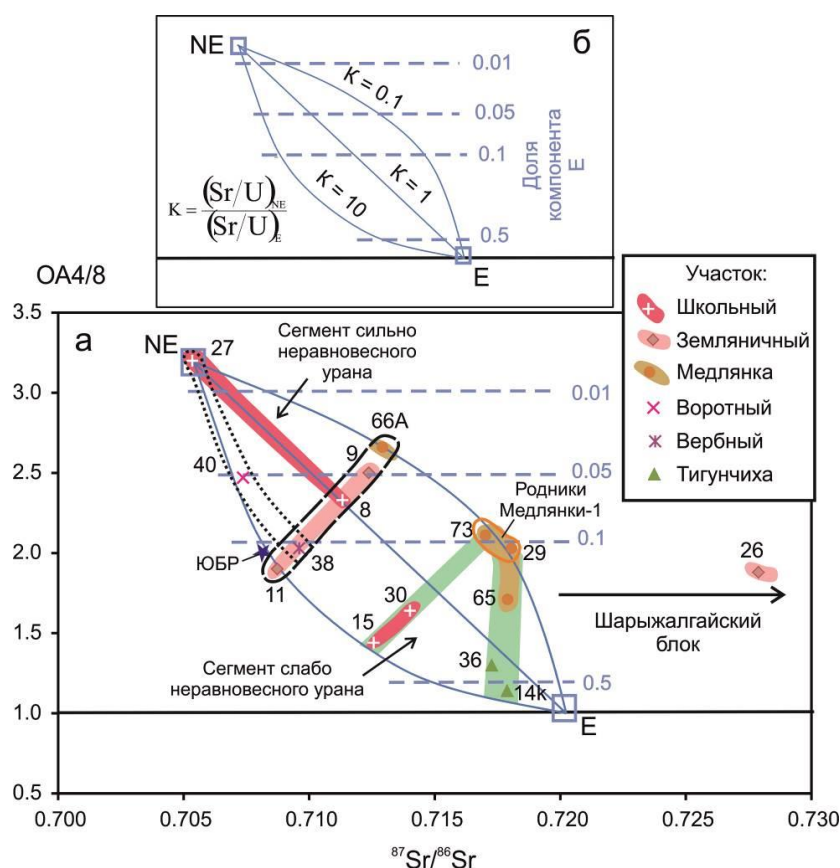


Рис. 9. Диаграмма $OA4/8 - ^{87}Sr/^{86}Sr$ подземных вод Култукского полигона. На врезке б приведена детерминированная двухкомпонентная модель. Конечные компоненты: E – с равновесным ураном (equilibrium U), NE – с неравновесным ураном (nonequilibrium U), $U_E > U_{NE}$. Воды Байкала и родников р. Медлянка-1 соответствуют содержаниям около 10 % компонента E. В сегменте сильно неравновесного урана доля этого компонента ниже, а в сегменте слабо неравновесного урана – выше. Характеристика станций Култукского полигона приведена в работе (Рассказов и др., 2015), обоснование компонента глубинной воды Южно-Байкальского резервуара ($OA4/8 = 1.96$; $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.70863$) – в работах (Рассказов и др., 2020а; Rasskazov et al., 2020б).

Fig. 9. Diagram $AR4/8$ vs $^{87}Sr/^{86}Sr$ of groundwater of the Kultuk area. Inset б shows a deterministic two-component model. Final components: E – with equilibrium uranium, NE – with nonequilibrium uranium, $U_E > U_{NE}$. Waters of Lake Baikal and springs of the Medlyanka-1 river correspond to ~10% of component

E. In the segment of strongly nonequilibrium uranium, the share of this component is lower, and in the segment of slightly nonequilibrium uranium, it is higher. Stations of the Kultuk area are described in (Rasskazov et al., 2015), the substantiation of the deep water component of the South Baikal Reservoir ($AR4/8 = 1.96$; $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.70863$) is given in the works (Rasskazov et al., 2020a; Rasskazov et al., 2020b).

На диаграммах $\delta^2H - OA4/8$ и $\delta^{18}O - OA4/8$ (рис. 3а,в) большинство фигуративных точек подземных вод Култукского полигона находится между точками ст. 45 и 27. Единственная точка ст. 66А попадает между точками ст. 14к и 27. Такое распределение точек подземных вод этих станций в общем согласуется с их пространственным разделением на диаграмме $OA4/8 - ^{87}Sr/^{86}Sr$ (рис. 9). Таким образом, данные по изотопам водорода и кислорода (входящие в молекулу воды) подземных вод Култукского полигона (зоны ГСР) служат дополнительным подтверждением принятой двухкомпонентной модели смешения растворенных компонентов. При этом подземные воды компонента Е (с У, близким изотопному равновесию) на ст. 45 дает меньший температурный сдвиг (δ^2H и $\delta^{18}O$), а на ст. 14к – больший. Фигуративная точка ЮБР находится ниже фигуративных полей подземных вод Култукского полигона (зоны ГСР); значение $\delta^{18}O (-15.88)$ сопоставимо с этим показателем подземных вод ст. 14к, тогда как

значение $\delta^2H (-126.21)$ существенно ниже значения подземных вод ст. 14к.

Механизмы фракционирования изотопов водорода и кислорода в подземных водах

Если подпитка глубинными флюидами отсутствует, подземные воды территории формируются за счет метеорных осадков и имеют инфильтрационное происхождение. Исходные изотопы вод, выпавших на поверхность Земли, в основном фракционируют в зависимости от температур. В теплых климатических условиях изотопный состав вод облегчается, в холодных – утяжеляется. Изотопы заметно фракционируют при испарении вод с фазовым переходом в водяной пар и при замерзании с фазовым переходом в лед. Линия замерзания (ЛЗ) пересекает глобальную линию метеорных вод (ГЛМВ) при низких значениях δ^2H и $\delta^{18}O$, линия испарения (ЛИ) – при повышенных значениях δ^2H и $\delta^{18}O$ (рис. 10).

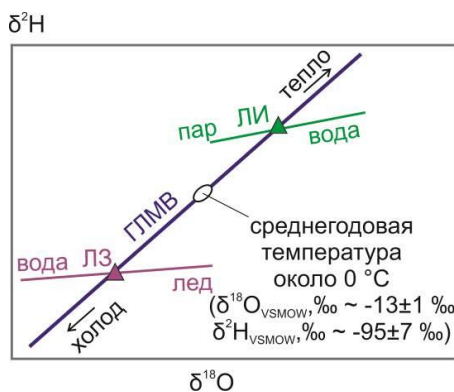


Рис. 10. Вариации изотопного состава водорода и кислорода в воде в зависимости от среднегодовой температуры воздуха. Начальный изотопный состав воды линий испарения (ЛИ) и замерзания (ЛЗ) соответствует глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ). При испарении уходящий пар по изотопам водорода и кислорода облегчается – «пар», а остаточная вода утяжеляется – «вода». При замерзании остаточная вода по изотопам водорода и кислорода облегчается – «вода», а лед утяжеляется – «лед». Из работы (Токарев, 2025) с изменениями.

Fig. 10. Variations in isotopic compositions of hydrogen and oxygen in water depending on the average annual air temperature. The initial isotopic composition of water of the evaporation (ЛИ) and freezing (ЛЗ) lines corresponds to the Global Line of Meteoric Waters (ГЛМВ). During evaporation, the outgoing steam becomes lighter in hydrogen and oxygen isotopes – “steam”, and the residual water becomes heavier – “water”. During freezing, the residual water becomes lighter in hydrogen and oxygen isotopes – “water”, and the ice becomes heavier – “ice”. Modified after (Tokarev, 2025).

Для водно-ледниковых объектов предполагается, что величины ОА4/8 в подземных водах, превышающие 3, являются следствием таяния многолетнемерзлых пород (Токарев, 2025). Этот механизм принимается как универсальный для выделения территорий подземных вод с высоким ОА4/8, в которых, как предполагается, когда-то распространялись мерзлые породы.

Тренд преобладающих составов подземных вод Култукского полигона на диаграмме $\delta^2\text{H} - \text{Si}$ (рис. 6а) отражает температурное фракционирование изотопов водорода. Растворение Si в подземных водах зависит от температуры. Из линейного согласования повышения значений $\delta^2\text{H}$ и содержания Si в подземных водах следует, что изотопный состав водорода меняется в зависимости от температуры в результате фракционирования изотопов при взаимодействии вода–порода непосредственно в Култукском резервуаре подземных вод. Таким образом, изотопный состав водорода в подземных водах может существенно отличаться от первичного состава метеорных вод (если они проникали в кору) и отражать градиент температур и фазовые переходы, существующие в резервуаре подземных вод. Смещение точки ЮБР влево относительно тренда точек подземных вод Култукского полигона на диаграмме $\delta^{18}\text{O} - \text{Si}$ (рис. 6б) в сравнении с ее положением на тренде диаграммы $\delta^2\text{H} - \text{Si}$ (рис. 6а) свидетельствует о разной роли компонентов изотопов водорода и кислорода в подземных водах полигона.

Поток газов–восстановителей (включая водород) усиливается при активизации разломов, приводящей к землетрясениям, что отражается в резком косейсмическом снижении окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) подземных вод и возрастанию роли атомарной ртути (Чебыкин и др., 2022; Рассказов и др., 2023). Согласованность тренда подземных вод Култукского полигона с составом ЮБР на диаграмме $\delta^2\text{H} - \text{Si}$ отражает (рис. 6а), таким образом, восстановленный характер флюидных потоков, которые преобладают в ходе сейсмической активизации разломов.

Интересно, что в метане газогидратов определен интервал $\delta^2\text{H}$ от -200 до -300 (Nashikubo et al., 2013). Пока не ясно, может ли повлиять разрушение газогидратов в донных отложениях Байкала на измеренные значения $\delta^2\text{H}$ в глубинной байкальской воде.

На примере трендов понижения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ с повышением Si в термальных водах

Баунтовской впадины Л.В. Замана (2011, с. 90) приходит к выводу о том, что «...данные по изотопному составу воды изученных термальных источников (Баунтовской впадины ред.) не расходятся с выводом о ее метеогенном происхождении, но в то же время корреляция изотопных отношений с концентрациями растворенной кремнекислоты дает основание предполагать возможность фракционирования изотопов и кислорода, и водорода в процессе взаимодействия воды с вмещающими породами». Рассмотрение причин образования разнонаправленных трендов $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ с возрастанием Si в подземных водах Култукского полигона и Баунтовской впадины выходит за рамки настоящей статьи. Заметим только, что за этими различиями кроются разные механизмы образования трендов. Термальные воды представляют собой открытую систему. Они характеризуются изотопным составом урана, близким к равновесию (Рассказов и др., 2024). Утяжеление изотопных составов водорода и кислорода термальных вод может быть следствием увеличения роли отделившейся газовой фазы при высокой (возрастающей) температуре (показатель – растворение Si) на нижнем гидротектоническом этаже.

Из выявленных зависимостей изотопных составов водорода и кислорода от содержания кремния (растворенной кремнекислоты) в подземных водах Култукского полигона и Баунтовской впадины следует, что подземные воды этих территорий получают сильные сигналы от вмещающих пород, вносящие искажения в их первоначальное состояние (зависимое или независимое от климатических условий). Этот вывод важен для подземных вод Култукского полигона с точки зрения мониторинговых наблюдений для оценки угрозы землетрясений. В подземных водах полигона выявляются изменения различных гидрогеохимических параметров. Изотопный состав водорода и кислорода также подвержен изменениям, свидетельствующим о существенных отличиях процессов глубинного Култукского резервуара от резервуаров других территорий БРС.

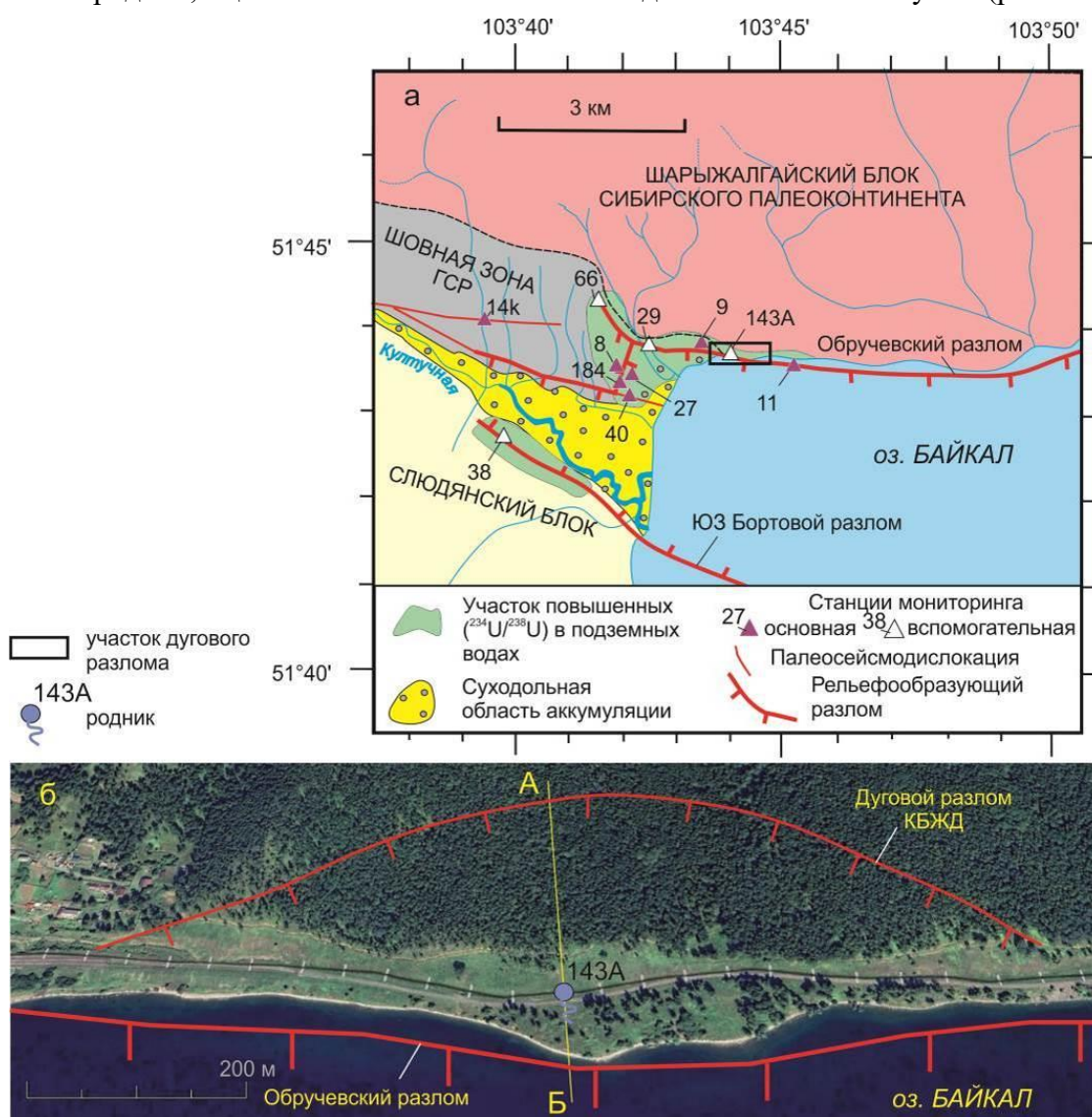
Структурный контроль выхода подземных вод в архейских породах Шарыжалгайского блока

Гипотеза о причинах повышения ОА4/8 в подземных родниковых водах ст. 143А укладывается в рамки интерпретации структуры территории как сочленения шовной зоны ГСР с Обручевским разломом, отсекающим от Шарыжалгайского блока сегмент,

опущенный за кайнозойское время в Южном Байкале не менее чем на 4 км (Rasskazov et al., 2020b). Соответственно, возрастание ОА4/8 вызвано более интенсивной отдачей ядер ^{234}U из области микротрещиноватости архейских шарыжалгайских пород по сравнению с отдачей из области микротрещиноватости тектонитов шовной зоны ГСР в Култукском резервуаре подземных вод.

Роднику ст. 143А пространственно соответствует дуговой разлом КБЖД, протягивающийся вдоль Обручевского разлома, приблизительно на 1 км (рис. 11а). Расстояние от родника ст. 143А до центральной части дуги составляет 220 м. Глубина резервуара, питающего этот родник, оценивается в 1.4 км по

температуре $34\text{ }^{\circ}\text{C}$, рассчитанной по концентрации $\text{Si } 9\text{ мг/дм}^3$ в воде этой станции с использованием халцедонового геотермометра (Amorsson et al., 1983) и регионального геотермического градиента $25\text{ }^{\circ}\text{C/км}$ (Голубев, 2007). Малое расстояние от дугового разлома до родника ст. 143А предполагает субвертикальное погружение дугового разлома до резервуара с последующим выполаживанием плоскости и переходом в листрический разлом. С учетом вероятного площадного нарушения геотермического градиента под впадиной оз. Байкал (Голубев, 2007), эта оценка глубины резервуара вод ст. 143А (1.5 км), скорее всего, занижена. Резервуар должен находиться несколько глубже (рис. 11б).



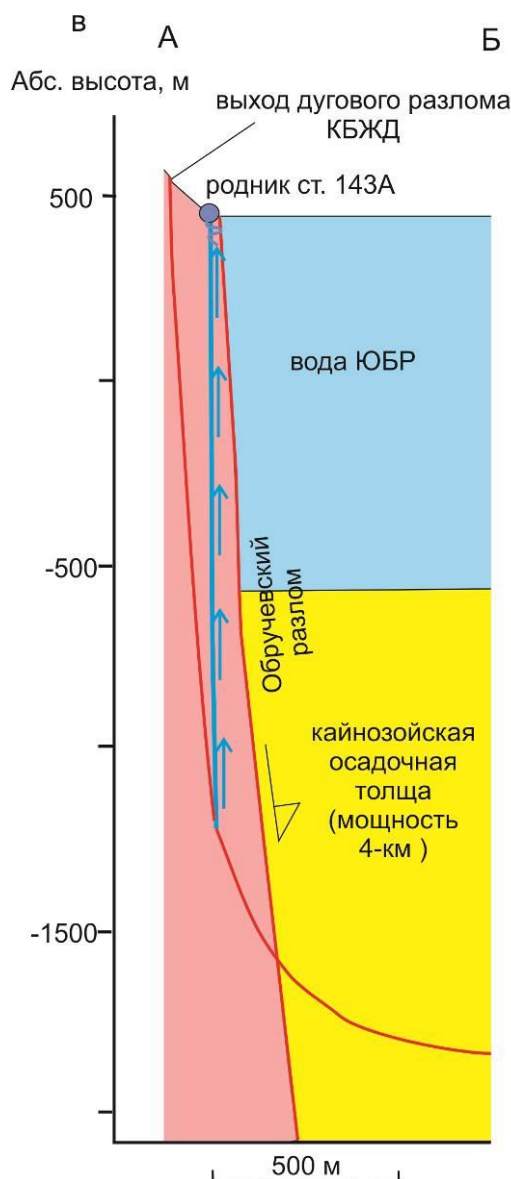


Рис. 11. Схема выхода родника (станция 143А) на восточной окраине Култукского мониторингового полигона с его структурным контролем дуговым разломом КБЖД на береговом склоне (а) и субмеридиональный профиль АБ предполагаемой глубинной структуры, контролирующей подземные воды (б). На панели а разлом выражен в рельефе уступами и западинами. Расстояние от родника до центральной части дуги – 220 м, до ее западного окончания на окраине пос. Култук – 500 м, до восточного окончания – 520 м. На панели б вода поднимается в структуре дугового разлома от области перехода его субвертикального падения к листрической части.

Fig. 11. Scheme of a spring outlet (station 143A) on the eastern margin of the Kultuk monitoring area with its structural control by the arc fault of the Circum-Baikal Railway on the coastal slope (a) and the north-south profile АБ of the supposed deep structure controlling groundwater (b). In panel a the fault is expressed in the relief by benches and depressions. The distance from the spring to the central part of the arc is 220 m, to its western end on the outskirts of the village of Kultuk is 500 m, to the eastern end is 520 m. In panel b the water rises in the structure of the arc fault from the area of transition from its subvertical dip to the listric one.

Активность дугового разлома КБЖД, контролирующего родник ст. 143А при подготовке Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации 2020–2023 гг., отражается в вариациях содержания Si подземных вод (рис. 12а). В 2016 г. в воде родника содержалось

около 7 мг/дм^3 растворенного кремния. Содержание Si возросло с течением времени и 18 июня 2016 г. составляло около 8 мг/дм^3 . В последующие 2.5 месяца содержание Si еще возросло более чем на 1 мг/дм^3 и 02 сентября 2019 г. вошло в диапазон значений 9.0–9.5

мг/дм³, характерный для Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации. Максимальное значение концентрации Si (9.5 мг/дм³) определено 21 июля 2021 г., после запускающих землетрясений (Быстринского, Кударинского и Хубсугульского). Проба воды, отобранная 18 февраля 2023 г., показала значение 9.1 мг/дм³ в диапазоне значений, характеризующих активизацию, но следующая проба, отобранная 05 апреля 2024 г.,

имела более низкое значение (8.6 мг/дм³). Спад концентрации Si обозначил завершение сейсмической активизации.

В досейсмический временной интервал 2016–2019 гг. значения ОА4/8 подземных вод были повышенными (3.57–3.68) и во время Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации снизились до интервала 3.48–3.54. Последнее значение, измеренное 18 февраля 2023 г., опустилось до 3.41 (рис. 12б).

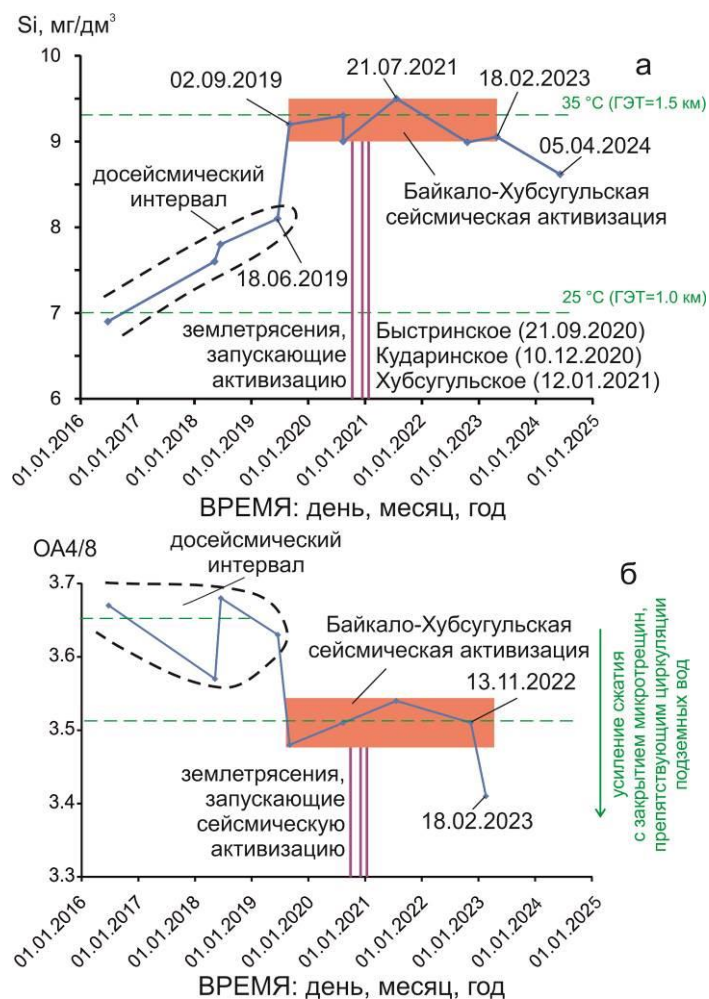


Рис. 12. Диаграммы временных вариаций (в 2016–2024 гг.) Si (а) и ОА4/8 (б) в подземных водах ст. 143А. Температура в резервуаре подземных вод рассчитывается по халцедоновому геотермометру (Arnorsson et al., 1983). ГЭТ – глубинный эквивалент температуры, оценивается по региональному геотермическому градиенту 25 °С/км (Голубев, 2007).

Fig. 12. Diagrams of temporal variations (in 2016–2024) of Si (a) and AR4/8 (b) in groundwater at station 143A. The temperature in the groundwater reservoir is calculated using a chalcedony geothermometer (Arnorsson et al., 1983). ГЭТ – the deep equivalent of temperature, estimated using a regional geothermal gradient of 25 °C/km (Golubev, 2007).

Перед Байкало-Хубсугульской сейсмической активизацией источник вод родника ст. 143А в резервуаре последовательно заглублялся от 1.0 до 1.2 км и во время этой

сейсмической активизации стабилизировался на глубине около 1.5 км, а после ее завершения источник проявил слабую тенденцию возвращения к досейсмическому состоянию с

относительным уменьшением глубины питающего резервуара. Высокое ОА4/8 в воде родника до сейсмической активизации интерпретируется как показатель сильного растяжения зоны развития микротрещиноватости в резервуаре подземных вод (на глубине 1.0–1.2 км). Снижение ОА4/8 во время Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации соответствует процессу закрытия микротрещин, препятствующему циркуляции подземных вод при продвижении их источника на глубину около 1.5 км. В конце сейсмической активизации (18 февраля 2023 г.) процесс закрытия микротрещин усиливается.

Феноменология образования оползней по дуговым разломам: сопоставления

На современном этапе структурного развития центральной части БРС землетрясения сосредоточены в основном в акватории Байкала и редко распространяются на его берега. Упругие напряжения накапливаются с сильными сейсмическими событиями вдоль Приморской и Главной Саянской шовных границ Сибирского палеоконтинента (рис. 13). Деформации Приморского шва реализовались в

Южно-Байкальском землетрясении 25 февраля 1999 г. ($M_w=6.0$) (Радзиминович и др., 2006). В очаговой области активизировался поперечный разрыв, параллельный Обручевскому разлому с почти вертикальным и горизонтальным положением нодальных плоскостей. Это указывает на контроль раздвига впадины субгоризонтальным слоем низкой вязкости. Более слабый афтершок 31 мая 2000 г. ($M_w=5.3$) имел сбросовый фокальный механизм слегка наклоненных нодальных плоскостей. В сейсмическом толчке Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. ($M_w=6.3$) опущенной (байкальской) части Главного Саянского шва реализовался сбросо-сдвиговый механизм подвижки поперечного к ней (северо-восточного) разрыва, параллельного Приморской шовной границе. В Быстринском землетрясении 2020 г. его поднятой (тункинской) части получили развитие сдвиговые смещения (Семинский и др., 2021). Тем не менее, общее северо-восточное растяжение сохранилось и в Южно-Байкальской впадине, и в сопредельной восточной части Тункинской долины.

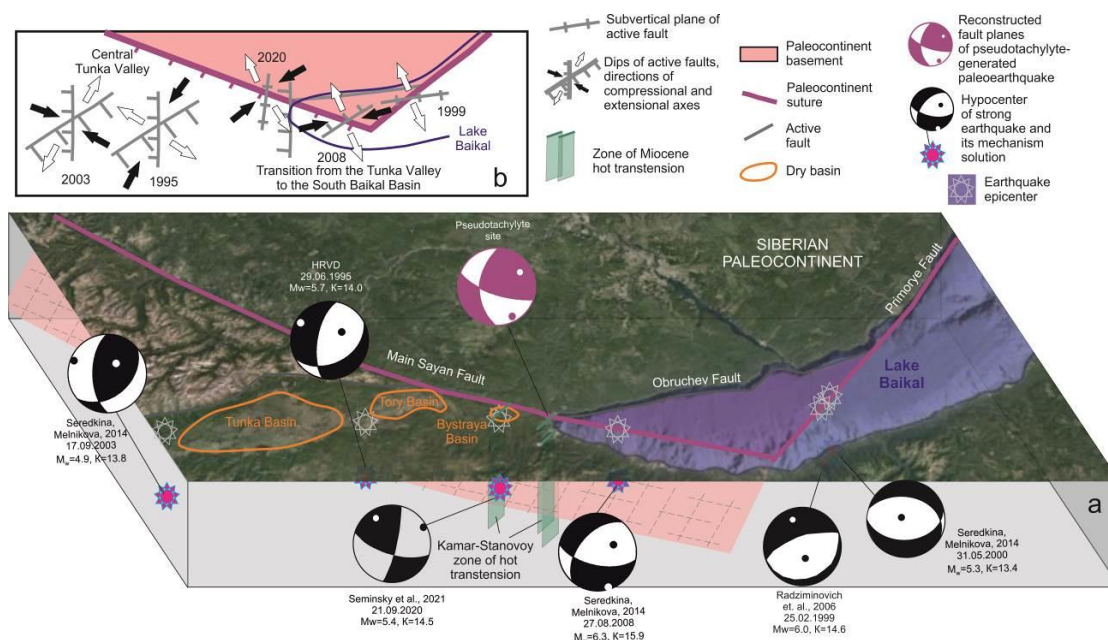


Рис. 13. Схематичная блок-диаграмма Тункинской долины и Южно-Байкальской впадины (а) и схематичная смена сил сжатия и растяжения в активных разломах Тункинской долины и Южно-Байкальской впадины (b) (Rasskazov et al., 2021).

Fig. 13. Schematic block-diagram of the Tunka Valley and South Baikal Basin (a) and schematic change in compression and extension forces in active faults of the Tunka Valley and South Baikal Basin (b) (Rasskazov et al., 2021).

Глубинная листрическая часть дугового разлома КБЖД входит в донные отложения оз. Байкал (см. рис. 11в). Отложения слабо литифицированы, поэтому имеют малую прочность и, очевидно, могут деформироваться при меньших тектонических нагрузках, чем архейские кристаллические породы Шарыжалгайского блока. Дуговой разлом КБЖД, сфокусированный на глубине в листрическое проникновение в донные отложения, отчленяет блок кристаллического фундамента от берега и создает опасность оползания отчлененного блока в Южно-Байкальскую впадину. Процесс смещения усугубляется насыщенностью плоскости дугового разлома КБЖД подземными водами, играющими в его глубинной части роль смазки. Нарастание активности этого дугового разлома может иметь катастрофические последствия.

Подобные смещения береговых блоков Байкала по дуговым разломам привели к образованию заливов Лиственничный и

Провал. Первое смещение известно как позднеплейстоценовое событие, повлекшее за собой начало стока из оз. Байкал через р. Анггару, второе – как событие сильнейшего землетрясения 1862 г.

Зарождающийся дуговой разлом КБЖД приурочен к юго-западному краю поднятого Шарыжалгайского блока на входе зоны ГСР в Южно-Байкальскую впадину. Здесь закладывается Обручевский разлом. Лиственничный дуговой разлом находится на юго-восточном краю поднятого Шарыжалгайского блока. Часть Шарыжалгайского блока отчленена Обручевским разломом и погружена в Южно-Байкальскую впадину. Береговая юго-восточная часть Шарыжалгайского блока испытала сильные деформации с надвиганием отложений юрского Иркутского бассейна на поднятый архейский фундамент палеоконтинента. В кайнозое деформированный фундамент палеоконтинента был тектонически ослаблен. Свершилось позднеплейстоценовое оползание блока (рис. 14).

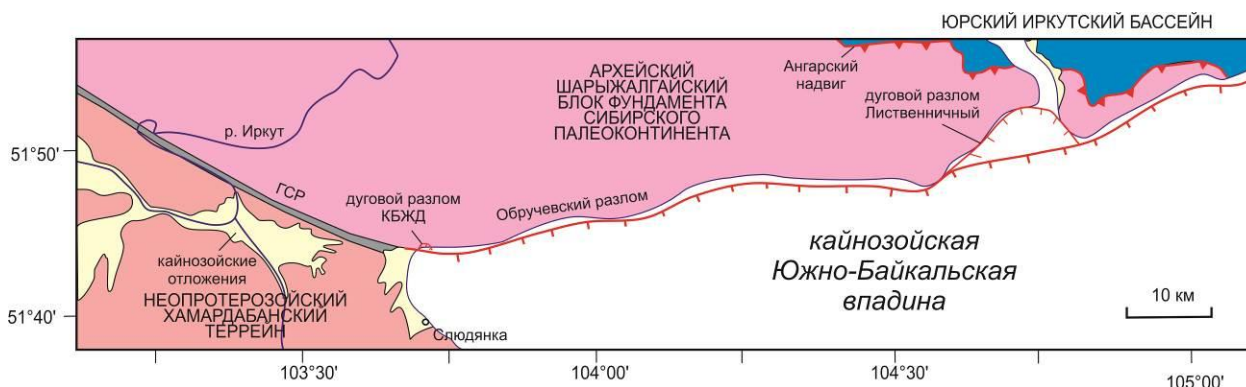


Рис. 14. Структурное положение дуговых разломов КБЖД и Лиственничный. Небольшой дуговой разлом КБЖД только зарождается. Более крупный дуговой разлом Лиственничный проявился в существенном позднеплейстоценовом смещении крупного берегового блока в Южно-Байкальскую впадину.

Fig. 14. Structural position of the Circum-Baikal Railway and Listvennichny arc faults. The small Circum-Baikal Railway arc fault is just emerging. The larger Listvennichny one was displayed in a significant late Pleistocene displacement of a large coastal block into the South Baikal Basin.

Залив Лиственничный образуют два опущенных блоковых фрагмента, каждому из которых соответствует дуговой разлом (рис. 15а). Один из них (восточный) пространственно приходится на исток р. Анггары. Протяженность дуги 9.5 км. Другой (западный) протягивается на 6.7 км. Общая протяженность дуг составляет 16.2 км. Дуги фокусируются в акватории Байкала, ориентировочно,

на расстоянии 6.5–7.5 км. Залив Провал ограничен единым дуговым разломом протяженностью 20.5 м с фокусированием от середины на расстоянии, приблизительно, 7.5 км. Расстояние от фокуса до концов дугового разлома составляет порядка 10.5 км. Дуговой разлом Провала является частью совокупности активных разломов дельты Селенги (рис. 15б).

В глубинном фокусе дуговых разломов, ограничивающих оба залива, могли находиться (возможно, находятся и сейчас) основные резервуары подземных вод, которые контролировались (возможно, продолжают

контролироваться) разломами, круто погружающимися от берегов с переходом в листрические в осадочном наполнении Южно-Байкальской впадины.

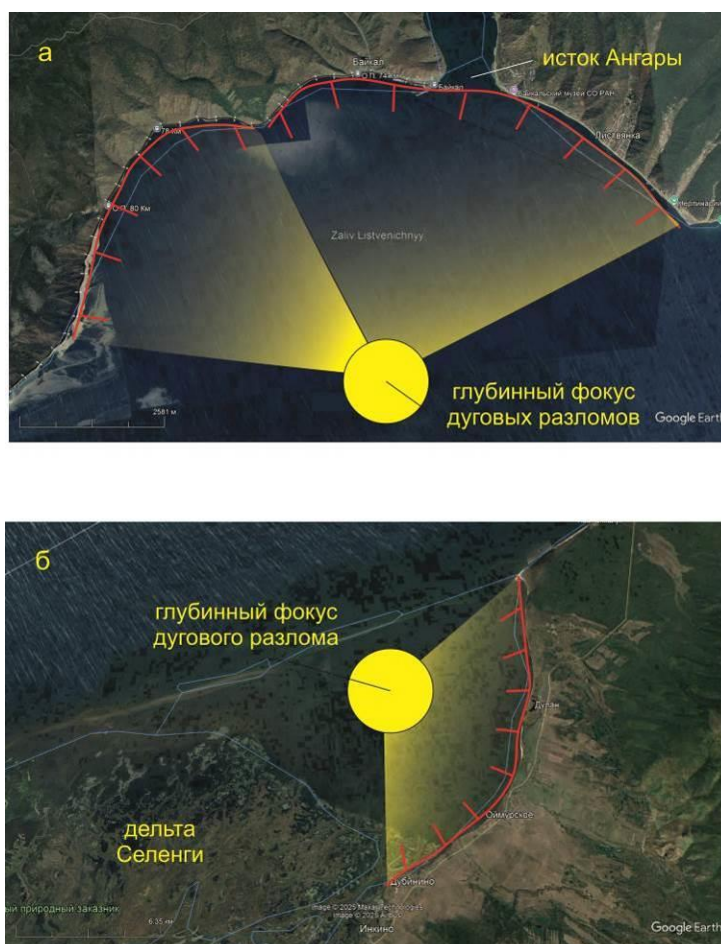


Рис. 15. Схемы структурного контроля образования крупных оползней дуговыми разломами заливов Лиственнический (а) и Провал (б).

Fig. 15. Schemes of structural control of the formation of large landslides by arc faults in the Listvenichnyy (a) and Proval (b) bays.

Мы предполагаем, что небольшой (1 км в сухопутной части) зарождающийся дуговой разлом КБЖД, сфокусированный на роднике ст. 143А, имеет аналогичные структуры во впадинах оз. Байкал с таким же (оползневым) механизмом образования, более протяженные (первые десятки км) и с совершившимися катастрофическими подвижками.

Между тем, дуговые разломы, находящиеся, подобно разлому КБЖД, на стадии зарождения, контролируют две группы родников Хонгор-Уула в северных отрогах хр. Ургудеевский к югу от Тункинской долины (Рассказов и др., 2025). Севернее обеих групп, на склонах речной долины,

наблюдаются наклоненные плоскости разломов, погружающихся к югу, в сторону выходов родников (рис. 16). Расстояние от выхода плоскости разлома на земную поверхность до родника НУ-1 северо-восточной группы составляет 360–380 м, расстояние до родника НУ-3 увеличивается до 1020 м, а до родника НУ-2 – до 1450 м. На юго-западе различаются три дуговых наклоненных разлома. Наиболее отчетливо наклонен средний разлом, расстояние от которого до родников НУ-4–НУ-8 составляет 980–1220 м. Расстояние до родников относительно наиболее северного наклоненного разлома увеличивается до 1270 м, а относительно южного – уменьшается до 800 м.

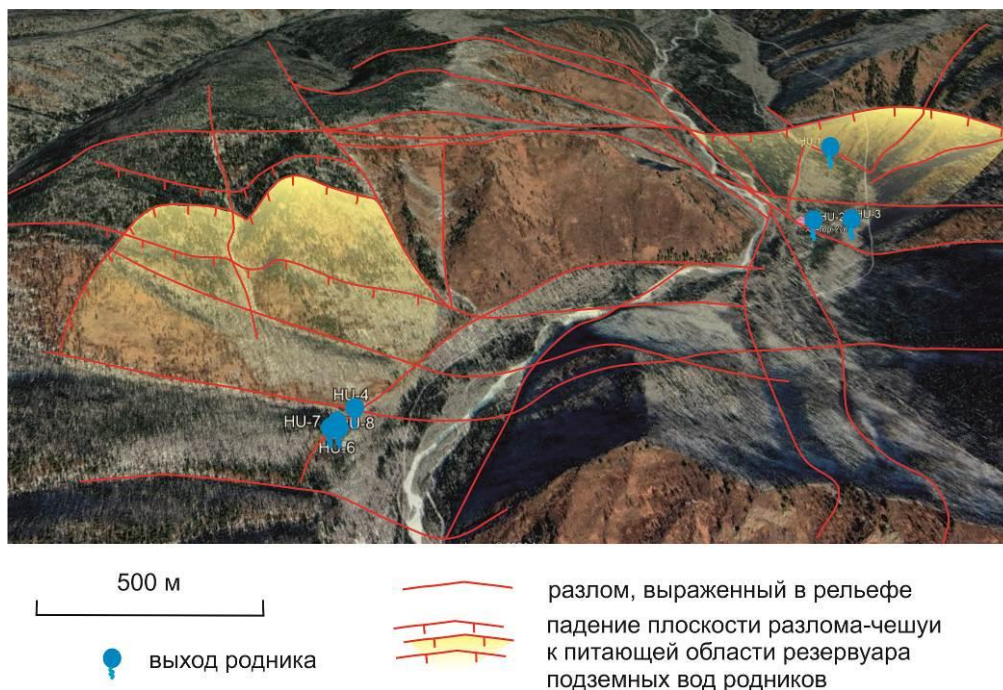


Рис. 16. Пространственные соотношения выходов родников Хонгор-Уула с дугowymi разломами, выраженными в рельефе. На правом берегу р. Харагун находится северо-восточная группа родников HU-1–HU-3, на левом – юго-западная группа родников HU-4–HU-8. Дуговые разломы, падающие к югу, фокусируются под родниками.

Fig. 16. Spatial relationships between outlets of the Khongor-Uula springs and faults expressed in relief. The northeastern group of springs HU-1–HU-3 occur on the right (eastern) bank of the Kharagun River, the southwestern group of springs HU-4–HU-8 is on the left (western) one. The arc faults, dipping to the south, are focused under the springs.

Кривые плоскостей дуговых наклоненных разломов, контролирующих глубины резервуара Хонгор-Уула, питающего родники, оцениваются по температуре подземных вод, рассчитанной по халцедоновому геотермометру (Arnorsson et al., 1983) и по региональному геотермическому градиенту 25 °С/км (Голубев, 2007). Для родников северо-восточной группы получается крутое падение плоскости разлома вблизи земной поверхности с ее выполаживанием на глубине около 1.6 км. Реконструируется листрический разлом. Родники юго-западной группы находятся практически в одной точке, но их питающий резервуар представлен двумя уровнями, один из которых (родники HU-5–HU-8) сопоставляется с уровнем 1.6 км листрического разлома, контролирующего поступление вод из резервуара северо-восточной группы родников, другой (родник HU-4) находится на глубине 2.1 км. Поскольку юго-западной группе родников пространственно

соответствуют три дуговых разлома, предполагается основной контроль поступления вод из резервуара подземных вод наиболее ярко выраженным средним разломом и дополнительное поступление вод родника HU-4 из более глубокой плоскости северного разлома. В обоих случаях проявляется листрическая конфигурация разломных плоскостей.

Заклучение

Култукский резервуар подземных вод выбран в качестве опорного для отслеживания изменений, происходящих в БРС. Воды этого резервуара характеризуются моделью двухкомпонентного смешения по изотопам U и Sr – компонентов растворенных в подземных водах. Модель в общем подтверждается изотопами H и O – компонентов, входящих в молекулу воды. Результаты определения $\delta^{2}\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ показывают отчетливую корреляцию этих параметров в подземных водах Култукского полигона с содержанием

растворенного кремния. Следовательно, изотопный состав водорода и кислорода фракционирует в зависимости от температуры, устанавливающейся в верхней части коры. Климатические показатели вод стираются и уступают место показателям, характеризующим эволюцию резервуара подземных вод. Разные геохимические показатели подземных вод Култукского резервуара меняются одновременно с развитием сейсмических процессов в коре. В отличие от култукского тренда подземных вод, сходство контрастных групп $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ поверхностных и подземных вод Тункинской долины может свидетельствовать об унаследовании подземными водами исходных изотопных характеристик поверхностных вод.

В U-H-O-изотопной систематике компонентов подземных вод на станциях гидрогеохимического мониторинга сейсмической угрозы в Байкальской рифтовой системе подчеркивается особое значение характеристик, полученных для ст. 143А Култукского полигона, которые частично соответствуют геохимическим характеристикам подземных вод Култукского резервуара, а частично – геохимическим характеристикам подземных вод северо-западного побережья Байкала и восточного побережья Иркутского водохранилища. Предполагается, что в подземные воды всех этих территорий входит компонент ЮБР.

Отличие U-H-O-изотопных характеристик вод родника ст. 143А от характеристик подземных вод зоны ГСР Култукского полигона объясняется структурным контролем выхода этого родника зарождающимся дуговым разломом КБЖД, заложенным в породах архейского Шарыжалгайского блока фундамента Сибирского палеоконтинента. В водах родника ст. 143А наблюдается более высокое ОА4/8, чем в подземных водах ГСР Култукского резервуара. Данные гидрогеохимического мониторинга 2016–2024 гг. показывают снижающееся ОА4/8 с течением времени вследствие нарастания сжатия в глубинной части разлома. Продолжение этого процесса может иметь катастрофические последствия – сход крупного оползня в Южно-Байкальскую впадину по плоскости дугового разлома.

Изотопные тренды верхнего гидрогеодинамического этажа в Култукском резервуаре подземных вод резко отличаются от трендов нижнего гидрогеодинамического этажа, полученных для термальных вод Баунтовской впадины. С повышением содержания растворенного кремния значения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в верхнем гидрогеодинамическом этаже возрастают, а в нижнем, наоборот, снижаются. Это различие предполагает разные механизмы кинетического фракционирования изотопов.

Благодарности

Аналитические исследования выполнялись на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500se в центре коллективного пользования «Ультрамикрoанализ» (ЛИН СО РАН, г. Иркутск) и на изотопном анализаторе WS-CRDS Picarro L2140-i в центре коллективного пользования «Геодинамика, геохронология» (ИЗК 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.

Дриль С.И., Чуканова В.С., Дубинина Е.О., Сандимиров И.В., Владимирова Т.А., Складорова О.А., Иконникова Т.А. Изотопная Sr-O-H-U систематика и генезис поверхностных и минеральных вод Тункинской впадины Байкальской рифтовой системы // Проблемы геохимии эндогенных процессов и окружающей среды. Мат-лы конференции. Т. 1. Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2007. Т. 1. С.158–162.

Екайкин А.А. Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии. Методическое пособие. Санкт-Петербург: Государственный научный центр РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, 2016. 63 с.

Замана Л.В. Дейтерий и кислород-18 воды азотных терм Баунтовской группы (Байкальская рифтовая зона) // Вестн. Бурятского гос. ун-та. 2011. № 3. С. 87–90.

Ильясова А.М., Снопков С.В. Косейсмические временные вариации термофильного элемента Si подземных вод западного побережья оз. Байкал в 2012–2022 гг. // Геология и окружающая среда.

2023. Т. 3, № 1. С. 72–105. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.72>

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

Короновский Н., Наймарк А. Непредсказуемость землетрясений как фундаментальное следствие нелинейных геодинамических систем // Вестник Моск. ун-та. 2012. № 6. С. 3–12

Короновский Н., Наймарк А. Землетрясение: возможен ли прогноз? // Наука и жизнь. 2013. № 3. С. 37–43

Оганесянц Л.А., Севостьянова Е.М., Кузьмина Е.И., Ганин М.Ю., Чебыкин Е.П., Сутурин А.Н. Изучение изотопного и химического состава глубинной воды озера Байкал // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51, № 4. С. 723–732. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-723-732>.

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

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

Рассказов С.В., Снопков С.В., Борняков С.А. Соотношение времени землетрясений Байкало-Хубсугульской активизации с вариациями окислительно-восстановительного потенциала в подземных водах Култукского полигона // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 181–201. doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.181

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Сунь Йи-минь, Снопков С.В. Переход от

Култукского сейсмического цикла к Байкало-Хубсугульскому в 2014–2015 гг.: Тренды U компонентов и Si–Na/Li температур в подземных водах южного фланга Южно-Байкальской впадины и Тункинской долины // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 2 (в печати).

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

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>

Родкин М. Прогноз непредсказуемых катастроф // Вокруг Света. 2008. № 6 (2813). С. 88–92

Садовский М.А. Предсказание времени землетрясений // Земля и Вселенная. 1978. № 6. С. 6–9.

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

Середкина А.И., Мельникова В.И. Тензор сейсмического момента землетрясений Прибайкалья по амплитудным спектрам поверхностных волн // Физика Земли. 2014. Т. 50, № 3. С. 103–114. Doi: 10.7868/S0002333714030090

Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.

Токарев И.В. Изотопная реконструкция происхождения, эволюции и оценка текущего состояния водно-ледниковых объектов. Диссертация на соискание уч. степени доктора геол.-мин. наук. Т. 1. Санкт-Петербург, 2025. 224 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.
- Чебыкин Е.П., Гольдберг Е.Л., Куликова Н.С., Жученко Н.А., Степанова О.Г., Малопевная Ю.А. Метод определения изотопного состава аутигенного урана в донных отложениях озера Байкал // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 6. С. 604–616.
- Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Снопков С.В., Рассказов С.В. Сигналы ртути подземных вод Култукского полигона во время подготовки и реализации Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации 2020–2021 гг. // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 1. С. 7–9. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2022.1.7>
- Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В. Первые результаты мониторинга $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // Доклады академии наук. 2015. Т. 460, № 4. С. 464–467.
- Чебыкин Е.П., Сороковикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В., Грачев М.А. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20. С. 613–631.
- Чердынцев В.В. Уран–234. М.: Атомиздат, 1969. 308 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.
- Craig H. Isotopic variation in meteoric waters // *Science*. 1961. V.133. P. 1702–1703.
- 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.
- Geller R.J. Earthquake prediction: a critical review // *Geophys. J. Int.* 1997. Vol. 131. P. 425–450.
- Hachikubo A., Khlystov O., Krylov A., Sakagami H., Minam H., Nunokawa Y., Yamashita S., Takahashi N., Shoji H., Nishio S., Kida M., Ebinuma T., Kalmychkov G., Poort J. Molecular and isotopic characteristics of gas hydrate-bound hydrocarbons in southern and central Lake Baikal // *Geo-Mar. Lett.* 2013. Vol. 30. P. 321–329. <https://doi.org/10.1007/s00367-010-0203-1>
- HRVD (<http://www.seismology.harvard.edu/>) – Department of Geological Sciences, Harvard University, 20 Oxford St., Cambridge, MA 02138, U.S.A.
- Radziminovich N.A., Melnikova V.I., San'kov V.A., Levi K.G. Seismicity and seismotectonic deformations of the crust in the Southern Baikal basin // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2006. Vol. 42, No. 11. P. 904–920. <http://dx.doi.org/10.1134/S1069351306110048>.
- Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Bornyakov S.A., Chuvashova I.S. Change of seismic hazard levels in complete 12-year seismogeodynamic cycle of the South Baikal Basin: Results of hydroisotopic ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) monitoring // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 2. P. 7–21. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.7
- Rasskazov S., Chuvashova I., Yasnygina T., Saranina E., Gerasimov N., Ailow Y., Sun Y.-M. Tectonic generation of pseudotachylytes and volcanic rocks: Deep-seated magma sources of crust-mantle transition in the Baikal Rift System, Southern Siberia // *Minerals*. 2021. Vol. 11, No 5. P. 487.
- Rasskazov S., Ilyasova A., Bornyakov S., Chuvashova I., Chebykin E. Responses of a $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio in groundwater to earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia // *Front. Earth Sci.* 2020b. V. 14 (4): 711–737; doi.org/10.1007/s11707-020-0821-5
- Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Chebykin E.P. Chemical hydrogeodynamics of the Kultuk groundwater reservoir versus paragenetically related large earthquakes in the central Baikal Rift System, Siberia // *Journal of Earth System Science*. 2024. Vol. 133, 190. <https://doi.org/10.1007/s12040-024-02392-2>
- Yakovlev E. Tokarev, I., Zykov S., Iglovsky S., Ivanchenko N. Isotope signs ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, ^2H , ^{18}O) of groundwater: An investigation of the existence of paleo-permafrost in European Russia (Pre-Volga Region) // *Water*. 2021. Vol. 13. P. 1838. <https://doi.org/10.3390/w13131838>
- Zverev V.L., Dolidze N.I., Spiridonov A.I. Anomaly of even isotopes of uranium in groundwater of seismically active regions of Georgia // *Geochemistry International*. 1975. No. 11. P. 1720–1724.

References

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.

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

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., Rasskasov S.V., Vodneva E.N., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Borneyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V. First results of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ monitoring in water from active faults on the western coast of South Baikal // *Doklady Earth Sciences*. 2015. Vol. 460, Part 2. P. 142–145.

Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Vodneva E.N., Rasskazov S.V., Khodzher T.V., Grachev M.A. Current state of the Selenga River waters on the territory of Russia by main components and trace elements // *Chemistry for Sustainable Development*. 2012. Vol. 20. P. 613–631.

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

Golubev V.A. Conductive and convective heat removal in the Baikal rift zone. Novosibirsk: Academic Publishing House "GEO", 2007. 222 p.

Craig H. Isotopic variation in meteoric waters // *Science*. 1961. V. 133. P. 1702–1703.

Dril' S.I., Chukanova V.S., Dubinina E.O., Sandimirov I.V., Vladimirova T.A., Sklyarova O.A., Ikonnikova T.A. Isotope SR-O-H-U systematics and genesis of surface and mineral waters of the Tunka depression of the Baikal rift system // *Problems of geochemistry of endogenous processes and the environment. Conference materials*. Vol. 1. Irkutsk: Publishing House of the V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 2007. Vol. 1. P. 158–162.

Geller R.J. Earthquake prediction: a critical review // *Geophys. J. Int.* 1997. Vol. 131. P. 425–450.

Ekaikin A.A. Stable isotopes of water in glaciology and paleogeography. Methodological manual. St. Petersburg: State Research Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, 2016. 63 p.

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.

HRVD (<http://www.seismology.harvard.edu/>) – Department of Geological Sciences, Harvard University, 20 Oxford St., Cambridge, MA 02138, U.S.A.

Hachikubo A., Khlystov O., Krylov A., Sakagami H., Minam H., Nunokawa Y., Yamashita S., Takahashi N., Shoji H., Nishio S., Kida M., Ebinuma T., Kalmychkov G., Poort J. Molecular and isotopic characteristics of gas hydrate-bound hydrocarbons in southern and central Lake Baikal // *Geo-Mar. Lett.* 2013. Vol. 30. P. 321–329. <https://doi.org/10.1007/s00367-010-0203-1>

Ilyasova A.M., Snopkov S.V. Coseismic temporal variations of thermophilic element Si in groundwaters from the SW coast of Lake Baikal in 2012–2022 // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 3, No. 1. P. 72–105. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.72>

Ilyasova A.M., Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Borneyakov S.A., Snopkov S.V., Chuvashova I.S., Tubanov Ts.A., German E.I., Bartanova S.V. Testing the Cherdyntsev–Chalov effect using a seismic vibrator ЦБО-100 and monitoring of similar U-hydroisotopic responses to earthquake preparation in the Kulkuk test site, Southern Baikal // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 4. P. 7–25. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.7

Koronovskiy N., Naimark A. Unpredictability of earthquakes as a fundamental consequence of nonlinear geodynamic systems // *Vestnik Moskov. Univ.* 2012. No. 6. P. 3–12.

Koronovskiy N., Naimark A. Earthquake: is the prediction possible? // *Science and life*. 2013. No. 3. P. 37–43.

Oganesyants L.A., Sevostianova E.M., Kuzmina E.I., Ganin M.Yu., Chebykin E.P., Sutturin A.N. Isotopic and chemical composition of the deep water of Lake Baikal // *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021. Vol. 51, No. 4. P. 723–732. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-723-732>.

Radziminovich N.A., Melnikova V.I., San'kov V.A., Levi K.G. Seismicity and seismotectonic deformations of the crust in the Southern Baikal basin // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2006. Vol. 42, No. 11. P. 904–920. <http://dx.doi.org/10.1134/S1069351306110048>.

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*. 2024. 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., Borneyakov S.A., Chuvashova I.S. Change of seismic hazard levels in complete 12-year seismogeodynamic cycle of the South Baikal Basin: Results of hydroisotopic ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) monitoring // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 2. P. 7–21. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.7

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Sun Yi-min, Snopkov S.V. Transition from the Kultuk seismic cycle to the Baikal-Khubsugul one in 2014–2015: Trends in U components and Si–Na/Li temperatures in groundwater of the southern flank of the South Baikal basin and Tunka valley // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 5, No. 2. (in preparation).

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Vodneva E.N., Chuvashova I.S., Borneyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V., Chechel'nitsky V.V., Gileva N.A. Creating the Kultuk polygon for earthquake prediction: variations of ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in groundwater from active faults at the western shore of Lake Baikal // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2015. Vol. 6, No. 4. P. 519–553. doi:10.5800/GT-2015-6-4-0192.

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

Rasskazov S., Ilyasova A., Borneyakov S., Chuvashova I., Chebykin E. Responses of a $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio in groundwater to earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia // *Front. Earth Sci*. 2020b. V. 14 (4): 711–737; doi.org/10.1007/s11707-020-0821-5

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Borneyakov S.A., Snopkov S.V., Chuvashova I.S., Chebykin E.P. Hydrogeochemical responses of groundwater from station 184 in 2020–2021 on seismogenic deformations of the Baikal-Khubsugul reactivation // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 4. P. 26–52. DOI 10.26516/2541-9641.2022.4.26

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Borneyakov S.A., Orgilyanov A.I., Kovalenko S.N., Seminsky A.K., Popov E.P., Chebykin E.P. Hydrogeochemical zoning of uranium isotopes ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) in the Southern Siberian paleocontinent: the role of the South Baikal reservoir in the groundwater formation // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2020a. Vol. 11, No. 3. P. 632–650. https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Chuvashova I.S., Borneyakov S.A., Chebykin E.P. Chemical hydrogeodynamics of the Kultuk

groundwater reservoir versus paragenetically related large earthquakes in the central Baikal Rift System, Siberia // *Journal of Earth System Science*. 2024. Vol. 133, 190. <https://doi.org/10.1007/s12040-024-02392-2>

Rasskazov S.V., Snopkov S.V., Borneyakov S.A. Relationship between timing of earthquakes of the Baikal-Khubsugul reactivation and oxidation–redox potential in groundwaters from the Kultuk polygon // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 181–201. doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.181

Rodkin M. Prediction unpredictable catastrophes // *Around the World*. 2008. Vol. 6, No. 2813. P. 88–92.

Sadovskiy M.A. Prediction of earthquake timing // *The Earth and Universe*. 1978. No. 6. P. 6–9.

Seminsky K.Zh., Borneyakov S.A., Dobrynina A.A., Radziminovich N.A., Rasskazov S.V., Sankov V.A., Mialle P., Bobrov A.A., Ilyasova A.M., Salko D.V., Sankov A.V., Seminsky A.K., Chebykin E.P., Shagan A.N., German V.I., Tubanov Ts.A., Ulzibat M. Earthquake Bystraya in the South Baikal region (09.21.2020, Mw = 5.4): main parameters, signs of preparation, and accompanying effects // *Russian Geology and Geophysics*. 2021. Vol. 62, No. 5. P. 727–743.

Seredkina A.I., Melnikova V.I. Seismic moment tensor of Pribaikalye earthquakes from the surface-wave amplitude spectra // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2014. Vol. 50, No. 3. P. 403–414. Doi: 10.7868/S0002333714030090

Sobolev G.A. Fundamentals of earthquake prediction. M: Nauka, 1993. 313 p.

Tokarev I.V. Isotope reconstruction of the origin, evolution and assessment of the current state of fluvioglacial objects. Dissertation for the academic degree of Doctor of Geological and Mineral Sciences. Vol. 1. St. Petersburg, 2025. 224 p.

Yakovlev E., Tokarev, I., Zykov S., Iglovsky S., Ivanchenko N. Isotope signs ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, ^2H , ^{18}O) of groundwater: An investigation of the existence of paleo-permafrost in European Russia (Pre-Volga Region) // *Water*. 2021. Vol. 13. P. 1838. <https://doi.org/10.3390/w13131838>

Zamana L.V. Deuterium and oxygen-18 waters of nitrogen thermal springs of the Baunt group (Baikal rift zone) // *Bulletin of the Buryat State University*. 2011. No. 3. P. 87–90.

Zverev V.L., Dolidze N.I., Spiridonov A.I. Anomaly of even isotopes of uranium in groundwater of seismically active regions of Georgia // *Geochemistry International*. 1975. No. 11. P. 1720–1724.

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, profes-
sor,
664025, Irkutsk, st. Lenina, 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Head of Dynamic Geology Char,
664033, Irkutsk, st. Lermontova, 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Head of the Laboratory for Isotopic and Geochronologi-
cal Studies,
tel.: (3952) 51–16–59,
email: rassk@crust.irk.ru*

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

Цыасова Aigul Maratovna,
*candidate of geological and mineralogical sciences, lead-
ing engineer,
664033, Irkutsk, st. Lermontova, d. 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
email: ila@crust.irk.ru*

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

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

Гутарева Оксана Сергеевна,
*младший научный сотрудник, аспирант,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
email: oxanagutareva@gmail.com*

Gutareva Oksana Sergeevna,
*Junior Researcher, Postgraduate Student,
664033, Irkutsk, st. Lermontova, d. 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
email: oxanagutareva@gmail.com*

Снопков Сергей Викторович,
*кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
664003, Россия, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Иркутский государственный университет,
доцент,
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 91,
Сибирская школа геонаук, Иркутский национальный
исследовательский технический университет,
научный сотрудник,
email: snopkov_serg@mail.ru*

Snopkov Sergey Viktorovich,
*Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, As-
sociate Professor,
Karl Marx st., 1, Irkutsk, 664003, Russia,
Irkutsk State University,
Associate Professor,
91 Lermontov st., Irkutsk, 664033, Russia,
Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Re-
search Technical University,
Researcher,
email: snopkov_serg@mail.ru*