

Мониторинг природных процессов

УДК 504.43:550.845 (51)

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.3.133>

Организация мониторинга компонентов подземных вод в пос. Орлик: западная часть Байкальской рифтовой системы

С.В. Рассказов^{1,2}, Е.П. Чебыкин^{1,3}, С.В. Снопков^{2,4}, Б.Д. Шарастепанов⁵,
А.П. Папаев⁵, Н.П. Пастыкова⁵, А.М. Ильясова¹, В.А. Саньков^{1,2,6}

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

²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

³Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

⁴Сибирская школа геонаук, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

⁵Орликская средняя школа, пос. Орлик, Окинский р-н Бурятии, Россия

⁶Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Приводятся результаты исследований компонентов подземных вод в родниках, скважинах и речных водах пос. Орлик и сопредельных территорий для организации косейсмического мониторинга в западной части Байкальской рифтовой системы. Первые временные ряды данных по подземным водам, полученные с 17 ноября 2023 г. до 16 апреля 2024 г., показывают контрастные косейсмические вариации U, свидетельствующие о высокой чувствительности выбранных станций мониторинга.

Ключевые слова: подземные воды, гидрогеохимия, уран, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, эффект Чердынцева–Чалова, кремниевый геотермометр, мониторинг.

Arrangement of Monitoring for Components in Groundwater from the Orlik Settlement: the Western Baikal Rift System

S.V. Rasskazov^{1,2}, E.P. Chebykin^{1,3}, S.V. Snopkov^{2,4}, B.D. Sharastepanov⁵, A.P. Papaev⁵,
N.P. Pastykova⁵, A.M. Ilyasova¹, V.A. Sankov^{1,2,6}

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

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

³Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

⁴Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

⁵Orlik Secondary School, Orlik settlement, Oka district of Buryatia, Russia

⁶V.M. Matrosov Institute of System Dynamics and Control Theory SB RAS, Russia

Abstract. Study of components in groundwater from springs, wells, and river waters in the Orlik settlement and adjacent areas is performed for arrangement of coseismic monitoring in the western part of the Baikal rift system. The first groundwater data series obtained from 17 November 2023 to 16 April 2024 show contrasting coseismic U variations, indicating the high sensitivity of the selected monitoring sites.

Keywords: groundwater, hydrogeochemistry, U, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, Cherdyntsev-Chalov effect, silica geothermometer, monitoring.

Введение

Для оценки сейсмической угрозы в западной части Байкальской рифтовой системы (БРС) мониторинг урановых компонентов проводился прежде на полигонах Тункинской долины, включая полигон Мондинской впадины (Рассказов и др., 2018). В более удаленной к западу ее части исследовалось качество подземных вод в пос. Орлик. В водах двух скважин было определено повышенное содержание Fe, приближающееся и существенно превышающее предельно допустимую концентрацию питьевых вод (ПДК). Была выявлена также повышенная концентрация стронция (Шарастепанов и др., 2024). Эти данные легли в основу работ по организации мониторинга компонентов подземных вод для оценки сейсмической угрозы. В настоящей работе приводятся результаты их изучения с демонстрацией первых мониторинговых рядов данных.

Отбор, хранение и аналитические исследования природных вод

Для определения элементного состава проба воды 2 мл пропускается через фильтр 0.45 мкм и сразу фиксируется каплей ультрачистой азотной кислоты. В отдельных случаях фильтрация и кислотная фиксация водного раствора проводится после доставки проб в лабораторию. Для определения изотопов урана отдельно используется до 400 мл воды, из которой уран выделяется на ионно-обменной колонке.

Для определения химического элементного состава 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 (Axygen 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., 2012). Изотопы урана определяются после его выделения на ионно-обменной колонке из отдельной пробы воды (до 400 мл). Детали методики приведены в работах (Чебыкин и др., 2007, 2015).

Результаты

Пункты и время опробования

Опробование подземных и поверхностных вод пос. Орлик проводилось в меженный период, 17–18 ноября 2023 г. В это время питание рек Восточного Саяна в основном происходит за счет выходов подземных вод. Отобранные пробы вод пяти скважин (ст. 223–227), двух родников (ст. 228, 230), рек Ока (ст. 231) и Орлик (ст. 229). Глубина скважин ст. 223 (Школа) и ст. 224 (Гостиница) – 70–75 м, других скважин – около 25–28 м (рис. 1).



Рис. 1. Схема пространственного расположения станций опробования подземных и поверхностных вод пос. Орлик и сопредельных территорий. Показаны номера точек опробования, в скобках – содержание Fe ($\mu\text{г}/\text{дм}^3$) каждой станции, полученное 17.11.2023. Розовое поле в южной части пос. Орлик обозначает территорию с высоким содержанием F в подземных водах.

Fig. 1. Spatial distribution of groundwater and surface water sampling stations in the Orlik settlement and adjacent areas. Sampling site numbers are shown, with the Fe content ($\mu\text{g}/\text{dm}^3$) at each station in brackets in samples of November 17, 2023. A pink field in the southern part of the Orlik settlement designates an area with a high Fe content in groundwater.

Т а б л и ц а 1

Список проб подземных и поверхностных вод с указанием координат пунктов опробования

Table 1

List of groundwater and surface water samples with coordinates of sampling sites

Номер пробы	День	Время	Место отбора	С.ш.	В.д.
223	17.11.23	21:30	сква 75 м в школе	52°30.726'	99°49.188'
224	17.11.23	21:45	сква 70 м в гостинице	N52°31'23.2"	E99°49'54.1"
225	18.11.23	9:15	сква 28 м на ул. Дугарова, 22	52°30.797'	99°49.825'
226	18.11.23	9:30	сква на ул. Дугарова, 43	52°30.733'	99°49.811'
227	18.11.23	9:45	сква на ул. Советская, 17А	N52°30'25.8"	E99°49'15.0"
228	18.11.23	10:30	источник в долине р. Орлик	52°32.576'	99°48.950'
229	18.11.23	10:40	р. Орлик	52°32.434'	99°49.097'
230	18.11.23	11:00	источник Базальтовый	52°32.119'	99°47.038'
231	18.11.23	12:00	р. Ока, правый борт, выше Орлика	52°25.836'	99°51.476'

Макрокомпоненты

Общая минерализация (ОМ) подземных и поверхностных вод Орлика меняется слабо в интервале 230–320 мг/дм³. Основные компоненты (мг/дм³): анионы: гидрокарбонат (НСО₃⁻) – 160–210, сера – 2.6–6.0, кремний – 1.5–2.5, хлор – 0.56–1.53; катионы: кальций – 47–70, Mg – 3.7–9.9, Na – 2–5.3, К – 0.89–1.53. Содержания макрокомпонентов подземных и поверхностных вод сопоставимы между собой.

В южной части поселка в воде двух скважин определено повышенное содержание Fe. В скв. 227 (ул. Советская, 17А) содержание Fe (280 мкг/дм³) приближается к значению ПДК питьевых вод (300 мкг/дм³), а в скв. 226 (ул. Дугарова, 43) существенно превышает ПДК (1240 мкг/дм³). Причиной высокого

содержания Fe в подземных водах этой части поселка может быть магматическое тело, сложенное породами основного–ультраосновного состава или глинистые осадочные отложения. Минимальное содержание Fe (9.3 мкг/дм³) получено для воды наиболее глубокой скважины школы (ст. 223).

Отдельные макрокомпоненты пресных подземных вод Орлика (S, Fe и др.) имеют промежуточное содержание между содержаниями в минеральных и пресных водах. Содержание Fe не зависит от ОМ и содержания S (рис. 2а,б) и возрастает с возрастанием содержания Mn (рис. 3а). Отношение Mn/Fe в водах с высоким содержанием железа в целом ниже, чем в водах с его низким содержанием (рис. 3б). Подобные вариации Fe и Mn наблюдаются в радоновых минеральных водах Ниловой Пустыни.

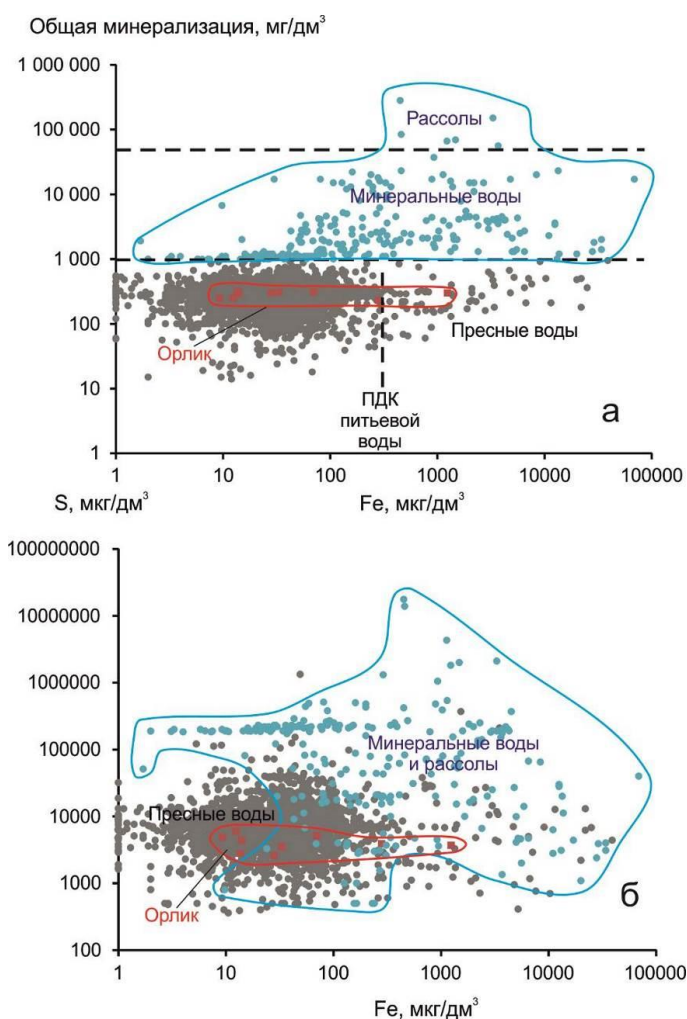


Рис. 2. Диаграммы общей минерализации – Fe (а) и S–Fe (б) подземных и поверхностных вод Орлика. Для сопоставления показаны составы пресных и минерализованных вод Центральной и Восточной Азии (используется банк данных авторов 3500 проб).

Fig. 2. Diagrams of total mineralization – Fe (a) and S–Fe (b) of ground and surface waters from the Orlik area. For comparison, compositions of fresh and mineralized waters from Central and East Asia are shown (the authors' database of 3500 samples is used).

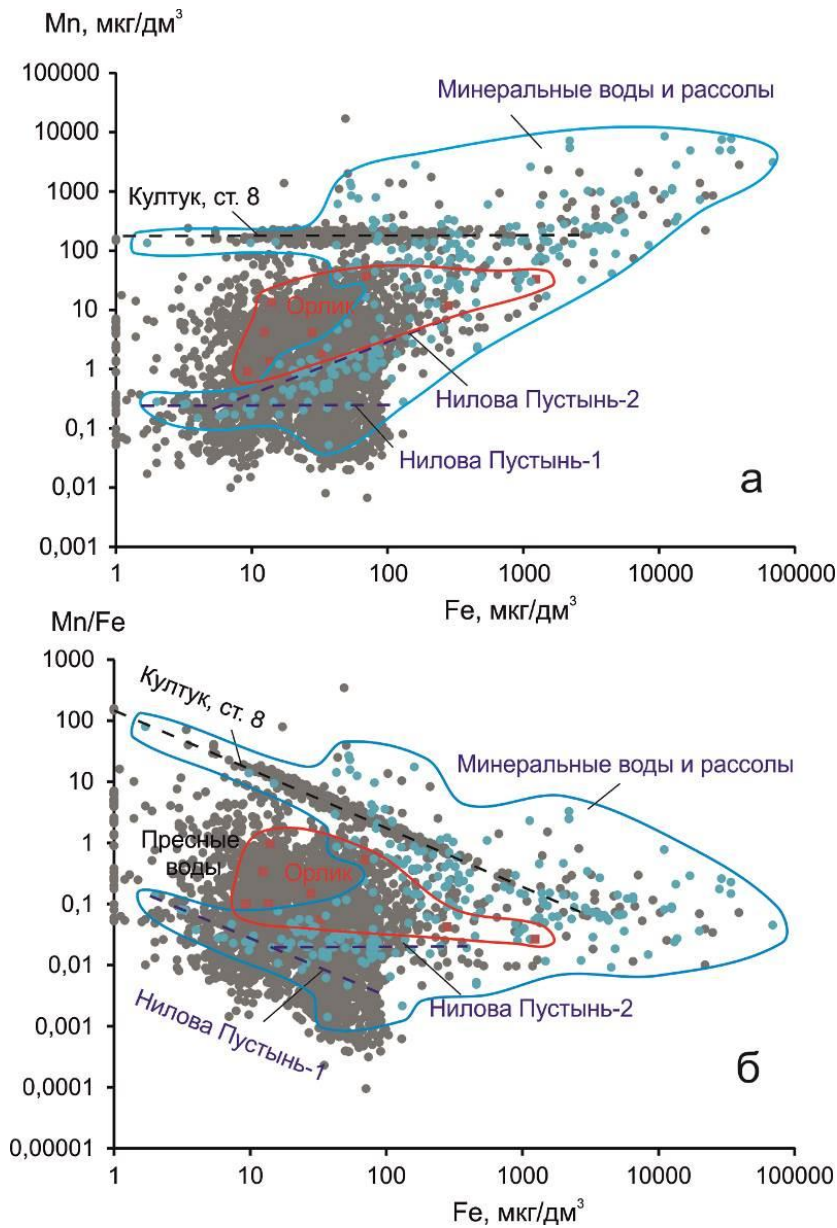


Рис. 3. Диаграммы Mn–Fe (a) и Mn/Fe–Fe (б) подземных и поверхностных вод Орлика. Условные обозначения см. рис. 2.

Fig. 3. Mn–Fe (a) and Mn/Fe–Fe (b) diagrams of ground and surface waters from the Orlik area. Symbols are as in Fig. 2.

Низкое содержание Si, Na при повышенном отношении Ca/Na соответствует

происхождению вод с малой глубины – с верхнего гидрогеодинамического этажа (рис. 4).

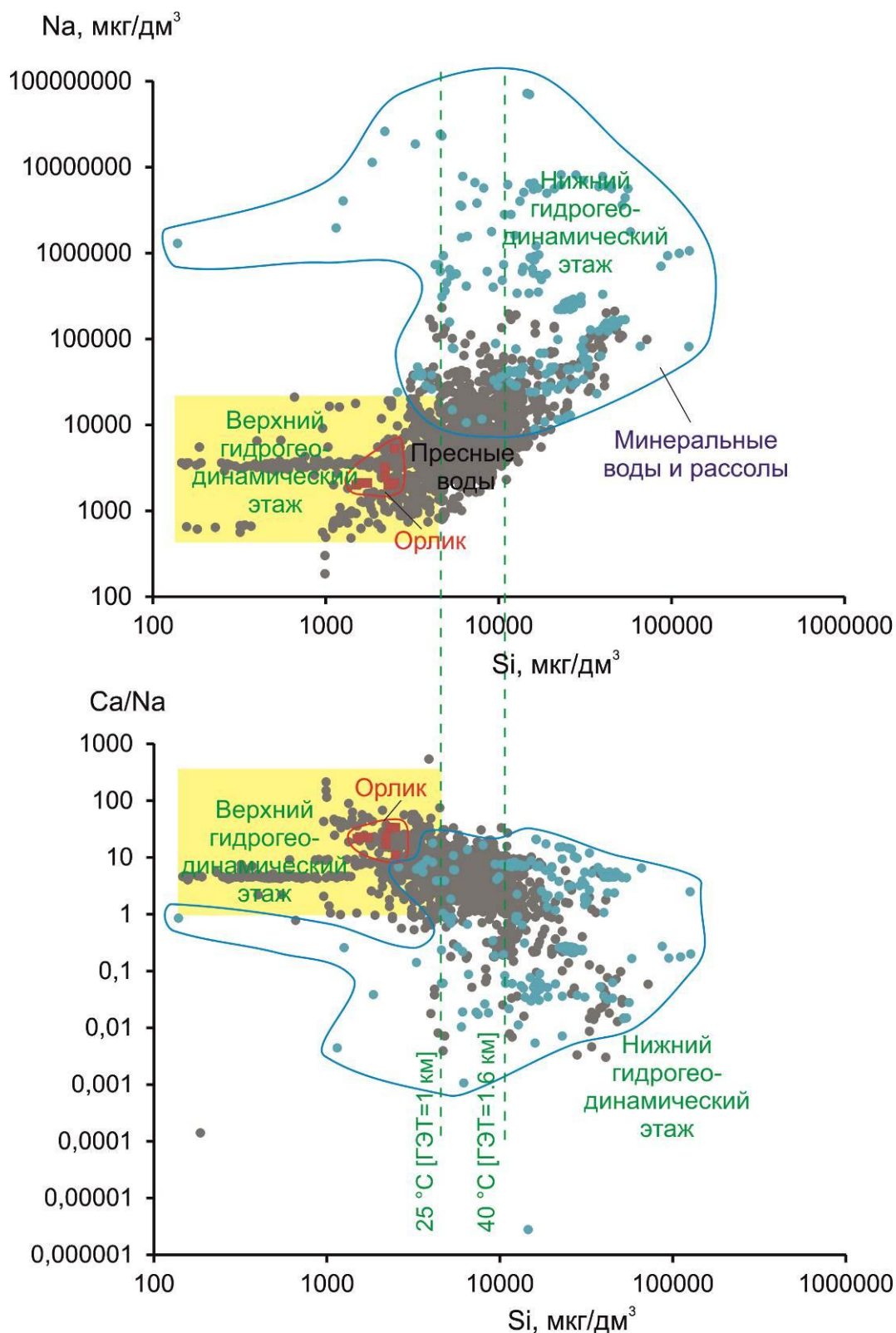


Рис. 4. Диаграммы Na–Si (а) и Ca/Na–Si (б) подземных и поверхностных вод Орлика. Условные обозначения см. рис. 2. Показано значение температуры 25 °С по халцедоновому геотермометру (Arnorsson et al., 1983) с соответствующим глубинным эквивалентом температуры (ГЭТ) = 1 и 1.6 км, исходя из регионального геотермического градиента 25 °С на 1 км (Голубев, 2007).

Fig. 4. Na–Si (a) and Ca/Na–Si (b) diagrams of ground and surface waters from the Orlik area. Symbols are as in Fig. 2. The temperature value of 25 °С is shown according to the chalcedony geothermometer (Arnorsson et al., 1983) with the corresponding deep equivalent temperature (DET) = 1 and 1.6 km, based on the regional geothermal gradient of 25 °С per 1 km (Golubev, 2007).

Микроэлементы

Концентрации щелочных элементов цезия и лития в пресных водах в основном не превышают, соответственно, 1 и 10 мкг/дм³ и обычно существенно возрастают в минеральных водах и рассолах одновременно с возрастанием щелочного макрокомпонента Na. Особенно сильно этот эффект проявляется в термальных минеральных водах. При

подготовке и реализации землетрясений наблюдаются колебания растворенной ртути (Hg²⁺) и газообразной ртути (Hg), не растворяющейся в воде.

Подземные и поверхностные воды Орлика имеют низкие содержания щелочных элементов Na, Li и Cs (рис. 5). Концентрация растворенной ртути в подземных и поверхностных водах Орлика не превышает 0.1 мкг/дм³(рис. б).

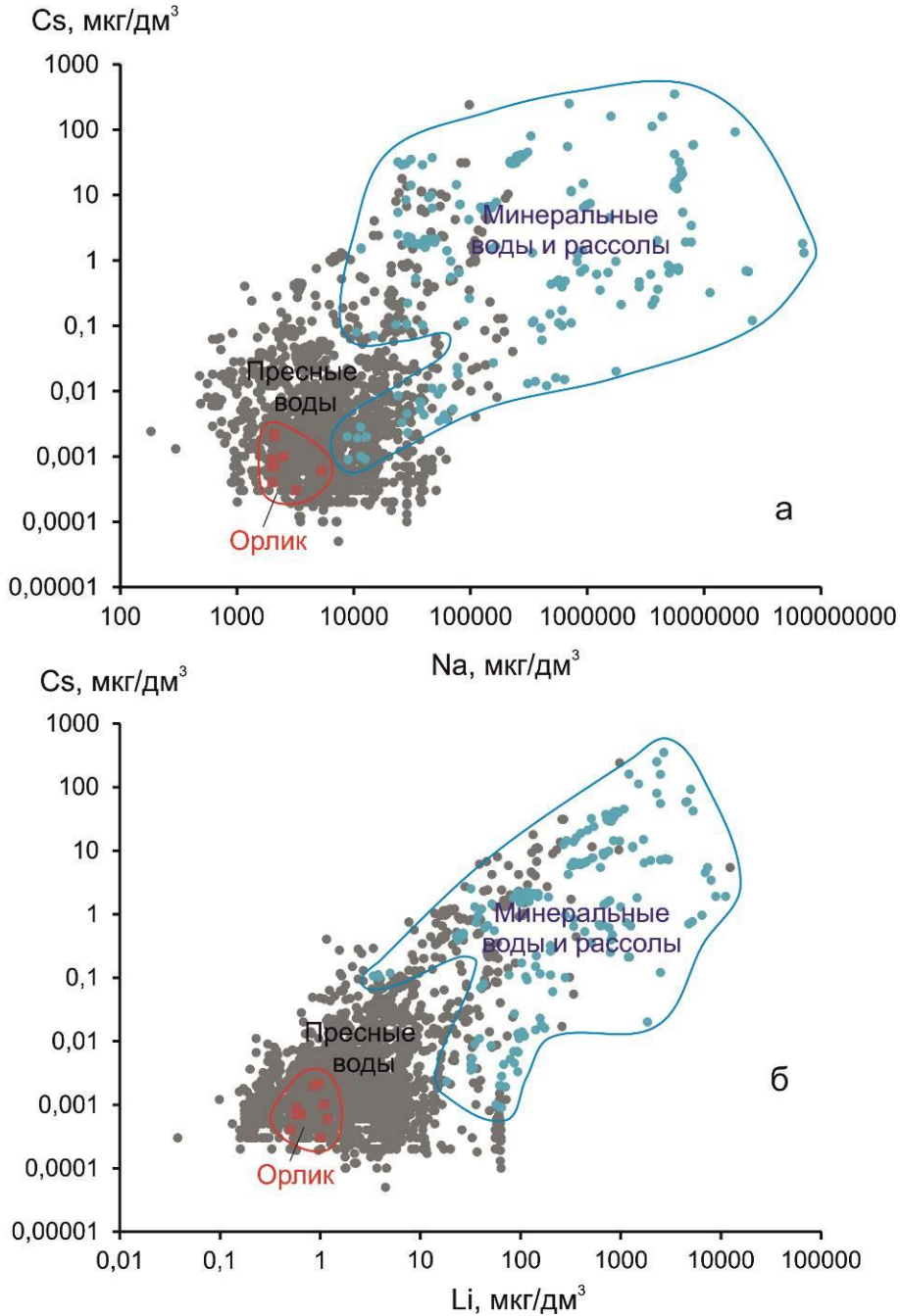


Рис. 5. Диаграммы Cs–Na (а) и Cs–Li (б) подземных и поверхностных вод Орлика. Условные обозначения см. рис. 2.

Fig. 5. Cs–Na (a) and Cs–Li (b) diagrams of ground and surface waters from the Orlik area. Symbols are as in Fig. 2.

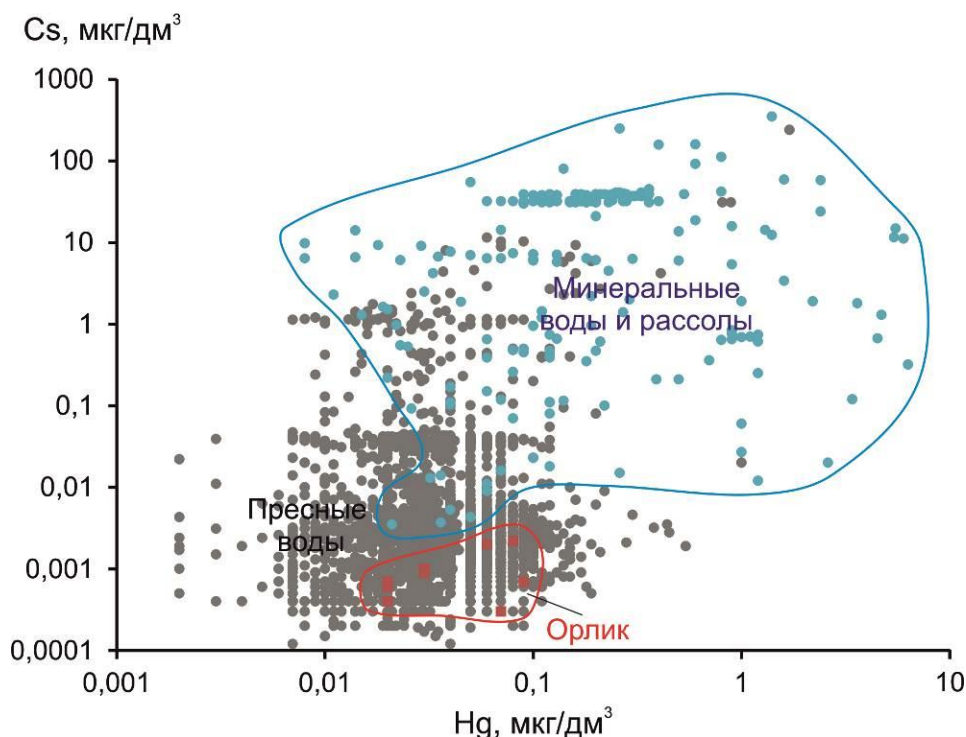


Рис. 6. Диаграмма Cs–Hg подземных и поверхностных вод Орлика. Условные обозначения см. рис. 2.

Fig. 6. Cs–Hg diagram of ground and surface waters from the Orlik settlement. Symbols are as in Fig. 2.

В подземных водах пос. Орлик выявляются повышенные концентрации других элементов, например, стронция. В роднике р. Орлик (ст. 228) определено $1280 \text{ мкг}/\text{дм}^3$ этого металла. Эта концентрация, однако, существенно ниже ПДК ($8000 \text{ мкг}/\text{дм}^3$).

Урановые компоненты

Для оценки сейсмической угрозы территории важнейшую информацию несут временные вариации урановых компонентов. При мониторинге концентрация U в подземных водах возрастает в присутствии газов–окислителей и снижается в присутствии газов–восстановителей. В случае, если в составе газов подземных вод преобладают окислители (O , CO_2 и др.), они обогащаются растворимым высоковалентным уранил-ионом, если же в составе газов подземных вод преобладают восстановители (H_2 , H_2S , CH_4 , CO и др.), они обедняются ураном (Рассказов и др., 2024а,б).

Кроме концентрации U, в урановом компоненте учитывается изотопное отношение $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ и концентрация изотопа ^{234}U . Оба показателя выражаются в единицах активностей (е.а.), соответственно, ОА4/8 и А4. В

подземных водах определяется изотопное равновесие между материнским изотопом ^{238}U и дочерним изотопом ^{234}U (ОА4/8 ~ 1) и изотопное неравновесие. Отклонение изотопного отношения U от равновесия, известное как эффект Чердынцева–Чалова (Чердынцев, 1969, 1973), объясняется не только зависимостью урановых компонентов от сейсмической активности разломов (Зверев и др., 1975; Finkel, 1981), но и изменениями, связанными с растворением кальцита карбонатов и с таянием мерзлоты, сохранявшейся десятки и сотни тысяч лет (Banner et al., 1990; Токарев и др., 2021).

В подземных водах Орликовского полигона концентрация U меняется в диапазоне от 1.1 до $5.5 \text{ мкг}/\text{дм}^3$. Различается два тренда, один из которых объединяет пробы малоглубинных скважин и родников, другой – пробы малоглубинных скважин и речных водотоков (рис. 7). К первому тренду относится проба 227 с наиболее низкой концентрацией U и повышенным содержанием Fe. Этот состав находится вместе с составами проб двух родников на линии возрастания U с возрастанием ОМ и ОА4/8, один из которых имеет высокое содержание Sr. Ортогональный тренд

снижения ОА4/8 с возрастанием концентрации U образуют пробы 231 (вода р. Оки), 229 (вода р. Орлик), 225 (скв. Дугарова 43) и 226

(скв. Дугарова 22). Последняя из них имеет высокое содержание Fe. На диаграмме U–ОМ тренд речных водотоков не проявлен.

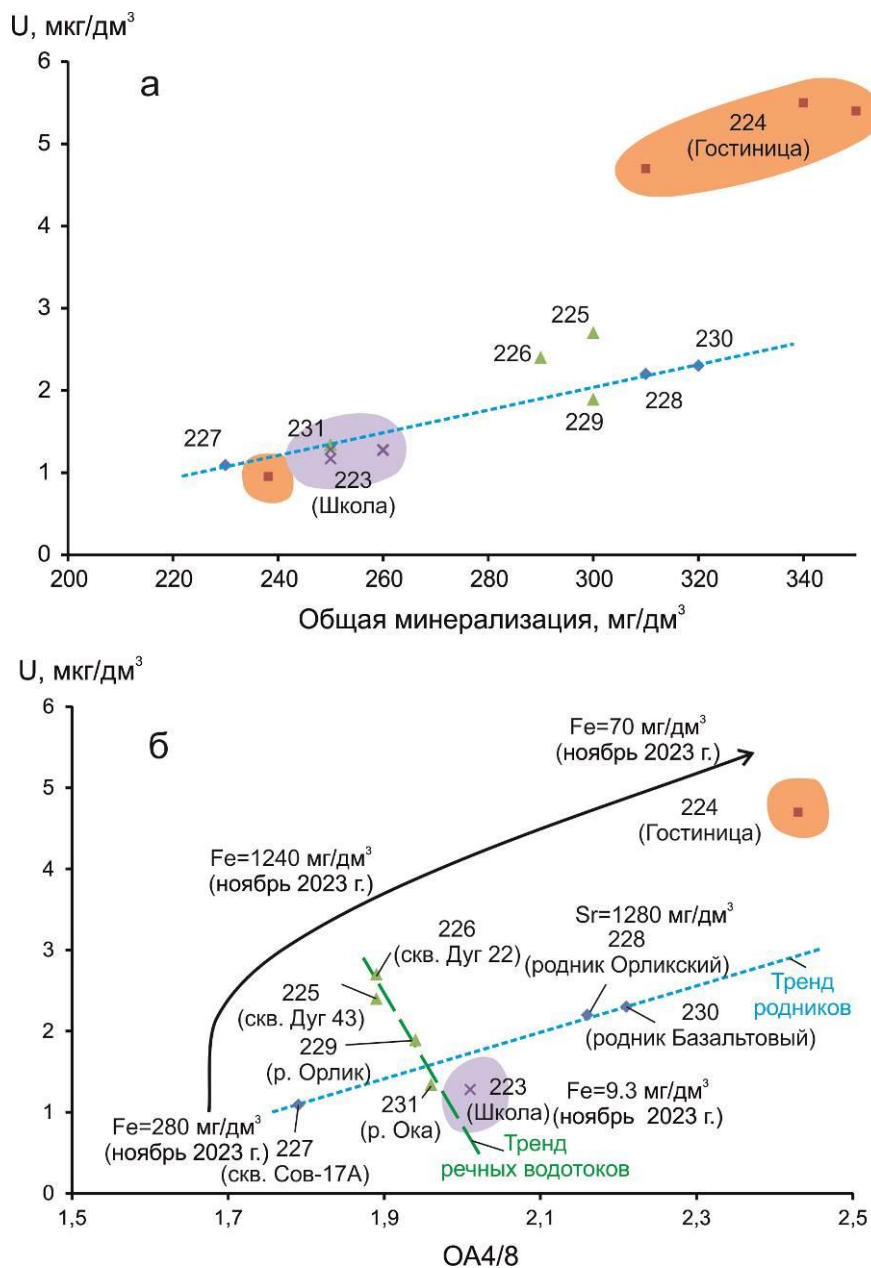


Рис. 7. Диаграммы U–общая минерализация (ОМ) (а) и U–ОА4/8 (б) подземных вод района Орлика.

Fig. 7. Diagrams U vs total mineralization (a) and U vs AR4/8 (b) for groundwater from the Orlik area.

Проба 223 (Школа) из более глубокой скважины находится вблизи линии тренда родников. На диаграмме U–ОА4/8 с отчетливо выраженным трендом речных вод этот состав близок к взаимному пересечению трендов родников и речных водотоков. Исходя из такого соотношения состава вод из глубокой скв. Школа с трендами малоуглубинных скважин, воды скв. Школа можно

считать генетически связанными с водами тренда родников. Проба 224 (Гостиница) из другой глубокой скважины дает обособленный состав, отличающийся самой высокой ОМ, самой высокой концентрацией U и максимальным значением ОА4/8.

На панели 7б низкая концентрация U в подземной воде скважины ст. 227 на окончании тренда родников может быть следствием

снижения его растворения в присутствии газов–восстановителей (обогащение Fe^{2+}), а повышенная концентрация U в подземной воде скважины ст. 226 на окончании тренда речных водотоков – следствием усиления его растворения в присутствии газов–окислителей (обогащение Fe^{3+}). Существенное возрастание концентрации U в подземной воде скважины ст. 224 (Гостиница) может свидетельствовать о повышенной роли газов–окислителей, но в отсутствии фактора обогащения железом. Вода из этой скважины генетически заметно отличается от других подземных вод (как глубоких, так и неглубоких скважин и родников) и речных вод.

Данные мониторинга U в подземных водах и обсуждение результатов

Временные вариации концентрации U

Для мониторинга на Орликском полигоне выбраны глубокие (70 м) скважины, воды которых имеют контрастные урановые компоненты (станции 224 и 223). Результаты

измерений U в подземных водах ст. 224 (Гостиница) (рис. 7) показывают возрастание его концентрации с 17 ноября 2023 г. до 22 февраля 2024 г. от 4.7 до 5.4 мкг/дм³. В это же время концентрация U в подземных водах ст. 223 (Школа) снижается от 1.28 до 1.17 мкг/дм³. Противоположная направленность изменения концентрации U отражает существующий контраст гидрогеохимических характеристик урановых компонентов (рис. 6). Благодаря этому контрасту дальнейшие изменения концентрации U станций Гостиница и Школа также были не согласованными между собой. В подземных водах ст. 224 (Гостиница) концентрация U с 22 февраля до 16 апреля 2024 г. изменяется незначительно (поднимается от 5.4 до 5.5 мкг/дм³) (рис. 8а), тогда как в подземных водах ст. 223 (Школа) за это же время возрастает от 1.17 до 1.27–1.28 мкг/дм³. Особый интерес вызывает снижение концентрации U в 6 раз (относительно значений 22 февраля и 16 апреля 2024 г.) в пробе воды, отобранной на ст. 224 (Гостиница) 01 апреля 2024 г. (рис. 8а).

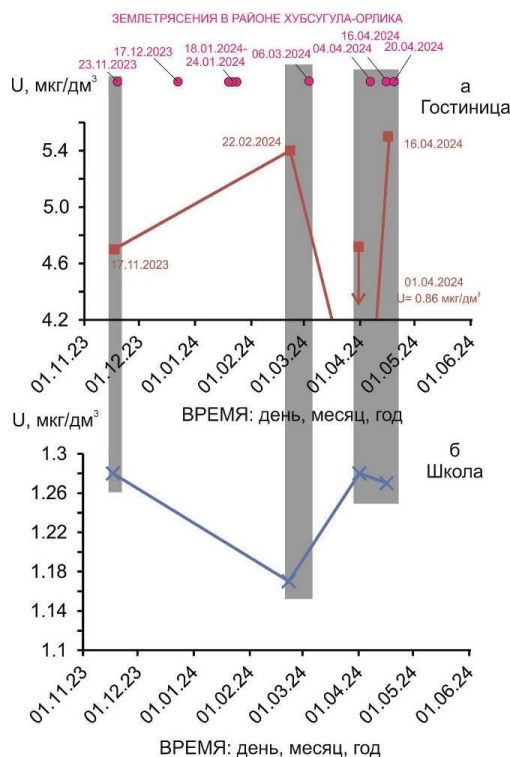


Рис. 8. Временные изменения концентрации U в подземных водах ст. 224 (Гостиница) (а) и ст. 223 (Школа) (б). Вертикальные серые полосы обозначают интервалы землетрясений, совпадающих с опробованием подземных вод. Пространственно-временное распределение землетрясений показано на рис. 9.

Fig. 8. Temporal changes in U concentration in groundwater from station 224 (Hotel) (a) and station 223 (School) (b). Vertical grey bars indicate intervals of earthquakes coinciding with groundwater sampling. Spatial-temporal distribution of the earthquakes is shown in Fig. 9.

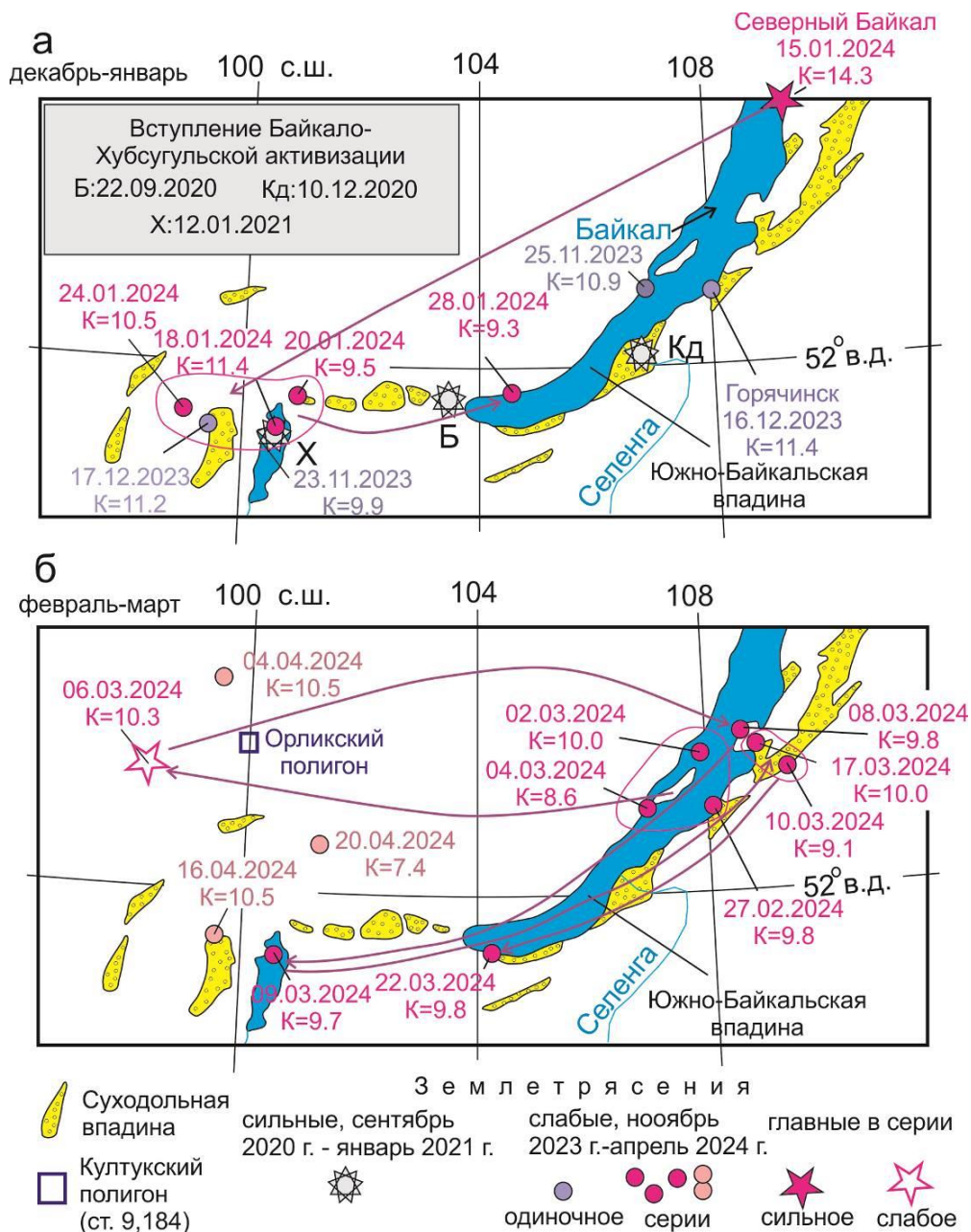


Рис. 9. Схема пространственного распределения землетрясений в центральной и западной частях БРС в ноябре 2023 г.– январе 2024 г. (а) и в феврале – апреле 2024 г. (б). Стрелками показаны последовательности землетрясений, овалами – эпицентральное поля землетрясений, близких по времени. Сохраняется переключка землетрясений, свойственная Байкало-Хубсугульской активизации, вступление которой обозначено сильными землетрясениями 2020–2021 гг.: Б – Быстринским, Кд – Кударинским, X – Хубсугульским. Наблюдения приводятся по местному времени, для землетрясений используется каталог (Карта..., 2023).

Fig. 9. Scheme of the spatial distribution of earthquakes in the central and western Baikal Rift System in November 2023–January 2024 (a) and in February–April 2024 (b). Arrows show sequences of earthquakes, ovals show the epicentral fields of earthquakes close in time. The roll call of earthquakes characteristic of the Baikal-Khubsugul reactivation remains, the entry of which was indicated by strong earthquakes in 2020–2021: Б – Bystraya, Кд – Kudara, X – Khubsugul. Data are given in the local time, the catalog (Map..., 2023) is used.

Соотношение вариаций концентрации U и других элементов подземных вод с землетрясениями

Данные, полученные по ст. 224 (Гостиница, скважина 70 м), сравниваются на рис. 10–11 с данными по ст. 223 (Школа, скважина 70 м). Основанием для сравнения является большая глубина этих скважин на Орликском полигоне.

Все пробы мониторинговых станций 224 и 223 были отобраны в интервалы сейсмической активности. Относительные вариации компонентов подземных вод этих скважин объясняются косейсмическими изменениями в резервуаре подземных вод. Отношение Na/Li в подземных водах ст. 224 выше, чем в подземных водах ст. 223, что свидетельствует о более высокой оценке температуры в резервуаре подземных вод под ст. Школа относительно ст. Гостиница по Na/Li геотермометрии. В пробе воды, отобранной на ст. 224 (Гостиница) 01 апреля 2024 г., отношение Na/Li снижается почти до уровня значений подземных вод ст. 223 (Школа). Резкое снижение U в этой же пробе ст. 224 01 апреля 2024 г. может быть следствием воздействия на подземные воды газа–восстановителя, поскольку восстановленная форма U^{4+} в воде трудно растворима. В воде ст. 224 01 апреля 2024 г. устанавливается самая низкая концентрация U (0.86 мкг/дм^3) для подземных вод всего Орликского полигона (см. рис. 7). Это падение концентрации предшествует серии землетрясений в Саянах временного интервала 04–20 апреля.

Существенные косейсмические вариации U не редкость. Например, после сильного землетрясения Империял Вэлли ($M=6.6$) в зоне разломов Сан-Андреас на западе США в подземных водах ст. N1LA-2W, расположенной в 70 км от эпицентра, наблюдалось 60-ти кратное возрастание концентрации U при относительном снижении значений OA4/8

(Finkel, 1981). Подобные резкие косейсмические вариации U и OA4/8 наблюдались на мониторинговых станциях Сухая, Гор-1 и МАХ Среднего Байкала (Расказов и др., 2023). Значение OA4/8 в первоапрельской пробе пока не определялось, но с учетом отмеченных закономерностей предполагается относительное возрастание этого показателя.

01 апреля 2024 г. в пробе подземной воды ст. 224 (Гостиница, скважина 70 м) снижается не только концентрация U и Na/Li отношение, но и концентрации других компонентов. В первоапрельской пробе ст. 224 концентрации таких элементов как K, W, Ca, Sr, U, а также $HCO_3^- + NO_3^-$ опускаются заметно ниже концентраций этих компонентов в подземных водах ст. 223, что отражается в падении общей минерализации этой пробы (рис. 10б–з). Часть первоапрельских сниженных концентраций элементов в подземной воде ст. 224 (Na, Cl, Mn, Mo, I, Ru) уравнивается с концентрациями в подземной воде ст. 223 (рис. 11а–е). Концентрация Rb в подземной воде ст. 224 возрастает более чем в 4 раза, превышая концентрацию этого элемента в подземной воде ст. 223 (рис. 11ж). Высокая концентрация Fe (70 мкг/дм^3) в первой пробе мониторингового ряда ст. 224 (рис. 11з) определена с фильтрацией и фиксацией раствора азотной кислотой непосредственно при отборе пробы. Снижение Fe в последующих пробах ряда ст. 224 может быть следствием их запоздалой обработки в лаборатории. Fe оказался сорбированным на твердых частицах и стенках бутылки при транспортировке проб. Характер поведения Fe будет предметом изучения в процессе дальнейшего мониторинга.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности компонентов подземных вод мониторинговых станций Орликского полигона к землетрясениям западной части БРС.

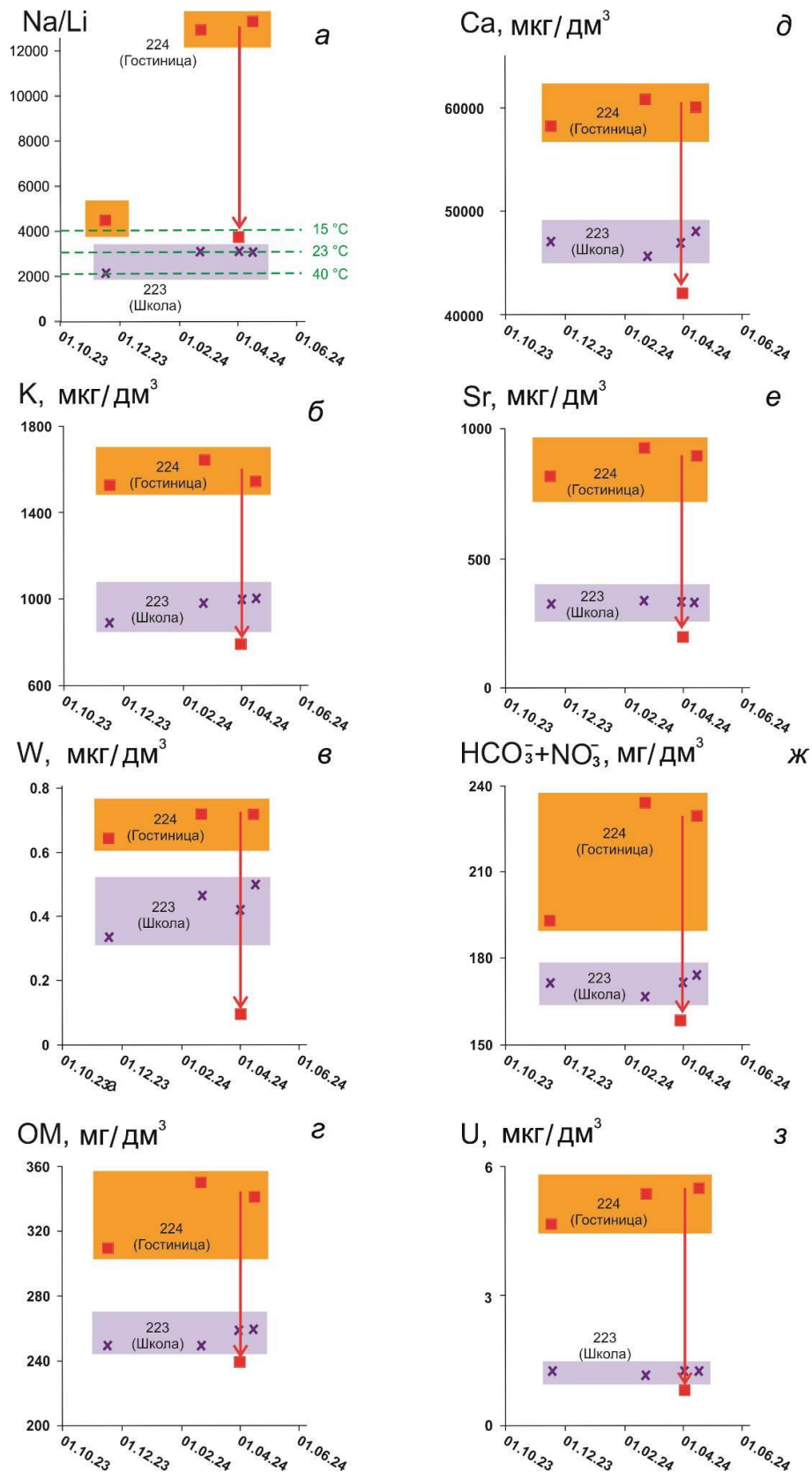


Рис. 10. Сравнение временных вариаций элементов подземных вод из 70-метровых скважин (ст. 224 и 223): *a* – снижение отношения Na/Li в первоапрельской пробе подземной воды ст. 224 почти до уровня значений того отношения в подземных водах ст. 223; *б–е* – падение концентраций элементов в этой пробе подземной воды ст. 224 ниже интервалов элементов в пробах подземных вод ст. 223. Амплитуды падения показаны красной стрелкой. На панели *a* показаны оценки температуры в резервуаре подземных вод по Na/Li геотермометру (Fouillac, Michard, 1981).

Fig. 10. Comparison of temporal variations of groundwater elements from 70-meter wells (stations 224 and 223): *a* – decrease in the Na/Li ratio in the 1st April sample of groundwater at station 224 almost to the level of that ratio in groundwater at station 223; *б–е* – drop in element concentrations in this sample of groundwater at station 224 below the element intervals in groundwater samples at station 223. The drop amplitudes are shown by red arrows. Panel *a* shows estimates of the temperature in the groundwater reservoir using a Na/Li geothermometer (Fouillac, Michard, 1981).

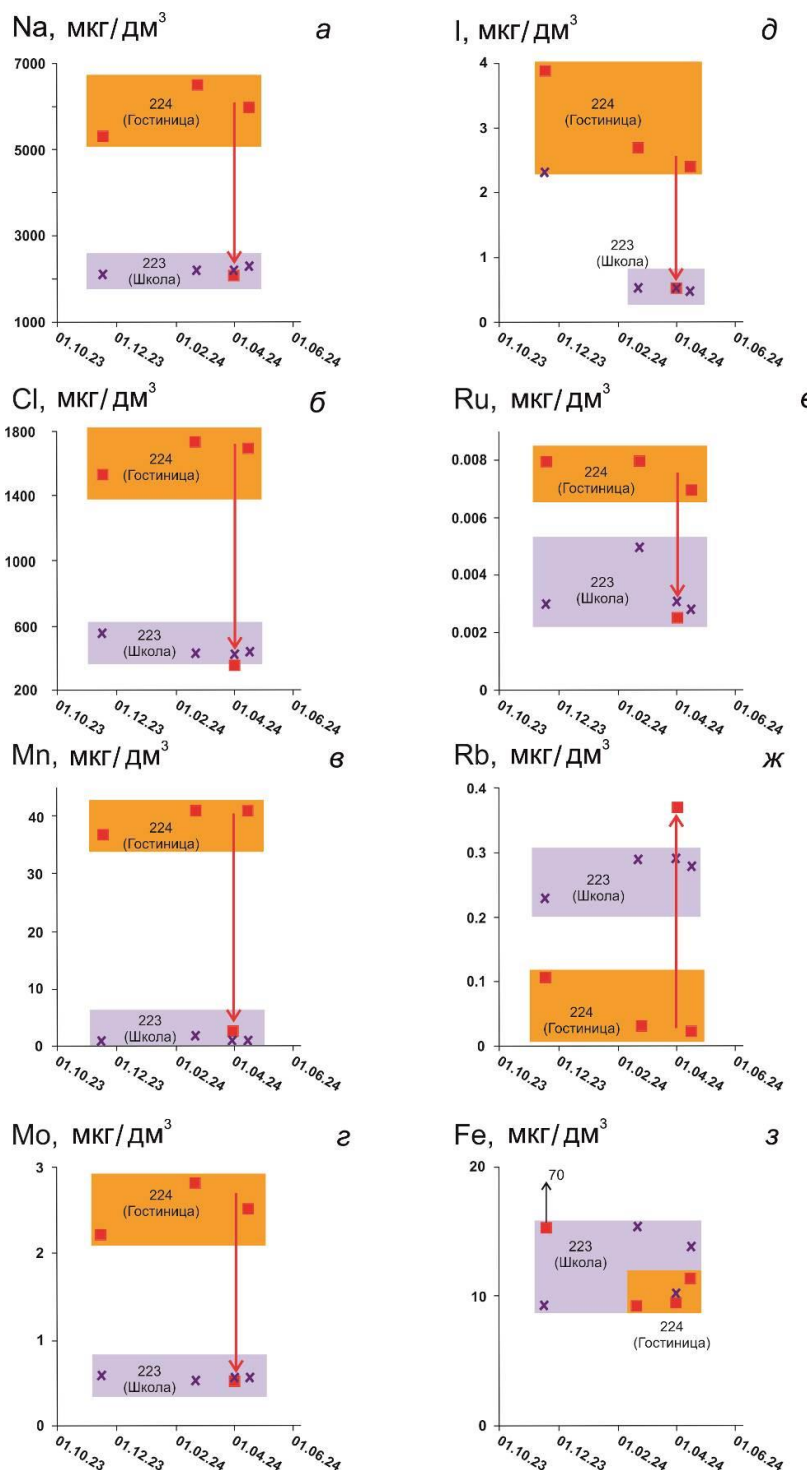


Рис. 11. Сравнение временных вариаций элементов подземных вод из 70-метровых скважин (ст. 224 и 223): *a–е* – снижение концентраций элементов и суммы газов в первоапрельской пробе подземной воды ст. 224 до интервала в пробах подземных вод ст. 223; *ж* – аномальное возрастание концентрации Rb; *з* – искаженные результаты для Fe при переносе фильтрования и кислотной фиксации проб в лабораторию. Амплитуды падения и возрастания концентраций элементов первоапрельской пробы показаны красной стрелкой.

Fig. 11. Comparison of temporal variations of groundwater elements from 70-meter wells (stations 224 and 223): *a–e* – decrease in element concentrations and a sum of gases in the 1st April sample of groundwater at station 224 to the interval in groundwater samples at station 223; *ж* – anomalous increase in Rb concentration; *з* – distorted results for Fe because of transferring filtration and acid fixation of samples to the laboratory. The amplitudes of the decrease and increase in element concentrations of the 1st April sample are shown by the red arrow.

Заключение

Подземные и поверхностные воды пос. Орлик, отобранные в меженный период, имеют сходный состав и в целом соответствуют пресным водам других территорий юга Сибири, поднимающихся с малых глубин верхней части коры (сотни метров).

В южной части Орлика в воде двух скважин определено повышенное содержание Fe. В скв. 227 (ул. Советская, 17А) содержание Fe (280 мкг/дм³) приближается к значению ПДК питьевых вод (300 мкг/дм³), а в скв. 226 (ул. Дугарова, 43) существенно превышает ПДК (1240 мкг/дм³). Вода с наиболее низким содержанием Fe (9.3 мг/дм³) определена в глубокой (70-метровой) скважине Орликской школы.

В подземных водах пос. Орлик выявляются повышенные концентрации стронция. В роднике р. Орлик (ст. 228) определено 1280 мкг/дм³ этого металла. Эта концентрация, однако, ниже ПДК (8000 мкг/дм³). Тем не менее, существует потенциальная возможность концентрирования этого элемента в подземных водах территории. При более детальном опробовании аномалии Sr могут быть выявлены.

Для гидрогеохимического мониторинга выбраны глубокие скважины (ст. 224–Гостиница и ст. 223–Школа), вода которых имеет контрастные урановые компоненты (соответственно, концентрация U 1.16–1.28 и 4.7–5.5 мкг/дм³, ОА4/8 = 2.01 и 2.43). Первые результаты мониторинга подземных вод этих станций с 17 ноября 2023 г. до 16 апреля 2024 г. показывают контрастные косейсмические вариации U и других компонентов подземных вод, свидетельствующие о высокой чувствительности выбранных станций мониторинга к процессам, сопровождающим подготовку и реализацию землетрясений в западной части БРС.

Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»). Аналитические исследования выполнялись на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500ce в центре коллективного пользования «Ультрамикроанализ» (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» (Карта..., 2024).

Литература

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

Зверев В.Л., Долидзе Н.И., Спиридонов А.И., Чешко А.Л., Чхенкели Ш.М. Аномалия четных изотопов урана в подземных водах сейсмоактивных районов Грузии // Геохимия. 1975. № 11. С. 1720–1724.

Карта эпицентров землетрясений. Иркутск: Байкальский филиал Федерального исследовательского центра Единая геофизическая служба РАН, 2024. <http://www.seis-bykl.ru>

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

С. 108–145. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.4.108>

Рассказов С.В., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Чебыкин Е.П. Вариации $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в подземных водах Мондинского полигона как отклики землетрясений на окончании Тункинской долины в Байкальской рифтовой системе // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 4. С. 1217–1234. doi:10.5800/GT-2018-9-4-0392

Рассказов С.В., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П. Временные изменения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, ^{234}U и концентраций элементов в минеральной воде из карбонатов в Олхинской скважине, юг Сибирской платформы: условия проявления эффекта Чердынцева–Чалова // Геология и окружающая среда. 2024а. Т. 4, № 2. С. 151–163. DOI 10.26516/2541-9641.2024.2.151

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. 2024б. Т. 4, № 3.

Токарев И.В., Яковлев Е.Ю., Зыков С.Б., Зина И.А. Неравновесный уран ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) водных объектов и климатические вариации: океанический резервуар // Геохимия. 2021. Т. 66, № 9. С. 857–864. DOI: 10.31857/S0016752521090077

Шарастепанов Б.Д., Папаев А.П., Рассказов С.В., Снопков С.В., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П. Качество подземных вод пос. Орлик, Окинский район Бурятии // Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы: материалы V Всероссийской конференции с участием иностранных ученых, посвященной памяти академика Н.А. Логачева в связи с 95-летием со дня рождения. г. Иркутск, 16–19 апреля 2024 г. / Ин-т земной коры СО РАН; Иркут. гос. ун-т; Иркутск: Издательство ИГУ, 2024. С. 186–188. DOI: 10.26516/978-5-9624-2262-6.2024.1-217

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 РАН. 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.

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

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

Banner JL., Wasserburg G.J., Chen J.H., Moore C.H. ^{234}U - ^{238}U - ^{230}Th - ^{232}Th systematics in saline groundwaters from central Missouri // Earth and Planet. Sci. Lett. 1990. Vol. 101. P. 296–312.

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

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

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.

Banner JL., Wasserburg G.J., Chen J.H., Moore C.H. ^{234}U - ^{238}U - ^{230}Th - ^{232}Th systematics in saline groundwaters from central Missouri // Earth and Planet. Sci. Lett. 1990. Vol. 101. P. 296–312.

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., 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. Moscow: Atomizdat, 1969. 308 p.

Cherdyntsev V.V. Nuclear volcanology. Moscow: Nauka, 1973. 208 p.

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

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

Map of earthquake epicenters. Irkutsk: Baikal branch of the Federal Research Center Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, 2024. <http://www.seis-bykl.ru>

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Vodneva E.N., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V., Chechel'nitsky V.V., Gileva N.A. Development of the Kultuk seismic forecasting site: variations ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in groundwater from active faults of the western coast of Lake Baikal // Geodynamics and Tectonophysics. 2015. Vol. 6, No. 4. P. 519–554.

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Bornyakov S.A., Chebykin E.P. Goryachinsk reactivation of the Yambui transtension zone in 2013–2015: Coseismic chemical hydrogeodynamics of groundwater on the southeastern coast of Middle Baikal // Geology and Environment. 2023. Vol. 3, No. 4. P. 108–145. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.4.108>

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Chebykin E.P. The $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ variations in groundwater from the Mondy area in response to earthquakes at the termination of the Tunka Valley in the Baikal Rift System // Geodynamics & Tectonophysics. 2018. Vol. 9, No. 4. P. 1217–1234. doi:10.5800/GT-2018-9-4-0392.

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. Temporal changes in $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, ^{234}U and element concentrations in mineral water from carbonates in the Olkha well, south of the Siberian platform: conditions for the manifestation of the Cherdyntsev-Chalov effect // Geology and Environment. 2024a. Vol. 4, No. 2. P. 151–163. DOI 10.26516/2541-9641.2024.2.151

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. 2024b. Vol. 4, No. 3.

Sharastepanov B.D., Papaev A.P., Rasskazov S.V., Snopkov S.V., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. Groundwater quality in the Orlik settlement, Oka district of Buryatia // Continental rifting, accompanied processes: Proceedings of the V All-Russian conference with the participation of foreign scientists, dedicated to the memory of the Academician N.A. Logatchev in connection with the 95th anniversary of his birth. Irkutsk, April 16–19, 2024 / Institute of the Earth's Crust SB RAS; Irkutsk. state University; Irkutsk: Irkutsk State University Publishing House, 2024. P. 186–188. DOI: 10.26516/978-5-9624-2262-6.2024.1-217

Tokarev I.V., Yakovlev E.Yu., Zykov S.B., Zimina I.A. Nonequilibrium uranium ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) of water bodies and climatic variations: an oceanic reservoir // Geochemistry International. 2021. Vol. 66, No. 9. P. 857–864. DOI: 10.31857/S0016752521090077

Zverev V.L., Dolidze N.I., Spiridonov A.I., Cheshko A.L., Chkhenkeli Sh.M. Anomaly of the even uranium isotopes in the groundwater of seismically active regions of Georgia // Geokhimiya. 1975. No. 11. P. 1720–1724.

Рассказов Сергей Васильевич,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
664025, г. Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет, геологический факультет,
заведующий кафедрой динамической геологии,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

*Институт земной коры СО РАН,
заведующий лабораторией изотопии и геохроно-
логии,*

тел.: (3952) 51–16–59,

email: rassk@crust.irk.ru.

Rasskazov Sergei Vasilievich,

*doctor of geological and mineralogical sciences,
professor,*

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 Geochrono-
logical Studies,*

tel.: (3952) 51–16–59,

email: rassk@crust.irk.ru.

Чебыкин Евгений Павлович,

кандидат химических наук,

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

Институт земной коры СО РАН,

664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,

Лимнологический институт СО РАН,

старший научный сотрудник,

email: epcheb@yandex.ru.

Chebykin Evgeny Pavlovich,

Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher,

664033, Irkutsk, st. Lermontova, 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.

Снопков Сергей Викторович,

*кандидат геолого-минералогических наук, до-
цент,*

664025, г. Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

*Иркутский государственный университет, гео-
логический факультет,*

доцент,

664074, г. Иркутск, ул. Курчатова, 3,

*Сибирская школа геонаук, Иркутский националь-
ный исследовательский технический универси-
тет,*

ведущий научный сотрудник,

email: snopkov_serg@mail.ru.

Snopkov Sergey Viktorovich,

*Candidate of Geological and Mineralogical Sci-
ences, assistant professor*

664025, г. Irkutsk, Lenina st., 3,

Irkutsk State University, Faculty of Geology,

664074, Irkutsk, st. Kurchatova, 3,

*Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Re-
search Technical University,*

Leading Researcher,

email: snopkov_serg@mail.ru.

Шарастепанов Баир Дашеевич,

кандидат географических наук,

*пос. Орлик, Окинский район, Республика Буря-
тия,*

Орликская средняя школа,

директор,

email: orlik_school@mail.ru.

Sharastepanov Bair Dasheevich,

Candidate of Geography,

*Orlik settlement, Okinsky district, Republic of Bury-
atia,*

Orlik Secondary School,

Director,

email: orlik_school@mail.ru.

Папаев Алексей Пурбоевич,

кандидат географических наук,

*пос. Орлик, Окинский район, Республика Буря-
тия,*

Орликская средняя школа,

зам. директора по воспитательной работе,

email: papayev13@rambler.ru.

Papayev Alexey Purboevich,

Candidate of Geography,

*Orlik settlement, Okinsky district, Republic of Bury-
atia,*

Orlik Secondary School,

Deputy Director for Educational Work,

email: papayev13@rambler.ru.

Пастыкова Наталья Павловна,

*пос. Орлик, Окинский район, Республика Буря-
тия,*

Орликская средняя школа,

учитель химии.

Pastykova Natalya Pavlovna,

*Orlik settlement, Okinsky district, Republic of Bury-
atia,*

Orlik Secondary School,

chemistry teacher,

email: papayev13@rambler.ru.

Ильясова Айгуль Маратовна,

*кандидат геолого-минералогических наук, веду-
щий инженер,*

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

Институт земной коры СО РАН,

email: ila@crust.irk.ru.

Ilyasova Aigul Maratovna,

*candidate of geological and mineralogical sciences,
leading engineer,*

664033, Irkutsk, st. Lermontova, d. 128,

Institute of the Earth's Crust SB RAS,

email: ila@crust.irk.ru.

Саньков Владимир Анатольевич,
кандидат геолого-минералогических наук,
664025, г. Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет, геологический факультет,
доцент,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128,
Институт земной коры СО РАН,
старший научный сотрудник,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134,
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,
старший научный сотрудник,
тел.: (3952) 42–79–03,

email: sankov@crust.irk.ru.

Sankov Vladimir Anatolievich,
candidate of geological and mineralogical sciences,
664025, Irkutsk, Lenin st., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
assistant professor,
664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
senior researcher,
664033, Irkutsk, Lermontov st., 134,
V.M. Matrosov Institute of System Dynamics and
Control Theory SB RAS,
senior researcher,
tel.: (3952) 42–79–03,
email: sankov@crust.irk.ru.
