

УДК 556.314
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5113
Шифр специальности ВАК: 1.6.6
Научная статья

Геохимические типы подземных вод юго-восточного Забайкалья

В.В. Дребот¹✉, О.Е. Лепокурова^{1,2}, С.В. Борзенко³

¹ Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, г. Томск

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

³ Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Россия, г. Чита

✉ DrebotVV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. *Актуальность* работы связана с вопросами формирования разнообразия химических типов подземных вод верхней гидродинамической зоны (от HCO₃-Ca до Cl-Na) юго-восточного Забайкалья, в том числе с солёностью >3 г/л. Существующие гипотезы объясняют это влиянием испарения, тогда как для подземных вод это неочевидно. Между тем выделение геохимических типов вод в рамках общей теории взаимодействия в системе вода–порода может раскрыть механизм формирования вод разного состава и определить этапы соленакопления, а использование данных по содержанию трития поможет оценить продолжительность контакта растворов с вмещающими отложениями и интенсивность водообмена в регионе. *Целью* работы является выделение геохимических типов подземных вод юго-востока Забайкалья и определение необходимых для этого условий на основе имеющейся изотопно-геохимической информации. *Объекты:* подземные воды верхней динамической зоны (59 проб) юго-восточного Забайкалья и региональные атмосферные осадки (6 проб). *Методы.* Макрокомпонентный состав вод определяли титриметрическим, потенциометрическим и фотометрическим методом, атомно-абсорбционной спектрометрией с пламенной атомизацией и пламенной атомно-эмиссионной спектрометрией, микрокомпонентный – с помощью ИСП-МС. Концентрации трития определялись с помощью жидкостинтилляционной спектрометрии. Индексы насыщения были рассчитаны в приложениях для физико-химического моделирования HydroGeo и GWB, базирующихся на методе констант равновесий. *Результаты и выводы.* В юго-восточном Забайкалье формируются три геохимических типа вод: кремнистый, содовый и солесодержащий, а также некоторые их разновидности, которые последовательно сменяют друг друга по мере движения вод от горного обрамления в сторону Торейской впадины. Это объясняется с позиций эволюционного развития в системе вода–порода в зависимости от времени взаимодействия воды с вмещающими отложениями. Показано, что кремнистые воды приурочены к области активного водообмена, их относительный возраст составил не более 50 лет и они находятся на стадии насыщения глинами. Содовые и солесодержащие воды характеризуются замедленным водообменом, их время взаимодействия в системе уже >57 лет, что оказывается достаточным для насыщения относительно большего числа минералов, в том числе кальция, при этом в растворе продолжает аккумулироваться натрий, который не связывается Na-содержащими солями. Интенсивное испарение, смешение с солёными озёрами в зонах локальной трещиноватости и дефляция дополнительно способствуют развитию засоления.

Ключевые слова: геохимические типы вод, система вода–порода, вторичное минералообразование, формирование химического состава, водообмен, тритий, Торейские озера, Восточное Забайкалье

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 24-27-00372.

Для цитирования: Дребот В.В., Лепокурова О.Е., Борзенко С.В. Геохимические типы подземных вод юго-восточного Забайкалья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 224–237. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5113

UDC 556.314
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5113
Scientific paper

Geochemical types of groundwater in South-Eastern Transbaikalia

V.V. Drebot^{1✉}, O.E. Lepokurova^{1,2}, S.V. Borzenko³

¹ Tomsk Branch of Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of SB RAS, Tomsk, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

³ Institute of Natural Resources, Ecology, and Cryology of SB RAS, Chita, Russian Federation

✉ DrebotVV@ipgg.sbras.ru

Abstract. Relevance. The formation of groundwater various chemical types in the upper hydrodynamic zone (from HCO₃-Ca to Cl-Na) of South-Eastern Transbaikalia, with salinities exceeding 3 g/L. Existing hypotheses link this phenomenon to evaporation; however, this is not clearly observed in groundwater. Identifying geochemical water types through the lens of water–rock interaction could illuminate the mechanisms behind differing compositions and reveal stages of salt accumulation. Additionally, data on tritium content may aid in assessing the duration of solution contact with rocks and the water exchange intensity in the area. **Aim.** To identify the groundwater geochemical types in South-Eastern Transbaikalia and determine the necessary conditions for this based on isotopic-geochemical information. **Objects.** Groundwater from the upper dynamic zone (59 samples) in South-Eastern Transbaikalia and regional atmospheric precipitation (6 samples). **Methods.** Water major components were determined using titrimetric, potentiometric, and photometric methods, FAAS and FAES. Trace elements were analyzed using ICP-MS. Tritium concentrations were measured by liquid scintillation spectrometry. Saturation indices were calculated using the HydroGeo and GWB applications for physicochemical modeling based on the equilibrium constant method. **Results and conclusions.** The authors have identified three geochemical water types in South-Eastern Transbaikalia: siliceous, soda, and saline, along with some variations that sequentially replace each other as water moves from the mountainous framing to the Torey depression. This sequence reflects the evolutionary processes in the water–rock system depended on the process duration. Siliceous waters belong to the active water exchange zone, with a relative age of no more than 50 years and saturated with clays. Soda and saline waters exhibit slower exchange, with interaction times exceeding 57 years, facilitating saturation with more minerals, including calcite, while sodium accumulates in unsaturated solutions. Evaporation and mixing with saline lakes contribute to further salinization.

Keywords: geochemical types of water, water–rock system, secondary mineral formation, chemical composition formation, water exchange, tritium, Torey lakes, Eastern Transbaikalia

Acknowledgements: The research was financially supported by the RSF within scientific project no. 24-27-00372.

For citation: Drebot V.V., Lepokurova O.E., Borzenko S.V. Geochemical types of groundwater in South-Eastern Transbaikalia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 224–237. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5113

Введение

Понятие «*геохимический тип вод*» было введено профессором С.Л. Шварцевым [1, 2] в рамках развиваемой им концепции о равновесно-неравновесном состоянии системы вода–порода, согласно которой состав воды определяется разностью между растворимыми горными породами и образующимися вторичными минералами. В отличие от классического и принятого в гидрогеологии «химического типа воды», характеризующего растворы по преобладающим анионам и катионам, геохимическая классификация является *генетической*, т. е. название даётся в зависимости от набора равновесных с водой вторичных отложений (например, Al, Si в составе глин), образующихся в данной среде, и некоторым её особенностям, тем самым указывая на механизм фор-

мирования этих вод. Всего С.Л. Шварцевым выделено семь основных типов [1], которые в свою очередь делились на подтипы. В последующих работах его ученики дополняли их на примерах разных регионов [3–9], что позволяло детальнее проиллюстрировать механизмы формирования вод.

В данной работе в качестве объекта исследования выбраны подземные воды верхней динамической зоны юго-восточного Забайкалья, интересные из-за пестроты химического состава (от HCO₃-Ca до Cl-Na) и разнообразия вмещающих пород (от базальтов до глин), засушливого климата и наличия гидравлической связи с широко распространёнными здесь солёными озерами. Авторы достаточно хорошо изучили воды на химический [10], микрокомпонентный и изотопный состав [11, 12], прове-

ли расчеты равновесия со вторичными минералами [13, 14], особенно в связи с процессами содобразования. Согласно концепции С.Л. Шварцева, содобразование – это определенный этап взаимодействия в системе вода–порода, наступающий с момента насыщения вод кальцитом, а геохимический тип таких вод, соответственно, назван щелочным карбонатно-кальциевым (или по-другому – содовым). При этом, как показано в работах [9, 14–16], для достижения такого равновесия необходимо определенное время, для оценки которого в данной работе дополнительно был изучен тритий (^3H). Тритий – сверхтяжелый изотоп водорода, который используется гидрогеологами по всему миру для оценки времени пребывания подземных вод в водоносных горизонтах [17–31]. Это связано с тем, что ^3H не образуется в подземных водах, а поступает в зону аэрации только с атмосферными осадками, т. е. его количество уменьшается во времени строго в соответствии с уравнением радиоактивного распада. Данный подход также имеет ряд недостатков, связанных, в частности, с определением входной функции (восстановление значений трития в региональных осадках области питания с учетом сезонности и времени пребывания в зоне аэрации и др.). В этой связи авторы не ставят перед собой задачу точно определить возраст исследуемых подземных вод, а предлагают использовать значения ^3H в качестве показателя, контролирующего водообмен. Таким образом, целью настоящей работы является выделение геохимических типов подземных вод верхней динамической зоны юго-востока Забайкалья и определение необходимых для этого геохимических условий на основе имеющейся изотопно-геохимической информации, а также иллюстрация последовательности формирования этих типов в формате концептуальной модели.

Объект исследования

Район исследования находится на юго-востоке Забайкальского края и простирается в пределах от 49° до 51° с.ш. и от 114° до 117° в.д (рис. 1, б). Южная граница территории совпадает с государственной границей между Россией и Монголией. Пробоотбор выполнялся на российской стороне вокруг самых крупных водных объектов региона – трансграничных озёр Зун- и Барун-Торей, водосборная площадь которых почти полностью находится в Монголии, а сама территория относится к Монгольской степной провинции и характеризуется недостаточностью увлажнения с обилием солнечного света. Абсолютные отметки постепенно понижаются от ~ 900 м (в горном обрамлении) и достигают 591,4 м на дне озера Барун-Торей.

Климат здесь близок к монгольскому, который является самым резко континентальным в мире.

Это объясняется расположением района исследований почти в самом центре Азии. Осадки (322 мм) лишь немного превышают испарение (318 мм) в водном балансе территории [32]. Кроме того, район исследований подвержен пыльным бурям, приходящим с территории Монголии, что усиливает влияние атмосферного переноса. Такая экологическая переходная зона считается крайне уязвимой к будущим климатическим изменениям, и северо-восточная Азия действительно испытала один из самых сильных сигналов потепления на Земле [33]. Резко континентальный полусухой климат и межгодовые колебания общей увлажненности территории приводят к значительной сезонной и более долгосрочной изменчивости гидрологического режима озёр. Это выражается в том, что раз в 25–30 лет широко распространённые солёные озера здесь практически полностью пересыхают, после чего наступает фаза увлажнения и они снова наполняются водой. Уровень подземных вод в это время также меняется. Последний маловодный период в регионе наблюдался в период с 1999 по 2021 гг. [34], который повлек за собой иссушение наиболее крупных озёр Барун-Торей и Зун-Торей. С 2020 г. русла рек Удзы и Ималки на территории России начали наполняться водой и в 2021 г. вода на 80 % заполнила котловину оз. Барун-Торей, в то время как котловина оз. Зун-Торей оставалась сухой.

Учитывая низкую степень антропогенной нагрузки в районе, предыдущими исследованиями было показано [13], что основными источниками макро- и микрокомпонентного состава подземных вод выступают вмещающие породы, которые здесь представлены палеозойскими, мезозойскими и кайнозойскими образованиями. На излияе скважин юго-восточного обрамления Торейской впадины было установлено наличие оливкового метадолерита и метабазальта, в составе которых присутствуют в разных соотношениях первичные минералы: основные плагиоклазы, клинопироксен, титаномagnetит и оливин. Среди вторичных минералов встречаются: хлориты, кремнистое вещество, каолинит, Ca-Mg-K-Na-Fe-монтмориллонит, альбит, кальцит. В пределах территории фиксируется также множество проявлений рудной минерализации, которые не имеют промышленного значения, но являются составной частью водовмещающих пород и могут выступать дополнительными источниками микроэлементов вод. Кроме того, котловины некоторых озёр содержат отложения поваренной соли, соды и сульфата натрия, которые выступают дополнительными источниками катионов и анионов.

Исследуемые подземные воды локализованы в пределах Торейского артезианского бассейна монгольского типа. Водоносные комплексы района в зависимости от условий залегания подземных вод,

их возраста и типа циркуляции относят либо к пластовому типу (N-Q), либо к трещинным водам (K₁, PZ-MZ, yMZ). Выделение водоносных горизонтов достаточно условно, поскольку воды, циркулирующие в трещиноватых породах разного возраста и состава, образуют единую гидравлически связанную систему со схожими условиями циркуляции. Питание осуществляется преимущественно атмосферными осадками по всей площади распространения трещиноватых пород горного обрамления территории, в том числе в восточных отрогах хребта Хэнтэй на монгольской стороне, который является мировым водоразделом между бассейнами Северного Ледовитого и Тихого океанов, с одной стороны, и бессточными бассейнами Средней Азии – с другой. Это подтверждается результатами многочисленных исследований изотопного состава воды в регионе [11, 12, 14]. Солонцы в области внутреннего стока при увлажнении становятся вязкими и водонепроницаемыми, затрудняя атмосферное питание. Движение вод предопределено геоморфологической позицией водовмещающего комплекса и в общем плане направлено от водоразделов в долины [35]. Таким образом, район исследований представляет собой по большей части закрытую-бессточную межгорную структуру, замкнутый характер которой, отсутствие подземного и поверхностного стоков, значительный дефицит увлажнения, интенсивное испарение и другие факторы определяют застойный режим подземных вод и, как следствие, затрудненные условия водообмена [36].

Методы исследования

В работе использованы данные гидрохимического опробования, проведенного в летние полевые сезоны с 2017 по 2021 гг. совместными усилиями сотрудников Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (ИПРЭК СО РАН, г. Чита) и Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Всего было отобрано 59 проб подземной воды верхней гидродинамической зоны из родников, колодцев и скважин глубиной до 70 м. Несмотря на то, что основной акцент был сделан на опробовании подземных вод, для изучения источников питания собирали также атмосферные (дождевые) осадки в количестве 6 проб. Технология пробоотбора была подробно описана в работах [10, 13, 14]. Пробы отфильтровывали через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм.

Макрокомпонентный состав исследуемых вод определяли стандартными методами, также описанным ранее в публикациях [10, 13, 14] в ближайшей к району исследования аттестованной лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии ИПРЭК СО РАН, микрокомпоненты в составе воды определяли

методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета и Аналитическом центре Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск). Температура, pH, Eh раствора определялись на месте *in situ* с помощью мультиметра AMTAST AMT03 (США). Концентрации трития определялись в восьми точках опробования в лаборатории ядерной океанологии Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН (г. Владивосток) методом жидкосцинтилляционной спектрометрии на низкофоновом жидкосцинтилляционном счетчике QUANTULUS 1220.

В рамках данной работы для ориентировочных расчетов была использована формула (1) (поршневая модель) [17]:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{C_0}{C} \right), \quad (1)$$

где t – «возраст» воды; λ – константа распада трития, равная $0,055 \text{ год}^{-1}$; C_0 – исходная концентрация трития в атмосферных осадках (в нашем случае – в реке Ульда – 27,0 ТЕ); C – концентрация трития в подземных водах.

Поскольку в рамках данного исследования тритий в атмосферных осадках региона, к сожалению, не определялся, в качестве исходной концентрации ^3H было принято его содержание в единственной крупной реке, питающей Торейские озера, – Ульдзе, которое находится на уровне 27 ТЕ и является одним из самых высоких среди изученных вод, т. е. вода имеет молодой «возраст». Река имеет преимущественно атмосферное питание и ожидается, что содержание ^3H здесь определяется главным образом его концентрациями в атмосферных осадках, выпадающих на водосборную площадь [17].

Для оценки степени насыщения исследуемых вод относительно минералов вмещающих пород в данном исследовании использовались индексы насыщения (saturation index – SI), опубликованные ранее в нашей работе [13]. Они были рассчитаны в программных комплексах HydroGeo (Россия) и GWB (США), которые основаны на методе констант равновесий, где в качестве входных данных использовались содержания растворённых элементов в растворе. Список минералов, который был учтен при моделировании в системе вода–порода основан на составе образцов, отобранных в районе исследования и подробно описанных в главе «Объект исследования» данной работы, а также литературных данных. Полученные результаты визуализировали с помощью графиков, построенных в MS Excel в сочетании с возможностями Adobe Illustrator. Название химического типа вод давалось по Щукареву, т. е. по убыванию содержаний основных катионов и анионов с концентрациями вы-

ше 25 мг-экв. % в растворе. Статистическая обработка данных осуществлялась в программном пакете Statistica с учетом соответствия нормальному или логнормальному законам распределения. Геообработка и картографический материал выполнялись в программном комплексе ArcGIS. Контур водосбора Торейских озёр строился с помощью комплекса инструментов группы Гидрология, где в качестве входных данных используется цифровая модель рельефа исследуемой территории. Карта распределения химических подземных вод построена с помощью интерполяции поверхности методом обратно взвешенных расстояний (ОВР).

Результаты исследования

Химический состав исследуемых подземных вод и атмосферных осадков региона

Исследуемые подземные воды преимущественно являются гидрокарбонатными, их химический состав представлен в форме диаграммы Пайпера на рис. 1, а, а подробная характеристика уже была представлена в работах [10, 13, 14]. По преобладающему катиону можно выделить три основных химических типа: 1) кальциевые воды, на долю кото-

рых приходится не более 20 %, 2) магниевые воды, число которых не превышает 16 %, 3) самые распространённые – натриевые, их распределение по территории представлено на рис. 2, б. Исключение составляют две скважины: Cl-Na типа на водосборе хлоридного оз. Горбунка и SO₄-Na типа на правом берегу оз. Барун-Торей.

По условиям пространственного залегания было выделено две группы подземных вод: воды водосборного бассейна Торейских озёр и воды за его пределами, в обрамлении Торейской впадины, т. е. расположенные дальше относительно озёр и на более высоких отметках рельефа. Общая минерализация исследуемой воды варьирует в широких пределах от 0,2 г/л (соответствует HCO₃-Ca химическому типу) до максимальной 3,2 г/л (соответствует SO₄-Na водам). При этом рост солёности отмечается с севера и северо-запада (в обрамлении Торейской впадины) на юг в сторону озёр (область водосбора) (рис. 2, б). Наиболее минерализованные воды (более 1 г/л) отобраны у береговой линии озёр.

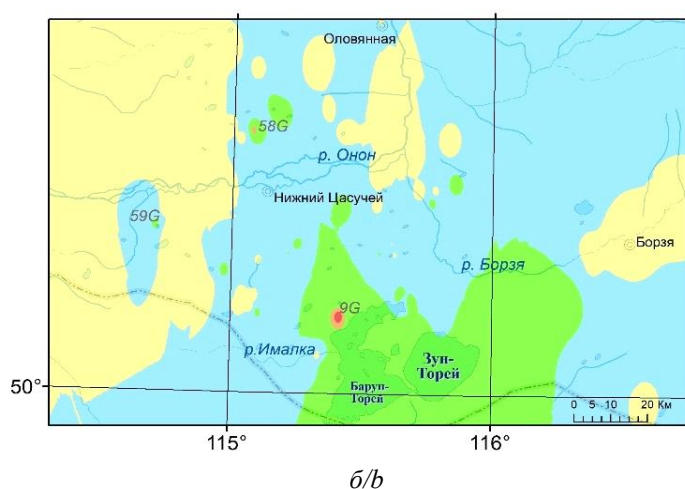
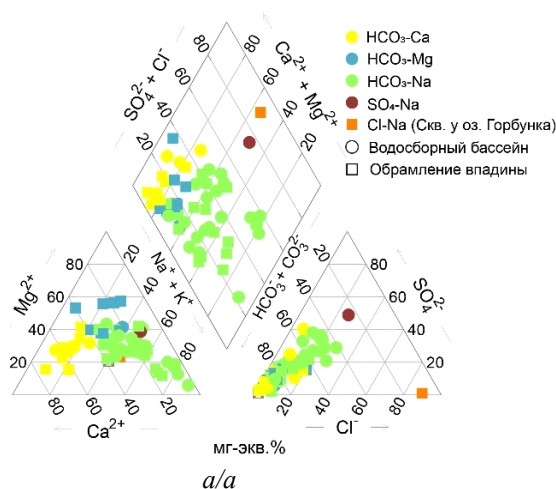


Рис. 1. Диаграмма Пайпера, иллюстрирующая состав подземных вод с учётом химических типов (а) и их распределение по территории (б)

Fig. 1. Piper diagram illustrating the groundwater composition taking into account chemical types (a) and their distribution over the territory (b)

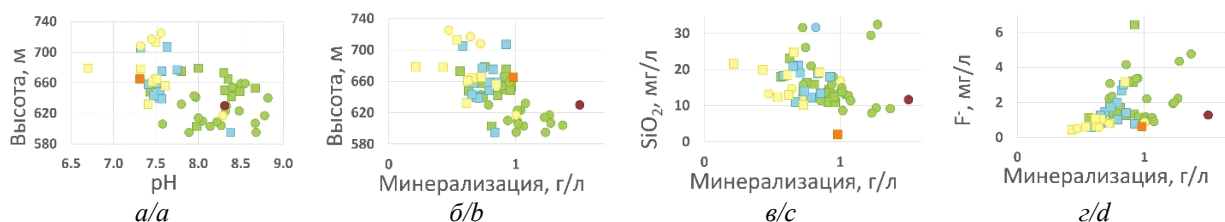


Рис. 2. Зависимость абсолютной высоты пробоотбора от pH (а), минерализации от высоты (б), содержания F⁻ (в) и SiO₂ (г) в исследуемых подземных водах (условные обозначения – на рис. 1, а)

Fig. 2. Relationship between elevations and pH (a), TDS with elevations (b), F⁻ (c) and SiO₂ (d) contents in the studied groundwater (symbols are in Fig. 1, a)

Преобладание определенного катиона контролируется солёностью и pH воды (рис. 2, а, б): Ca^{2+} превалирует при минерализации до 0,6 г/л и pH до 7,4, Mg^{2+} – при солёности от 0,5 до 0,8 г/л и pH 7,4–7,8, Na^+ , соответственно, при более высоких значениях pH и солёности. Сульфат-ион присутствует в количествах, достаточных для определения химического типа, и при солёности 1,1 г/л и pH 8,3 г/л может входить в формулу ионно-солевого состава (>25 мг-экв. %). Кроме основных ионов во всех подземных водах в относительно высоких концентрациях отмечаются F^- и SiO_2 . При этом в обрамлении впадины с ростом солёности содержания F^- увеличиваются, а SiO_2 , наоборот, снижаются (рис. 2, в, г).

Атмосферные осадки региона являются ультрапресными (10–120 мг/л), слабокислыми (pH 6,0–6,8), сложного катионного и анионного составов, но в основном преобладают HCO_3^- , реже SO_4^{2-} . Химический состав в целом сопоставим с усредненными данными по г. Улан-Батор (Монголия) за многолетний период [37] и содержаниями зон недостаточного увлажнения бывшего СССР [1].

Тритий (^3H) в исследуемых водах

В данной работе тритий предлагается использовать для оценки относительного «времени» нахождения исследуемых вод в водоносных горизонтах исходя из представлений о том, что чем выше значения ^3H в воде, тем моложе её возраст. Такой подход позволит предположить время и характер водообмена, что внесет ясность при выделении геохимических типов воды. Показано, что все опробованные подземные воды являются тритийсодержащими, т. е. относительно молодыми. Содержания ^3H в водах рассматриваемой территории изменяются в диапазоне от 1,7 до 27,0 Т.Е. (третиевых единиц) (табл. 1).

Таблица 1. Содержание ^3H в подземных водах и в р. Ульдзе, их «возраст» в зависимости от химического типа и абсолютной высоты в районе исследований

Table 1. ^3H content in groundwater and in the Uldza River, their "age" depending on the chemical type and absolute altitude in the study area

Точка опробования Sampling point	Химический тип воды Water chemical type	Высота, м Elevation, m	TE/TU	t, л t, year
61G	$\text{HCO}_3\text{-Ca}$	717	12,1	40,7
63G		708	27,8	17,7
64G		725	16,7	29,4
66G	$\text{HCO}_3\text{-Mg-Na}$	649	2,32	>90
67G	$\text{HCO}_3\text{-Na}$	609	8,66	56,7
68G		595	5,55	88,5
69G		632	1,73	>90
9R (р. Ульдза Uldza River)	$\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$	604	27,0	–

Хорошо прослеживается зависимость концентраций трития от гипсометрического положения точек опробования: с уменьшением высоты и продвижением вод от областей питания в сторону озер Т.Е. становится меньше, т. е. увеличивается возраст вод (рис. 3). Так, зону замедленного водообмена можно условно выделить по концентрациям трития в интервале 1,7–8,7 Т.Е., активного – 12–28 Т.Е. В качестве границы между двумя зонами можно условно принять значение трития 10 Т.Е. Таким образом, условный «возраст» подземной воды зоны активного водообмена находится в пределах от 17 до 40 лет, а замедленного >57 лет (табл. 1). Более молодые воды по химическому типу являются гидрокарбонатными кальциевыми, а по мере увеличения «возраста» воды и движения в область внутреннего стока в сторону понижения отметок рельефа начинает преобладать доля натрия и состав постепенно сменяется с $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ на $\text{HCO}_3\text{-Mg-Na}$, и на последующей стадии формирования состава становится – $\text{HCO}_3\text{-Na}$.



Рис. 3. Расположение точек отбора подземной воды в зависимости от высоты и ^3H

Fig. 3. Layout of groundwater sampling points depending on elevation and ^3H

Равновесие исследуемых вод с основными минералами вмещающих пород

Известно, что химический состав подземных вод определяется разностью между элементами, которые поступают в раствор из растворяемых горных пород, и той частью элементов, которые связываются вторичными минералами. Этот набор формирующихся вторичных фаз представляет собой необходимое геохимическое условие для образования того или иного геохимического типа воды [2]. В этой связи определение, относительно каких минералов подземные воды достигли насыщения, а какие продолжают растворяться, является важной частью исследования. При этом наибольший интерес представляет характер равновесия воды именно с широко развитыми на территории базальтами (раннемеловые андезиты-базальты тургинской свиты), поскольку известно, что равновесие воды относительно этих минералов не достигается, поэтому это равновесно-неравновесное состояние можно считать начальной точкой эволюции состава вод [2].

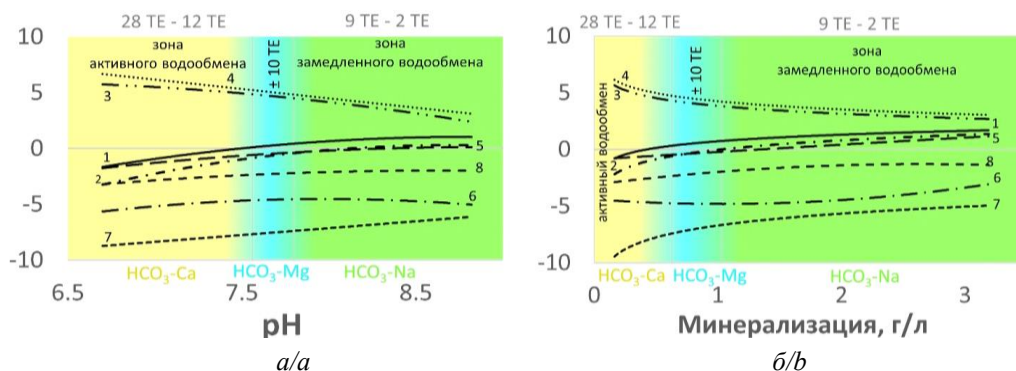


Рис. 4. Индекс насыщения вод по отношению к минералам вмещающих пород в зависимости от а) pH воды и б) солёности: 1 – кальцит, 2 – магнезит, 3 – каолинит, 4 – монтмориллонит, 5 – альбит, 6 – анортит, 7 – галит, 8 – гипс

Fig. 4. Water saturation index in relation to minerals of host rocks depending on a) water pH and b) salinity: 1 – calcite, 2 – magnesite, 3 – kaolinite, 4 – montmorillonite, 5 – albite, 6 – anorthite, 7 – halite, 8 – gypsum

Для иллюстрации этого процесса в данной работе были использованы SI исследуемых вод относительно минералов вмещающих пород, подобные расчёты которых уже были ранее приведены в [10, 13]. Для удобства SI представлены в виде графиков, учитывающих также химических тип вод и значения трития (рис. 4).

Показано, что все без исключения подземные воды далеки от насыщения относительно породообразующих алюмосиликатов (например, анортита), но находятся на стадии насыщения относительно вторичных глинистых минералов (например, каолинита и монтмориллонита). Что касается карбонатов, то хорошо видно (рис. 4), как по мере уменьшения содержаний трития (с 27 до 12 ТЕ) с параллельным увеличением pH и солёности до 7,2 и 0,3 г/л, соответственно, сначала достигается насыщение доломитом, а затем при более высоких значениях pH и минерализации (7,4 и 0,4 г/л) – с кальцитом и магнезитом. Это сопровождается сменой химического типа исследуемых вод с $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ в обрамлении Торейской впадины через $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ на $\text{HCO}_3\text{-Na}$ в области сброса. На более поздних этапах взаимодействия $\text{HCO}_3\text{-Na}$ воды, которым соответствуют значения трития в воде от 9 ТЕ и ниже, достигают линии насыщения альбитом. Это даёт основание предположить, что насыщение исследуемых вод после попадания атмосферных осадков в зону аэрации относительно глинистых минералов достигается относительно быстро. Формирование $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ подземных вод, для которых характерны наиболее высокие показатели ^3H (12–28 ТЕ), происходит на протяжении ~40 лет в условиях ненасыщенности к кальциту. Замкнутый характер Торейской впадины способствует формированию застойного режима в области внутреннего стока и в случае, если вода не покидала водоносный горизонт на протяжении ~57 лет, устанавливается насыщение к кальциту, а исследуемые воды постепенно приобретают

$\text{HCO}_3\text{-Na}$ состав. Это хорошо согласуется с концепцией содообразования С.Л. Шварцева [1, 15], согласно которой для накопления соды необходимо большее время взаимодействия вод с вмещающими породами. При этом видно, что ни одна проба не достигла насыщения с хлоридами (галит) и сульфатами (гипс).

Геохимические типы исследуемых подземных вод

На основе классификации, предложенной С.Л. Шварцевым [1], в районе Торейских озёр Забайкалья были выделены три геохимических типа подземных вод: *кремнистый*, *содовый* и *солеосодержащий* и некоторые их разновидности (табл. 2), распространённость которых на территории представлена на рис. 5. Они различаются не только по составу равновесных минералов, но и по общей солёности вод, pH, Eh, и концентрациям характерных элементов.

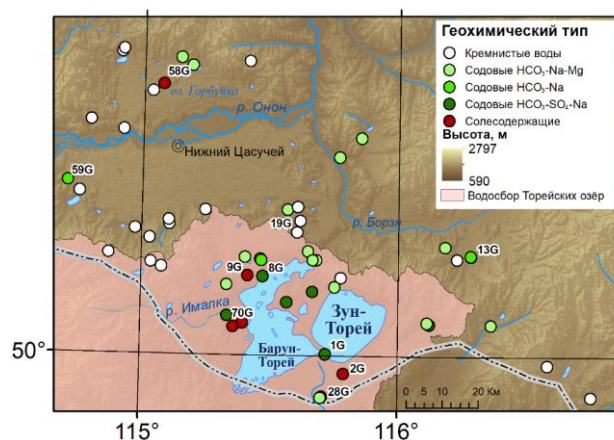


Рис. 5. Распространённость геохимических типов исследуемых подземных вод

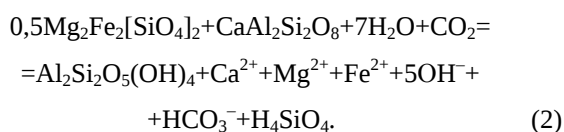
Fig. 5. Distribution of geochemical types of studied groundwater

Таблица 2. Геохимические типы подземных вод района Торейских озёр

Table 2. Geochemical types of groundwater in the Torey Lakes region

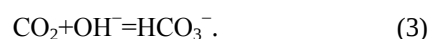
Геохимический Geochemical		Контролирующие показатели Control indicators	Необходимое геохимическое условие Necessary geochemical condition		Вторичные минералы, равновесные с водой Secondary minerals in equilibrium with water	Возраст воды Water age	Водообмен Water exchange	Территория Area
тип вод water type	подтип вод water subtype		равновесие вод с waters equilibrium with	H ³				
Кремнистый Siliceous	Кремнистый Ca-Na-Mg-K Siliceous Ca-Na-Mg-K	pH, Si, K, HCO ₃ ⁻ , Ca, Mg, Na, K	каолинитом, монтмориллонитами Ca, Mg, Na, K kaolinite, montmorillonites Ca, Mg, Na, K	12 TE – 28 TE / 2 TU – 28 TU	Каолинит, монтмориллонит Kaolinite, montmorillonite	<50 лет <50 years	Активный Active	За пределами водосбора Торейских озёр Beyond the Torey lake depression
	Кремнистый Ca-Fe Siliceous Ca-Fe	pH, Si Ca, Fe	дафнитом, сидеритом daphnite, siderite		Дополнительно: сидерит Additionally: siderite			
	Кремнистый Ca-Mn Siliceous Ca-Mn	pH, Si Ca, Mn	родохрозитом rhodochrosite		Дополнительно: родохрозит Additionally: rhodochrosite			
Содовый Soda	Кремнистый карбонатно-кальциевый Siliceous calcium-carbonate	pH, HCO ₃ ⁻ , Ca, Si, K	кальцитом, монтмориллонитами calcite, montmorillonites	2 TE – 9 TE / 2 TU – 9 TU	Каолинит, иллит, Мт, кальцит, мусковит Kaolinite, illite, Mt, calcite, muscovite	>57 лет >57 years	Замедленный Slow	Водосбор Торейских озёр Torey lake catchment
	Кремнисто карбонатный кальциево-фтористый Siliceous carbonate-calcium fluoride	pH, HCO ₃ ⁻ , Ca, Si, F	кальцитом, монтмориллонитом, флюоритом calcite, montmorillonite, fluorite		Дополнительно: флюорит Additionally: fluorite			
Солесодержащий Saline	Кремнистые сульфатно-натриевые Siliceous sodium-sulfate	pH, HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , Ca, Si, Mg	кальцитом, альбитом, хлоритом calcite, albite, chlorite	<2 TE / <2 TU	Каолинит, Мт, кальцит, мусковит, хлорит, анальцим Kaolinite, Mt, calcite, muscovite, chlorite, analcime	>90 лет >90 years		

Концептуальную модель формирования выделенных геохимических типов можно представить следующим образом. Как было показано ранее [11, 12], исследуемые воды имеют метеорный генезис, т. е. основным источником питания здесь являются слабокислые и нейтральные ультрапресные атмосферные осадки с минерализацией до 0,12 г/л, которые, попадая в зону аэрации, начинают интенсивно растворять вмещающие породы: песчаники, гранитоиды, эффузивные породы и др. Этот процесс, сопровождающийся ростом всех компонентов раствора, т. е. солёности и щёлочности вод, и может быть представлен на примере реакции растворения алюмосиликатов основного состава (анортита и оливина) (2), к которым воды не достигают равновесия:



При гидролизе всегда выделяется группа OH⁻, что ведет к постоянному подщелачиванию раствора. Часть аниона сразу нейтрализуется уголекислотой (CO₂), всегда присутствующей в зоне активно-

го водообмена при растворении почвенного и подпочвенного органического вещества (3), что представляет собой биогенный этап формирования и из-за чего подземные воды на начальном этапе всегда являются гидрокарбонатными по составу.



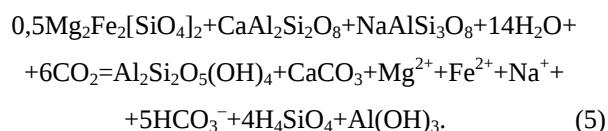
В катионном составе вод изначально превалирует Ca²⁺, иногда Ca²⁺ и Mg²⁺ из-за их высоких кларков в породах и сильной миграционной способности. Так, по достижении минерализацией значений >0,2 мг/л и pH > 7,1 формируется первый геохимический тип подземных вод – кремнисто-кальциевый или кремнисто-магниево-кальциевый, для которого характерно равновесие с глинами (рис. 4). В общем виде формула Курлова (4) для усреднённого состава данного типа выглядит следующим образом:

$$M_{0,5} \frac{\text{HCO}_3}{\text{Ca}^{2+} + 40\text{Mg}^{2+} + 39\text{Na}^{+21}} \text{pH}_{7,4}. \quad (4)$$

Исходя из расчетов по тритию воды данного типа являются самыми молодыми, относятся к зоне активного водообмена в обрамлении Торейской впадины и чаще всего выходят за пределы водо-

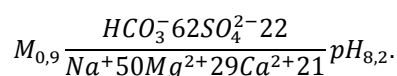
сбора непосредственно самих Торейских озер к северу, охватывая частично бассейн р. Онон (рис. 5). Высокая степень интенсивности выщелачивания горных пород и формирование каолинита с монтмориллонитами проявляется в снижении содержаний SiO_2 (рис. 2), которые начинают постепенно выходить из раствора на данном этапе. Поскольку часть точек опробования, отобранных в зонах марганцевой минерализации, достигают насыщения относительно родохрозита, а также дафнита и сидерита (расчеты опубликованы в [10, 13]) в пределах кремнисто-кальциевого геохимического типа были выделены и более редкие разновидности: *кремнисто-кальциево-марганцевый* и *кремнистый кальциево-железистый*.

По мере движения подземной воды от горного обрамления в сторону Торейской котловины возрастает время взаимодействия вод (~50 лет и более) с вмещающими породами, что ведет к еще большему увеличению солёности и pH. При минерализации $>0,5$ г/л, $\text{pH} > 7,5$ воды достигают равновесия с кальцитом и другими карбонатами (рис. 4). Реакция гидролиза (5) может принять следующий вид:



С этого момента вода приобретает характерный для района исследований HCO_3^- -Na состав, формируя второй и самый распространённый в районе исследований геохимический тип воды – *кремнистый карбонатно-кальциевый* (или по-другому – *содовый*), наступающий с момента достижения равновесия воды с кальцитом [15]. Это приводит к тому, что Na^+ начинает интенсивно аккумулироваться в водах, а концентрации Ca^{2+} снижаются (связываясь кальцитом и др. карбонатами). При этом, как видно из реакции (5), кремний продолжает уходить из раствора во вторичные отложения, что приводит к дальнейшему снижению SiO_2 .

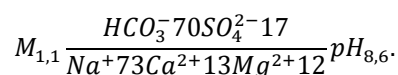
В существующих природных условиях содовые воды в чистом виде формируются редко, поэтому внутри этого типа хорошо выделяются три основные подгруппы. Первая – это содовые воды обрамления Торейской впадины, которые отличаются наибольшим распространением по территории. По составу эти воды гидрокарбонатные натриевые, с высокой долей магния в составе, который почти всегда входит в формулу ионно-солевого состава вторым:



Это хорошо коррелирует со степенью насыщения воды на данном этапе магнезитом (рис. 5), который

еще продолжает формироваться, что обеспечивает остаточное присутствие элемента в растворе.

К содовым водам в чистом виде можно отнести только четыре точки опробования: например, воды точки 8G самоизливающейся скважины с максимальным для всех подземных вод территории pH, доходящим до 8,8. Стабильным содовым составом отличается также скважина 13G в районе оз. Борзинского, которое было детально изучено в работе [16] как самое щелочное в районе. В целом формула Курлова для данного подтипа может выглядеть так:



Помимо натрия, воды обогащаются и другими химическими элементами, среди которых выделяется фтор. При этом хорошо видно (рис. 2), как F^- в воде по мере трансформации химического состава сначала непрерывно растёт до 1 мг/л, а после этого снижается. По-видимому, это связано с достижением частью исследуемых опробований насыщения относительно флюорита, что было показано в [10, 13]. Благодаря чему внутри содового геохимического типа можно, например, выделить *кремнисто-карбонатный кальциево-фтористый* ввиду достижения исследуемой подземной водой насыщения соответствующими минералами. Среди карбонатов, помимо кальцита и магнезита, вода, в зависимости от состава вмещающих отложений, достигает равновесия и, например, с сидеритом или наиболее характерным для содовых вод давсонитом [10, 13], что позволяет согласно классификации С.Л. Шварцева выделить также *кремнисто-карбонатный кальциево-давсонитовый* тип подземных вод. Все они также выводят Ca, Mg или Fe из воды, после чего Na будет становиться лидирующим катионом.

В условиях полуаридного климата интенсивное испарение может играть ключевую роль в формировании выделенных геохимических типов подземных вод как напрямую через испарительное концентрирование приповерхностных водоносных горизонтов, ускоряя тем самым процессы взаимодействия в системе вода–порода, так и через дефляцию с водосборов солёных озёр. На пике аридизации климата площадь акваторий многих озер в районе уменьшается, их минерализация возрастает [38], увеличивается потенциал образования в рапах этих водоемов сульфатных и хлоридных солей, которые затем с ветром (в том числе и с Монголии) попадают в атмосферу и разносятся по водосборным площадям. На атмогенном этапе солёность и концентрация натрия в осадках выше, чем средние показатели по г. Улан-Батор, т. е. вода активно обогащается солями местного генезиса, которые

затем растворяются и с водой возвращаются в зону аэрации. Этот круговорот существует постоянно, активизируясь и замедляясь в разные фазы сложного гидрологического режима региона, поэтому на литогенном этапе система всегда работает в среде с повышенной солёностью. При этом вода обогащается сульфатами быстрее, чем хлоридами, потому что кларк серы в 2,8 раз выше [1].

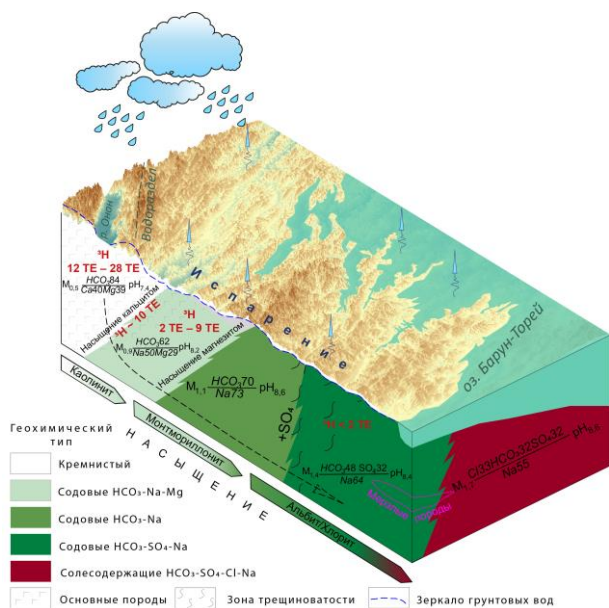


Рис. 6. Концептуальная модель формирования геохимических типов подземных вод юго-восточного Забайкалья

Fig. 6. Conceptual model of groundwater geochemical types formation in South-Eastern Transbaikalia

Дополнительным источником сульфатов, а также и других элементов в воде, таких как медь или цинк, могут служить и распространенные в обрамлении Торейской впадины проявления сульфидной минерализации, что также объясняет рост содержания SO_4^{2-} локально на удалении от области внутреннего стока. Все это приводит к формированию сначала самых соленых среди содовых подземных вод с высокой долей SO_4^{2-} , где сульфат нередко входит в формулу вторым:

$$M_{1,4} \frac{\text{HCO}_3^- 48 \text{SO}_4^{2-} 32 \text{Cl}^- 17}{\text{Na} + 64 \text{Mg}^{2+} + 22 \text{Ca}^{2+} + 13} \text{pH}_{8,4}$$

и последнего геохимического типа в регионе – *солеосодержащего*, воды которого в основном отбирались из колодцев и скважин у берегов Тореев, в областях распространения пластовых вод, где дебиты скважин снижаются, а время взаимодействия в системе увеличивается до 90 лет и более и воды уже достигают равновесия со слюдами (мусковит, биотит, флогопит и др.), низкотемпературными

алюмосиликатами (альбит, пренит, анальцит, хлорит и др.) и т. д. Минерализация таких вод доходит до 3 г/л, а роль ведущего аниона в формуле ионно-солевого состава делят между собой HCO_3^- , SO_4^{2-} и Cl^- (красные точки на карте (рис. 5)):

$$M_{1,7} \frac{\text{Cl}^- 33 \text{HCO}_3^- 32 \text{SO}_4^{2-} 32}{\text{Na} + 55 \text{Mg}^{2+} + 29} \text{pH}_{8,0}$$

Кроме того, не исключено смешение подземных вод с солеными озёрными посредством локальной трещиноватости. Это касается нескольких точек, которые выбиваются из выборки, например воды Cl-Na скважины у хлоридного оз. Горбунка. Весь вышеописанный процесс наглядно проиллюстрирован с помощью концептуальной модели формирования состава (рис. 6).

Вывод

Показано, что в юго-восточном Забайкалье формируются несколько различных по химическому составу типов подземных вод, которые поэтапно сменяются от $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ через $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ к $\text{HCO}_3\text{-Na}$ по мере понижения абсолютных отметок рельефа от обрамления Торейской впадины в сторону области внутреннего стока. Точечно у озёр представлены воды с самой высокой солёностью ($\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Cl-Na}$ и др.). Такая смена объясняется с позиций эволюционного развития в системе вода–порода в зависимости от времени взаимодействия воды с породой.

В соответствии с классификацией [2] было выделено три геохимических типа вод: кремнистый, содовый и солеосодержащий, а также некоторые их специфические разновидности. Воды первого типа являются нейтральными, характеризуются минерализацией до 0,5 г/л и находятся на стадии насыщения с глинами (каолинит и монтмориллониты Ca, Mg, Na, K), а также иногда с дафнитом, сидеритом и родохрозитом. Кремнистые воды распространены в обрамлении Торейской впадины, в области активного водообмена, их показатели трития достигают самых высоких значений (12–29 ТЕ), а относительный возраст является самым молодым (до 50 лет).

Воды второго, содового, геохимического типа являются щелочными, их минерализация нередко уже выше 1 г/л, а значения трития, наоборот, самые низкие и находятся между 2 и 9 ТЕ. Содовые воды уже достигли насыщения относительно большего количества минералов, среди которых помимо глин появляется кальцит и другие карбонаты, что приводит к тому, что Na^+ начинает интенсивно аккумулироваться в водах, а концентрации Ca^{2+} и Mg^{2+} снижаются, связываясь равновесными минералами. Кроме того, эти воды достигли насыщения к флюориту, что позволило дополнительно выделить внутри группы кремнисто-карбонатный кальциево-фтористый подтип. Это объясняется увеличением

времени взаимодействия воды с горными породами до 57 лет и более, которое контролируется снижением интенсивности водообмена по мере движения вод к центру Торейской впадины и отсутствием стока.

Формирование третьего геохимического типа, солесодержащего, воды которого преимущественно отбирали из колодцев и скважин у берегов Тореев, в областях распространения пластовых вод с низкими дебитами скважин, обусловлено как еще более длительным временем взаимодействия (>90 лет), так и влиянием интенсивного испарения в регионе. Эти

воды уже достигают насыщения с низкотемпературными алюмосиликатами (альбит, хлорит и др.), тритий в них практически отсутствует, а минерализация возрастает до 3 г/л. Испарение здесь может как напрямую влиять на состав через концентрирование в неглубокозалегающих водоносных горизонтах, ускоряя тем самым процессы взаимодействия в системе вода–порода, так и через дефляцию с водосборов солёных озёр. Для уточнения первых результатов датирования поземных вод в дальнейшем планируется применение тритий/гелиевого-3 и/или уран-торий/гелиевого-3 методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. 2е изд. испр. и доп. – М.: Недра, 1998. – 367 с.
2. Система вода–порода в условиях зоны гипергенеза. Т. 2. / С.Л. Шварцев, Б.Н. Рыженко, В.А. Алексеев, Е.М. Дутова, И.А. Кондратьева // Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода: в 5 т. / под ред. Б.Н. Рыженко. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 389 с.
3. Колубаева Ю.В., Шварцев С.Л., Копылова Ю.Г. Геохимия вод северной части Колывань-Томской складчатой зоны // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2010. – № 2. – С. 50–58.
4. Чечель Л.П., Замана Л.В. Геохимические типы вод хвостохранилищ свинцово-цинковых месторождений Восточного Забайкалья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 17–25. DOI: 10.18799/24131830/2019/4/189
5. Роль системы вода–порода в процессах формирования состава радоновых вод Тулинского месторождения (г. Новосибирск) / Д.А. Новиков, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, В.П. Сухоруков, А.С. Деркачев, А.Ф. Сухорукова, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных, А.А. Хвощевская, Н.А. Медешова // Геология и геофизика. – 2024. – Т. 65. – № 12. – С. 1772–1790. DOI: 10.15372/GiG2024117
6. Распределение химических элементов в системе вода–порода (на примере железнодорожного ключа в долине реки Ини) / Д.А. Новиков, Л.Г. Вакуленко, А.А. Максимова, О.Д. Николенко, А.С. Деркачев, Я.В. Фомина (Садыкова), А.А. Хвощевская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 201–214. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4759
7. Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Хвощевская А.А. Геохимические типы природных вод на междуречье Ензоряхи и Юньяхи (восточный склон Полярного Урала) // Водные ресурсы. – 2013. – Т. 40. – № 4. – С. 386–395. DOI: 10.7868/S0321059613040056
8. Наймушина О.С. Геохимическая эволюция природных вод нижней части бассейна реки Томи: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2014. – 169 с.
9. Lepokurova O.E. Sodium-bicarbonate groundwaters in southeastern West Siberia, Russia: Compositions, types, and formation conditions // Applied Geochemistry. – 2020. – Vol. 116. – article no. 104579. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104579
10. Дребот В.В. Формирование химического состава подземных вод в районе Торейских озёр (Забайкальский край): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2023. – 150 с.
11. Лепокурова О.Е., Дребот В.В. Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) подземных вод территории Торейских озёр (Восточное Забайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 20–29. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3350
12. Борзенко С.В., Замана Л.В., Посохов В.Ф. Изотопный состав, природа и основные механизмы формирования разных типов и подтипов солёных озёр Забайкалья // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63. – № 6. – С. 851–874. DOI: 10.15372/GiG2021110
13. Дребот В.В., Лепокурова О.Е. Равновесно-неравновесное состояние природных вод территории Торейских озёр (Восточное Забайкалье) с ведущими минералами вмещающих пород // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 99–112. DOI: 10.18799/24131830/2022/9/3768
14. Borzenko S.V., Drebot V.V., Fedorov I.A. Main formation conditions of soda-type groundwater: A case study from south-eastern Transbaikalia region (Russia) // Applied Geochemistry. – 2020. – Vol. 123. – article number 104763. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104763
15. Шварцев С.Л. Содовые воды как зеркало противоречий в современной гидрогеохимии // Фундаментальные проблемы современной гидрогеохимии: Труды Международной науч. конф., посвящ. 75-летию юбилею гидрогеохимии. – Томск: Изд-во НТЛ, 2004. – С. 70–75.
16. Borzenko S.V. The main formation processes for different types of salt lakes: Evidence from isotopic composition with case studies of lakes in Transbaikalia, Russia // Science of the Total Environment. – 2021. – Vol. 782. – article number 146782. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146782
17. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. – М.: Научный Мир, 2009. – 632 с.
18. Stotler R. Geochemistry: isotope hydrogeology // Encyclopedia of Geology. – Amsterdam: Elsevier, 2021. – P. 426–441. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00012-6>
19. Nitrate trend reversal in Dutch dual-permeability chalk springs, evaluated by tritium-based groundwater travel time distributions / H.P. Broers, M.E. van Vliet, T. Kivits, R. Vernes, T. Brussée, J. Sültenfuß, D. Fraters // Science of the Total Environment. – 2024. – Vol. 951. – article number 175250. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175250

20. Estimation of groundwater recharge from precipitation by using tritium and chloride concentrations in the Chinese loess unsaturated zone in Inner Mongolia, China / J. Liu, Z. Chen, Z. Nie, Y. Tian // *Hydrogeology Journal*. – 2024. – Vol. 32. – P. 1511–1520. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-024-02798-8>
21. Quantifying recharge mechanisms in low-hilly areas of a loess region: Implications for the quantity and quality of groundwater / H. Li, W. Xiang, B. Si, M. Min, C. Miao, J. Jin // *Journal of Hydrology*. – 2024. – Vol. 643. – article number 131982. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131982
22. Tritium across the hydrologic systems of southern Ontario, Canada: implications for groundwater age dating in the Great Lakes Basin / E.H. Priebe, S.M. Hamilton, A. Lemieux, D.J. Rowan, I.D. Clark // *Hydrogeology Journal*. – 2023. – Vol. 31. – P. 641–659. DOI: 10.1007/s10040-023-02626-5
23. Analysis of isoscapes (δD , $\delta^{18}O$ and tritium) in groundwater in the semiarid northeast region of Mexico / O.J. Ibarra-Alejos, R. Ventura-Houle, J.F. Morales, B.A. Macías, L. Heyer // *Hydrogeology Journal*. – 2024. – Vol. 32. – P. 1521–1535. DOI: 10.1007/s10040-024-02802-1
24. Mamun A. Groundwater renewal time by environmental tritium isotopes as a tracer for sustainable water resource management // *Discover Water*. – 2024. – Vol. 4. – article number 84. DOI: 10.1007/s43832-024-00135-4
25. Identification of salinity sources in groundwater at Golgohar Mine using self-organizing maps (SOM) and correlation analysis: a hydrogeochemical and isotopic approach, south-central Iran / F. Jafari, H.R. Nassery, F. Alijani, S. Maknooni Gilani // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2025. – Vol. 47. – article number 105. DOI: 10.1007/s10653-025-02414-y
26. Banerjee S., Sikdar P.K., Kumar S. Hydrochemical systematics and isotope ($\delta^{18}O$, δD and $3H$) variations of aquifer system of southern Bengal Basin: implications for groundwater pollution // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2024. – Vol. 31. – № 16. – P. 23858–23875. DOI: 10.1007/s11356-024-32692-5
27. Origin and evolution of groundwater in the Gohar-Zamin Mine Area using hydrogeochemical and isotopic analyses / A. Saberinasr, N. Kalantari, H. Ghelichpour, M. Morsali // *Mine Water and the Environment*. – 2025. – Vol. 44. – P. 30–54. DOI: 10.1007/s10230-025-01032-5
28. Yoon Y.Y., Ko K.S., Lee J.M. Tritium and $35S$ activity variation in precipitation in Korea and its application to groundwater age determination // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2023. – Vol. 332. – P. 1917–1921. DOI: 10.1007/s10967-023-08888-3
29. Groundwater vulnerability to pollution in Africa's Sahel region / J. Podgorski, O. Kracht, L. Araguas-Araguas, S. Terzer-Wassmuth, J. Miller, R. Straub, R. Kipfer, M. Berg // *Nature Sustainability*. – 2024. – Vol. 7. – P. 558–567. DOI: 10.1038/s41893-024-01319-5
30. Hydrogeochemical and isotopic evolution of groundwater in shallow and deep aquifers of the Kabul Plain, Afghanistan / A. Zaryab, A. Farahmand, H.R. Nassery, F. Alijani, S. Ali, M.Z. Jamal // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2023. – Vol. 45. – P. 8503–8522. DOI: 10.1007/s10653-023-01734-1
31. Лебедева Л.С., Шамов В.В., Горячев В.В. Тритий в атмосферных, поверхностных и подземных водах Восточной Сибири // *Подземная гидросфера: материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России: XXIV Совещание по подземным водам востока Сибири и Дальнего Востока с международным участием*. – Екатеринбург: Институт горного дела ИГД УрО РАН, 2024. – С. 337–342.
32. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 18. Дальний Восток. Вып. 1. Верхний и средний Амур / под ред. А.П. Муранова. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 800 с.
33. Isotopic variation of precipitation over eastern Mongolia and its implication for the atmospheric water cycle / T. Yamanaka, M. Tsujimura, D. Oyunbaatar, G. Davaa // *Journal of Hydrology*. – 2007. – Vol. 333. – P. 21–34. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.07.022
34. Обязов В.А., Кирилюк В.Е., Кирилюк А.В. Торейские озера как индикатор многолетних изменений увлажненности Юго-восточного Забайкалья и Северо-восточной Монголии // *Гидросфера. Опасные процессы и явления*. – 2021. – Т. 3. – С. 204–232. DOI: <https://doi.org/10.34753/HS.2021.3.3.204>
35. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба. Издание второе. Серия Даурская. Лист М-50-XIV (Ниж. Цасучей), XX (Соловьевск). Масштаб 1:200000: объяснительная записка / под ред. Е.В. Нечпаева. – М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2019. – 97 с.
36. Степанов В.М. Гидрогеологические структуры Забайкалья. – М.: Недра, 1980. – 176 с.
37. Туваанжав Г., Халзанхуу Ж. Химический состав атмосферных осадков в окрестностях г. Улаанбаатара // *Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук*. – 2005. – № 8 (46). – С. 76–79.
38. Экосистемы содовых озер Северо-Востока Центральной Азии в поисках ответов на вызовы времени / С.В. Борзенко, Б.Б. Базарова, А.П. Куклин, Л.В. Замана, Е.Ю. Афонина, Н.А. Ташлыкова, Г.Ц. Цыбекмитова, П.В. Матафонов, И.А. Федоров // *Байкал – ворота в Азию: Материалы Международн. научно-практ. конф.* – Улан-Удэ: Бурятский научный центр СО РАН, 2021. – С. 59–62. DOI: <https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0605-3-2021-59-62>

Информация об авторах

Валерия Витальевна Дребот, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4, DrebotVV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0458-2864>

Олеся Евгеньевна Лепокурова, доктор геолого-минералогических наук, директор и ведущий научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4; профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, <https://orcid.org/0000-0003-0252-197>

Светлана Владимировна Борзенко, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, и. о. заведующего лабораторией Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Россия, 672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16а, <https://orcid.org/0000-0003-3929-642>

Поступила в редакцию: 23.04.2025

Поступила после рецензирования: 07.05.2025

Принята к публикации: 18.06.2025

REFERENCES

1. Shvartsev S.L. *Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone*. 2nd ed. Moscow, Nedra Publ., 1998. 367 p. (In Russ.)
2. Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseev V.A., Dutova E.M., Kondratieva I.A. Water–rock system under conditions of hypergenesis zone. Vol. 2. *Geological evolution and self-organization of the water–rock system*. Ed. by B.N. Ryzhenko. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ. House, 2007. 389 p. (In Russ.)
3. Kolubaeva Yu.V., Shvartsev S.L., Kopylova Yu.G. Water geochemistry of the North of Kolyvan-Tomsk folded zone. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and exploration*, 2010, no. 2, pp. 50–58. (In Russ.)
4. Chechel L.P., Zamana L.V. Geochemical types of waters of lead-zinc deposits tailings in the Eastern Transbaikalia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 17–25. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2019/4/189
5. Novikov D.A., Pyryaev A.N., Maksimova A.A., Sukhorukov V.P., Derkachev A.S., Sukhorukova A.F., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Khvashevskaya A.A., Medeshova N.A. Role of the water–rock system in the formation of the composition of radon water of the Tulinskoe field (Novosibirsk). *Geology and Geophysics*, 2024, vol. 65, no. 12, pp. 1772–1790. (In Russ.) DOI: 10.15372/GiG2024117
6. Novikov D.A., Vakulenko L.G., Maksimova A.A., Nikolenko O.D., Derkachev A.S., Fomina (Sadykova) Ya.V., Khvashevskaya A.A. Distribution of chemical elements in the water–rock system (based on the example of a Zheleznodorozhny spring in the valley of the Inya river). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 201–214. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4759
7. Guseva N.V., Kopylova Yu.G., Khvashevskaya A.A. Geochemical types of natural waters in the interfluvium of the Enzoryakhi and the Yunyakhi (Eastern slope of the Polar Urals). *Water Resources*, 2013, vol. 40, no. 4, pp. 417–425. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0097807813040052>
8. Naimushina O.S. *Geochemical evolution of natural waters in the lower part of the Tom River basin*. Cand. Dis. Tomsk, 2014. 169 p. (In Russ.)
9. Lepokurova O.E. Sodium-bicarbonate groundwaters in southeastern West Siberia, Russia: compositions, types, and formation conditions. *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 116, article number 104579. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104579
10. Drebot V.V. *Chemical composition formation of groundwater in the area of the Torey Lakes (Transbaikalia)*. Cand. Dis. Tomsk, 2023. 150 p. (In Russ.)
11. Lepokurova O.E., Drebot V.V. Isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$, δd , $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) of groundwaters in the area of toreya lakes (eastern Transbaikalia region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 20–29. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3350
12. Borzenko S.V., Zamana L.V., Posokhov V.F. The isotope composition, nature, and main mechanisms of formation of different types and subtypes of salt lakes in Transbaikalia. *Russian Geology and Geophysics*, 2022, vol. 63, no. 6, pp. 706–725. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.2113/RGG20214272> 10.2113
13. Drebot V.V., Lepokurova O.E. Equilibrium–Nonequilibrium state of natural waters in the area of the Torey Lakes (Eastern Transbaikalia) with leading minerals of host rocks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 9, pp. 99–112. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/9/3768
14. Borzenko S.V., Drebot V.V., Fedorov I.A. Main formation conditions of soda-type groundwater: A case study from south-eastern Transbaikalia region (Russia). *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 123, article number 104763. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104763
15. Shvartsev S.L. Soda waters as a mirror of contradictions in modern hydrogeochemistry. Fundamental problems of modern hydrogeochemistry. *Fundamental Problems of Modern Hydrogeochemistry: Proceedings of the International Scientific Conf., dedicated to the 75th Anniversary of Hydrogeochemistry*. Tomsk, NTL Publ. House, 2004. pp. 70–75. (In Russ.)
16. Borzenko S.V. The main formation processes for different types of salt lakes: Evidence from isotopic composition with case studies of lakes in Transbaikalia, Russia. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 782, article number. 146782. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146782
17. Ferronsky V.I., Polyakov V.A. *Isotopy of the Earth's hydrosphere*. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2009. 632 p. (In Russ.)
18. Stotler R. Geohydrology: isotope hydrogeology. *Encyclopedia of Geology*. Amsterdam, Elsevier, 2021. pp. 426–441. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00012-6> 10.1016
19. Broers H.P., Van Vliet M.E., Kivits T., Vernes R., Brussée T., Sültenfuß J., Fraters D. Nitrate trend reversal in Dutch dual-permeability chalk springs, evaluated by tritium-based groundwater travel time distributions. *Science of the Total Environment*, 2024, vol. 951, article number. 175250. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175250
20. Liu J., Chen Z., Nie Z., Tian Y. Estimation of groundwater recharge from precipitation by using tritium and chloride concentrations in the Chinese loess unsaturated zone in Inner Mongolia, China. *Hydrogeology Journal*, 2024, vol. 32, pp. 1511–1520. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-024-02798-8> 10.1007
21. Li H., Xiang W., Si B., Min M., Miao C., Jin J. Quantifying recharge mechanisms in low-hilly areas of a loess region: Implications for the quantity and quality of groundwater. *Journal of Hydrology*, 2024, vol. 643, article number 131982. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131982

22. Priebe E.H., Hamilton S.M., Lemieux A., Rowan D.J., Clark I.D. Tritium across the hydrologic systems of southern Ontario, Canada: implications for groundwater age dating in the Great Lakes Basin. *Hydrogeology Journal*, 2023, vol. 31, pp. 641–659. DOI: 10.1007/s10040-023-02626-5
23. Ibarra-Alejos O.J., Ventura-Houle R., Morales J.F., Macías B.A., Heyer L. Analysis of isoscapes (δD , $\delta^{18}O$ and tritium) in groundwater in the semiarid northeast region of Mexico. *Hydrogeology Journal*, 2024, vol. 32, pp. 1521–1535. DOI: 10.1007/s10040-024-02802-1
24. Mamun A. Groundwater renewal time by environmental tritium isotopes as a tracer for sustainable water resource management. *Discover Water*, 2024, vol. 4, article number 84. DOI: 10.1007/s43832-024-00135-4 EDN: EXDXNE
25. Jafari F., Nassery H.R., Alijani F., Maknooni S Gilani Identification of salinity sources in groundwater at Golgohar Mine using self-organizing maps (SOM) and correlation analysis: a hydrogeochemical and isotopic approach, south-central Iran. *Environmental Geochemistry and Health*, 2025, vol. 47, article number 105. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-025-02414-y>"10.1007
26. Banerjee S., Sikdar P.K., Kumar S. Hydrochemical systematics and isotope ($\delta^{18}O$, δD and $3H$) variations of aquifer system of southern Bengal Basin: implications for groundwater pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, vol. 31, no. 16, pp. 23858–23875. DOI: 10.1007/s11356-024-32692-5
27. Saberinasr A., Kalantari N., Ghelichpour H., Morsali M. Origin and Evolution of Groundwater in the Gohar-Zamin Mine Area Using Hydrogeochemical and Isotopic Analyses. *Mine Water and the Environment*, 2025, vol. 44, pp. 30–54. DOI: 10.1007/s10230-025-01032-5
28. Yoon Y.Y., Ko K.S., Lee J.M. Tritium and ^{35}S activity variation in precipitation in Korea and its application to groundwater age determination. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2023, vol. 332, pp. 1917–1921. DOI: 10.1007/s10967-023-08888-3 EDN: OAJWZK
29. Podgorski J., Kracht O., Araguas-Araguas L., Terzer-Wassmuth S., Miller J., Straub R., Kipfer R., Berg M. Groundwater vulnerability to pollution in Africa's Sahel region. *Nature Sustainability*, 2024, vol. 7, pp. 558–567. DOI: 10.1038/s41893-024-01319-5
30. Zaryab A., Farahmand A., Nassery H.R., Alijani F., Ali S., Jamal M.Z. Hydrogeochemical and isotopic evolution of groundwater in shallow and deep aquifers of the Kabul Plain, Afghanistan. *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, vol. 45, pp. 8503–8522. DOI: 10.1007/s10653-023-01734-1
31. Lebedeva L.S., Shamov V.V., Goryachev V.V. Tritium in atmospheric, surface, and groundwater of Eastern Siberia. *Underground Hydrosphere. Materials of the XXIV All-Russian Conference on Groundwater of the East of Russia with International Participation*. Yekaterinburg, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, 2024. pp. 337–342. (In Russ.)
32. *Resources of surface waters of the USSR. Vol. 18. Far East. Iss. 1. Upper and Middle Amur*. Ed. by A.P. Muranov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1966. 800 p. (In Russ.)
33. Yamanaka T., Tsujimura M., Oyunbaatar D., Davaa G. Isotopic variation of precipitation over eastern Mongolia and its implication for the atmospheric water cycle. *Journal of Hydrology*, 2007, vol. 333, pp. 21–34. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.07.022
34. Obizov V.A., Kirilyuk V.E., Kirilyuk A.V. Torey lakes as an indicator of moisture long-term changes in southeastern Transbaikalia and Northeastern Mongolia. *Hydrosphere. Hazardous Processes and Phenomena*, 2021, vol. 3, pp. 204–232. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.34753/HS.2021.3.3.204>"10.34753
35. *State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1:200000. 2nd ed. Daurian Series. Sheet M-50-XIV (Nizhny Tsasuchay), XX (Solovyovsk): explanatory note*. Ed. by E.V. Nechaev. Moscow, Moscow Branch of FSBI «VSEGEI» Publ., 2019. 97 p. (In Russ.)
36. Stepanov V.M. *Hydrogeological structures of Transbaikalia*. Moscow, Nedra Publ., 1980. 176 p. (In Russ.)
37. Tuvanjav G., Khalzanhoo Zh. Chemical composition of air precipitation in environs of Ulaanbaatar. *Bulletin of the East Siberian Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Medical Sciences*, 2005, no. 8 (46), pp. 76–79. (In Russ.)
38. Borzenko S.V., Bazarova B.B., Kuklin A.P., Zamana L.V., Afonina E.Yu., Tashlykova N.A., Tsybekmitova G.Ts., Matafonov P.V., Fedorov I.A. Ecosystems of soda lakes in the North-East of Central Asia in search of answers to the challenges of the time. *Baikal – Gateway to Asia. Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Ulan-Ude, Buryat Scientific Center SB RAS Publ., 2021. pp. 59–62. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0605-3-2021-59-62>"10.31554

Information about the authors

Valeriia V. Drebot, Cand. Sc., Researcher, Tomsk Branch of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 4, Academicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation, DrebotVV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0458-2864>

Olesya E. Lepokurova, Dr. Sc., Head of Laboratory, Tomsk Branch of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 4, Academicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation; Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-0252-197>

Svetlana V. Borzenko, Dr. Sc., Chief Researcher, Acting Head of the Laboratory of the Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, 16a, Nedorezov street, Chita, 672014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3929-642>

Received: 23.04.2025

Revised: 07.05.2025

Accepted: 18.06.2025