Оригинальная статья / Original article
УДК 556.332.62
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-106-115

Гидрогеохимические особенности озера Котокель

© Н.А. Ангахаева[a], А.М. Плюснин[b], А.В. Украинцев[c], М.К. Чернявский[d], Е.Г. Перязева[e], Д.И. Жамбалова[f]
[a–f]Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

Резюме: Цель данного исследования заключалась в определении основных гидрохимических параметров глубинных вод озера Котокель, выявлении роли питающих его подземных вод, а также установлении особенностей пространственного распределения макро- и микроэлементов по акватории озера. Полевые работы были проведены в ледовый и безледный сезоны года. Пробы воды отобраны у дна озера специальным пробоотборником. На месте отбора проб образцы воды были профильтрованы через фильтры с размером пор 0,45 мкм. Воду для анализа отбирали в пластиковые бутылки. Пробы воды на микроэлементы помещали в полипропиленовые контейнеры (15 мл), предварительно обработанные азотной кислотой 0,1N. Анализ макрокомпонентного состава воды был выполнен в сертифицированной Лаборатории гидрогеологии и геоэкологии Геологического института Сибирского отделения Российской академии наук (г. Улан-Удэ) по стандартным методикам, предназначенным для пресных и соленых вод. Катионы (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}) определены методом атомной абсорбции, F^{-}, SiO_2 – колориметрическим, HCO_3^{-}, CO_3^{2-} и Cl^{-} – титриметрическим, SO_4^{2-} – турбидиметрическим методами. Анализ содержания микроэлементов проводился в Лаборатории водной микробиологии Лимнологического института Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск) методом индуктивно связанной плазмы на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500ce. В результате проведенных исследований установлен неоднородный химический состав озерной воды, связанный с разгрузкой трещинно-жильных вод по разломам, ограничивающим впадину с юго-востока и северо-востока и пересекающим акваторию озера от острова к реке Исток. Наиболее высокое содержание растворенных веществ зафиксировано в проливе между островом Монастырский и западным берегом озера: здесь обнаружены максимальные значения гидрокарбонат-иона, общей минерализации. Максимальные содержания сульфат-иона обнаружены в южной и юго-восточной частях озера. Дисперсия в распределении микроэлементов достигает нескольких математических порядков. Наиболее изменчива концентрация железа, марганца, меди, цинка, свинца, фосфора, молибдена, вольфрама, стронция. Их высокие содержания обнаружены в озерной воде в пределах расположения разрывных нарушений северо-восточного простирания. Таким образом, химический состав воды озера Котокель в значительной степени формируется за счет трещинно-жильных вод. Разгрузка этих вод происходит по тектоническим нарушениям северо-восточного простирания. В ходе исследования было выделено два очага субаквальной разгрузки, которые характеризуются формированием в озерной воде двух разных ассоциаций микроэлементов. Состав микроэлементов в трещинно-жильных водах определяется разной степенью их взаимодействия с горными породами.

Ключевые слова: озеро, разломы, трещинно-жильные воды, микроэлементы, зональность химического состава воды

Благодарности: Исследование выполнено в рамках государственного бюджетного проекта АААА-А21-121011890033-1, частично работы финансировались по гранту РФФИ № 18-45-030003.

Для цитирования: Ангахаева Н.А., Плюснин А.М., Украинцев А.В., Чернявский М.К., Перязева Е.Г., Жамбалова Д.И. Гидрогеохимические особенности озера Котокель. *Науки о Земле и недропользование.* 2021. Т. 44. № 2. С. 106–115. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-106-115

Hydrogeochemical features of Lake Kotokel

© Nadezhda A. Angakhaeva[a], Alexey M. Plyusnin[b], Alexander V. Ukraintsev[c], Mikhail K. Chernyavskii[d], Elena G. Peryazeva[e], Dashima I. Zhambalova[f]
[a–f]Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

Abstract: The purpose of this study is to determine the main hydrochemical parameters of Lake Kotokel deep waters, to identify the role of groundwater feeding it, as well as to establish the features of spatial distribution of macro- and microelements in the lake. Field work was carried out during the ice and ice-free seasons. A special sampler was used to take water samples from the bottom of the lake. Water samples were filtered through the filters with a pore size of 0.45 μm at the sampling site. Plastic bottles were used for the water samples for analysis. Polypropylene containers (15 ml) pretreated with 0.1 N nitric acid were used for the water samples for trace elements. The analysis of the macrocomponent composition of water was carried out in a certified Laboratory of Hydrogeology and Geoecology of the Geological Institute of the Siberian

Branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude) according to the standard methods intended for fresh and saline waters. Cations (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}) were determined by atomic absorption, F^{-}, SiO_2 – by the colorimetric method, HCO_3^{-}, CO_3^{2-} and Cl^{-} – by the titrimetric method, SO_4^{2-} – by the turbidimetric method. The analysis of the trace element content was carried out in the Laboratory of Aquatic Microbiology at the Limnological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk) by the method of inductively coupled plasma on Agilent 7500ce quadrupole mass spectrometer. Conducted research made it possible to determine an inhomogeneous chemical composition of lake water associated with the discharge of fissure-vein waters along the faults that bound the depression from the southeast and northeast and intersect the lake water area from the island to the Istok river. The highest content of dissolved substances was recorded in the strait between Monastyrsky island and the western shore of the lake; the maximum values of hydrocarbonate ion and total mineralization were found here. The maximum content of sulfate ion was found in the southern and southeastern parts of the lake. The dispersion in microelement distribution reaches several mathematical orders. The most variable concentration is characteristic of iron, manganese, copper, zinc, lead, phosphorus, molybdenum, tungsten, strontium. Their high contents were found in the lake water within the location of faults of northeast strike. Therefore, the chemical composition of the water of Lake Kotokel is largely formed by fissure-vein waters. This water is discharged along the tectonic faults of the northeastern strike. The research revealed two centers of subaqueous discharge, which are characterized by the formation of two different associations of microelements in the lake water. The composition of microelements in fissure-vein waters is determined by their interaction degrees with rocks.

Keywords: lake, faults, fissure-vein waters, microelements, zoning of water chemical composition

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state budget project AAAA-A21-121011890033-1, the work was partially funded by the Russian Foundation for Basic Research, grant no.18-45-030003.

For citation: Angakhaeva NA, Plyusnin AM, Ukraintsev AV, Chernyavskii MK, Peryazeva EG, Zhambalova DI. Hydrogeochemical features of Lake Kotokel. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2021;44(2):106–115. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-106-115

Введение

Формирование ресурсов и химического состава воды озер часто связано с разгрузкой подземных вод [1–4]. Особенно это актуально для Байкальской рифтовой зоны, где широко распространены открытые разрывные нарушения [5, 6]. Здесь на формирование химического состава вод водоемов оказывает влияние разгрузка азотных термальных вод [7, 8]. Они привносят в водоемы биоактивные элементы, что благоприятно сказывается на развитии микроводорослей и водной растительности [9, 10].

Озеро Котокель расположено на восточном побережье среднего Байкала в 2 км от него, между устьями рек Турка и Кика. Длина озера достигает 15 км, ширина – около 5 км, площадь зеркала составляет 70 км^2, площадь водосбора – 183 км^2. Озеро относится к водоемам с очень малым удельным водосбором, показатель которого равен 2,6. Глубина его составляет 4–6 м, максимальная глубина – около 14 м. Из озера вытекает одна река – Исток, направление течения которой может меняться несколько раз за лето, что происходит из-за колебания уровня воды в озере [11]. Основной объем стока приходится на теплое время года. Небольшая глубина способствует тому, что вода в озере летом быстро прогревается до температуры 24–25 °С. Проведенные ранее исследования показали, что котловина озера интенсивно разбита разрывными нарушениями [12], по которым в него разгружаются трещинно-жильные воды. Эти воды привносят в своем составе микроэлементы, высокие содержания которых характерны для термальных вод [13]. Насколько существенен этот вклад в ресурсы и в какой мере данные микроэлементы оказывают влияние на гидрохимический режим озера, неизвестно. Этот пробел в исследовании озера мы попытались восполнить представленной публикацией.

Материалы и методы исследования

Авторами данной статьи были проведены полевые исследования и лабораторные работы. Полевые исследования проводились в 2018–2020 гг. в ледовый и безледный сезоны года. Опробование воды происходило со льда или с лодки. Профили опробования воды задавались в местах предполагаемой разгрузки трещинно-жильных вод. На месте отбора проб воды с помощью GPS-навигатора определялись географические координаты. Температуру воды *t* и водородный показатель pH измеряли на глубине 1,5 м. Пробы воды отбиралась у дна озера специальным пробо-

отборником. Воду для анализа макрокомпонентного состава помещали в пластиковые бутылки. Для определения микроэлементов водой заполняли полипропиленовые контейнеры (15 мл), предварительно обработанные в лаборатории азотной кислотой 0,1N. На месте отбора проб образцы воды для отделения взвешенных веществ были профильтрованы через фильтры с размером пор 0,45 мкм и подкислены дважды перегнанной азотной кислотой 0,1N до pH = 1–2. Анализ макрокомпонентного состава воды выполнен в сертифицированной Лаборатории гидрогеологии и геоэкологии Геологического института Сибирского отделения Российской академии наук (г. Улан-Удэ) по стандартным методикам для пресных и соленых вод. Катионы (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}) определяли методами атомной абсорбции, F^{-}, SiO_2 – колориметрическим, HCO_3^{-}, CO_3^{2-} и Cl^{-} – титриметрическим, SO_4^{2-} – турбидиметрическим методами. Анализ содержания микроэлементов проводился в Лаборатории водной микробиологии Лимнологического института Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск) методом индуктивно связанной плазмы на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500ce.

Геолого-гидрогеологические условия района

По схеме тектонического районирования озеро Котокель находится в пределах Котокельской впадины. С юго-западной и западной стороны впадина сочленяется с Кикинской котловиной. С северо-запада и севера депрессия отделяется от Среднего Байкала Котокельской грядой, которая к северу продолжается низкой горной дугой хребта Черная Грива, а на юге смыкается с отрогом Морского хребта. Северо-восточный край котловины через долину реки Коточик соединяется с Нижнетуркинской впадиной. Со стороны южной суходольной части впадина отделена от Зезивандинского структурного понижения одноименным отрогом. В морфоструктурном отношении Котокельская депрессия представляет собой южный отрезок Кикинско-Котокельско-Коточик-Туркинской группы впадин в пределах переходной части рельефа от Байкальского рифта к передовой ступени хребта Улан-Бургасы. В геологическом строении территории озера Котокель принимают участие стратифицированные осадочные породы кайнозоя, интрузивные образования разного возраста [14]. Озеро находится в пределах Байкальской гидрогеологической складчатой области в бассейне трещинных вод хребтов Хамар-Дабан, Морской и Улан-Бургасы. Водоносные горизонты трещинных вод разгружаются в озеро по разломам сбросового типа, которые широко развиты в районе исследования. Они образовались в результате общего вздымания побережья Байкала в голоцене. В исторически сложившихся тектонических условиях они испытывают растяжение, по ним до сих пор в результате изостазии после таяния ледников происходят подвижки в вертикальном направлении [15]. Зияющие сбросы остаются открытыми для движения вод, на глубине они гидравлически связаны друг с другом. Общее направление движения этих вод – к северо-востоку, в сторону Байкала.

Результаты исследования

По нашим представлениям в районе Котокельской впадины некоторые блоки горных пород фундамента в результате тектонических движений по листрическим сбросам оказались более глубокоопущенными, из-за этого происходит перехват потока подземных вод, подъем их на поверхность и разгрузка в озеро. Наиболее активная разгрузка наблюдается по разломам, ограничивающим впадины с юго-востока и северо-востока. Наиболее глубоко проникающие в недра воды разгружаются в районе вытекания из озера реки Исток. Здесь ранее нами были выявлены повышенные содержания гелия в эманациях свободно выделяющегося газа из донных отложений [13].

Для перехвата трещинно-жильных вод пробы отбирались по линии, располагающейся вкрест простирания предполагаемых разломов (рис. 1). Предварительно в предполагаемом месте опробования проводилось измерение температуры воды.

Всего было отобрано 39 проб озерных вод. Были сформированы выборки по месту отбора, средние содержания представлены в таблице.

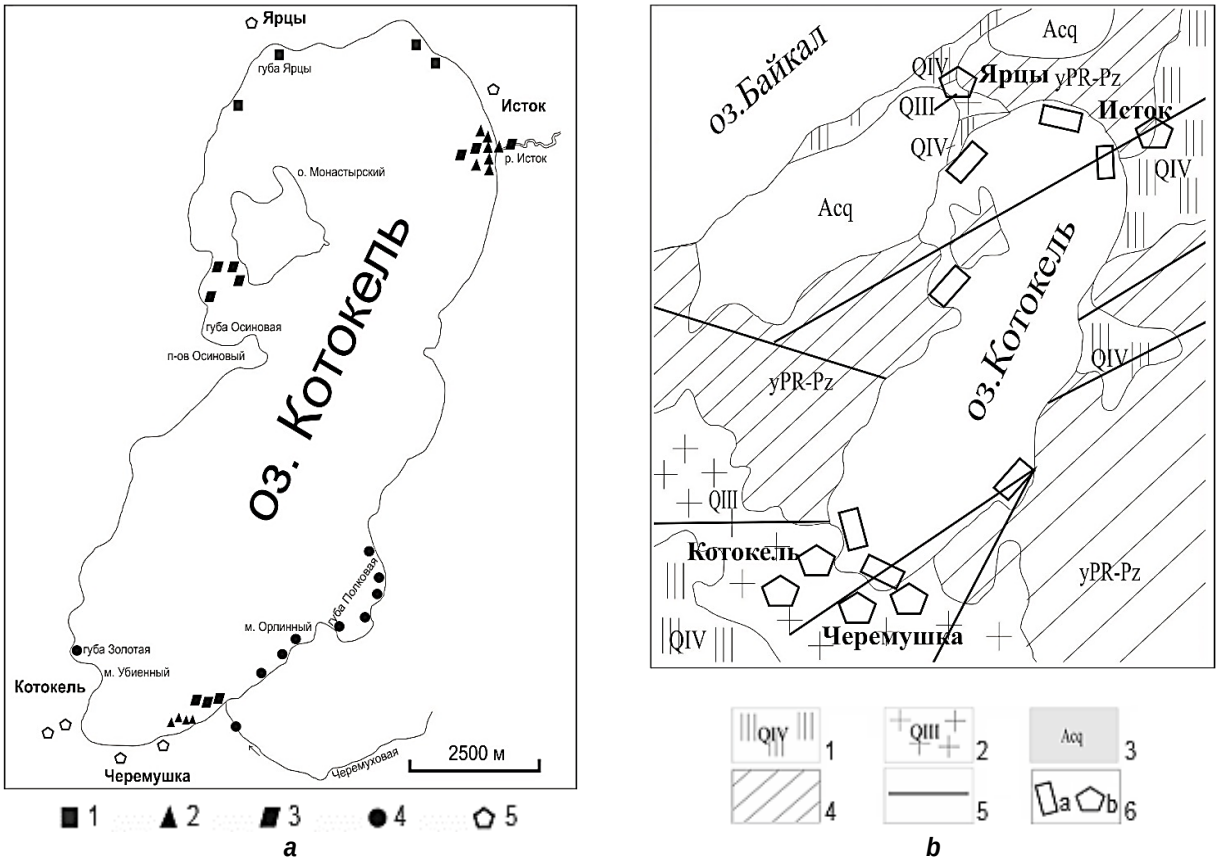


Рис. 1. Гидролого-гидрогеологическая схема района исследования с местами опробования поверхностных и подземных вод в разные годы:

a – карта-схема мест отбора гидрохимических проб на озера Котокель в 2018–2020 гг.:
1–4 – опробования поверхностных вод по датам: 1 – 22 июля 2018 г., 2 – 11 апреля 2019 г.,
3 – 12 июля 2019 г., 4 – 29 июля 2020 г.; 5 – опробования подземных вод;
b – гидрогеологическая карта района расположения озера:
1 – водоносные горизонты современных четвертичных отложений (валуны, галечники, пески, суглинки),
2 – водоносный горизонт верхнечетвертичных отложений (пески, глины, супеси), 3 – подземные воды зоны экзогенной трещиноватости метаморфических пород черногривенской свиты,
4 – воды зоны трещиноватости интрузивных пород разного возраста, 5 – разломы,
6 – районы исследования: a – поверхностных вод, b – подземных вод

Fig. 1. Hydrological and hydrogeological diagram of the study area with the sampling sites of surface and ground waters in different years:

a – schematic map of the hydrochemical sampling places on Lake Kotokel in 2018–2020:
1–4 – surface water sampling by dates: 1 – July 22, 2018, 2 – April 11, 2019,
3 – July 12, 2019, 4 – July 29, 2020; 5 – groundwater sampling;
b – hydrogeological map of the lake area:
1 – aquifers of modern Quaternary sediments (boulders, pebbles, sands, loams),
2 – an aquifer of Upper Quaternary sediments (sands, clays, sandy loams), 3 – groundwaters of the zone of exogenous fracturing of metamorphic rocks of the Chernogrivenskaya suite,
4 – waters of the fractured zone of intrusive rocks of different ages, 5 – faults,
6 – study areas of: a – surface waters, b – groundwater

Из представленных результатов видно, что содержание макрокомпонентов в разных частях озера существенно различается. Наиболее высокое содержание растворенных веществ зафиксировано в проливе между островом и западным берегом озера. В этих пробах обнаружены максимальные значения гидрокарбонат-иона. Максимальные содержания сульфат-иона обнаружены в южной и юго-восточной частях озера. В ледовый период в районе реки Исток обнаружены относительно высокие концентрации нитрата и кремниевой кислоты, а у села Черемушки – максимальное содержание гидрокарбоната. Общая минерализация воды в этом районе возросла по сравнению с летним периодом в 1,3 раза.

Средний макрокомпонентный состав воды озера Котокель в местах опробования
Average macrocomponent composition of Lake Kotokel water in the sampling sites

Дата опробования	pH	*t*, °C	Na	Ca	Mg	Fe^{+3}	HCO_3	NO_3	SO_4	Cl	F	H_4SiO_4	Минерализация
Село Ярцы, мг/л													
24.06.2018	7,28	19,7	17,5	4	1,6	1,1	54,13	4,5	2,83	4,6	0,15	2,13	92
Река Исток													
12.07.2019	7,35	23,9	14,1	6,7	2,3	0,1	45,1	3	1,95	10,8	0,27	16,75	95
Село Черёмушки, мг/л													
12.07.2019	6,6	23,9	16	7,4	2,3	0,2	50,8	0,6	1,87	13,3	0,24	16	77,7
Юго-западная часть острова Монастырский, мг/л													
12.07.2019	7,35	23,1	20,6	6,7	2,7	0,1	53,35	1,9	3,3	16,8	0,25	13,8	114,7
Губа Осиновая, мг/л													
12.07.2019	6,95	23,5	14,85	6,8	1,9	0,4	47,25	1	2,1	10,9	0,35	11,65	93,3
Губа Полковая, мг/л													
28.07.2020	7,11	Н.о.	6,75	8,2	2,3	0,8	43,53	0,6	5,21	3,2	0,23	5,67	74,4
Село Черёмушки, мг/л													
30.07.2020	7,07	Н.о.	10,64	7	2,4	0,8	47,9	0,6	6,34	3,9	0,28	5,69	83,5
Губа Золотая, мг/дм^3													
30.07.2020	6,86	Н.о.	11,04	6	3,6	0,1	48,81	0,2	7,24	3,9	0,32	5,77	84,8
Река Исток, ледовый период, мг/л													
11.04.2019	7,39	1,3	13,6	6,2	2,2	0,04	44,24	3,7	3,51	5,7	0,15	20,73	94,1
Село Черёмушки, ледовый период, мг/л													
11.04.2019	6,53	1,2	13,1	8	3,3	0,1	55,65	2,7	5,63	5,9	0,1	19,08	106,7

Примечание. Н.о. – не определялось.
Note. Н.о. – not measured.

Установлены некоторые закономерности в распределении микроэлементов в озерной воде. Дисперсия в распределении микроэлементов достигает нескольких математических порядков. Наиболее изменчивой оказалась концентрация железа, марганца, меди, цинка, свинца, фосфора, молибдена, вольфрама и стронция. Их наиболее высокие содержания были обнаружены в озерной воде в пределах расположения разрывных нарушений северо-восточного простирания. Разлом, пересекающий озеро от острова Монастырский до реки Исток, проявляется в проливе между западным берегом и островом аномальными содержаниями железа, цинка, меди, свинца, никеля и фосфора. Эти же элементы в относительно высоких концентрациях присутствуют в северо-восточной части озера в районе реки Исток. Другая ассоциация микроэлементов выделяется в пределах разрывного нарушения, протягивающегося через акваторию озера от села Черемушки до губы Полковая. Здесь в ассоциации элементов наиболее контрастны содержания вольфрама, в этом месте установлены также аномальные концентрации железа фосфора, хрома и стронция.

Нами исследованы концентрации лантаноидов в озерной воде в этих местах. В поведении редкоземельных элементов наблюдаются существенные различия. Максимальное суммарное содержание установлено в выборке проб, отобранных у острова Монастырский: здесь их концентрация достигает 0,842 мкг/дм^3. В других местах содержание меньше, но в районах распространения разрывных нарушений возрастает. В районе губы Осиновая содержание редкоземельных элементов достигает 0,366 мкг/дм^3, а в районе губы Полковая – 0,438 мкг/дм^3.

На рис. 2 представлены спектры распределения лантаноидов, нормированные по составу североамериканского сланца. Из данного рисунка видно, что в районе острова Монастырский и губы Осиновая наблюдается общая закономерность уменьшения концентрации от легких редкоземельных элементов к тяжелым. В их спектре наблюдаются колебания, но общая тенденция сохраняется. Особенно ярко это прослеживается в пробах воды, отобранных в районе острова. В озерной воде в районе губы Полковая наблюдается обратная зависимость: концентрация

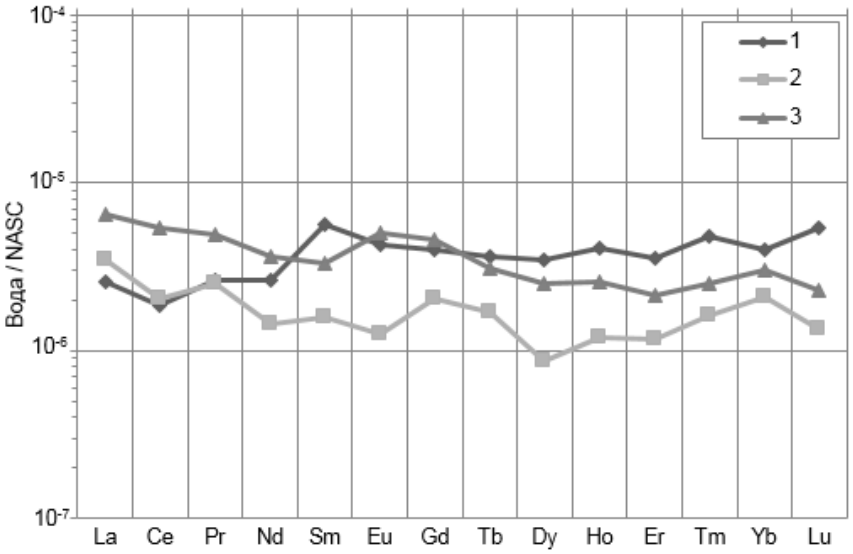


Рис. 2. Спектры распределения концентраций редкоземельных элементов, нормированные по содержанию в североамериканском сланце (NASC), в пробах озерной воды:
1 – губа Полковая (28 июля 2020 г.); 2 – губа Осиновая (12 июля 2019 г.); 3 – остров Монастырский (12 июля 2019 г.)
Fig. 2. Distribution spectra of rare earth element concentrations normalized by the content in the North American shale (NASC) in the samples of lake water:
1 – Polkovaya Bay (July 28, 2020); 2 – Osinovaya Bay (July 12, 2019); 3 – Monastyrsky Island (July 12, 2019)

тяжелых редкоземельных элементов выше, чем легких.

Обсуждение полученных результатов

Проведенные гидрогеохимические исследования показали, что в современных условиях в озере Котокель заключены неодинаковые по химическому составу воды. В различных районах озера наблюдаются существенные отличия и в макро-, и в микрокомпонентном составе вод, что связано с неравномерно протекающими процессами метаморфизации. Некоторые компоненты химического состава вод, несомненно, связаны с жизнедеятельностью биоты, продукты разложения которой накопились в озере за длительное время [16, 17]. С биологическими процессами, вероятно, взаимосвязано поступление в озерную воду гидрокарбоната и нитрата. Эти компоненты имеют максимальные значения в местах отложения залежей сапропеля. В этой части озера происходит образование аутигенных карбонатных минералов [18]. Другая часть связана с антропогенной нагрузкой на озеро: так, сульфат и хлорид поступают в озеро с коммунально-бытовыми стоками от населенных пунктов и домов отдыха [19]. Третья часть соотносится с воздействием субаквальной разгрузки трещинно-жильных вод. Разгружающиеся трещинно-жильные воды содержат в своем составе биологически активные элементы, которые благоприятствуют развитию водной растительности. Установленные аномальные содержания микроэлементов в придонной воде озера группируются в ассоциации, характерные для трещинно-жильных вод, в том числе и для термальных. Дисперсия в содержании редкоземельных элементов в значительной степени связана с субаквальной разгрузкой именно трещинно-жильных вод, которые привносят продукты разрушения горных пород, накапливающихся в растворе при длительной фильтрации их от мест питания до озера. Установленные закономерности в распределение редкоземельных элементов показывают, что разгружающиеся в озеро трещинно-жильные воды имеют разную степень взаимодействия с породами. Они связаны с разломами разной пространственной ориентации [20]. Ресурсы трещинно-жильных вод, разгружающихся в юго-восточной части озера, формируются под воздействием наиболее метаморфизованных трещинно-жильных вод: здесь накапливаются тяжелые редкоземельные элементы, в значительных количествах

обнаруживается вольфрам и фосфор, которые характерны для термальных вод Байкальского региона.

Заключение

Химический состав воды озера Котокель в значительной степени формируется за счет трещинно-жильных вод. Разгрузка этих вод происходит по тектоническим нарушениям северо-восточного и северо-северо-восточного простирания, которые секут акваторию озера в двух местах. По этим разрывным нарушениям поступают воды, обогащенные рядом микроэлементов, включая термофильные и биофильные. Воздействие разгрузки трещинно-жильных вод благоприятствует развитию в озере Котокель биоты, в результате разложения органических остатков образована залежь сапропеля.

Список литературы

1. Baker L.A., Herlihy A.T., Kaufmann P.R., Eilers J.M. Acidic lakes and streams in United States: the role of asidic deposition // Science. 1991. Vol. 252. Iss. 5009. P. 1151–1154.

2. Last W.M., Fawn M.G. Saline systems of the Great Plains of Western Canada: an overview of the limnology and paleolimnology // Aquatic Biosystems. 2005. Vol. 1. Iss. 10. P. 1–10. https://doi.org/10.1186/1746-1448-1-10

3. Parkhurst D.L., Christenson S.C., Breit G.N. Ground-water-quality assessment of the Central Oklahoma Aquifer, Oklahoma: geochemical and geohydrologic investigation. Oklahoma: U.S. Geological Survey, 1996. 110 p.

4. Stojanovic A., Kogelnig D., Mitteregger B., Mader D., Jirsa F., Krachler R., et al. Major and trace element geochemistry of superficial sediments and suspended particulate matter of shallow saline lakes in Eastern Austria // Geochemistry. 2009. Vol. 69. Iss. 3. P. 223–234. https://doi.org/10.1016/j.chemer.2009.03.001

5. Плюснин А.М., Перязева Е.Г., Чернявский М.К., Жамбалова Д.И., Будаев Р.Ц., Ангахаева Н.А. Генезис воды и растворенных веществ содовых озер Нижнего Куйтуна Баргузинской впадины // География и природные ресурсы. 2020. № 3. С. 89–97. https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-3(89-97)

6. Plyusnin A.M., Khazheeva Z.I., Sanzhanova S.S., Peryazeva E.G., Angakhaeva N.A. Sulfate mineral lakes of Western Transbaikalia: formation conditions and chemical composition of waters and bottom sediments // Russian Geology and Geophysics. 2020. Vol. 61. Iss. 8. P. 858–873. https://doi.org/10.15372/RGG2019154

7. Плюснин А. М., Украинцев А.В., Чернявский М.К., Перязева Е.Г., Ангахаева Н.А. Факторы и процессы образования соленого озера на берегу Байкала // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 2. С. 194–206. https://doi.org/10.31857/S0321059621020097

8. Плюснин А.М., Чернявский М.К., Посохов В.Ф. Условия формирования гидротерм Баргузинского Прибайкалья по данным микроэлементного и изотопного состава // Геохимия. 2008. № 10. С.1063–1072.

9. Кузьмич В.Н. Эколого-продукционная характеристика озер Иркана и Котокель // Биопродуктивность евтрофных озер Иркана и Котокель бассейна озера Байкал: сб. науч. тр. Л.: Изд-во НПО «Промрыбвод», 1989. С. 131–146.

10. Кострова С.С., Майер Х., Чаплыгин Б., Безрукова Е.В. Изотопные исследования озера Котокель // Современные проблемы геохимии: материалы Всерос. совещ. Т. 1. Иркутск, 2012. С. 159–162.

11. Убугунов Л.Л., Пронин Н.М., Меркушева М.Г., Базова Н.В., Аненхонов О.А., Афанасьева Л.В. [и др.]. Озеро Котокельское: природные условия, биота, экология / отв. ред. Н.М. Пронин, Л.Л. Убугунов. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2013. 320 с.

12. Лунина О.В. Разломы и сейсмически индуцированные геологические процессы на юге Восточной Сибири и сопредельных территориях. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 225 с.

13. Перязева Е.Г., Плюснин А.М., Гармаева С.З., Будаев Р.Ц., Жамбалова Д.И. Особенности формирования химического состава вод озер восточного побережья Байкала // География и природные ресурсы. 2016. № 5. С. 49–59. https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-5(49-59)

14. Иметхенов А.Б. Позднекайнозойские отложения побережья озера Байкал. Новосибирск: Наука, 1987. 148 с.

15. Хаптанов В.Б., Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г. Структура водной толщи и донных отложений озера Котокель по данным георадарного зондирования // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 5. С. 143–146.

16. Кострова С.С., Майер Х., Тарасов П.Е., Безрукова Е.В., Чаплыгин Б., Косслер А. [и др.]. Изотопный состав кислорода створок диатомовых водорослей из донных отложений озера Котокель (Бурятия) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 8. С. 1571–1580. https://doi.org/10.15372/GiG20160809

17. Крайнов М.А., Безрукова Е.В., Кербер Е.В., Левина О.В., Иванов Е.В., Щетников А.А. [и др.]. Первые результаты исследования донных отложений оз. Баунт (северное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 11. С. 1764–1776. https://doi.org/10.15372/GiG20171110

18. Солотчина Э.П., Безрукова Е.В., Солотчин П.А., Шток О., Жданова А.Н. Отложения позднего плейстоцена-голоцена в озерах центрального Забайкалья: последствия для изменения климата и окружающей среды // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 11. С. 1777–1794. https://doi.org/10.15372/GiG20181103

19. Цыренова Д.Д., Гаранкина В.П., Дагурова О.П., Дамбаев В.Б. Условия развития цианобактерий в озерах прибрежной полосы озера Байкал // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2016. № 4. С. 11–16. https://doi.org/10.18101/2306-2363-2016-4-11-16

20. Плюснин А.М., Гунин В.И. Природные гидрогеологические системы, формирование химического состава и реакция на техногенное воздействие (на примере Забайкалья). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2001. 137 с.

References

1. Baker LA, Herlihy AT, Kaufmann PR, Eilers JM. Acidic lakes and streams in United States: the role of asidic deposition. *Science*. 1991;252(5009):1151–1154.

2. Last WM, Fawn MG. Saline systems of the Great Plains of Western Canada: an overview of the limnology and paleolimnology. *Aquatic Biosystems*. 2005;1(10):1–10. https://doi.org/10.1186/1746-1448-1-10

3. Parkhurst DL, Christenson SC, Breit GN. *Groundwater-quality assessment of the Central Oklahoma Aquifer, Oklahoma: geochemical and geohydrologic investigation*. Oklahoma: U.S. Geological Survey; 1996. 110 p.

4. Stojanovic A, Kogelnig D, Mitteregger B, Mader D, Jirsa F, Krachler R, et al. Major and trace element geochemistry of superficial sediments and suspended particulate matter of shallow saline lakes in Eastern Austria. *Geochemistry*. 2009;69(3):223–234. https://doi.org/10.1016/j.chemer.2009.03.001

5. Plyusnin AM, Peryazeva EG, Chernyavskii MK, Zhambalova DI, Budaev RTs, Angakhaeva NA. Genesis of water and dissolved matter in soda lakes of Nizhnii kuitun of the Barguzin depression. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2020;3:89–97. (In Russ.) https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-3(89-97)

6. Plyusnin AM, Khazheeva ZI, Sanzhanova SS, Peryazeva EG, Angakhaeva NA. Sulfate mineral lakes of Western Transbaikalia: formation conditions and chemical composition of waters and bottom sediments. *Russian Geology and Geophysics*. 2020;61(8):858–873. https://doi.org/10.15372/RGG2019154

7. Plyusnin AM, Ukraintsev AV, Chernyavskii MK, Peryazeva EG, Angakhaeva NA. Factors and formation processes of a saline lake on the shore of Lake Baikal. *Vodnye resursy*. 2021;48(2):194–206. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S0321059621020097

8. Plyusnin AM, Chernyavskii MK, Posokhov VF. Formation conditions of hydrothermal waters in the Barguzin Cisbaikalia according to trace element and isotopic composition data. *Geokhimiya*. 2008;10:1063–1072. (In Russ.)

9. Kuz'mich VN. Ecological and production characteristics of lakes Irkana and Kotokel. In: *Biopro-duktivnost' evtrofnykh ozer Irkana i Kotokel' basseina ozera Baikal = Bioproduction of eutrophic lakes Irkana and Kotokel in the basin of Lake Baikal*. Leningrad: Research and production association “Promrybvod”; 1989. p.131–146. (In Russ.)

10. Kostrova SS, Maier Kh, Chaplygin B, Bezrukova EV. Isotopic studies of Lake Kotokel. In: *Sovremennye problemy geokhimii: materialy Vserossiiskogo soveshchaniya = Modern problems of geochemistry: materials of All-Russian meeting*. Vol. 1. Irkutsk; 2012. p.159–162. (In Russ.)

11. Ubugunov LL, Pronin NM, Merkusheva MG, Bazova NV, Anenkhonov OA, Afanasyeva LV, et al. *Lake Kotokel'skoe: natural conditions, biota, ecology*. Ulan-Ude: Buryat Scientific Center, Siberian Branch of Russian Academy of Science; 2013. 320 p. (In Russ.)

12. Lunina OV. *Faults and seismically induced geological hazards in southern East Siberia and adjacent areas*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2016. 225 p. (In Russ.)

13. Peryazeva EG, Plyusnin AM, Garmaeva SZ, Budaev RTs, Zhambalova DI. Features of the formation of chemical composition of lake waters along the eastern shores of Baikal. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2016;5:49–59. (In Russ.) https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-5(49-59)

14. Imetkhenov AB. *Late Cenozoic deposits of the coast of Lake Baikal*. Novosibirsk: Nauka; 1987. 148 p. (In Russ.)

15. Khaptanov VB, Bashkuev YuB, Dembelov MG. Structure of the Kotokel lake water and bottom sediments according to GPR sounding. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*. 2013;5:143–146. (In Russ.)

16. Kostrova SS, Meyer H, Tarasov PE, Bezrukova EV, Chapligin B, Kossler A, et al. Oxygen isotope composition of valves of diatomic algae from Lake Kotokel bottom sediments (Buryatia). *Geologiya i geofizika*. 2016;57(8):1571–1580. (In Russ.) https://doi.org/10.15372/GiG20160809

17. Krainov MA, Bezrukova EV, Kerber EV, Levina OV, Ivanov EV, Shchetnikov AA, et al. The first study results of bottom sediments of Lake Bount (northern Transbaikalia). *Geologiya i geofizika*. 2017;58(11):1764–1776. (In Russ.) https://doi.org/10.15372/GiG20171110

18. Solotchina EP, Bezrukova EV, Solotchin PA, Shtok O, Zhdanova AN. Deposits of the Late Pleistocene-Holocene in the lakes of central Transbaikalia: implications for climate and environmental changes. *Geologiya i geofizika*. 2018;59(11):1777–1794. (In Russ.) https://doi.org/10.15372/GiG20181103

19. Tsyrenova DD, Garankina VP, Dagurova OP, Dambaev VB. Conditions for the cyanobacteria development in the lakes of Lake Baikal coastal zone. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya. Fizika*. 2016;4:11–16. (In Russ.) https://doi.org/10.18101/2306-2363-2016-4-11-16

20. Plyusnin AM, Gunin VI. *Natural hydrogeological systems, formation of chemical composition and technogenic impact response (on example of Transbaikalia)*. Ulan-Ude: Buryat Scientific Center, Siberian Branch of Russian Academy of Science; 2001. 137 p. (In Russ.)

Сведения об авторах / Information about the authors

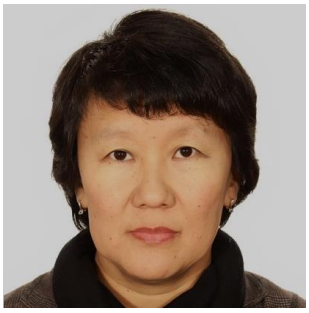
Ангахаева Надежда Александровна,
младший научный сотрудник Лаборатории гидрогеологии и геоэкологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
✉ e-mail: ms.angakhaeva@mail.ru
Nadezhda A. Angakhaeva,
Junior Researcher of the Laboratory of Hydrogeology and Geoecology,
Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6a Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
✉ e-mail: ms.angakhaeva@mail.ru

Плюснин Алексей Максимович,
доктор геолого-минералогических наук,
заместитель директора по научной работе,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: plyusnin@ginst.ru
Alexey M. Plyusnin,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Deputy Director for Research,
Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6a Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: plyusnin@ginst.ru

Украинцев Александр Викторович,
кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник Лаборатории гидрогеологии и геоэкологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: ukraintsev@ginst.ru
Alexander V. Ukraintsev,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Scientific Researcher of the Laboratory of Hydrogeology and Geoecology,
Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6a Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail:: ukraintsev@ginst.ru

Чернявский Михаил Константинович,
кандидат географических наук,
научный сотрудник Лаборатории гидрогеологии и геоэкологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: mitchel@ginst.ru
Mikhail K. Chernyavskii,
Cand. Sci. (Geogr.),
Scientific Researcher of the Laboratory of Hydrogeology and Geoecology,
Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6a Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: mitchel@ginst.ru

Перязева Елена Георгиевна,
кандидат географических наук,
научный сотрудник Лаборатории гидрогеологии и геоэкологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: peryazeva@ginst.ru
Elena G. Peryazeva,
Cand. Sci. (Geogr.),
Scientific Researcher of the Laboratory of Hydrogeology and Geoecology,
Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6a Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: peryazeva@ginst.ru



Жамбалова Дашима Ивановна,
кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник Лаборатории гидрогеологии и геоэкологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: dachima@geo.stbur.ru
Dashima I. Zhambalova,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Scientific Researcher of the Laboratory of Hydrogeology and Geoecology,
Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6a Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: dachima@geo.stbur.ru

Заявленный вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 10.03.2021; одобрена после рецензирования 12.04.2021; принята к публикации 14.05.2021.
The article was submitted 10.03.2021; approved after reviewing 12.04.2021; accepted for publication 14.05.2021.