

УДК 556.55.551

Динамика формирования и рудогенерирующий потенциал минерализованных озер Забайкалья и Северо-Восточной Монголии

О. А. СКЛЯРОВА¹, Е. В. СКЛЯРОВ², Ю. В. МЕНЬШАГИН², М. А. ДАНИЛОВА²¹Институт геохимии Сибирского отделения РАН,
ул. Фаворского, 1а, Иркутск 664033 (Россия)

E-mail: oly@igc.irk.ru

²Институт земной коры Сибирского отделения РАН,
ул. Лермонтова, 128, Иркутск 664033 (Россия)

Аннотация

Охарактеризованы малые озера Забайкалья и Северо-Восточной Монголии, объединенные в пять систем: Баргузинскую, Еравнинско-Гусиноозерскую, Ингодинскую, Онон-Борзинскую и Восточно-Монгольскую. В пределах систем озера разделены на компактные группы, характеризующиеся общим химическим составом и типом геохимической эволюции. Приведена характеристика подземных и поверхностных вод, питающих озера. На основании изучения микроэлементного состава озерных (около 200 озер) и подземных (более 100 источников, колодцев и скважин) вод выделены элементы, концентрирующиеся в процессе эвапоритизации озерных вод. Рассмотрены перспективы использования малых озер в качестве “жидкой руды” для промышленного извлечения некоторых металлов (Li, U, REE и др.).

Ключевые слова: минерализованные озера, микроэлементный состав, Забайкалье, Северо-Восточная Монголия

ВВЕДЕНИЕ

Минерализованные озера широко распространены в пределах Забайкалья и прилегающих территорий Северо-Восточной Монголии (рис. 1). При значительных вариациях размеров (площадь водного зеркала $0.01n - 10n$ км²) и минерализации ($0.1n - 100n$ г/л) они имеют ряд общих характеристик: небольшую глубину (обычно не более первых метров), крайне ограниченную площадь водосбора, приуроченность к зонам семиаридного климата, отсутствие поверхностного стока. Озера группируются в системы, которые в первом приближении можно разделить на два типа. К первому типу относятся озерные системы линейных межгорных впадин (Баргузинская, Еравнинско-Гусиноозерская, Ингодинская). Второй тип представлен озерами арального распространения на обширных территориях Южного Забайкалья и Северо-Вос-

точной Монголии со слабо расчлененным рельефом (Онон-Борзинская и Восточно-Монгольская системы). Практический интерес к некоторым озерам ограничивался кустарной или полупромышленной добычей соды в первой половине прошлого века [1] и рыбоводством, однако, учитывая мировые тенденции, он может существенно возрасти в скором времени.

Минерализованные озера Восточной Сибири были детально охарактеризованы в монографической сводке начала второй половины прошлого века [2, 3], представляющей собой обобщение результатов работ многочисленных гидрогеологических партий. Однако аналитические возможности тех лет позволяли определять содержание лишь главных компонентов озерных вод; геохимическая же специфика озерных вод оставалась за рамками исследований. Изученность озер Восточной Монголии очень слабая. В крайне немногочисленных публикациях по озерам Монголии [4, 5]

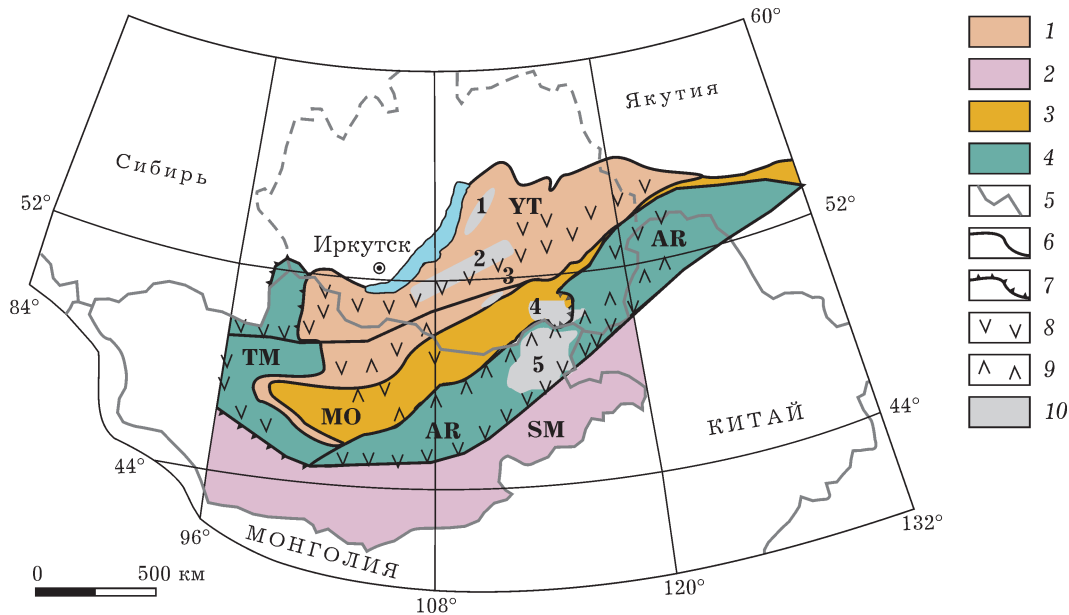


Рис. 1. Расположение систем малых озер Забайкалья и Северо-Восточной Монголии на геодинамической схеме Северо-Восточной Азии (по [Nokleberg, 2010]): 1–3 – террейны Центрально-Азиатского складчатого пояса (1 – Енисейско-Забайкальский (YT) (V-O₁); 2 – Южно-Монгольско-Хинганский (SM) (O-C); 3 – Монголо-Охотский (MO) (D-K₃)); 4 – супертеррейны (PR₃-Ст): Аргунско-Идермегский (AR) и Тувино-Монгольский (TM); 5 – государственные границы; 6 – геологические границы и разломы; 7 – надвиги; 8 – перекрывающие образования континентальной окраины; 9 – перекрывающие образования трансформной континентальной окраины; 10 – системы малых озер: 1 – Баргузинская; 2 – Еравнинско-Гусиноозерская; 3 – Ингодинская; 4 – Онон-Борзинская; 5 – Северо-Монгольская.

рассмотрены лишь наиболее крупные озера, расположенные главным образом в западной части Монголии. Детальные геохимические исследования даже этих, относительно больших, озер не проводились. В настоящей работе приведена краткая характеристика озерных систем, особое внимание уделено их геохимической специфике. Всего нами исследовано более 200 озер и около 150 источников, колодцев, скважин.

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СПЕЦИФИКА ОЗЕР И ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Баргузинская система

Эта система включает более 1100 малых озер [6, 7], точное количество которых, как и их размеры и конфигурация, может изменяться с каждым годом. Абсолютное большинство озер расположено в пойме р. Баргузин, воды пресного типа, по составу близки к речным. Среди минерализованных озер выделяется три группы: Гаргинско-Аргодинская (Харамодунская), Усть-Аргодинская и Алгинская.

Озера Гаргинско-Аргодинской группы имеют преимущественно термокарстовое происхождение. Среди них встречаются пресные и солоноватые щелочные озера (pH 8.7–9.7) с минерализацией (total dissolved solids, TDS) в пределах 0.1–2 г/л. По химическому составу пресные термокарстовые озера являются гидрокарбонатными магниевыми, солоноватые – гидрокарбонатными натриевыми (табл. 1).

Усть-Аргодинская группа состоит из четырех озер: Саган-Нур и три близко расположенных озера с общим названием Нухэ-Нур. Вода озер характеризуется высокой щелочностью (pH 9.7–10.6), высокой минерализацией (14–16 г/л) и имеет содовую геохимическую специфику.

Алгинская группа озер – единственная в Баргузинской впадине группа, имеющая сульфатную специфику. Вариации солености в озерах этой группы составляют 6–70 г/л при pH 8.8–9.6.

Подземные воды, питающие озера, по химическому составу относятся к гидрокарбонатному кальциевому или гидрокарбонатному кальциево-магниевому типам. Только для некоторых из них характерна повышен-

ТАБЛИЦА 1

Гидрохимические характеристики озерных вод рассматриваемого региона

Показатели	Озерные системы				
	Баргузинская	Еравнинско-Гусиноозерская	Ингодинская	Онон-Борзинская	Восточно-Монгольская
TDS, г/л	0.1–71	0.1–17	0.1–104	0.3–380	0.5–280
pH	8–10.5	7.6–10	8.4–10.1	8–10.14	7.2–10.1
Анионы	SO ₄ , HCO ₃	HCO ₃ , SO ₄	HCO ₃	HCO ₃ , Cl, SO ₄	Cl, SO ₄ , HCO ₃
Катионы	Na, Mg, Ca	Na, Mg, Ca	Na, Mg, Ca	Na	Ca, Na, Mg
Содержание, мкг/л:					
Li	1.1–2300	2.3–1000	1–1000	9–442	4–48 000
B	3.5–6600	3.3–1100	Фон	52–65 000	42–92 000
V	Фон	Фон	0.3–176	1–500	1–646
Ge	Фон	Фон	0.02–25	0.01–40	0.8–6
As	0.1–140	Фон	Фон	0.5–14 000	19–7200
Se	Фон	Фон	Фон	0.05–56 000	0.5–44
Br	5–14 600	9–23 800	Н. о.	Н. о.	29–777 000
Sr	75–6000	92–5600	44–1500	96–13 100	91–23 800
Zr	Фон	0.01–375	Фон	0.1–1650	0.03–790
Mo	0.5–45	0.3–472	Фон	1–670	9–1420
Sb	Фон	Фон	Фон	0.2–100	0.6–86
Cs	Фон	Фон	Фон	Фон	0.005–26
REE	Фон	Фон	Фон	0.05–170	0.1–119
W	1–550	Фон	Фон	0.04–407	0.2–522
U	Фон	0.1–154	Фон	3.1–2200	6.8–4800

Примечание. Н. о. – не определено.

ная доля сульфат-иона и натрия. Минерализация подземных вод составляет 0.08–0.3 г/л, значения pH близки к нейтральным (pH 7.4–7.9). В анионном составе термальных вод преобладает сульфат-ион, в катионном – натрий. Минерализация термальных вод существенно выше (0.28–1.1 г/л) по сравнению с холодными источниками, а значения pH составляют 8.5–9.9 (табл. 2).

Еравнинско-Гусиноозерская система

Данная система малых озер простирается на расстояние более 500 км от р. Витим на северо-востоке до р. Джида на юго-западе и включает более 100 озер. В пределах рассматриваемой системы выделяются четыре группы озер: Еравнинская, Хоринско-Удинская, Гусиноозерская и Белоозерская.

Еравнинская группа. Наибольшее количество озер этой группы сосредоточено в пределах

Еравнинской впадины. Это в основном пресные, щелочные озера с минерализацией 0.1–1 г/л, и только два из них солоноватые (TDS = 2.4 и 4.5 г/л). Самый распространенный тип вод – гидрокарбонатный кальциево-натриевый или натриево-кальциевый; среднее значение pH 9.1 (см. табл. 1).

Озера **Хоринско-Удинской группы** близки по химическому составу к озерам Еравнинской группы, но их отличает меньшая щелочность воды (pH 8.3–9.1) и более высокая минерализация. Здесь преобладают солоноватые озера с общим количеством растворенных солей до 7.3 г/л, а в анионном составе существенную долю составляют сульфаты.

Гусиноозерская группа объединяет ультрапресные (Гусиное оз.), пресные, солоноватые и соленые озера, расположенные, главным образом, в пределах одноименной впадины. Вариации солености составляют 0.2–15 г/л при pH 8.1–9.6. Преобладают гидрокар-

ТАБЛИЦА 2

Гидрохимические характеристики источников рассматриваемого региона

Показатели	Озерные системы					
	Баргузинская		Еравнинско-	Ингодинская	Онон-	Восточно-
	Термальные воды	Холодные воды	Гусиноозерская		Борзинская	Монгольская
TDS, г/л	0.3–1.1	0.1–0.4	0.1–0.7	0.05–1.2	0.2–1.0	0.8–1.6
pH	8.0–10	6.7–8.3	7.1–9.1	6.5–8.5	6.5–8	7.1–8.3
Анионы	SO ₄ , HCO ₃	HCO ₃ , SO ₄	HCO ₃ , SO ₄	HCO ₃	HCO ₃ , Cl, SO ₄	HCO ₃ , Cl, SO ₄
Катионы	Na	Ca, Mg, Na	Ca, Mg, Na	Mg, Ca, Na	Ca, Mg, Na	Ca, Na, Mg
Содержание, мкг/л						
Li	43–1330	Фон	Фон	Фон	5–164	5–530
B	44–220	Фон	Фон	Фон	13–470	9–650
V	Фон	Фон	Фон	Фон	0–26	0.7–52
Ge	2–11.3	Фон	Фон	0.02–25	Фон	Фон
As	Фон	Фон	Фон	Фон	0.5–25	0.9–73
Se	Фон	Фон	Фон	Фон	0.1–4.3	0.1–7
Br	19–108	Фон	15–460	Н. о.	Н. о.	12–1300
Rb	5–108	Фон	Фон	Фон	Фон	Фон
Sr	110–3000	Фон	30–2300	44–1500	80–1600	Фон
Mo	0.5–45	Фон	1.1–51	Фон	0.5–25	1.3–20
Sb	Фон	Фон	Фон	Фон	0.1–28	Фон
Cs	0.6–38	Фон	Фон	Фон	Фон	Фон
REE	Фон	Фон	Фон	Фон	Фон	0.01–11
W	7.2–82	Фон	Фон	Фон	Фон	Фон
U	Фон	Фон	0–27	Фон	0–22	1–176

Примечание. Н. о. – не определено.

бонатные или гидрокарбонатно-сульфатные воды, в наиболее минерализованном озере состав воды сульфатно-хлоридный. По катионному составу озерные воды принадлежат к Ca–Mg-, Mg–Na-, Mg–Ca–Na- и Na-типам.

Белоозерская группа озер также характеризуется широким спектром солености вод (TDS = 0.1–17 г/л) и величины pH (8.0–9.8). По мере увеличения солености гидрохимический тип воды изменяется от гидрокарбонатного кальциево-магниевого до сульфатно-гидрокарбонатного натриевого.

Уровень минерализации питающих подземных вод составляет 0.1–0.6 г/л при pH 7.0–8.8 (см. табл. 2).

Ингодинская система

В пределах Ингодинской системы, локализующейся в пределах одноименной впадины, насчитывается более 20 озер. Среди них преобладают озера со “сверхмалыми” размерами

и неустойчивым гидрологическим режимом. Озера занимают плоские, мелкие котловины округлой или овальной формы, расположенные в незначительных депрессиях рельефа.

Для озер данной системы характерен широкий диапазон вариаций минерализации: от пресных, с общим количеством растворенных солей 0.1–0.5 г/л, до солоноватых и соленых озер с минерализацией в пределах 1.0–104 г/л. Озера впадины относятся к щелочному типу, реакция среды варьирует в пределах pH 9.40–10.12 (см. табл. 1).

В ионном составе питающих озера подземных и поверхностных вод Ингодинской впадины преобладают гидрокарбонатные ионы с широким диапазоном вариаций катионного состава: от существенно кальциевого, кальциево-магниево-натриевого до натриевого. Общее количество растворенных солей также варьирует в широких пределах: от ультрапресной воды (TDS = 0.05 г/л) до солоноватой щелочной (TDS = 1.19 г/л).

Онон-Борзинская система

Эта система включает несколько сотен озер, локализованных в пределах и по обрамлению Цасучейской впадины, а также на прилегающих с юга и востока территориях. Площадь наиболее крупных озер Зун-Торей и Барун-Торей составляет 300 и 580 км² соответственно, в то время как в целом преобладают озера с очень малыми размерами и неустойчивым гидрологическим режимом. В пределах этой системы выделяются Северо-Цасучейская, Южно-Цасучейская, Торейская и Борзинская группы озер.

Для **Северо-Цасучейской группы** характерны наибольшие вариации солености и компонентного состава озерных вод. Величина TDS варьирует в пределах 1.0–210 г/л, pH воды составляет 8.0–9.9. Анионный состав озерных вод в зависимости от солености изменяется от гидрокарбонатного (через гидрокарбонатно-сульфатный) до существенно хлоридного. Катионный состав вод варьирует не так значительно, изменяясь от магниевонариевого до натриевого (см. табл. 1).

Озера **Южно-Цасучейской группы** менее разнообразны по своему составу. Вариации солености для них составляют 0.3–15 г/л при pH 9–10. Анионный состав вод изменяется от гидрокарбонатного через гидрокарбонатно-хлоридный к хлоридно-гидрокарбонатному, а катионный – от натриево-магниевый к натриевому.

Озерные воды **Торейской группы** при незначительных вариациях величины TDS (0.4–16 г/л) и pH (9.4–9.8) характеризуются значительным разнообразием компонентного состава. По мере увеличения солености гидрохимический тип озерных вод изменяется от гидрокарбонатно-сульфатного натриевого через гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатный натриевый к гидрокарбонатно-хлоридному натриевому.

Борзинская группа объединяет озера с наиболее широкими вариациями солености (от 0.4 до 310 г/л). Величина pH также варьирует в значительных пределах (pH 8.1–10). Гидрогеохимический тип озерных вод изменяется по мере возрастания минерализации от гидрокарбонатного кальциевого до хлоридного натриевого.

Подземные воды характеризуются диапазоном значений TDS 0.2–1 г/л, pH 6.5–8.4, относятся к гидрокарбонатному типу с высо-

кой долей ионов хлора в некоторых источниках. Катионный состав вод более разнообразен и варьирует от кальциевого и кальциево-магниевый до натриевого (см. табл. 2).

Восточно-Монгольская система малых озер

В Восточной Монголии насчитывается около 5000 озер [4, 5], преобладающая часть которых объединяется нами в Восточно-Монгольскую систему малых озер, расположенных в северо-восточной части Монголии. Это наиболее крупная из рассматриваемых озерных систем, в пределах которой выделяются Южно-Торейская, Центральная, Галутинская и Керуленская группы. Южно-Торейская группа объединяет озера, расположенные к югу от Торейских озер; к Керуленской группе отнесена цепочка озер, протягивающаяся вдоль р. Керулен. Центральная и Галутинская группы вместе также образуют протяженную полосу, однако существенные различия химического состава озерных вод не позволили объединить их.

Для **Южно-Торейской группы** характерны щелочные солоноватые или соленые озера (пресных нет) с вариациями минерализации от 2 до 140 г/л. В катионном составе преобладает натрий. По мере накопления солей гидрохимический тип изменяется от гидрокарбонатного натриевого до хлоридно-сульфатного натриевого (см. табл. 1).

Озера **Центральной группы** характеризуются значительными вариациями величины pH (7.2–9.9), в основном они солоноватые, только в водах двух озер соленость превышает 10 г/л (до 21 г/л). Для пресных озер характерен гидрокарбонатный натриево-кальциевый состав вод, для солоноватых – гидрокарбонатный натриевый, для соленых – хлоридно-гидрокарбонатный натриевый.

Для озер **Галутинской группы** характерны широкие вариации солености (1–144 г/л) и довольно узкий интервал величины pH (8.2–9.2). По мере накопления солей гидрохимический тип озерных вод изменяется от гидрокарбонатного натриевого через хлоридно-гидрокарбонатный натриевый к хлоридно-сульфатному натриевому.

В **Керуленскую группу** входят преимущественно соленые озера (5–99 г/л), при этом для

вод большинства озер TDS превышает 20 г/л, а величина рН варьирует незначительно (рН 8.1–9.1). В катионном составе преобладает натрий, а в анионном – либо ионы хлора, либо сульфаты.

Для питающих подземных вод характерна повышенная минерализация (0.9–1.4 г/л), за исключением источников Центральной группы, где общее количество растворенных солей составляет 0.3–0.5 г/л. В анионном составе подземных вод преобладают гидрокарбонатные ионы, иногда с существенной долей ионов хлора (Южно-Торейская и Галутинская группы) или сульфат-ионов (Керуленская группа). Катионный состав очень разнообразный (см. табл. 2).

Рассматривая металлогеническую специфику водных систем региона, следует подчеркнуть, что поступление “полезных компонентов” в озерные воды осуществляется главным образом питающими подземными (реже и поверхностными) водами, а дальнейшее их концентрирование определяется, как правило, процессами эвапоритизации. Соответственно, при оценке рудогенерирующего потенциала необходимо рассматривать не только озера, но и питающие их подземные воды.

Подземные воды

Общее содержание растворенных солей в подземных водах редко превышает 1 г/л. Наиболее минерализованы термальные воды Баргузинской впадины и холодные источники Восточно-Монгольской системы (см. табл. 2). Содержание большинства проанализированных элементов в источниках всех систем не превышает нескольких микрограммов на литр. Повышенное содержание микроэлементов характерно для термальных вод, однако их локализация в бортовых частях Баргузинской впадины исключает формирование здесь озер, необходимых для дальнейшего концентрирования полезных компонентов. Термальные воды можно рассматривать в качестве потенциальной самостоятельной жидкой руды. Что касается холодных источников, то наиболее высокие концентрации многих полезных компонентов характерны для Восточно-Монгольской системы. Содержание лития и

урана здесь достигает сотни микрограммов на литр, редкоземельных элементов и молибдена – десятки микрограммов на литр.

Минерализованные озера

Наблюдаются значительные вариации минерализации и геохимической специфики озерных вод, причем не только для озер разных систем, но и в пределах каждой из систем (см. табл. 1). Большинство исследованных озер являются щелочными, пресными или солоноватыми. Отчетливо содовый тип эволюции имеют озера Ингодинской впадины. В пределах Баргузинской и Еравнинско-Гусино-озерской озерных систем увеличивается (вплоть до преобладания) доля сульфат-иона в озерных водах. Озера Восточно-Монгольской и особенно Онон-Борзинской систем очень неоднородны по геохимическому типу вод.

Повышенное содержание некоторых элементов в питающих подземных водах обеспечило накопление солей в озерах Восточной Монголии и в меньшей степени – в озерах Онон-Борзинской системы, для которых характерен самый высокий уровень концентраций большинства элементов. Содержание лития здесь достигает кондиционного [8], составляя около 50 мг/л. В некоторых озерах отмечается высокая концентрация урана (до 5 мг/л), молибдена (до 1.4 мг/л), W (до 0.5 мг/л), редкоземельных (до 0.1 г/л) и некоторых других элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты наших исследований показали, что вероятность обнаружения на юге Сибири и в Монголии объектов типа южноамериканских саларов или тибетских металлоносных озер очень низкая: концентрация полезных компонентов здесь значительно ниже рентабельной либо объема воды в озерах крайне незначительны. Практический интерес к малым озерам в будущем может быть обусловлен тремя факторами: 1) снижением уровня “рентабельной” концентрации полезных компонентов в водах по мере разработки новых технологий; 2) корректировкой стратегии добычи полезных ископаемых с пере-

носом акцента на комплексную разработку небольших месторождений с использованием передвижных установок; 3) усилением экологических требований к разработке полезных ископаемых. Экологичное извлечение полезных ископаемых предполагает не только отсутствие “рваных ран” на поверхности и в недрах Земли в виде карьеров, шахт, отвалов, но и минимальное воздействие на природный комплекс региона. Последнее возможно при отработке только мелких, пересыхающих озер.

Исторические экскурсы показали, что во многих малых водоемах Южной Сибири и Монголии, группирующихся в системы озер, существовали периоды значительного падения уровня воды под действием неблагоприятных климатических факторов. Результатом влияния этих факторов стало концентрирование в озерах солей, их иссушение вплоть до продолжительных безводных периодов с последующим периодическим наполнением водоема и т. д. Другими словами, при минимально рентабельных концентрациях полезных компонентов каждое такое озеро можно рассматривать в качестве источника возобновляемой руды, что снимает или значительно ослабляет проблему количества запасов.

Существенно ускорить практическое освоение малых озер может разработка передвижных установок селективного извлечения полезных компонентов из озерных вод на базе высокопроходимого транспорта. Причем для озер, в отличие от подземных рассолов Сибирской платформы, проблема утилизации высокоагрессивных вод после извлечения металлов не будет столь остра. Проведение технологи-

ческих операций в зимний период или ранней весной имеет дополнительные преимущества.

1. Существенно облегчается доступ к озерам, берега которых летом нередко заболочены;

2. Глубина большинства озер составляет 1,5–3 м, поэтому зимой замерзает 30–90 % объема воды. При этом происходит дополнительное концентрирование солей в озерных водах, в том числе и полезных компонентов. Специальные исследования для минерализованных озер Западного Прибайкалья показали, что соленость вод зимой возрастает в 2–7 раз;

3. Отсутствует необходимость строительства специальных отстойников или резервуаров для использованных вод.

Исследования выполнены при частичной финансовой поддержке СО РАН (интеграционные проекты № 38, 335), СО РАН–Академия наук Монголии (интеграционный проект “Минеральные озера Монголии – рудогенерирующий потенциал, инновационные технологии освоения, экология”) и РФФИ (проект № 09-05-00884).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Франк-Каменецкий А.Г. // Изв. Биол.-геогр. НИИ при ИГУ. Иркутск: 1924. Т. 1, вып. 4. С. 3–33.
- 2 Власов Н. А., Павлова Л. И., Чернышев Л. А., Минеральные озера // Минеральные воды южной части Восточной Сибири. М.: Недра, 1961. С. 189–245.
- 3 Минеральные воды южной части Восточной Сибири. / Под ред. Н. А. Власова, В. Г. Ткачук, Н. И. Толстихина. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1962. Т. 2. 198 с.
- 4 Egorov A. N. // Hydrobiologia. 1993. Vol. 267. P. 13–21.
- 5 Williams W. D. // Hydrobiologia. 1991. Vol. 210. P. 39–66.
- 6 Обожин В. Н., Богданов В. Т., Кликунова О. Ф. Гидрохимия рек и озер Бурятии. Новосибирск: Наука, 1986. 185 с.
- 7 Намсараев Б. Б., Зайцева С. В., Хахинов В. В. Минеральные источники и озера Баргузинской долины. Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2007. 100 с.
- 8 Крайнов С. Р., Рыженко Б. Н., Швец В. М. Геохимия подземных вод. М.: Наука, 2004. 677 с.