

УДК 556.55.551

Е. В. СКЛЯРОВ*, О. А. СКЛЯРОВА, Ю. В. МЕНЬШАГИН*, М. А. ДАНИЛОВА***

*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск

**Институт геохимии СО РАН, г. Иркутск

МИНЕРАЛИЗОВАННЫЕ ОЗЕРА ЗАБАЙКАЛЬЯ И СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ МОНГОЛИИ: ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И РУДОГЕНЕРИРУЮЩИЙ ПОТЕНЦИАЛ

Охарактеризованы малые озера сопредельных территорий — Забайкалья (РФ) и Северо-Восточной Монголии, объединенные в пять систем: Баргузинскую, Еравнинско-Гусиноозерскую, Ингодинскую, Онон-Борзинскую и Восточно-Монгольскую. В пределах этих систем озера разделены на компактные группы, характеризующиеся в основном общими чертами химического состава и типом геохимической эволюции. Также приведена характеристика питающих озера подземных и поверхностных вод. 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: система малых озер, Забайкалье, Монголия, минерализация воды, рудогенерирующий потенциал.

An outline is given of the small lakes on two neighboring territories: Transbaikalia (RF), and Northeastern Mongolia, which are combined into five systems: Barguzinskaya, Eravninsko-Gusinoozerskaya, Ingodinskaya, Onon-Borzinskaya, and Eastern-Mongolian. Within these systems, the lakes are divided into compact groups characterized largely by common features of chemical composition, and by the type of geochemical evolution. Also, a characteristic of subterranean and surface waters feeding the lakes is given. Based on studying the trace element composition of lacustrine (about 200 lakes) and subterranean

© 2011 Скляров Е. В. (skl@crust.irk.ru), Склярова О. А., Меньшагин Ю. В., Данилова М. А.

(more than 100 springs, wells and boreholes) waters, it was possible to identify the elements concentrating in the evaporation process of lacustrine waters. We examine the prospects for using small lakes as "liquid ore" for commercial extraction of some metals (Li, U, REE, and others).

Keywords: system of small lakes, Transbaikalia, Mongolia, water mineralization, ore-generating potential.

ВВЕДЕНИЕ

Системы малых озер — серии бессточных озер, расположенных на компактной площади, характеризующейся сходными ландшафтными и гидрографическими условиями, представляют интерес во многих отношениях. Прежде всего широкие вариации их химического состава, меняющегося в зависимости от смены (кратковременной или долгопериодной) климатических или гидрогеологических условий, позволяют рассматривать системы малых озер в качестве природных модельных объектов для изучения поведения элементов в водной среде и корректного выбора граничных условий при широко используемом в гидрогеохимических исследованиях термодинамическом моделировании [1–3]. Возможно, поэтому в зарубежных периодических изданиях в последнее десятилетие появляется все больше публикаций, рассматривающих распределение и вариации различных элементов в отдельных малых озерах или их сериях [4–11].

Особое внимание уделяется соленым озерам, вплоть до предложения считать их изучение отдельным направлением исследований в гидрогеологии — салинологией [12] — в связи с уникальностью их химического и микробиологического состава, а также с возрастающим экономическим потенциалом и экологическими аспектами. Соленые и солоноватые озера встречаются не только в жарких и засушливых областях, но и в регионах с умеренным и холодным климатом, в частности в Восточной Сибири [13, 14]. В этих случаях обычно присутствует серия озер от пресных до гиперсоленых [14–17], что и делает системы малых озер очень привлекательными для исследования вопросов эволюции поверхностных вод.

Возрастающий интерес к минерализованным озерам определяется в немалой степени и их экономическим потенциалом. Даже при небольших концентрациях полезных компонентов (относительно «твердых» руд) их добыча становится более рентабельной, поскольку исключаются дорогостоящие и экологически грязные этапы отработки шахт, карьеров или россыпей, дробления пород, предварительного концентрирования и последующего перевода металлов в раствор. Практический интерес пока представляет только литий, хотя для некоторых озер прогнозные оценки сделаны и на В, Rb, Cs, U [12]. По оценкам Р. К. Эванса [18], прогнозные запасы лития в рассолах Аргентины (del Ricon, de Nombre), Боливии (Del Uyuni), Чили (de Atacama), США (Silver Peak, Searles Lake, Great Salt Lake) и Китая (соленые озера Taijinaier, Hitai Ginar, Zabau и др.) намного превышают все известные в мире ресурсы «твердого» Li, что и определяет основные тенденции поиска соответствующих объектов. На современном технологическом уровне содержание полезных компонентов должно быть достаточно высоким, а размеры озер весьма приличными для того, чтобы обеспечить рентабельность их освоения.

Минерализованные озера Восточной Сибири детально охарактеризованы в монографической сводке начала второй половины прошлого века [14, 15], 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 осталась за рамками рассмотрения. Изученность озер Восточной Монголии очень слабая. В крайне немногочисленных публикациях по озерам Монголии [19, 20] рассмотрены лишь наиболее крупные озера, расположенные главным образом в западной части Монголии. Детальные геохимические исследования даже относительно больших озер так же не проводились.

В связи с этим нам представляется целесообразной публикация серии статей, подготовленных на основе результатов исследований 2004–2009 гг. и посвященных геохимическим характеристикам отдельных озерных систем Восточной Сибири и прилегающих территорий Монголии. Краткую характеристику этих систем, с акцентом на геохимическую специфику озер, мы предлагаем в настоящей статье.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕРНЫХ СИСТЕМ

Минерализованные озера широко распространены в Забайкалье и на прилегающей территории Северо-Восточной Монголии (рис. 1). При значительных вариациях размеров (площадь водного зеркала от 0,01 до 10 км²) и минерализации (от 0,1 до 300 г/л) их общими чертами являются небольшая глубина, как правило, не превышающая первых метров, крайне ограниченная площадь водосбора, расположение в зонах семиаридного климата и отсутствие поверхностного стока.

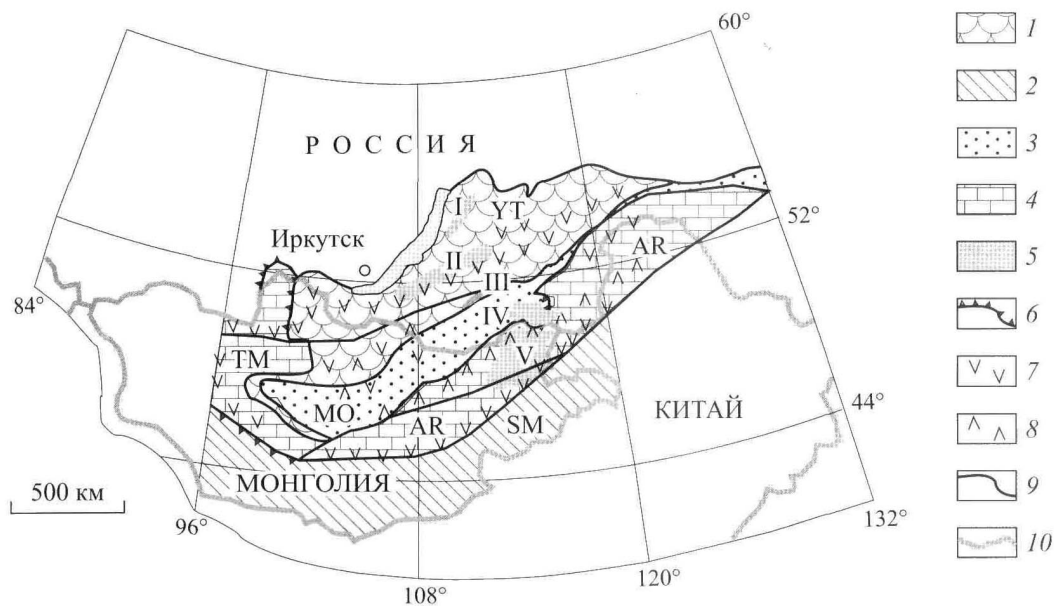


Рис. 1. Расположение систем малых озер Забайкалья (РФ) и Северо-Восточной Монголии на геодинамической схеме Северо-Восточной Азии, по [21].

Террейны Центрально-Азиатского складчатого пояса: 1 — Енисейско-Забайкальский (УТ) (V–O₁); 2 — Южно-Монгольско-Хинганский (SM) (O–C); 3 — Монголо-Охотский (МО) (D–K₃). Супертеррейны (PR₃–Ст): 4 — Аргунско-Идермегский (AR) и Тувино-Монгольский (ТМ). 5 — системы малых озер: I — Баргузинская, II — Еравнинско-Гусиноозерская, III — Ингодинская, IV — Онон-Борзинская, V — Северо-Монгольская. 6 — надвижки. 7 — перекрывающие образования континентальной окраины. 8 — перекрывающие образования трансформной континентальной окраины. 9 — геологические границы и разломы. 10 — государственная граница.

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 ареального распространения на обширных территориях Южного Забайкалья и Северо-Восточной Монголии со слабо расчлененным рельефом (Онон-Борзинская и Восточно-Монгольская системы). Практический интерес к некоторым из озер ограничивался кустарной или полупромышленной добычей соды в первой половине прошлого века [22] и рыбоводством, однако учитывая мировые тенденции, он может оказаться гораздо более широким. В каждую из упомянутых систем объединяются от нескольких десятков (Ингодинская) до нескольких тысяч (Восточно-Монгольская) малых озер.

Баргузинская система малых озер. В Баргузинской впадине насчитывается более 1100 малых озер [23, 24], точное количество которых, как и их размеры и конфигурация, может изменяться с каждым годом. Абсолютное большинство озер, расположенных в пойме р. Баргузин, пресные и характеризуются составом воды, близким к речному. Что касается минерализованных озер, то выделяется три их группы: Гаргинско-Аргадинская (Харамодунская), Усть-Аргадинская и Алгинская (рис. 2).

Озера *Гаргинско-Аргадинской* группы имеют преимущественно термокарстовое происхождение. Среди них встречаются пресные и солоноватые щелочные озера (pH = 8,7–9,7) с минерализацией (TDS — total dissolved solids) от 0,1 до 2 г/л. По химическому составу пресные термокарстовые озера гидрокарбонатные магниевые, солоноватые — гидрокарбонатные натриевые (рис. 3).

Усть-Аргадинская группа состоит из четырех озер: Саган-Нур и три близко расположенных озера с общим названием Нухэ-Нур. Н. А. Власов с соавт. [15] в своей работе исключили из рассмотрения оз. Саган-Нур, и, вероятно, они правы, поскольку и по расположению (в пойме р. Аргада) и по минерализации оно резко отличается от остальных озер, вода которых характеризуется высокой щелочностью (pH = 9,7–10,6), высокой минерализацией (14–16 г/л) и имеет содовую геохимическую специфику.

Алгинская группа озер является единственной в Баргузинской впадине, имеющей сульфатную специфику [15]. В исследованиях тех лет внимание было уделено только компактной группе озер, расположенных непосредственно вблизи самого крупного Алгинского озера, поскольку именно на этой площади широко проявлены выцветы белых солей, отчетливо указывающие на повышенную минерализацию вод. Достаточно многочисленные озера разных размеров, расположенные к северу от описанных, были, видимо, априори отнесены к пресным. Нашими исследованиями выявлено еще

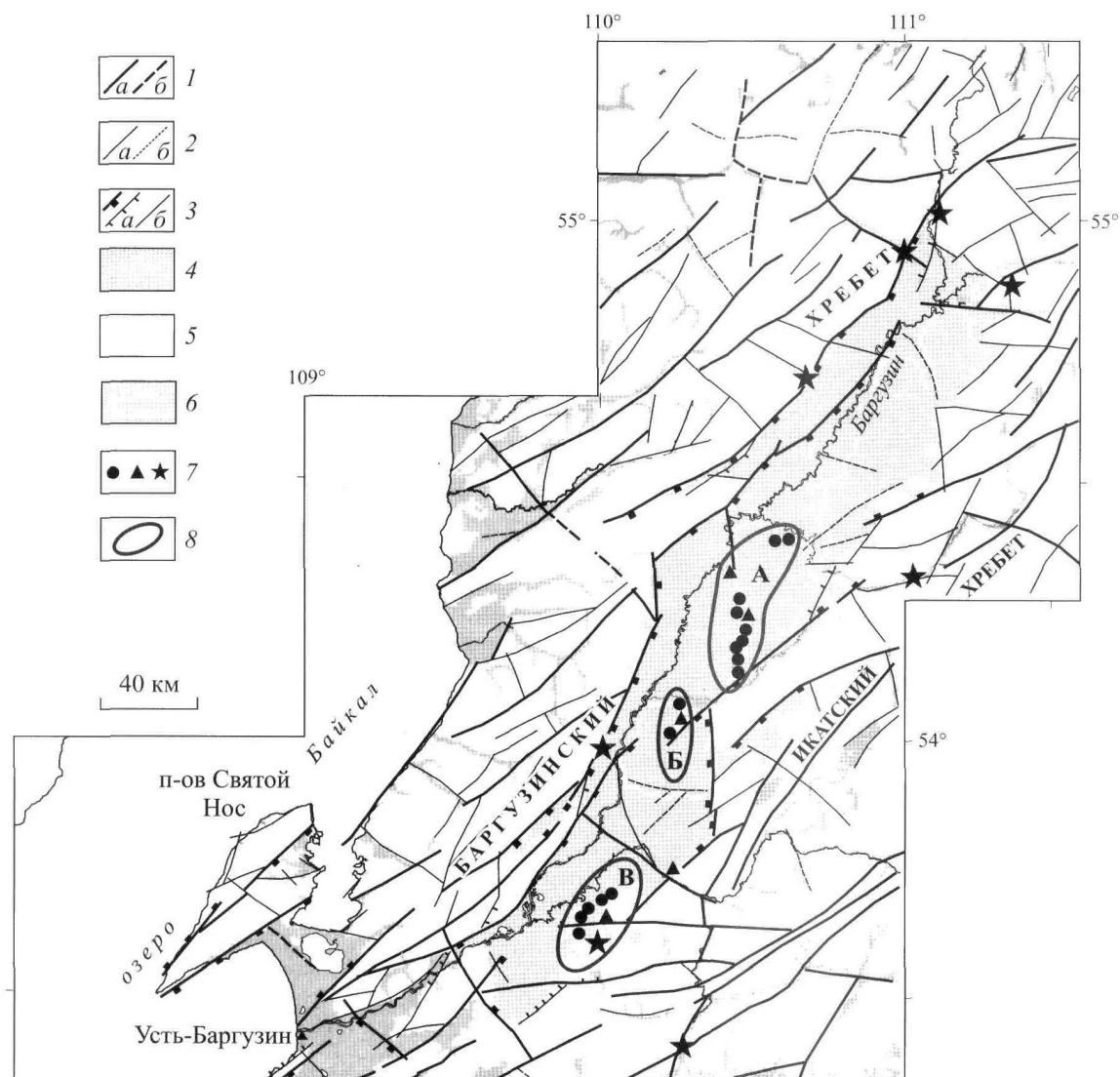


Рис. 2. Схема распространения озер и источников Баргузинской системы малых озер. Составлена на основе карты разломно-блокового строения земной коры Баргузинской рифтовой впадины и сопредельной территории [25].

1 — достоверные (а) и предполагаемые (б) региональные разломы; 2 — достоверные (а) и предполагаемые (б) локальные разломы; 3 — сбросы (а) и сдвиги (б); 4 — впадины, заполненные кайнозойскими осадками; 5 — выходы кристаллического фундамента; 6 — границы куйтунов; 7 — опробованные озера (кружки), холодные источники и скважины (треугольники) и термальные источники (звездочки); 8 — группы озер: Гаргинско-Аргадинская (А), Усть-Аргадинская (Б) и Алгинская (В).

несколько соленых озер, которые перемежаются с действительно пресными озерами. Вариации солености в озерах этой группы составляют 6–70 г/л при рН = 8,8–9,6. Вода с наибольшим содержанием солей отмечена в Гуджиргарнском озере (70,6 г/л), которое в засушливые годы становится рапным.

Подземные воды, питающие озера (оценка по холодным источникам и скважинам), по химическому составу относятся к гидрокарбонатному кальциевому или гидрокарбонатному кальциево-магниевому типам. Только для некоторых из них характерна повышенная доля сульфат-иона и натрия. Минерализация подземных вод составляет 0,08–0,3 г/л, значения величины рН близки к нейтральным (7,4–7,9). В анионном составе термальных вод в основном преобладает сульфат-ион, в катионном — натрий. Их минерализация существенно выше (0,28–1,1 г/л), чем у холодных источников, а значения рН 8,5–9,9.

Еравнинско-Гусиноозерская система малых озер. Эта система из более сотни озер протягивается на расстояние более 500 км от р. Витим на северо-востоке до р. Джиды на юго-западе (рис. 4). В пределах этой системы выделяются две крупных группы озер — *Еравнинская* и *Гусиноозерская*, распола-

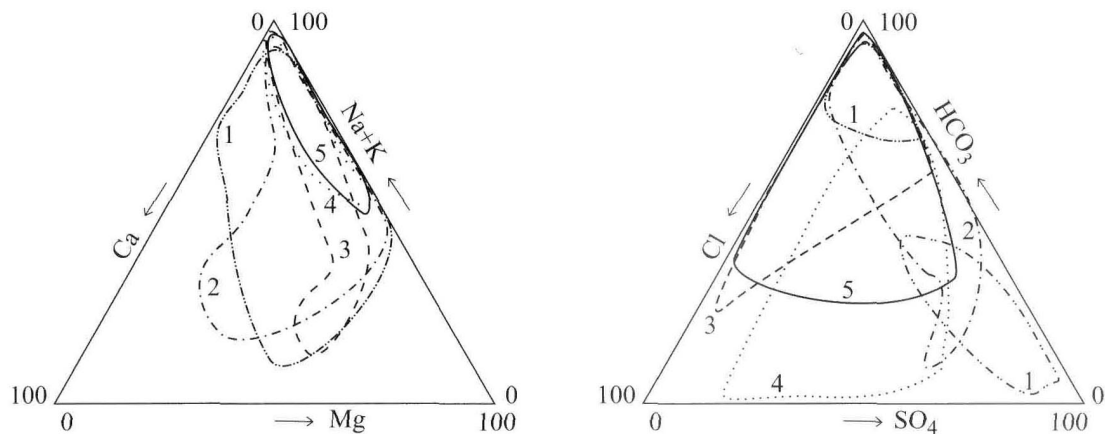


Рис. 3. Химический состав озерных вод изученных систем.

Поля составов озерных вод Баргузинской (1), Еравнинско-Гусиноозерской (2), Ингодинской (3), Онон-Борзинской (4) и Восточно-Монгольской (5) систем минерализованных озер.

гающихся в пределах одноименных впадин. Возможно, выделение этих групп в качестве самостоятельных систем было бы более корректным, однако при этом за рамками рассмотрения остались бы озера, находящиеся в пределах узкой полосы от Еравнинской до Гусиноозерской впадины. Их мы объединили в *Хоринско-Удинскую* группу. В самой западной части расположено несколько соленых озер, выделяемых в качестве *Белоозерской* группы (см. рис. 4).

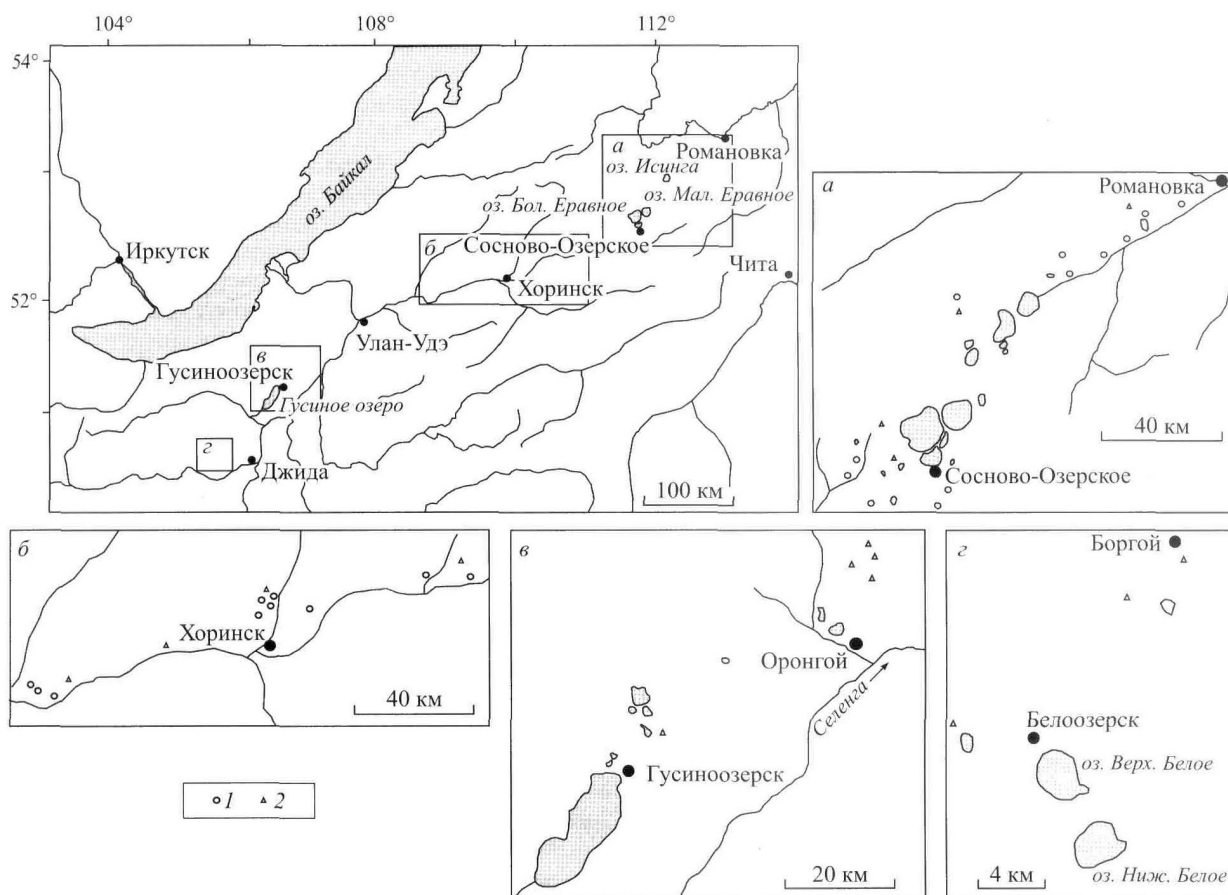


Рис. 4. Схема распространения озер и источников Еравнинско-Гусиноозерской системы малых озер.

На врезках показано расположение опробованных озер и источников Еравнинской (а), Хоринско-Удинской (б), Гусиноозерской (в) и Белоозерской (з) групп озер. 1 — озера; 2 — источники (здесь и на рис. 6).

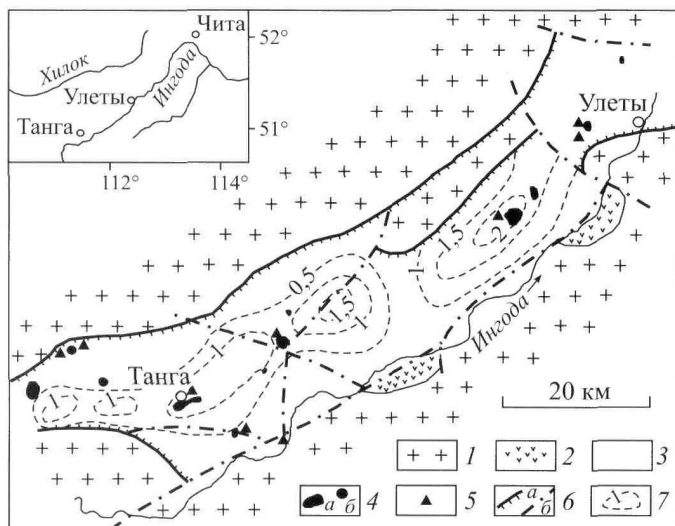


Рис. 5. Схема расположения малых озер, родников и ручьев Ингодинской впадины. Составлена с использованием материалов [26, 27].

1 — палеозойские и мезозойские магматические и метаморфические породы обрамления впадины; 2 — вулканогенные, 3 — нижнемеловые осадочные; 4 — озера с реальными размерами (а) и показанные вне масштаба (б); 5 — опробованные родники и ручьи; 6 — сбросы (а) и прочие разломы (б); 7 — изолинии мощности нижнемеловых отложений впадины, км.

Наибольшее количество озер (более 50-ти) сосредоточено в пределах Еравнинской впадины (Еравнинская группа). Это в основном пресные, щелочные озера с минерализацией 0,1–1,0 г/л, только два из них

являются солоноватыми (TDS 2,4; 4,5 г/л). Наиболее распространенным является гидрокарбонатный кальциево-натриевый или натриево-кальциевый тип вод (см. рис. 3); среднее значение величины pH = 9,1.

Озера Хоринско-Удинской группы близки по химическому составу к озерам предыдущей 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 озер объединяет ультрапресные (Гусиное озеро), пресные, солоноватые и соленые озера, расположенные главным образом в пределах одноименной впадины. Вариации солености составляют 0,2–15,0 г/л при pH = 8,1–9,6. Преобладают гидрокарбонатные 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 0,1–17,0 г/л) и величины pH = 8,0–9,8. По мере увеличения солености озерных вод гидрохимический тип воды меняется от гидрокарбонатного кальций-магниевого до сульфатно-гидрокарбонатного натриевого. Уровень минерализации питающих подземных вод составляет 0,1–0,6 г/л при pH = 7,0–8,8.

Ингодинская система малых озер. В Ингодинской системе малых озер, локализующихся в пределах одноименной впадины, известно более 20 озер, среди которых большинство со «сверхмалыми» размерами и неустойчивым гидрологическим режимом (рис. 5). Озера занимают мелкие котловины округлой или овальной формы, расположенные в незначительных депрессиях рельефа. Наиболее известно оз. Доронинское, где добыча гуджира и донной соды производилась с XIX в. до 1952 г. [14, 15, 22]. Самое глубокое в Ингодинской впадине оз. Арей; его глубина достигает 13,5 м. Все озера и родники находятся в степной зоне впадины, в лесной зоне расположены оз. Арей и оз. Салия, которое питает ручей, берущий начало в заболоченной области лесной зоны.

Озера Ингодинской впадины имеют широкий диапазон вариаций минерализации. От пресных, с общим количеством растворенных солей 0,1–0,5 г/л, до солоноватых и соленых озер с минерализацией от 1,0 до 104,0 г/л. Максимальная концентрация солей отмечена в оз. Хужарном. Озера впадины относятся к щелочному типу с вариациями величины pH от 9,40 до 10,12. Исключение составляют оз. Арейское, расположенное на водоразделе рек Ингода и Хилок, и оз. Солонцовое в бортовой части впадины. В этих озерах величина pH воды составляет 8,4 и 7,9 соответственно.

В ионном составе питающих озера подземных и поверхностных вод преобладают гидрокарбонатные ионы с широким диапазоном вариаций катионного состава: от существенно кальциевого, кальциево-магниево-натриевого до натриевого. Общая минерализация варьирует в широких пределах: от 0,05 г/л (ультрапресная среда) до 1,19 г/л (солоноватая щелочная). Наблюдается закономерное увеличение минерализации воды водотоков с уменьшением абсолютных высот, характерное для горных областей [28].

Онон-Борзинская система малых озер. Онон-Борзинская система включает несколько сотен озер, локализованных в пределах и по обрамлению Цасучейской впадины, а также на прилегающих с юга и востока территориях (рис. 6). Площадь наиболее крупных озер Зун-Торей и Барун-Торей составляет 300 и 580 км² соответственно, в то время как преобладающее количество озер характеризуются очень малыми размерами и неустойчивым гидрологическим режимом. В пределах этой системы выделяются *Северо-Цасучейская*, *Южно-Цасучейская*, *Торейская* и *Борзинская* группы озер.

Рис. 6. Схема распространения озер и источников Онон-Борзинской системы малых озер.

Оконтурены Северо-Цасучейская (1), Южно-Цасучейская (2), Торейская (3) и Борзинская (4) группы озер.

Для Северо-Цасучейской группы характерны наибольшие вариации солёности и компонентного состава озерных вод. Интервал значений TDS составляет 1–210 г/л при вариациях pH от 8,0 до 9,9. Анионный состав озерных вод в зависимости от солёности меняется от гидрокарбонатного через гидрокарбонатно-сульфатный до существенно хлоридного (см. рис. 3). Катионный состав вод менее вариабелен, изменяясь от магниевно-натриевого до натриевого.

Минерализация озер Южно-Цасучейской группы менее разнообразна. Показатели солёности в них варьируют в пределах 0,3–15,0 г/л при pH = 9–10, анионный состав вод изменяется от гидрокарбонатного через гидрокарбонатно-хлоридный к хлоридно-гидрокарбонатному, а катионный — от натриево-магниевое к натриевому.

Озерные воды Торейской группы при не очень широких вариациях значений TDS (0,4–16 г/л) и pH 9,4–9,8 характеризуются значительным разнообразием компонентного состава. По мере увеличения солёности 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 солёности (от 0,4 до 310 г/л). Отчасти такой размах объясняется тем, что в момент опробования Борзинское озеро находилось в стадии пересыхания: в озерной котловине присутствовали небольшие лужи рапы. Значения pH так же варьируют достаточно широко: от 8,1 до 10,0. Гидрогеохимический тип озерных вод меняется по мере возрастания минерализации от гидрокарбонатного кальциевого до хлоридного натриевого.

Подземные воды характеризуются вариациями значений TDS от 0,2 до 1,0 г/л и pH от 6,5 до 8,4. Практически все опробованные воды относятся к гидрокарбонатным; в некоторых источниках Борзинской группы отмечено повышенное содержание хлоридов. Катионный состав вод более разнообразен и варьирует от кальциевого и кальций-магниевое до натриевого.

Восточно-Монгольская система малых озер. В Восточной Монголии насчитывается около 5000 озер [19, 20], 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 (рис. 7).

Южно-Торейская группа объединяет озера, расположенные к югу от Торейских озер; к Керуленской группе отнесена цепочка озер, протягивающаяся вдоль р. Керулен. Цент-

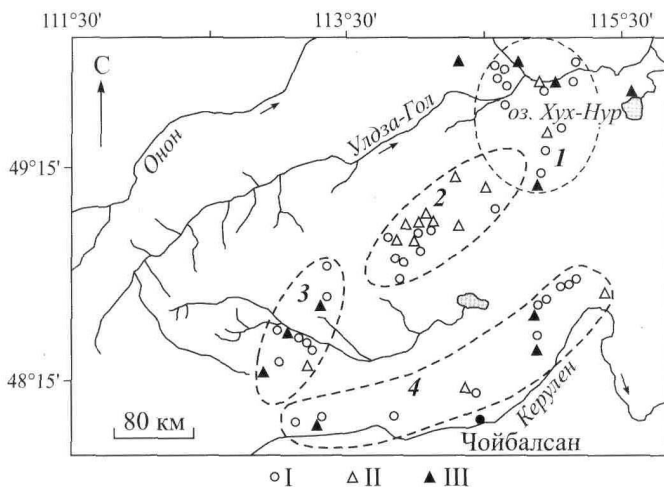


Рис. 7. Схема распространения озер и источников Восточно-Монгольской системы малых озер.

Группы озер: 1 — Южно-Торейская, 2 — Центральная, 3 — Галутинская, 4 — Керуленская. I — озера; II — источники; III — скважины и колодцы.

ральная и Галутинская группы вместе так же занимают протяженную полосу, однако существенные различия химического состава озерных вод не позволили их объединить.

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 (от 71 до 100 %). По мере накопления солей гидрохимический тип изменяется от гидрокарбонатного натриевого до хлоридно-сульфатного натриевого (см. рис. 3).

Озера Центральной группы характеризуются значительными вариациями величины pH (7,2–9,9). В основном они солоноватые; только два озера имеют соленость выше 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. Часть пресных и солоноватых озер во время опробования (2008 г.) находилась в стадии заполнения после нескольких лет безводного режима.

Для озер Галутинской группы характерны широкие вариации солености (от 1 до 144 г/л) и довольно узкий интервал величины pH (8,2–9,2). По мере накопления солей гидрохимический тип озерных вод меняется от гидрокарбонатного натриевого через хлоридно-гидрокарбонатный натриевый к хлоридно-сульфатному натриевому.

В Керуленскую группу входят преимущественно соленые озера (5–99 г/л) при этом TDS воды большинства озер выше 20 г/л, а величина pH варьирует незначительно (от 8,1 до 9,1). В катионном составе преобладает натрий, а в анионном — либо ионы хлора, либо сульфаты.

Для питающих озера 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 пестрый (см. рис. 3).

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СПЕЦИФИКА МИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ОЗЕР

Рассматривая металлогеническую специфику водных систем региона, следует подчеркнуть, что поступление «полезных компонентов» в озерные воды осуществляется главным образом питающими подземными, реже поверхностными водами, а дальнейшее их концентрирование определяется преимущественно процессами эвапоритизации. Соответственно при оценке рудогенерирующего потенциала необходимо рассматривать не только озера, но и питающие их подземные воды. Опробование озер (около 200) и источников (более 100) проводилось с 2002 по 2009 г. методом «одномоментного снимка»: каждая озерная система опробовалась в короткий срок (2–3 недели), во время сухого периода или незначительного выпадения атмосферных осадков (август–сентябрь).

Пробы воды озер отбирались с резиновой лодки на расстоянии от берега не менее 100 м с глубины 0,3–0,5 м. На месте отбора проб определялись температура, электропроводность, pH, Eh, растворенный O₂. Вода для анализа макрокомпонентов собиралась в пластиковые бутылки 1,5 л. Пробы воды на микрокомпоненты отбирались медицинскими одноразовыми шприцами в полиэтиленовые контейнеры (15 мл), предварительно подготовленные в лаборатории: очищенные HNO₃ 0,1M и промытые деионизированной водой. На месте отбора проб образцы отфильтрованы через стерильные шприцевые насадки «Minisart» (d = 2,5 см) из ацетата целлюлозы с размерами пор 0,45 мкм и немедленно подкислены азотной кислотой марки «ultrapure» («Merk», Германия) до pH = 1–2.

Анализ макрокомпонентного состава воды сделаны в химической лаборатории Института геохимии СО РАН по стандартным методикам для соленых вод [29]. Микроэлементный состав определялся на масс-спектрометре ELEMENT2 (Finnigan MAT, Германия). Правильность анализа контролировалась с помощью сертифицированного раствора IQC-026 (NIST, США). Для градуировки прибора на микроэлементный состав использовали многоэлементные растворы CLMS-1,2 и 3 фирмы SPEX США. Возможности метода позволили определить содержания следующих микроэлементов: Li, B, Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Ge, Mo, Cd, Sb, Cs, Ba, REE, W, Pb, Th, U.

Подземные воды. Общее содержание растворенных солей в подземных водах редко превышает 1 г/л. Наиболее минерализованными являются термальные воды Баргузинской впадины и холодные источники Восточно-Монгольской системы (табл. 1). Содержание большинства проанализированных элементов в источниках всех систем не превышает первых мкг/л. 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 сотен мкг/л, редкоземельных элементов и молибдена — десятков мкг/л.

Таблица 1

Гидрохимические характеристики источников рассматриваемого региона

Показатели	Озерные системы					
	1а	1б	2	3	4	5
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	8,0–10,0	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
			мкг/л			
Li	43–1330				5–164	5–530
B	44–220				13–470	9–650
V					0–26	0,7–52
Ge	2–11,3			0,02–25		
As					0,5–25	0,9–73
Se					0,1–4,3	0,1–7
Br	19–108		15–460	Не опр.	Не опр.	12–1300
Rb	5–108					
Sr	110–3000		30–2300	44–1500	80–1600	
Mo	0,5–45		1,1–51		0,5–25	1,3–20
Sb					0,1–28	
Cs	0,6–38					
REE						0,01–11
W	7,2–82					
U			0–27		0–22	1–176

Примечание. Здесь и в табл. 2 озерные системы: 1 — Баргузинская (а — термальные, б — холодные); 2 — Еравнинско-Гусиноозерская; 3 — Ингодинская; 4 — Онон-Борзинская; 5 — Восточно-Монгольская. Шрифтом выделены повышенные содержания элементов.

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 (табл. 2). Большинство исследованных озер щелочные, пресные или солоноватые. Отчетливо содовый

Таблица 2

Гидрохимические характеристики озерных вод рассматриваемого региона

Показатели	Озерные системы				
	1	2	3	4	5
TDS (г/л)	0,1–71	0,1–17	0,1–104	0,3–380	0,5–280
pH	8,0–10,5	7,6–10	8,4–10,1	8,0–10,14	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
			мкг/л		
Li	1,1–2300	2,3–1000	1–1000	9–442	4–48000
B	3,5–6600	3,3–1100		52–65000	42–92000
V			0,3–176	1–500	1–646
Ge			0,02–25	0,01–40	0,8–6
As	0,1–140			0,5–14000	19–7200
Se				0,05–56000	0,5–44
Br	5–14600	9–23800	Не опр.	Не опр.	29–777000
Sr	75–6000	92–5600	44–1500	96–13100	91–23800
Zr		0,01–375		0,1–1650	0,03–790
Mo	0,5–45	0,3–472		1–670	9–1420
Sb				0,2–100	0,6–86
Cs					0,005–26
REE				0,05–170	0,1–119
W	1–550			0,04–407	0,2–522
U		0,1–154		3,1–2200	6,8–4800

тип эволюции имеют озера Ингодинской впадины. В Баргузинской и Еравнинско-Гусиноозерской озерных системах увеличивается (вплоть до преобладания) доля сульфат-иона. Озера Восточно-Монгольской и особенно Онон-Борзинской систем очень неоднородны по геохимическому типу вод, и в каждой из них можно выделить несколько компактно расположенных групп озер с различной геохимической спецификой.

Повышенное содержание некоторых элементов в питающих подземных водах (см. выше) обеспечило накопление солей в озерах Восточной Монголии, в меньшей степени в Онон-Борзинской системе. Для них характерен самый высокий уровень концентраций элементов. Содержание лития здесь достигает кондиционных [2], составляя около 50 мг/л. В некоторых озерах отмечаются высокие концентрации урана (до 5 мг/л), молибдена (до 1,4 мг/л), W (до 0,5 мг/л), редкоземельных (до 0,1 мг/л) и некоторых других элементов.

ХОЗЯЙСТВЕННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ МИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ОЗЕР

Практическое использование малых озер рассматриваемого региона в прошлом веке ограничивалось кустарной или полупромышленной добычей соды (гуджира), грязелечением и рекреационной деятельностью, а также любительским рыболовством и охотой. Позднее на некоторых озерах был организован промышленный лов рыбы (Еравнинские озера). Все эти виды могут и должны развиваться (за исключением добычи соды), однако мы хотели бы остановиться на возможном использовании озерных вод в качестве жидкой руды.

Наши исследования показали, что обнаружение на юге Сибири и в Монголии объектов по типу южноамериканских саларов или тибетских металлоносных озер очень маловероятно: либо концентрации полезных компонентов значительно ниже рентабельных, либо объемы 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) коррекцией стратегии добычи полезных ископаемых с переносом акцента на комплексную разработку небольших месторождений передвижными установками; 3) усилением экологических требований к разработке полезных ископаемых.

Экологически чистое извлечение полезных ископаемых предполагает не только отсутствие нарушений 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 экскурсии 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, приводившие к концентрированию в них солей и иссушению, вплоть до продолжительных безводных периодов с последующим периодическим наполнением водоема. Другими словами, при минимально рентабельных концентрациях полезных компонентов каждое такое озеро можно рассматривать в качестве источника возобновляемой руды, что снимает или значительно ослабляет проблему ее 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, не будет остро стоять проблема утилизации высокоагрессивных вод после извлечения металлов, поскольку соленые воды будут оставаться там же, где они были до промышленного освоения. Если же проводить технологические операции зимой или ранней весной, то добавляются три дополнительных 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 минерализованных озер Западного Прибайкалья [30] показали, что соленость вод зимой возрастает в два-четыре раза; 3) отсутствует необходимость строительства специальных отстойников или резервуаров для использованных вод.

Таким образом, системы малых озер, широко распространенные в пределах Забайкалья и Восточной Монголии, чрезвычайно разнообразны по уровню минерализации и химическому составу и обладают большим потенциалом хозяйственного использования, в том числе и для промышленного извлечения ряда металлов (Li, U, REE и др.).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Интеграционного проекта СО РАН (№ 38), Интеграционного проекта СО РАН–Монголия и Российского фонда фундаментальных исследований (09–05–00884).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шварцев С. Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. — М.: Недра, 1998. — 666 с.
2. Крайнов С. Р., Рыженко Б. Н., Швец В. М. Геохимия подземных вод. — М.: Наука, 2004. — 677 с.
3. Склярова О. А., Чудненко К. В., Бычинский В. А. Физико-химическая модель эволюции вод малых озер внутриконтинентальных областей в условиях холодного климата // Геохимия. — 2011. — № 7 (в печати).
4. Johannesson K. H., Lyons W. B., Graham E. Y., Welch K. A. Oxyanion concentrations in the Eastern Sierra Nevada rivers — 3. Boron, molybdenum, vanadium, and tungsten // Aquatic Geochem. — 2000. — Vol. 6. — P. 19–46.
5. Jones B. F. and Deocampo D. M. Geochemistry of Saline Lakes // Treatise on Geochem. Vol. 5. — Elsevier Ltd, 2003. — P. 393–424.
6. Green W. J., Stage B. R., Bratina B., et al. Nickel, copper, zinc and cadmium cycling with manganese in Lake Vanda (Wright Valley, Antarctica) // Aquatic Geochem. — 2004. — Vol. 10. — P. 303–323.
7. Shacat J. A., Green W. J., Decarlo E. H., Newell S. The geochemistry of Lake Joyce, McCurdo Dry Valley, Antarctica // Aquatic Geochem. — 2004. — Vol. 10. — P. 325–352.
8. Chen C.-T. A., Wu J.-T., Wang B.-J., Huang K.-M. Acidification and trace metals of lakes in Taiwan // Aquatic Geochem. — 2004. — Vol. 10. — P. 33–57.
9. Hamilton P. B., Gajewski K., Atkinson D. E., Lean D. R. S. Physical and chemical limnology of 204 lakes from Canadian Arctic Archipelago // Hydrobiologia. — 2001. — Vol. 457. — P. 133–148.
10. Moiseenko T. I., Gashkina N. A. The distribution of trace elements in surface continental waters and the character of their migration in water // Water Researc. — 2007. — Vol. 34, № 4. — P. 423–437.
11. Radke L. C., Howard K. W. F. Influence of groundwater on the evaporative evolution of saline lakes in the Wimmera of south-eastern Australia // Hydrobiologia. — 2007. — Vol. 591. — P. 185–205.
12. Zheng M. On salinology // Hydrobiologia. — 2001. — Vol. 446. — P. 339–347.
13. Downing J. A., Prairie Y. T., Cole J. J. et al. The global abundance and size distribution of lakes, ponds and impoundments // Limnol. Oceanogr. — 2006. — Vol. 51, № 5. — P. 2388–2397.
14. Власов Н. А., Павлова Л. И., Чернышев Л. А. Минеральные озера // Минеральные воды южной части Восточной Сибири. — М.: Недра, 1961. — С. 189–245.
15. Минеральные воды южной части Восточной Сибири / Ред. Н. А. Власов, В. Г. Ткачук, Н. И. Толстихин. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962. — Т. 2. — 198 с.
16. Склярова О. А., Скляров Е. В., Федоровский В. С. Структурно-геологический контроль локализации и состава воды озер и родников Приольхонья // Геол. и геофиз. — 2002. — Т. 43, № 8. — С. 732–755
17. Склярова О. А., Скляров Е. В., Федоровский В. С., Санина Н. Б. Минеральные озера Приольхонья: вопросы генезиса и эволюции // География и природ. ресурсы. — 2004. — № 4. — С. 44–49.
18. Evans R. K. A report on the world's Lithium resources and reserves. 2008. — <http://lithiumabundance.blogspot.com/>
19. Egorov A. N. Mongolian salt lakes: some features of their geography, thermal patterns, chemistry and biology // Hydrobiologia. — 1993. — Vol. 267. — P. 13–21.
20. Williams W. D. Chinese and Mongolian saline lakes: a limnological overview // Hydrobiologia. — 1991. — Vol. 210. — P. 39–66.
21. Metallogenesis and Tectonics of Northeast Asia: U.S. Geological Survey Professional Paper 1765 / Ed. W. J. Nokleberg. — 2010. — 624 p.
22. Франк-Каменецкий А. Г. Доронинское содовое озеро в Забайкалье // Изв. Биол.-геогр. науч.-исслед. ин-та при ИГУ. — Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1924. — Т. 1, вып. 4. — С. 3–33.
23. Обожин В. Н., Богданов В. Т., Кликунова О. Ф. Гидрохимия рек и озер Бурятии. — Новосибирск: Наука, 1986. — 185 с.
24. Намсараев Б. Б., Зайцева С. В., Хахинов В. В. и др. Минеральные источники и озера Баргузинской долины. — Улан-Удэ: Изд-во Бурят. ун-та, 2007. — 100 с.
25. Лунина О. В., Гладков А. С., Неведрова Н. Н. Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история развития. — Новосибирск: Гео, 2009. — 316 с.
26. Геологическая карта Читинской области. М-б 1:500 000 / Ред. И. Г. Рутштейн. — М.: МПГИТ, 1992.
27. Скляров Е. В., Мазукабзов А. М., Мельников А. И. Комплексы метаморфических ядер Кордильерского типа. — Новосибирск: Изд-во ИНЦ ОИГГМ СО РАН, 1997. — 197 с.
28. Основы гидрогеологии. Т. 2: Гидрогеохимия / Отв. ред. С. Л. Шварцев. — Новосибирск: Наука, 1982. — 286 с.
29. Унифицированные методы анализа вод / Отв. ред. Ю. Ю. Лурье. — М.: Химия, 1971. — 243 с.
30. Склярова О. А. Геохимия и генезис озер Приольхонья (Западное Прибайкалье): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. — Иркутск, 2004. — 17 с.

Поступила в редакцию 23 мая 2011 г.