
Гидрогеология

УДК 556.551

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ВТОРИЧНОГО МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ В ОЗЕРАХ ЗАПАДНОЙ МОНГОЛИИ

Колпакова Марина Николаевна,

ассистент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30; аспирант, мл. науч. сотр. Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 634055, Томск, Академический пр., 4.
E-mail: marina.kolpakova@gmail.com

Исупов Виталий Петрович,

д-р хим. наук, ведущ. науч. сотр., зав. лабораторией Института химии твердого тела и механохимии, Россия, 630128, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18. E-mail: isupov@solid.nsc.ru

Шварцев Степан Львович,

д-р. геол.-минерал. наук, профессор, зав. кафедрой гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30; зав. лабораторий Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 634055, Томск, Академический пр., 4.
E-mail: tomsk@igng.tsc.ru

Подробное изучение состава озер с использованием современных методов физико-химических расчетов взаимодействия озерных вод с различными минералами дает возможность с качественно новых позиций подойти к вопросу о вторичном минералообразовании и его роли в формировании состава вод.

Цель исследования: установить степень равновесия озерных вод с простыми солями (карбонатными, сульфатными, хлоридными) и алюмосиликатными минералами.

Методы: вычисление квотанта реакции и активных концентраций компонентов определялись с использованием программного комплекса Hydro Geo по методу Питцера для высокоминерализованных вод и рассолов.

Результаты: Представлено состояние равновесия озерных вод Западной Монголии с карбонатными, сульфатными, хлоридными и алюмосиликатными минералами. Поскольку соленые озера подвержены интенсивному испарению и соленость их может достигать 300 г/л и более, равновесие озерных вод с различными минералами носит своеобразный характер, достигая насыщения вод относительно кальцита, доломита, тенардита, галита, реже соды, альбита, мусковита и Mg-хлорита. Установлено, что каждый химический тип озер характеризуется определенным набором минералов во вторичной фазе, который зависит не только от химического состава самих озер, но и от состава горных пород, расположенных на территории их водосборных бассейнов. Сравнительный анализ реальных донных осадков озер с расчетными данными показал достоверность полученных результатов.

Ключевые слова:

Физико-химическое моделирование, равновесие в системе «вода–порода», соленые озера, Монголия, донные осадки.

Взаимодействие воды с горными породами с позиций равновесной и неравновесной термодинамики для природных сред является в последние годы объектом повышенного внимания, поскольку позволяет более полно изучать природу геохимической специализации озер, механизмы их формирования, источники химических элементов [1–5], процессы озерной седиментации [6, 7], механизмы вторичного минералообразования [8, 9], распределение микрокомпонентов в озерах [10] и роль различных факторов в формировании состава озер [11]. В этом плане большой интерес представляют озерные воды Западной Монголии, где на относительно небольшой территории в схожих климатических и ландшафтно-геоморфологических условиях расположены различные геохимические типы озер: содовые, сульфатные и хлоридные. Поскольку формирование состава озер начинается еще на водоразделах и продолжается на всей территории водосбора, где происходит постоянное взаимодействие жидкой и твердой фаз, то выявление механизма этого взаимодействия невозможно без детального изучения системы «вода–порода».

Геологическое строение района исследования

Территория Западной Монголии входит в состав средней части Центрально-Азиатского складчатого пояса и включает два основных района: Алтайскую горную область и Котловину больших озер. Территория объединяет разновозрастные складчатые сооружения, в которых «заключены» древние континентальные массивы и блоки фундамента. В геологическом строении Алтайской горной области принимают участие блоки палеозойского фундамента и смятые в складки породы мезозойско-кайнозойского возраста. Современный рельеф останцовых гор, мелкосопочников и межгорных равнин Котловины Больших озер (КБО), в различной степени расчлененных эрозией, выработан на древних осадочных и интрузивных образованиях, а сложная система впадин Котловины Больших озер является унаследованной от мезозойских структур. Оживление новейших тектонических движений особенно резко проявилось в плиоцен-четвертичное время и обусловило рост высоких гор, ограничивающих КБО, расчленение ее на части и прогибание в центральных частях [12].

Методы исследования

Начиная с 2008 г. наш коллектив занимается изучением проблем формирования состава и накопления различных химических элементов в озерных водах Западной Монголии. За это время нами исследовано более 100 различных водных объектов на данной территории, свыше 40 из которых принадлежат соленым озерам. Подробная методика отбора проб и химико-аналитических определений, выполненных в проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии научно-образовательного центра «Вода» ИПР ТПУ (г. Томск) и в лаборатории Института химии твер-

дого тела и механохимии СО РАН (ИХТТМ СО РАН), уже была представлена нами ранее [13, 14]. Расчет равновесия воды с горными породами проводился по методике, изложенной в работе Р.М. Гаррелса и Ч.Л. Крайста [15] для температуры 25 °С и давления 0,1 МПа. Расчеты необходимых для вычисления квотанта реакций и активных концентраций компонентов определялись с использованием программного комплекса Hydro Geo, разработанного М.Б. Букаты [16] по методу Питцера [17] для высокоминерализованных вод и рассолов. При настройке модели в данном программном комплексе учитывались минералы, наиболее часто встречающиеся на исследуемой территории, т. е. карбонатные (кальцит, магнезит, доломит), сульфатные (гипс, тенардит), хлоридные (галит, сильвин), а также некоторые алюмосиликатные минералы. Решение вопроса о направлении преобразования минерального вещества в сложившихся гидрогеохимических условиях проводилось с использованием индекса неравновесности (SI), равного $SI = \lg \frac{Q}{K}$, где K – термодинамическая константа реакции растворения породы или минерала; Q – квотант реакции, представляющий собой фактическое значение произведения активностей продуктов реакции, отнесенного к произведению активностей исходных веществ [15, 18]. По мере насыщения вод относительно какого-либо соединения индекс неравновесности уменьшается, стремясь к нулю, при пересыщении вод его значения становятся положительными; нулевое значение характеризует равновесное состояние.

Рентгенофазовый анализ донных осадков озер осуществлялся в лаборатории ИХТТМ СО РАН с использованием дифрактометра ДРОН-4, $\text{Cu-K}\alpha$ излучение, скорость съемки 2 °/мин, интервал углов съемки $2\Theta = 5\text{--}70^\circ$ (донные отложения), $20\text{--}60^\circ$ (солевые осадки). Анализ фазового состава осуществлялся на основе программы Search-Match.

Химический состав исследуемых озер

В настоящее время, геохимическая классификация озерных вод не разработана. Поэтому нами за основу была взята система Курнакова–Валяшко [19] с добавлением некоторых параметров. Мы выделили три геохимических типа озер:

- 1) содовые, к которым отнесли все озера с $\text{pH} \geq 9,0$;
- 2) хлоридные, если $\text{pH} < 9,0$, а среди анионов преобладает хлор;
- 3) сульфатные, если $\text{pH} < 9,0$, но среди анионов доминирует сульфат.

Исследуемые озера достаточно многообразны по химическому составу, солености воды, pH, а также содержанию SiO_2 (табл. 1). Высокая минерализация характерна для сульфатных и хлоридных озер, высокая щелочность – для содовых. Преобладающим анионом в большинстве изученных озер является хлор (его содержание достигает 192 при среднем значении – 20 г/л), а катионом – натрий

(до 105, среднее – 18 г/л). По солености исследуемые озерные воды варьируют от умеренно солоноватых до сверхкрепких рассолов: минерализация воды хлоридного типа озер достигает 363 г/л. Более подробное описание состава озерных вод представлено в работах [13, 14].

Таблица 1. Средние значения макрокомпонентного состава (мг/л), pH и общей минерализации (г/л) для озер Западной Монголии

Химические типы озер	Содовые			Хлоридные			Сульфатные		
	мин	макс	среднее	мин	макс	среднее	мин	макс	среднее
pH	9,0	9,9	9,4	6,90	9,0	8,2	7,1	8,9	8,0
(CO ₃) ²⁻	103	1207	530	1,9	545	139	0,6	492	149
(HCO ₃) ⁻	884	7101	2482	445	4697	901	403	1696	821
(SO ₄) ²⁻	510	4800	3084	92	56393	15537	802	116616	39146
Cl ⁻	640	6300	3686	234	191700	51783	231	75550	4906
Ca ²⁺	8,3	100	80	4,8	2213	57	32	728	224
Mg ²⁺	15	626	205	42	26750	5362	134	24140	1332
Na ⁺	557	8026	4659	239	105160	29519	374	57977	20211
K ⁺	18	307	175	16	21575	205	31	1562	419
M	4,0	28,5	31,2	1,1	363	105	2,0	278	83,0
SiO ₂	12,0	42,8	15,1	1,1	43,3	10,8	2,3	42,0	15,7
Количество озер	15			20			7		

Равновесие озерных вод с простыми солями и глинистыми минералами

В соответствии с растворимостью минералов соляных озер первыми в ходе испарения воды кристаллизуются карбонаты щелочно-земельных металлов. Среди них наиболее широким распространением пользуется кальцит, поэтому рассмотрим, прежде всего, состояние его равновесия с озерными водами Западной Монголии. На рис. 1 видно, что подавляющая часть озерных вод пересыщена этим минералом, поэтому концентрирование Са в этих водах невозможно без изменения характера геохимической среды. Исключением являются

только несколько хлоридных и сульфатных озер, в которых наблюдаются довольно низкие концентрации кальция (51–225 мг/л) и значения pH (6,9–7,4). Содовые озера при этом все без исключения насыщены к кальциту. Активность иона CO₃²⁻ в этих водах намного выше, чем при более низких pH, и его содержания достаточно для достижения равновесия с кальцитом даже при низких содержаниях кальция.

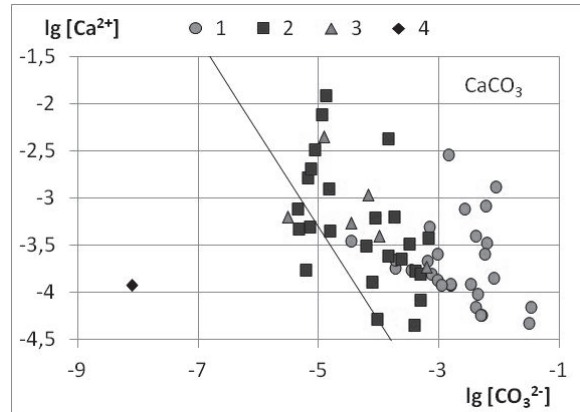


Рис. 1. Степень насыщения содовых (1), сульфатных (2) и хлоридных (3) озерных вод, а также атмосферных осадков (4) относительно кальцита в зависимости от значений pH

При определенных концентрациях карбонат-ионов и магния в растворе возможно образование магнезита или доломита. Диаграммы равновесия, представленные на рис. 2, показывают полное насыщение озерных вод этими минералами. Соответственно, озерные воды наряду с кальцитом способны высаживать и магнезит, и доломит в донных осадках в условиях имеющей место геохимической среды. При этом накопление магния в растворе прекращается, а доминирующим становится ион натрия, у которого в этих геохимических условиях нет контролирующего минерала.

При изучении состояния равновесия озерных вод с содой (Na₂CO₃·10H₂O, рис. 3) зафиксировано, что в сравнении с другими геохимическими типами именно содовые озера наиболее близки к дости-

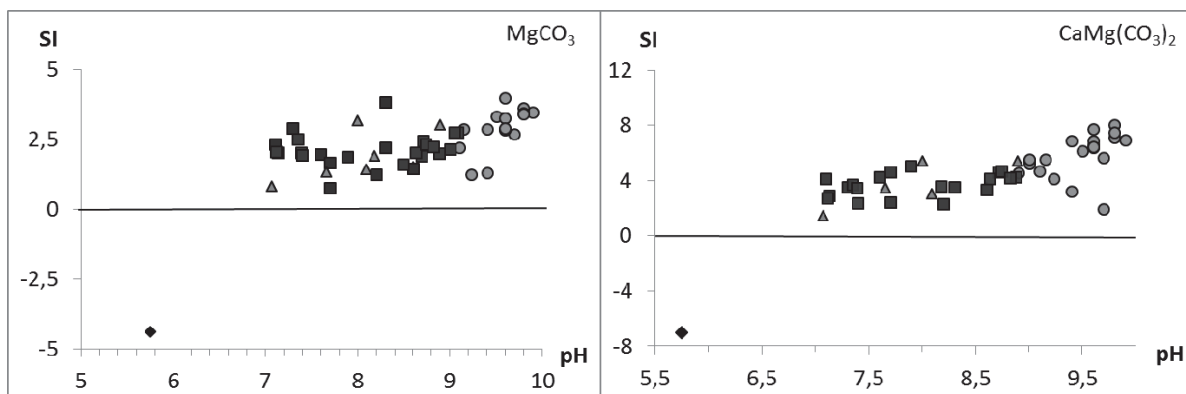


Рис. 2. Степень насыщения озерных вод и атмосферных осадков относительно магнезита и доломита в зависимости от значений pH вод (условные обозначения – на рис. 1)

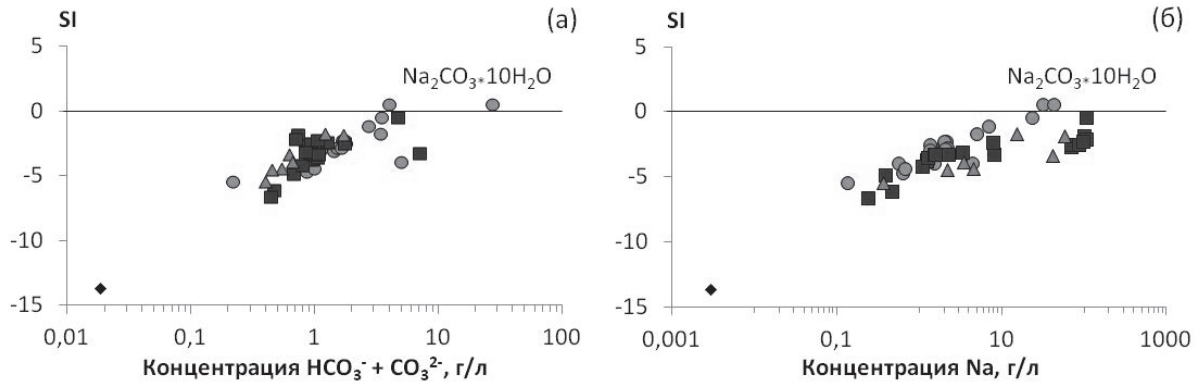


Рис. 3. Степень насыщения озерных вод и атмосферных осадков относительно соды в зависимости от содержаний в них суммы карбонат- и гидрокарбонат-ионов (а) и натрия (б) (условные обозначения – на рис. 1)

жению равновесия с этим минералом. Кроме того, содовые озера Цохор-Нуур и Бага-Нуур 2, в которых, при содержании карбонат- и гидрокарбонат-ионов 5 и 28 г/л, наблюдаются еще и самые высокие концентрации натрия – более 30 г/л. Из озер хлоридного типа лишь одно озеро Бага-Гашун-Нуур находится близко к линии насыщения вод содой. Это связано с максимальной среди озер этого типа долей карбонатных солей, достигающей среднего значения для содовых озер (218 мг-экв/л).

В отличие от карбонатов, в подавляющем большинстве озер нет равновесия вод с сульфатными минералами. Пересыщение относительно гипса (рис. 4) зафиксировано в 10 озерах, из которых три – сульфатных, шесть – хлоридных и одно – содовое. Во всех этих озерах содержание сульфат-иона более 12 г/л, кальция – 160 мг/л, а минерализация превышает 130 г/л. Помимо этих озер, есть также и другие, в которых также зафиксированы высокие концентрации сульфат-иона (19–52 г/л), однако в них наблюдаются очень маленькие концентрации Са (12–50 мг/л), которых недостаточно для насыщения воды гипсом. Неравновесно большинство озерных вод и с тенардитом (рис. 4). Точки, приближающиеся к этому равновесию, принадлежат в основном хлоридному типу озер с повышенным содержанием натрия и сульфат-ионов и при уменьшении температуры характер равновесия может сдвинуться в сторону образования солей.

С галитом равновесие наблюдается только в хлоридных оз. Давсан-Нуур, Бага-Гашун-Нуур и Дэвтэрийн-Давст-Нуур, соленость которых выше 300 г/л и является максимальной среди всех изученных нами озер (рис. 5).

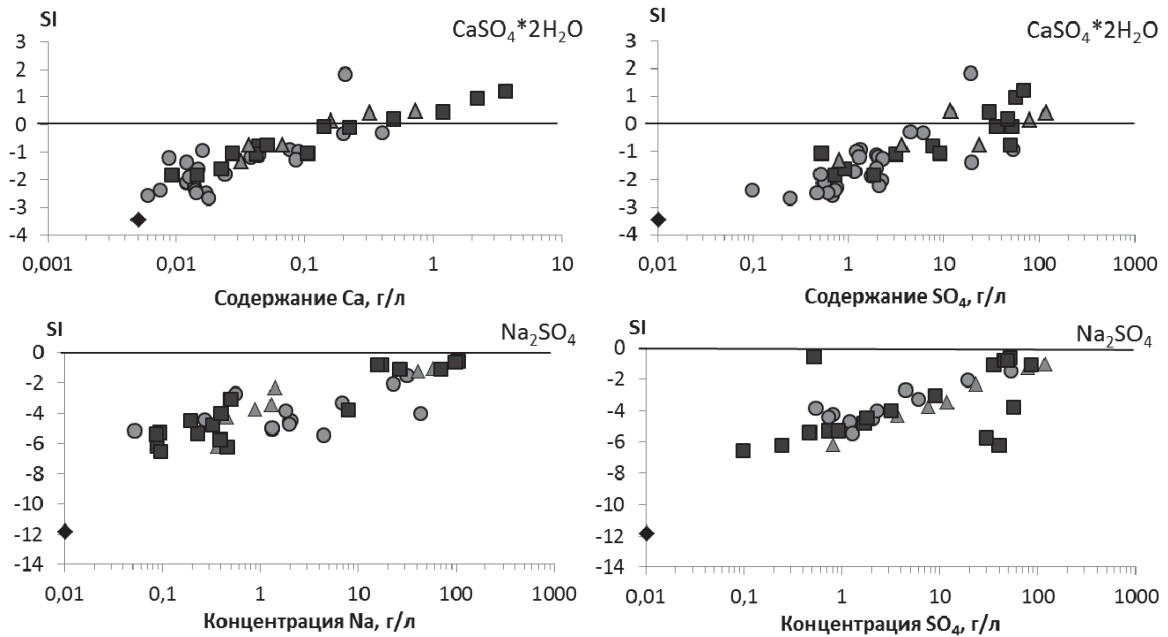


Рис. 4. Степень насыщения озерных вод и атмосферных осадков относительно гипса и тенардита в зависимости от содержаний в них сульфатов, кальция и натрия (условные обозначения – на рис. 1)

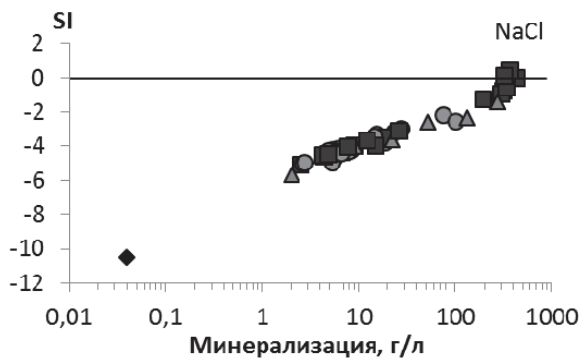


Рис. 5. Степень насыщения озерных вод и атмосферных осадков относительно галита в зависимости от их минерализации (условные обозначения – на рис. 1)

В результате проведенных расчетов установлено, что большинство озерных вод Западной Монголии насыщены относительно кальцита, доломита, магнетита, реже относительно соды, гипса, тенардита, галита, то есть способны высаживать их из раствора, формируя новообразованную вторичную твердую фазу, которая сохраняется на протяжении всего времени взаимодействия в системе вода–порода. При этом формирование на протяжении всего времени карбонатных, сульфатных и хлоридных солей носит закономерный характер, который определяется такими параметрами геохимической среды, как pH, температура и минерализация озерных вод.

Другой тип взаимодействия характерен для алюмосиликатов, растворение которых протекает по механизму гидролиза [9]. Многокомпонентный характер реакций гидролиза не позволяет решать проблемы равновесия алюмосиликатов с водным раствором путем построения простых диаграмм как это принято для простых солей. Для них используются более сложные диаграммы полей устойчивости [15], с помощью которых нам удалось проанализировать закономерности химического равновесия некоторых глинистых минералов (рис. 6).

Анализ полученных данных показал, что большая часть содовых вод оказалась сосредоточена в области устойчивости Са-монтмориллонита, меньшее количество – в полях каолинита и гиббсита (рис. 6). Кроме того, основная их масса пересыщена относительно кварца. Такое поведение точек объясняется тем, что при высоких значениях pH растворимость кремнекислоты тоже повышается, что и способствует перемещению точек вод содового типа в сторону насыщения монтмориллонитом, который является более затратным при процессе минералообразования в отношении кремния. На диаграмме полей устойчивости минералов в зависимости от активностей в воде ионов кремнекислоты, pH, а также калия, натрия или магния, содовые воды ложатся исключительно в поле мусковита, альбита и Mg-хлорита,

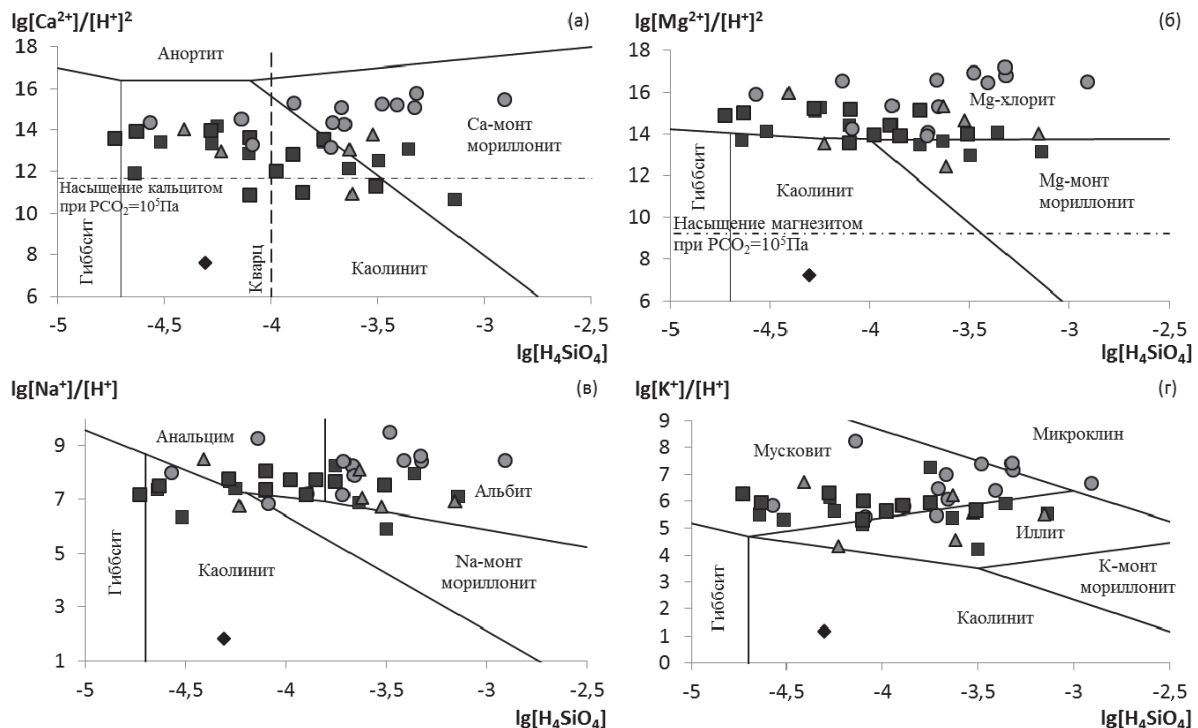


Рис. 6. Равновесие озерных вод с алюмосиликатными минералами при температуре 25 °С в различных системах: а) $HCl-H_2O-Al_2O_3-CaO-CO_2-SiO_2$; б) $HCl-H_2O-Al_2O_3-MgO-CO_2-SiO_2$; в) $SiO_2-Al_2O_3-Na_2O-CO_2-H_2O$; г) $SiO_2-Al_2O_3-K_2O-CO_2-H_2O$. Штриховыми линиями показано насыщение вод кварцем и аморфным кремнеземом. Штрихпунктирная линия указывает на насыщение вод кальцитом (а) и магнетитом (б) при соответствующем парциальном давлении P_{CO_2} (условные обозначения – на рис. 1)

соответственно (рис. 6). Следует обратить внимание, что в любой рассматриваемой системе на рис. 6 точки содовых озер расположены значительно выше хлоридных. Это связано с более высокими значениями в них рН.

Сульфатные воды имеют более низкие активности катионов по сравнению с содовыми водами, поэтому точки располагаются ниже, хотя основная масса их все также находится в области устойчивости с альбитом, мусковитом, Mg-хлоритом и Самонтмориллонитом (рис. 6).

Активности кремнекислоты в озерах хлоридного типа очень разнообразны и воды находятся в равновесном состоянии со многими минералами. Низкие концентрации Са и относительно низкое рН хлоридных озер, совместно с низким содержанием в них кремнезема, в отдельных случаях приводит к равновесию их вод с каолинитом, который иногда встречается в озерах среди глинистых минералов. Кроме того, некоторые точки находятся на границе полей устойчивости этого минерала с Са-монтмориллонитом, что может указывать на образование смешанных глин. Поскольку большинство точек равновесны также и относительно Mg-хлорита (рис. 6), то не исключаются случаи образования каолинит-монтмориллонитовых смешанных глин с хлоритовыми слоями.

Поскольку озерные воды насыщаются карбонатными минералами раньше, чем алюмосиликатными [9], то подавляющая часть поступающих в раствор из горных пород Са и Mg связывается именно карбонатными минералами. Иллит и разные по составу монтмориллониты также связывают часть Na, Mg, K и Si, растворенных в озерной воде, и выступают геохимическими барьерами на пути формирования минералов, расположенных в верхней части рис. 6 – альбита, мусковита. Однако глинистые минералы, в отличие от карбонатных, не способны связать весь поступающий в озерную воду Na, K, Si, поэтому равновесие с альбитом, анальцимом, мусковитом достигается.

Обсуждение результатов

Для проведения анализа достоверности полученных результатов нами были изучены донные осадки некоторых из опробованных нами озер. Полученные результаты приведены в табл. 2. Сравнение результатов численных расчетов с реальными природными осадками соленых озер подтверждает наличие большей части описанных выше минералов в донных отложениях. Так, например, основной формой выпадения карбонатов во вторичной минеральной фазе являются карбонаты кальция и кальция-магния, а вот магнезита в большинстве донных осадков не обнаружено (табл. 2).

Такое распределение карбонатных минералов зависит от соотношения концентраций Ca^{2+} и Mg^{2+} в растворе. В исследуемых озерах происходит в основном образование доломита, поскольку отношение $Mg/Ca > 7$, а вот при достижении $Mg/Ca > 40$ (что встречается редко) доломит уже переходит в

магнезит [20]. В донных осадках оз. Давсан-Нуур и Бага-Гашун-Нуур, соленость которых превышает 300 г/л, нами обнаружены такие минералы, как тенардит и галит, что также совпадает с результатами численных расчетов.

Таблица 2. Наличие твердых фаз в изученных донных и солевых отложениях некоторых озер Западной Монголии

Твердая фаза	Название озера				
	Давсан-Нуур	Бага-Гашун-Нуур	Их-Гашун-Нуур	Хиргис-Нуур	Шаазгай-Нуур
Геохим. тип озера	Хлоридный	Хлоридный	Содовый	Содовый	Содовый
Глубина отбора, см	0–5	0–5	0–5	0–5	0–5
Кальцит	н. опр.	+	–	+	+
Магнезит	н. опр.	+	–	–	–
Карбонаты*	н. опр.	+	+	+	+
Тенардит	+	+	н. опр.	н. опр.	н. опр.
Галит	+	+	н. опр.	н. опр.	н. опр.
Каолинит	н. опр.	+	+	+	+
Монтмориллонит*	н. опр.	–	–	–	+
Альбит	н. опр.	+	+	+	+
Анортит	н. опр.	+	+	+	–
Кварц	н. опр.	+	+	+	+
Мусковит	н. опр.	+	+	+	+

*формулы твердой фазы: Монтмориллонит – $Na_{0,3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_{2,4}H_2O$, Карбонаты кальция и магния: Твердый раствор на основе кальцита (низкое содержание магния) – $Mg_{0,03}Ca_{0,97}CO_3$, Хюнтит (двойной карбонат магния-кальция) – $Mg_3Ca(CO_3)_4$.

Выпадение алюмосиликатных минералов в виде вторичных минералов также подтверждается данными РФА (табл. 2). Поскольку образование глин в изученных озерах по результатам расчетов должно быть в основном кальциевого состава, Na-монтмориллонита в донных осадках большинства озер не обнаружено. Каолинит также представлен в основном минералом кальциевого состава, а образование слюд представлено в данном случае К-мусковитом. Альбит и анортит также обнаружены в донных осадках озер, причем первый в большинстве своем в содовых озерах, второй – в хлоридных. Такое распределение натриевых минералов в озерах разного типа связано с содержанием кремнезема, преобладание которого свойственно для содовых озер.

Таким образом, система «озерная вода – вторичное минералообразование» является весьма многообразной по составу вторичных минералов. Каждый геохимический тип озерных вод при этом характеризуется определенным набором минералов во вторичной фазе, который определяется не только химическим составом самих озер, но составом горных пород, расположенных на территории водосборных бассейнов озер. В рассматриваемой нами системе происходит постоянное взаимодей-

ствие воды с минералами: она одновременно растворяет те, с которыми она неравновесна, и осаждает те, с которыми равновесна. Однако, поскольку соленые озера подвержены интенсивному испарению и соленость их может достигать 360 г/л, равновесие озерных вод с различными минералами носит своеобразный характер, достигая насыщения относительно альбита, мусковита, что не

типично для речных или подземных вод даже в условиях аридного климата.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ – Монг а 09–05–90210, междисциплинарных интеграционных проектов СО РАН № 99 (2006–2008 гг.), № 38 (2009–2011 гг.), № 110 (2012–2014), проекта совместных работ СО РАН И АНМ № 6 (2011–2013), а также проектов СО РАН по поддержке экспедиционных работ 2008–2009 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fritz B., Zins-Pawlas M.-P., Gueddari M. Geochemistry of silica-rich brines from lake Natron (Tanzania) // *Sci. Geol.* – 1987. – V. 40. – P. 97–110.
2. Risacher F., Fritz B. Geochemistry of Bolivian salars, Lipiez, southern Aliplano: Origin of solute and brine evolution // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* – 1991. – V. 55. – P. 687–705.
3. Geochemistry of acid brines: Lake Tyrrell, Victoria, Australia / D.T. Long, N.E. Fegan, W.B. Lyons, M.E. Hines, P.G. Macumber, A.M. Giblin // *Chem. Geol.* – 1992. – V. 96. – P. 33–52.
4. Risacher F., Alonso H., Salazar C. Hydrogeochemistry of two adjacent acid saline lakes in the Andes of northern Chile // *Chem. Geol.* – 2002. – V. 187. – P. 39–57.
5. Pellicori D.A., Gammons C.H., Poulson S.R. Geochemistry and stable isotope composition of the Berkley pit lake and surrounding mine waters, Butte, Montana // *Appl. Geoch.* – 2005. – V. 11. – P. 2116–2137.
6. Eugster H.P. Geochemistry and sedimentology of marine and nonmarine evaporates // *Eclog. geol. Helv.* – 1984. – V. 77. – № 2. – P. 237–248.
7. Manega P.C., Bieda S. Modern sediments of lake Natron, Tanzania // *Sci. Geol.* – 1987. – V. 40. – P. 83–95.
8. Bowell R.J., Parshley J.V. Control of pit-lake water chemistry by secondary minerals, Summer Camp pit, Getchell mine, Nevada // *Chem. Geol.* – 2005. – V. 215. – P. 373–386.
9. Геологическая эволюция и самоорганизация системы «вода–порода». Т. 2. Система вода–порода в условиях зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев, Б.Н. Рыженко, В.А. Алексеев, Е.М. Дутова, И.А. Кондратьева, Ю.Г. Копылова, О.Е. Лепкурова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 389 с.
10. The trace-metal geochemistry of the Lake Tyrrell system brines (Victoria, Australia) / W.B. Lyons, S. Welch, D.T. Long, M.E. Hines, A.M. Giblin, A.E. Carey, P.G. Macumber, R.M. Lent, A.L. Herczeg // *Chem. Geol.* – 1992. – V. 96. – P. 115–132.
11. Thermodynamic constraints of Dead Sea evaporation: can the Dead Sea dry up? / B.S. Krumgalz, A. Hecht, A. Starinsky, A. Katz // *Chem. Geol.* – 2000. – V. 165. – P. 1–11.
12. Маринов Н.А. Геологические исследования МНР. – М.: Недра, 1967. – 843 с.
13. Химический состав и гидроминеральные ресурсы соленых озер Северо-западной Монголии / В.П. Исупов, А.Г. Владимиров, С.Л. Шварцев, Н.З. Ляхов, С.С. Шацкая, Л.Э. Чупахина, Л.В. Куйбида, М.Н. Колпакова, С. Ариунбилэг, С.Л. Кривоногов // *Химия в интересах устойчивого развития.* – 2011. – Т. 19. – № 2. – С. 141–150.
14. Ураноносность высокоминерализованных озер Северо-Западной Монголии / В.П. Исупов, А.Г. Владимиров, Н.З. Ляхов, С.Л. Шварцев, С. Ариунбилэг, М.Н. Колпакова, С.С. Шацкая, Л.Э. Чупахина, Л.В. Куйбида, Е.Н. Мороз // *Вестник ДАН.* – 2011. – Т. 437. – № 1. – С. 85–89.
15. Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. – М.: Мир, 1968. – 368 с.
16. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения в области нефтегазовой гидрогеологии // *Разведка и охрана недр.* – 1997. – № 2. – С. 37–39.
17. Питтцер К.С. Термодинамическая модель плотных водных растворов // *Термодинамическое моделирование в геологии (минералы, флюиды, расплавы).* – М.: Мир, 1992. – С. 110–153.
18. Surface and groundwater, weathering, and soils / Ed. J.I. Drever // *Treatise on geochemistry.* V. 5. – Oxford: Elsevier-Perгамон, 2005. – 605 p.
19. Валяшко М.Г. Закономерности формирования месторождений солей. – М.: МГУ, 1962. – 397 с.
20. Келлер У.Д. Основы химического выветривания // *Геохимия литогенеза.* – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – С. 85–197.

Поступила 10.09.2013 г.

PHYSICAL AND CHEMICAL CALCULATIONS OF SECONDARY MINERALOGENESIS IN LAKES OF WESTERN MONGOLIA

Marina N. Kolpakova,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia;
Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 4, Akademicheskii avenue,
Tomsk, 634055, Russia. E-mail: marina.kolpakova@gmail.com

Vitaly P. Isupov,

Dr. Sc., Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 18, Kutateladze street,
Novosibirsk, 630128, Russia. E-mail: isupov@solid.nsc.ru

Stepan L. Shvartsev,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050,
Russia; Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and
Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 4, Akademicheskii
avenue, Tomsk, 634055, Russia. E-mail: tomsk@igng.tsc.ru

The detailed research of lakes chemical composition using modern methods of physical and chemical calculations of lake water interaction with various minerals gives the chance to approach from qualitatively new positions to the issue of secondary mineralogenesis and its role in water composition formation.

The main aim of the study is to determine balance degree of lake water with simple salts (carbonate, sulphate, chloride) and aluminosilicate minerals.

The methods used in the study: Activity of components of aqueous solutions was determined by the «HydroGeo» software package by the method of Pitzer for highly mineralized water and brines.

The results: The paper introduces the equilibrium state of lake waters of Western Mongolia with carbonate, sulfate, chloride and aluminosilicate minerals. As salty lakes are subject to intensive evaporation and their salinity can reach 300 g/l and more the balance of lake waters with various minerals has a peculiar character, reaching water saturation concerning calcite, dolomite, tenardite, halite, rare soda, albite, white mica and Mg-chlorite. It was ascertained that each chemical type of lakes is characterized by a certain set of minerals in secondary phase which depends not only on lake chemical composition, but also on composition of the rocks located within their catchment basins. The comparative analysis of real ground precipitation of lakes with settlement data showed the reliability of the received results.

Key words:

Physical and chemical modeling, equilibrium in the system «water-rock», salt lakes, Mongolia, bottom sediments.

REFERENCES

1. Fritz B., Zins-Pawlas M.-P., Gueddari M. Geochemistry of silica-rich brines from lake Natron (Tanzania). *Sci. Geol.*, 1987, vol. 40, pp. 97–110.
2. Risacher F., Fritz B. Geochemistry of Bolivian salars, Lipez, southern Altiplano: Origin of solute and brine evolution. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1991, vol. 55, pp. 687–705.
3. Long D.T., Fegan N.E., Lyons W.B., Hines M.E., Macumber P.G., Giblin A.M. Geochemistry of acid brines: Lake Tyrrell, Victoria, Australia. *Chem. Geol.*, 1992, vol. 96, pp. 33–52.
4. Risacher F., Alonso H., Salazar C. Hydrogeochemistry of two adjacent acid saline lakes in the Andes of northern Chile. *Chem. Geol.*, 2002, vol. 187, pp. 39–57.
5. Pellicori D.A., Gammons C.H., Poulson S.R. Geochemistry and stable isotope composition of the Berkley pit lake and surrounding mine waters, Butte, Montana. *Appl. Geoch.*, 2005, vol. 11, pp. 2116–2137.
6. Eugster H.P. Geochemistry and sedimentology of marine and nonmarine evaporates. *Eclog. geol. Helv.*, 1984, vol. 77, no. 2, pp. 237–248.
7. Manega P.C., Bieda S. Modern sediments of lake Natron, Tanzania. *Sci. Geol.*, 1987, vol. 40, pp. 83–95.
8. Bowell R.J., Parshley J.V. Control of pit-lake water chemistry by secondary minerals, Summer Camp pit, Getchell mine, Nevada. *Chem. Geol.*, 2005, vol. 215, pp. 373–386.
9. Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseev V.A., Dutova E.M., Kondrateva I.A., Kopylova Yu.G., Lepokurova O.E. *Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy «voda-poroda»*. *Sistema voda-poroda v usloviyakh zony gipergeneza* [Geological evolution and self-organization of the system water-rock. The system water-rock within hypergenesis zone]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2007. Vol. 2, 389 p.
10. Lyons W.B., Welch S., Long D.T., Hines M.E., Giblin A.M., Carey A.E., Macumber P.G., Lent R.M., Herczeg A.L. The trace-metal geochemistry of the Lake Tyrrell system brines (Victoria, Australia). *Chem. Geol.*, 1992, vol. 96, pp. 115–132.
11. Krungalz B.S., Hecht A., Starinsky A., Katz A. Thermodynamic constraints of Dead Sea evaporation: can the Dead Sea dry up? *Chem. Geol.*, 2000, vol. 165, pp. 1–11.
12. Marinov N.A. *Geologicheskie issledovaniya MNR* [Geological investigations of MPR]. Moscow, Nedra Publ., 1967. 843 p.
13. Isupov V.P., Vladimirov A.G., Shvartsev S.L., Shatskaya S.S., Chupahina L.E., Kuybida L.V., Kolpakova M.N., Ariunbileg S., Krivonogov S.L. *Khimichesky sostav i gidromineralnye resursy solenykh ozer Severo-Zapadnoy Mongolii* [Chemical composition

- and hydrothermal resources of salty lakes of north-west Mongolia]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2011, vol. 19, no. 2, pp. 141–150.
14. Isupov V.P., Vladimirov A.G., Lyakhov N.Z., Shvartsev S.L., Ariunbileg S., Kolpakova M.N., Shatskaya S.S., Chupakhina L.E., Kuybida L.V., Moroz E.N. Uranonosnost vysokomineralizovannykh ozer severo-zapadnoy Mongolii [Uranium-bearing feature of high-mineralized lakes of north-west Mongolia]. *Vestnik DAN*, 2011, vol. 437, no. 1, pp. 85–89.
 15. Garrels R.M., Krayst Ch.L. *Rastvory, mineraly, ravnovesiya* [Solutions, minerals, equilibrium]. Moscow, Mir Publ., 1968. 368 p.
 16. Bukaty M.B. Razrabotka programmnogo obespecheniya v oblasti neftegazovoy gidrogeologii [Development of software in oil and gas hydrogeology]. *Razvedka i okhrana nedr*, 1997, no. 2, pp. 37–39.
 17. Pitser K.S. Termodinamicheskaya model plotnykh vodnykh rastvorov [Thermodynamic model of solid water solutions]. *Termodinamicheskoe modelirovanie v geologii (mineraly, flyuidy, rasplavy)* [Thermodynamic modeling in geology (minerals, fluids, melts)]. Moscow, Mir Publ., 1992. pp. 110–153.
 18. *Surface and groundwater, weathering, and soils. Treatise on geochemistry*. Vol. 5. Ed. J.I. Drever. Oxford, Elsevier-Pergamon, 2005. 605 p.
 19. Valyashko M.G. Zakonomernosti formirovaniya mestorozhdeniy soley [Salt field formation laws]. Moscow, MGU Publ., 1962. 397 p.
 20. Keller U.D. Osnovy khimicheskogo vyvetriviya [Bases of chemical weathering]. *Geokhimiya litogeneza* [Geochemistry of lithogenesis]. Moscow, Izdatelstvo inostrannoy literatury, 1963. pp. 85–197.

УДК 553.78; 553.79 (574)

ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ ГИДРОГЕОТЕРМАЛЬНЫХ И ГИДРОГЕОМИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ КАЗАХСТАНА

Абсаметов Малис Кудысович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор, академик, директор ТОО «Институт гидрогеологии и геоэкологии имени У.М. Ахмедсафина», Казахстан, 050010, г. Алматы, ул. Валиханова, д. 94. E-mail: mabsametov@mail.ru

Муртазин Ермек Жамшитович,

канд. геол.-минерал. наук, зам. директора ТОО «Институт гидрогеологии и геоэкологии имени У.М. Ахмедсафина», Казахстан, 050010, г. Алматы, ул. Валиханова, д. 94. E-mail: ye_murtazin@list.ru

Касымбеков Даут Азыханович,

канд. геол.-минерал. наук, член-корреспондент Академии минеральных ресурсов РК, зам. директора ТОО «Институт гидрогеологии и геоэкологии имени У.М. Ахмедсафина», Казахстан, 050010, г. Алматы, ул. Валиханова, д. 94. E-mail: dkassymbekov@mail.ru

Актуальность исследований обусловлена необходимостью комплексного освоения термальных и промышленных подземных вод Казахстана как нетрадиционных источников энергии и минерального сырья.

Цель исследований заключается в оценке потенциала и обосновании перспектив хозяйственного освоения гидрогеотермальных и гидрогеоминеральных ресурсов Казахстана.

Методы исследований включают анализ и обобщение зарубежного и отечественного опыта оценки потенциала и направлений использования гидрогеотермальных и гидрогеоминеральных ресурсов применительно к гидрогеологическим условиям Казахстана.

Результаты: Представлен потенциал гидрогеотермальных и гидрогеоминеральных ресурсов Казахстана. Рекомендованы перспективные площади для комплексного освоения термальных и промышленных подземных вод Казахстана как нетрадиционных источников энергии и минерального сырья. Обоснована необходимость практической реализации проектов освоения термальных и промышленных подземных вод на перспективных площадях Западного и Южного Казахстана.

Выводы: Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку научно-обоснованных технологических схем и технологий комплексного освоения термальных и промышленных подземных вод, технико-экономических обоснований их использования и бизнес-планов для привлечения отечественных и зарубежных инвестиций. Имеется возможность без больших капитальных затрат начать эксплуатацию существующих самоизливающих геотермальных скважин. В зависимости от минерализации и химического состава термальные воды можно использовать для получения электроэнергии (геотермальные электростанции с бинарным циклом), отопления и горячего водоснабжения жилых и производственных помещений, бальнеологии, теплично-парниковых комплексов и прудовых хозяйств.

Практическое использование промышленных подземных вод целесообразно осуществлять в комплексе с освоением ресурсов углеводородного сырья. Извлечение ценных компонентов и соединений из попутных пластовых рассолов повысит эффективность эксплуатации месторождений нефти и газа.

Ключевые слова:

Гидрогеотермальные ресурсы, гидрогеоминеральные ресурсы, термальные подземные воды, промышленные подземные воды, прогнозные эксплуатационные запасы.