

На правах рукописи

Борзенко Светлана Владимировна

**ГЕОХИМИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ СОДОВЫХ ВОД
ОЗЕРА ДОРНИНСКОЕ (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)**

Специальность 25.00.09 – «Геохимия, геохимические методы поисков
полезных ископаемых»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Томск 2012

Работа выполнена в Институте природных ресурсов, экологии и криологии
Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель кандидат геолого-минералогических наук
Замана Леонид Васильевич

Официальные оппоненты **Исупов Виталий Петрович**, доктор химиче-
ских наук, Институт химии твердого тела и ме-
ханохимии Сибирского отделения Российской
академии наук, заведующий лабораторией
ИиМР

Копылова Юлия Григорьевна, кандидат гео-
лого-минералогических наук, доцент, Нацио-
нальный исследовательский Томский политех-
нический университет, доцент кафедры ГИГЭ

Ведущая организация Геологический институт Сибирского отделения
Российской академии наук (г. Улан-Удэ)

Защита состоится «27» марта 2012 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертацион-
ного совета ДМ212.269.03 ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 2а,
строение 5, корпус 20, аудитория 504.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Националь-
ный исследовательский Томский политехнический университет».

Автореферат разослан «21» февраля 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук

Лепокурова Олеся Евгеньевна.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На территории Восточного Забайкалья распространены многочисленные соленые озера континентального типа. Соленость их обусловлена испарительным концентрированием озерных вод в условиях засушливого климата, в ходе которого должна происходить направленная трансформация химического состава со сменой химического типа, по устоявшимся представлениям, от карбонатного к сульфатному и далее к хлоридному (Валяшко, 1952; Посохов, 1981; Шварцев, 1982 и др.). Фактическое распределение химических компонентов в водах этих озер по мере роста их солености отличается от указанной последовательности, в химическом составе преобладают хлоридные и карбонатные соли натрия, сульфаты содержатся в малых количествах, при этом редко входят в название химического типа воды лишь как второй по значимости анион (Замана, Борзенко, 2009). Примером является озеро Доронинское – единственный известный в литературе меромиктический содовый водоем в Забайкалье и во всем Сибирском регионе (Франк-Каменецкий, 1924; Гладцин, 1936; Минеральные воды..., 1961 и др.). Оно отличается от типичных голомиктических (однородных по глубине) степных озер выраженной меромиксией (стратификацией) и относится к редкому типу соленых содовых озер (Солоноватые и соленые..., 2009). В мире известно лишь несколько подобных водоемов. Они находятся в США и в Африканской рифтовой зоне и сформировались под влиянием новейших поствулканических процессов. Среди них озера Моно Лейк (штат Калифорния) (Sorokin etc., 2002; Humayoun etc., 2003), Биг Сода Лейк (Cloern etc. 1983) и Соуп Лейк (штат Невада) (Горленко, 2007) и небольшое озеро Соначи (Mac Intyre, Melack, 1982) в Кении.

В настоящее время исследованию стратифицированных содовых озер уделяется повышенное внимание, поскольку уникальный химический состав воды и разнообразие бактериальной жизни дали основание полагать, что подобные водоемы существовали на ранних этапах происхождения глобальной экосистемы Земли (Заварзин, Жилина, 2000). Тем не менее, многие важные аспекты формирования такого типа озер выяснены недостаточно. Сама по себе проблема генезиса содовых вод в современной теоретической гидрогеохимии считается одной из центральных (Шварцев, 2004). В этой связи содовое оз. Доронинское может служить своеобразной моделью, в рамках которой исследуются механизмы и масштабы воздействия разнообразных факторов на химический состав и соленость озерных вод.

Анализ формирования основных геохимических типов вод зоны гипергенеза Восточного Забайкалья является одним из основных направлений гидрогеохимических исследований в Институте природных ресурсов экологии и криологии СО РАН и входит в приоритетные направления научных исследований СО РАН и РАН. Используемые при подготовке диссертации материалы получены в процессе выполнения научных исследований по следующим темам и проектам: «Сравнительный анализ физико-химических и биологических характеристик и индикаторы состояния гидрогеохимических систем Забайкалья» (2003-2006 гг.); «Геохимическая среда как

фактор биологического разнообразия и состояния водных экосистем верхнеамурского бассейна» (2007–2009 гг.); междисциплинарный интеграционный проект СО РАН № 38 «Минеральные озера Центральной Азии – архив палеоклиматических летописей высокого разрешения и возобновляемая жидкая руда» (2009-2011 гг.); «Роль ледяных покровов в сезонных геохимических и гидробиологических циклах малых соленых и пресных озер Забайкалья» (2010-2011 гг.).

Цель работы – изучение геохимических особенностей и основных механизмов формирования химического состава оз. Доронинское как редкого стратифицированного водоема содового типа.

Основные задачи исследований:

- определить основные источники, участвующие в формировании химического состава оз. Доронинское;
- изучить химический состав подземных и поверхностных вод водосборного бассейна оз. Доронинское;
- выявить закономерности распределения, сезонную и межгодовую динамику основных химических компонентов по вертикали водной толщи;
- установить количественное содержание, пространственное и временное распределения восстановленных форм серы в озере;
- определить степень равновесия вод озера с основными карбонатными, сульфатными, хлоридными и алюмосиликатными минералами;
- выявить ведущие процессы и механизмы формирования химического состава оз. Доронинское.

Исходный материал и методы исследований. Для решения поставленных задач выполнены сбор, систематизация и обобщение материалов по геологии и гидрогеологии водосборного бассейна оз. Доронинское; проведены полевые гидрохимические исследования, в результате которых отобрано и проанализировано 358 проб, из них 267 водных и 56 ледовых проб озера и 35 проб подземных и поверхностных вод водосборного бассейна. Химико-аналитические измерения водных проб проводились в лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии ИПРЭК СО РАН. Параллельно с химическими анализами воды были проведены микробиологические исследования лабораторией водных экосистем ИПРЭК СО РАН, а также Институтом общей и экспериментальной биологии СО РАН (Улан-Удэ) и Институтом микробиологии РАН (Москва). Нестойкие компоненты (HS^- , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, O_2 и др.) фиксировались на точке отбора. Восстановленные формы серы определялись фотометрическим и потенциометрическим методами. Металлы анализировались атомно-абсорбционным методом на спектрофотометре Perkin-Elmer и SOLLAR 6M с электротермическим атомизатором HGA-600 и Zeeman/3030. Потенциометрически с применением ионселективных электродов находились pH, Eh, Cl^- , F^- . Титрование применялось для определения содержания CO_3^{2-} , HCO_3^- , величины перманганатной окисляемости. Сульфат-ион определялся турбидиметрическим методом в виде сернокислого бария. В Ана-

литическом центре ДВО РАН выполнены определения изотопного состава растворенных карбонатов.

Изучение равновесий в системе «вода-порода» проведено с использованием физико-химического моделирования по программе HG32 (М.Б. Букаты), прямыми расчетами по соотношению произведений активностей и растворимости соответствующих минеральных фаз и по приведенным в работе С.Л. Шварцева (1998) диаграммам, построенным по константам реакций.

Личный вклад автора. С участием автора выполнен основной объем гидрогеохимического опробования. Лично проанализированы все пробы воды и льда на катионы и металлы, формы серы. Обработаны с помощью программ Statistica 6 и Microsoft Excel результаты химико-аналитических определений. Выполнен анализ термодинамических равновесий. Выявлены основные геохимические особенности изучаемых вод. Определены основные механизмы формирования химического состава оз. Доронинское.

Научная новизна:

- впервые расчетами гидрохимического баланса показано, что основными источниками солевого питания оз. Доронинское являются подземные и атмосферные воды;
- показано существование сероводорода в аналитически определяемых количествах в кислородсодержащем слое воды озера в непосредственном контакте с атмосферой;
- впервые установлено наличие элементной серы в воде соленого континентального озера, исследована сезонная и многолетняя динамика форм серы в водной толщии;
- показано, что процесс бактериальной сульфатредукции вносит дополнительный вклад в природные процессы образования содовых озерных вод.

Практическая значимость. Материалы исследований вошли в научные отчеты лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии ИПРЭК СО РАН и могут быть использованы при оценке запасов соды и иловых сульфидных грязей озера в целях их практического использования.

Апробация работы и публикации. По теме диссертации опубликовано 24 работы, в том числе 10 в журналах из списка ВАК. Основные положения и результаты исследований докладывались на международных и всероссийских конференциях. В их числе III международная научно-практическая конференция «Вода – источник жизни» (Павлодар, Казахстан, 2008); международная конференция «Экология и геохимическая деятельность микроорганизмов экстремальных местообитаний» (Улан-Удэ – Улан-Батор, 2011); всероссийские конференции «Гидрогеохимия осадочных бассейнов» и «Проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии» (Томск, 2007 и 2010); конференция, посвященная 50-летию Сибирского отделения РАН и 80-летию чл.-корр. РАН Федора Петровича Кренделева, и «Современные проблемы микробиологии Центральной Азии» (Улан-Удэ, 2007 и 2010); XIII научное совещание географов Сибири и Дальнего Востока (Иркутск, 2007); конференции

«Фундаментальные проблемы квартера: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований» (Новосибирск, 2009), «Природные ресурсы Забайкалья и проблемы геосферных исследований», «Минералогия и геохимия ландшафта горно-рудных территорий», «Эволюция биогеохимических систем (факторы, процессы, закономерности)» (Чита, 2006, 2008 и 2011).

Результаты исследований, показавших существования сероводорода и других восстановленных форм серы в кислородсодержащей воде оз. Доронинское, вошли в отчет о важнейших результатах научной деятельности РАН в 2006 г.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы, включающего 150 наименований. Объем текста – 151 с., количество таблиц – 28, рисунков – 32.

Благодарности. Автор благодарит за выбор темы и объекта исследований, многолетнюю помощь в их проведении и подготовке диссертации своего научного руководителя заведующего лабораторией геоэкологии и гидрогеохимии к.г.-м.н. Л.В. Заману. Глубокую признательность автор выражает к.б.н. Е.Б. Матюгиной, д.б.н., профессору В.М. Горленко, д.б.н., профессору Б.Б. Намсараеву, д.г.-м.н. Б.Н. Абрамову за тесное сотрудничество, а также получение данных по микробиологии и геологии. Автор признателен за помощь и консультации д.г.-м.н., профессору, лауреату Государственной премии С.Л. Шварцеву, а также своим коллегам по лаборатории Т.Г. Смирновой, Т.Е. Хвостовой, М.Т. Усманову, Л.И. Усмановой, Л.П. Чечель, Т.Н. Шелковниковой, Ш.А. Аскарову за помощь в проведении полевых работ, химико-аналитических исследованиях и разностороннюю поддержку.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Первое защищаемое положение. *Формирование химического состава стратифицированного содового озера Доронинское – многофакторный процесс, в котором наряду с общепризнанным испарительным концентрированием солевых компонентов доминирующую роль играет взаимодействие в системе вода–порода, обеспечивающее через субаквальную разгрузку подземных вод основную долю солевого питания озера. В поступление хлора существенный вклад вносят атмосферные осадки.*

Озеро Доронинское расположено в днище Читино-Ингодинской межгорной впадины. Окружающие хребты ее в основном сложены гранитами и гнейсами, сама впадина заполнена песчаниково-алевролитовыми породами мезозоя и рыхлыми четвертичными отложениями. Район озера относится к степной зоне с типичным аридным климатом. Испарение с поверхности воды и почв существенно превышает количество осадков. Водоем бессточный с площадью акватории около 4.5 км² и глубиной до 6.5 м. Озерные отложения представлены донными илами мощностью до 7.5 м. Осадок пелитовых фракций имеет смектит-каолинит-гидрослюдистый состав и содержит гидросульфиды железа с примесью карбонатов доломит-анкеритовой групп.

По классификации О.А. Алекина вода оз. Доронинское относится к карбонатному классу, группе натрия, первому типу. Усредненный химический состав ее выражается формулой: $M_{28,2} (HCO_3^- + CO_3^{2-}) 70 Cl^- 29 / Na^+ 98$. Величина рН изменялась в пределах 9.56-10.49 единиц.

В связи со стратификацией гидрохимические характеристики озера заметно разнятся по глубине. В верхнем кислородном слое, охватывающим глубины до 3.5–5.0 м в зависимости от сезона года и в многолетнем разрезе, минерализация воды изменялась от 15.7 до 36.2 г/л. Глубже кислородный слой сменялся сероводородным, минерализация воды в нем не выходила за пределы 25–35.5 г/л, при этом содержание сероводорода достигало 50 мг/л, а окислительно-восстановительный потенциал (Eh) переходил в область отрицательных значений.

В сезонной динамике в обоих слоях прослеживалось синхронное изменение минерализации и концентраций CO_3^{2-} и HCO_3^- , рост содержаний которых регистрировался осенью и весной. Концентрации Cl^- в основном росли с конца летнего периода до максимума в феврале-марте (табл. 1), полностью отражая, тем самым, зависимость от сезонных климатических явлений – выпадения атмосферных осадков и образования льда.

Таблица 1. Средние содержания основных ионов и минерализация (М) (мг/л) в годовом разрезе на центральной станции оз. Доронинское

Месяц	рН	ПО	$HCO_3^- + CO_3^{2-}$	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	М
Кислородный слой, мг/л										
Июль	9.82	34.2	9147	121	3835	1.73	16.1	7830	102	21087
Август	9.75	36.9	10144	146	4142	2.32	32.6	8710	104	23291
Сентябрь	9.71	41.9	13827	148	4066	12.7	57.9	10398	75.7	28935
Октябрь	9.73	36.7	12311	125	4274	9.42	34.3	9840	140	26744
Декабрь	9.84	35.8	10408	127	4475	7.8	26.1	8885	147	24086
Февраль	9.87	42.1	14625	155	5412	9.7	40.5	11688	129	32059
Март	9.89	42.6	15051	158	5474	4.1	49.2	11787	152	33675
Апрель	9.92	39.2	12953	183	5437	7.2	40.7	10999	120	29752
Сероводородный слой, мг/л										
Июль	9.90	69.2	12848	89	4521	1.39	9.27	10290	161	27931
Август	9.67	62.7	13391	100	4911	2.94	39.4	11241	144	29839
Сентябрь	9.85	56.5	15628	157	4978	13.2	33	12388	89.5	33298
Октябрь	9.89	73.2	14065	175	5037	5.25	31	11491	208	31024
Декабрь	9.87	70.0	12654	92.8	5339	7.8	23.7	10859	160	29147
Февраль	9.96	65.0	15274	110	5893	7.5	52.8	11816	132	33298
Март	9.97	57.1	15580	127	5772	4.5	42.7	11870	164	33573
Апрель	9.92	69.2	13980	172	5618	7.3	40.6	11100	124	31055
Примечание. ПО – перманганатная окисляемость, М- минерализация.										

В многолетнем разрезе установлено закономерное увеличение среднегодовых значений минерализации и концентраций основных ионов с максимальными значе-

ниями на пике засушливого периода (2007 г.), за исключением сульфатов, содержания которых к этому периоду снизились (табл. 2).

Таблица 2. Средние содержания основных ионов и минерализации (мг/л) в озере Доронинское

Год	$\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	М
2003	10518	170	4269	4.3	27.1	8145	136	23282
2004	11616	115	4537	2.5	40.8	9385	139	25847
2005	11400	113	4617	5.41	17.5	9406	151	25722
2006	12327	170	4998	4.62	25.8	10035	129	27701
2007	15533	108	5197	16.3	45	12042	108	33061
2008	14499	120	5092	9.2	40.1	11584	104	31460
2009	14768	138	4294	9.5	54.3	10869	123	30268

В межсезонной и межгодовых динамике рост карбонатов опережает рост хлоридов и, тем более, сульфатов и не соответствует естественному ходу концентрирования раствора, при котором накопление всех компонентов системы должно осуществляться, по крайней мере, в равных пропорциях. Следовательно, существуют дополнительные механизмы, контролирующие их содержания. Для их выявления в первую очередь необходимо определить поступление минеральных веществ в озеро. Для расчетов использованы данные по химическому составу источников солевого питания (табл. 3) и их доли в приходных статьях водного баланса. Последние получены из соотношения соответствующей статьи (в мм) к общей сумме, которая принята равной суммарному испарению с водной поверхности озера (490 мм). Эти доли составили: атмосферные осадки – $340/490 = 0.694$, подземные воды – $120/490 = 0.245$, поверхностный сток – $30/490 = 0.061$.

Таблица 3. Химический состав вод (мг/л), участвующих в солевом питании оз. Доронинское

Статьи	pH	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	F^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	М
$Q_{\text{п}}$	7.55	241.8	18.5	6.33	0.18	38.6	19.7	22.2	1.09	348
$Q_{\text{р}}$	7.62	418	36.3	12.5	0.2	74.1	41.3	20	4.2	607
$Q_{\text{а}}$	5.60	16.6	1.2	2.4	0.05	2.1	1.2	3.3	1	27.9

Примечание. Статьи: $Q_{\text{п}}$ – подземные воды; $Q_{\text{р}}$ – поверхностные воды (руч. Калитиха); $Q_{\text{а}}$ – атмосферные осадки.

Годовое количество химических компонентов, поступающих в озеро на 1 дм² его акватории (Q), и общий солевой состав (Q_1) приведены в табл. 4. Из расчетов следует, что основную массу поступающих в озеро химических компонентов обеспечивают подземные воды, за исключением хлора, основная часть которого привносится с атмосферными осадками, роль поверхностного стока второстепенна. Состав подземных вод (табл. 3) приведен усредненный по данным собственного опробования, в расчет включались пробы воды, ненасыщенные по кальциту.

Подземные воды рассматриваемой территории в большинстве своем относятся к типичным водам выщелачивания, все они гидрокарбонатные преимущественно кальциевые с минерализацией до 0.7 и pH до 7.7. Формируются они в ос-

новном за счет растворения минералов водовмещающих горных пород. Среди подземных вод района исследований встречаются воды с повышенной минерализацией (от 0.8 г/л) и pH (от 7.6), которые можно отнести к водам начального этапа засоления. Эти воды относятся к гидрокарбонатным кальциево-натриевым (название дано от меньшего к большему).

Таблица 4. Составляющие солевого питания оз. Доронинское (% от общего количества компонента)

Основные хим. компоненты	Q _п		Q _а		Q _р		Q	Q ₁
	мг	%	мг	%	мг	%	мг	мг/л
HCO ₃ ⁻	59.2	61.5	11.5	12.0	25.5	26.5	96.3	19.6
SO ₄ ²⁻	4.53	59.8	0.83	11.0	2.21	29.2	7.58	1.55
Cl ⁻	1.55	39.0	1.67	41.9	0.76	19.2	3.98	0.81
F ⁻	0.04	48.6	0.03	38.0	0.01	13.4	0.09	0.02
Ca ²⁺	9.45	61.3	1.46	9.4	4.52	29.3	15.43	3.15
Mg ²⁺	4.83	59.0	0.83	10.2	2.52	30.8	8.18	1.67
Na ⁺	5.44	60.8	2.29	25.6	1.22	13.6	8.95	1.83
K ⁺	0.27	21.9	0.69	57.0	0.26	21.0	1.22	0.25
M	85.4	60.3	19.3	13.6	37.0	26.1	141.7	28.9

Соотношение SO₄²⁻ и Cl⁻ в рассматриваемых водах в большинстве случаев выше, чем в атмосферных осадках и водах зоны выщелачивания (Шварцев, 1998), что указывает на существование дополнительного источника поступления сульфатов. Им служат осадочные породы мезозоя, содержащие сульфиды железа (пирит, марказит), окисление которых приводит к непропорциональному относительно Cl⁻ росту концентраций SO₄²⁻.

Химический состав воды оз. Доронинское существенно отличается от среднего состава вод, участвующих в его солевом питании (табл. 5). Очевидно, что хлор и натрий наиболее полно отражают процесс испарительной концентрации раствора, об этом свидетельствуют близкие отношения Na/Cl (2.5 и 2.2) в двух сравниваемых составах. Незначительное снижение этого отношения в озерной воде указывает на потери натрия с ростом солёности воды. Карбонаты накапливаются в озере в меньших масштабах, чем хлор и натрий – соотношения (HCO₃ + CO₃)/Cl и (HCO₃ + CO₃)/Na в озерной воде 2.7 и 1.27, в исходном растворе 24 и 11, но при этом сохраняют за собой доминирующее положение. Наиболее резкие изменения произошли в соотношениях катионов, в особенности кальция и натрия. Если в первоначальном составе превалировал кальций, и это видно из отношения Na/Ca (0.58), то в озерной воде ситуация меняется уже в сторону существенного преобладания натрия (1385). Аналогичная ситуация, но с другими отношениями (0.52 и 35 соответственно), отмечается между хлором и сульфатами, хотя в рассматриваемом диапазоне солёности эти компоненты должны накапливаться в приблизительно одинаковых пропорциях (Шварцев, 1982). Сложившаяся ситуация требует особого рассмотрения.

Для объяснения причин выявленных диспропорций по программе HG32 было выполнено термодинамическое моделирование изменения состава вод при испарении воды с учетом образования вторичных минеральных фаз. Для этого был взят расчетный химический состав вод Q_1 (табл. 5). В качестве показателя степени испарения использовался Cl как наиболее консервативный компонент, не вступающий в реакции взаимодействия с образованием вторичных минералов в исследованном диапазоне солености воды.

Таблица 5. Средний химический состав вод (мг/л) и степень концентрирования

Показатели	pH	$\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$	SO_4^{2-}	Cl ⁻	F	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	М
1	9.88	12952	133.4	4715	11.4	7.37	35.8	10209	127	28190
2	-	19.6	1.55	0.81	0.02	3.15	1.67	1.83	0.25	28.9
3	-	661	86	5821	570	2	21	5579	508	975

Примечание. Показатели: 1 – средний состав воды оз. Доронинское; 2 – расчетный состав Q_1 ; 3 – степень концентрирования.

Результаты термодинамического моделирования показали, что весь хлор можно отнести к результату испарительной концентрации. Натрий за небольшим исключением тоже концентрируется в растворе. Высокие содержания калия в модельном составе говорят лишь о неполном учете вторичных К-содержащих минералов в модели, т.к. количество их в базе данных программы ограничено. Причины низких содержаний кальция и магния вытекают из расчета, где они связываются в основном кальцитом, доломитом и магнезитом. Что касается расчетного содержания сульфата, то оно выше, а суммы гидрокарбоната и карбоната – ниже, чем в воде озера (табл. 5 и 6).

Таблица 6. Остаточный состав воды в модельном растворе

Физико-химические компоненты (мг/л, кроме pH)									
pH	$\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$	SO_4^{2-}	Cl ⁻	F ⁻	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	М
9.45	9056	5945	4715	0.73	3.6E-5	0.60	10628	511	30856

Масса основных равновесных минеральных фаз (мг/л): кальцит CaCO_3 – 42448; доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ – 60394; магнезит MgCO_3 – 30500; гидромагнезит $\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_4$ – 64; гипс $\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$ – 4338; флюорит CaF_2 – 222; альбит $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ – 5.07; анальцит $\text{NaAlSi}_2\text{O}_5(\text{OH})_2$ – 2.16; мусковит $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – 47.8; иллит $\text{K}_{0.8}\text{Al}_{2.56}\text{Si}_{3.38}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – 9.9; монтмориллонит $\text{K}_3\text{Al}_{1.9}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – 2.02.

Накопление карбонатов в озере возможно за счет исходной концентрации в питающих водах при соблюдении неравенства $\text{rHCO}_3^- + \text{rCO}_3^{2-} > \text{rCa}^{2+} + \text{rMg}^{2+}$ (“r” обозначает эквивалентную форму концентрации). В рассматриваемом случае сумма карбонатных компонентов была немногим выше, чем щелочноземельных элементов (табл. 5), этим и объясняются высокие содержания карбонатов остаточного раствора. Однако в воде они выше, чем в результатах моделирования. В озере приходная статья гидрохимического баланса карбонатов кроме поступления с подземным и поверхностным стоком складываются также за счет минерализации растворенных органических веществ (ОВ), большая часть которых используется для бактериального

восстановления сульфатов. Процессы сульфатредукции и их роль в обогащении воды ионами угольной кислоты будут рассмотрены ниже.

Следовательно, испарительное концентрирование вод, участвующих в солевом питании озера, обеспечивает накопление исходных компонентов, но содержания их в озере растут неравномерно, так как на формирование химического состава воды влияют геохимические процессы, в частности, образование вторичных минеральных фаз, насыщение по которым и является следствием такого концентрирования.

Второе защищаемое положение. *Гидрогенным минералообразованием контролируются концентрации в воде кальция, магния и калия, частично натрия и карбонатных компонентов. Все подземные воды неравновесны с эндогенными минералами. Озерная вода равновесна с анальцитом и в определенные периоды с альбитом. Следовательно, озерные и подземные воды находятся в равновесно-неравновесном состоянии с основными минералами, что обеспечивает непрерывное концентрирование Na^+ и HCO_3^- , т.е., компонентов соды. Тем не менее, по соде $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, как и по хлоридным и сульфатным минералам, в воде озера равновесия не достигаются.*

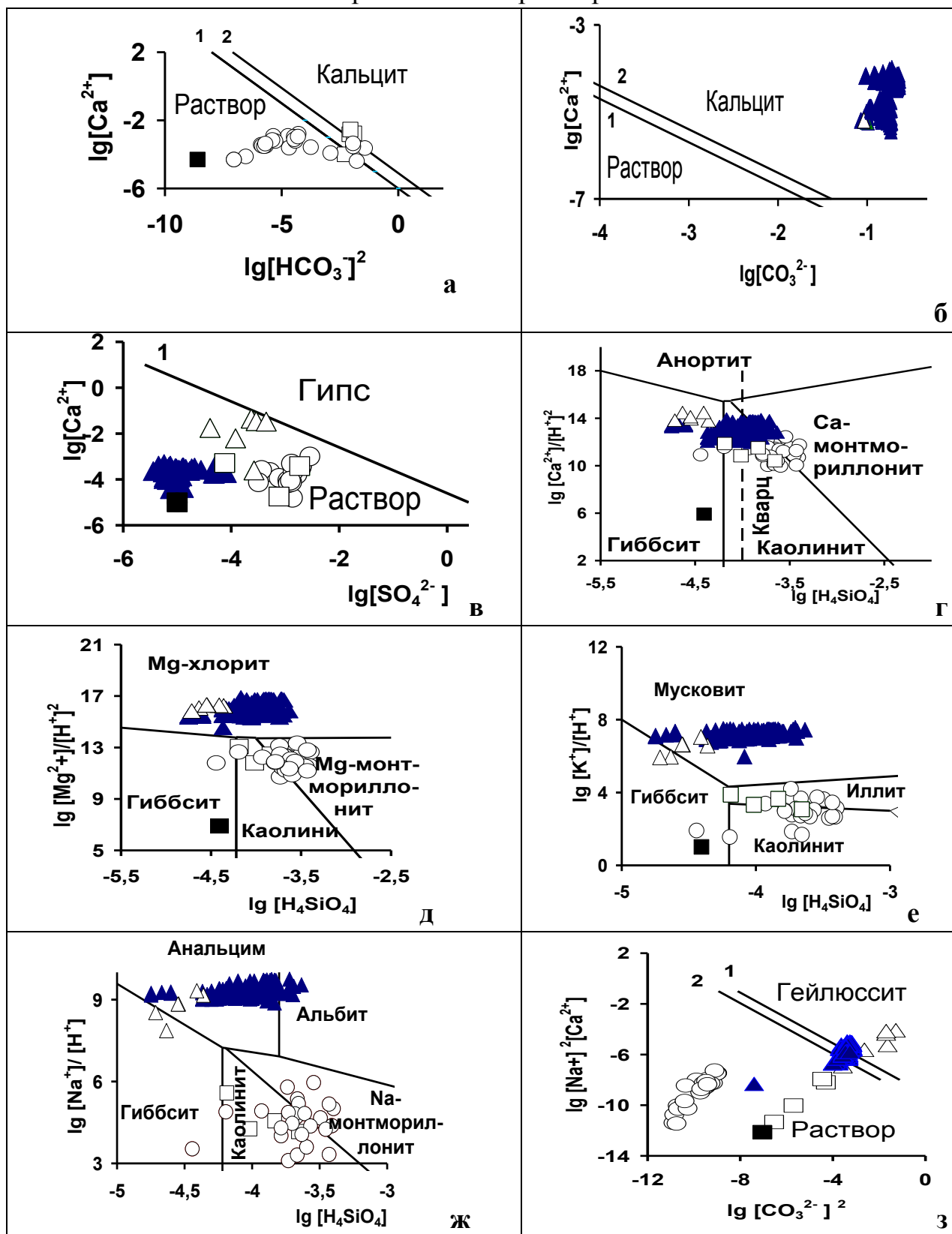
С позиций современных представлений, заложенных и активно развиваемых С.Л. Шварцевым, система вода-порода является равновесно-неравновесной (Шварцев и др., 2007 и др.). Растворение первичных минералов горных пород, с которыми вода в условиях зоны выщелачивания, как правило, неравновесна, сопровождается образованием вторичных минералов, с которыми по мере накопления химических элементов вода становится равновесной. Для решения вопроса о роли гидрогенного минералообразования в формировании химического состава вод озера выполнен анализ гидрогеохимических данных, для чего использовались диаграммы термодинамических равновесий из работы С.Л. Шварцева (1998), программный комплекс HG32 (Букаты, 2002), а также расчеты по отдельным минералам на основе термодинамических величин (Наумов и др., 1971).

Прежде всего, рассматривалось равновесие вод с кальцитом, насыщение по которому, как показал С.Л. Шварцев, наступает при минерализации природных вод около 0.6 мг/л и величине рН 7.4. Как показали наши расчеты, подземные воды с минерализацией более 0.8 г/л и рН выше 7.6 равновесны с кальцитом (рис. 1 а). Очевидно, что с момента формирования кальцита содержания Ca^{2+} в водах не растут. Глинистые минералы выводят из раствора большую часть К, Mg и частично Са (рис. 1 г, д, е, ж). Вместе с тем все подземные воды неравновесны с эндогенными минералами (анортит, К-полевошпат, альбит, форстерит и т.д.), поэтому, растворяясь, они являются основными источниками химических компонентов (Шварцев, 1982). Натрий, как основной элемент катионного состава, выносится из алюмосиликатных минералов, растворение которых происходит, к примеру, по следующей реакции:

$$\text{NaCaAl}_5\text{Si}_7\text{O}_{24} + 9.5\text{H}_2\text{O} + 3\text{CO}_2 = 2.5\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{CaCO}_3 + \text{Na}^+ + \text{HCO}_3^- + 2\text{H}_4\text{SiO}_4.$$
 Несмотря на равновесие натрия в отдельных случаях с Na-монтмориллонитом (рис.

1ж), он связывается в меньших масштабах, чем остальные катионы, поэтому накапливается в воде наиболее интенсивно. Вместе с ним растут и концентрации HCO_3^- . Формирующийся в этих условиях химический тип подземных вод является содовым.

Таким образом, процесс содообразования начинается уже в подземных водах и продолжается в озере, где пресные воды постепенно превращаются в обогащенный солевыми компонентами минерализованный раствор.



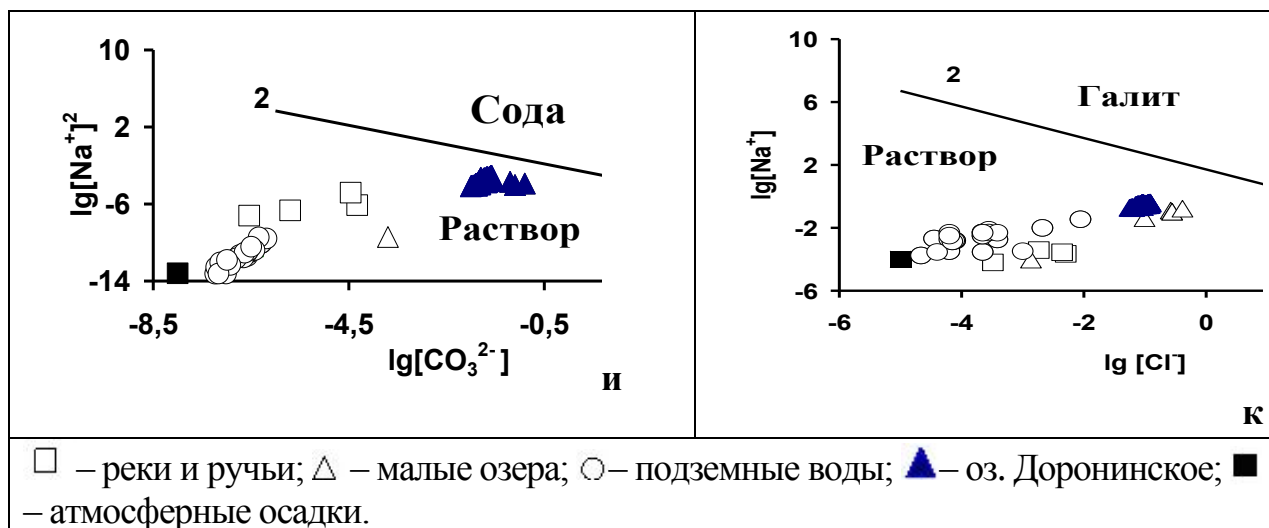
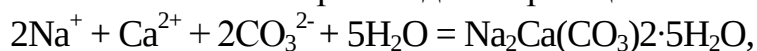


Рис. 1. – Системы: а) и б) CaCO_3 – вода; в) CaSO_4 – вода; г) $\text{H}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{CO}_2-\text{SiO}_2$; д) $\text{H}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{CO}_2-\text{SiO}_2$; е) $\text{H}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{K}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{SiO}_2$; ж) $\text{H}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Na}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{SiO}_2$ (при 25°C); з) $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – вода; и) Na_2CO_3 – вода; к) NaCl – вода; с нанесением данных по составу вод оз. Доронинское и вод района. 1 – 25°C , 2 – 0°C .

Вода оз. Доронинское равновесна с кальцитом (рис. 1б). Расчет по программе HG32 показал равновесие с другими карбонатными минералами, в частности, с доломитом $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, магнезитом MgCO_3 , лансфордитом $\text{MgCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$; родохрозитом $\text{Mn}^{2+}\text{CO}_3$; сидеритом FeCO_3 ; стронцианитом SrCO_3 ; церусситом PbCO_3 . В поле равновесия с гипсом $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ не попадает ни одна точка (рис. 1в), т.к. активности сульфатных SO_4^{2-} ионов ниже эвтектических. Что касается сульфидов, то отмечается насыщение по галениту PbS ; алабандину MnS , сфалериту ZnS ; троиллиту и аморфному троиллиту $\text{FeS} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (расчет по HG32). Правильность термодинамических расчетов отражается находками сульфидов железа в донных отложениях озера, на долю последних приходится около 2 % от общего состава осадков.

С эндогенными минералами (анортит, К-полевопшпат, форстерит и т.д.) вода неравновесна, исключая равновесие с анальцитом и в отдельных случаях с альбитом (рис. 1г, д, е, ж). Приведенные диаграммы и термодинамические расчеты не охватывают всех возможных гидрогенных образований, которые встречаются в составе донных отложений озера, в частности, гейлюссита. Этот минерал не входит в базу данных программы HG32, поэтому проведены дополнительные расчеты равновесия по справочным термодинамическим данным (Наумов и др., 1971).

Образование гейлюссита происходит по реакции:



Константа реакции при 25°C равна $10^{9.11}$, а при 0°C – $10^{9.94}$. Отсюда произведение растворимости ПР соответственно равно $10^{-9.11}$ и $10^{-9.94}$. По расчетам, максимальное пересыщение по гейлюсситу отмечается осенью. Летом равновесие достигается только в придонной воде, поскольку поверхностный слой в это время года наиболее опреснен (рис. 1з). Однако степень насыщения по этому минералу относительно невелика (табл. 7).

Термодинамические расчеты по программе HG32 и расчеты с использованием справочных данных показали, что вода неравновесна с основным компонентом данной системы – содой, поскольку произведение активностей ионов натрия и карбона-

та не превышает ПР соды. Это следует из приведенной ниже реакции образования соды и ее константы:



Константа этой реакции $K = 10^{2.33}$ (при 25 °C) и при 0 °C $K = 10^{2.49}$, т.е. существенно выше произведения активности основных ионов, участвующих в данной реакции, что подтверждается положением точек на диаграмме (рис. 1и).

Не отмечается насыщения и по таким основным Na-содержащим галогенным минералам как галит NaCl (рис. 1к), нахколит NaHCO_3 , трона $\text{NaHCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и мирабилит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (расчет по HG32).

Таблица 7. Максимальная степень равновесия (lg ПА/ПР) и равновесное количество гейлюссита ($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

Месяц	lgПА	lgПА/ПР	Степень насыщения	Количество гейлюссита, мг/л
Февраль	–8.63	0.48	3.02	1.58E-09
Март	–8.48	0.56	3.63	2.05E-09
Апрель	–8.50	0.61	4.07	2.40E-09
Июль	–10.15	–0.21*	0.16	–2.97E-10
Август	–10.06	0.15*	1.38	2.31E-10
Сентябрь	–8.24	0.87	7.41	4.98E-09
Октябрь	–8.21	0.90	7.94	5.45E-09
Декабрь	–8.29	0.82	6.61	4.29E-09

Примечание. * при 25 °C.

Таким образом, пересыщенность воды кальцитом, доломитом, магнезитом и т.д. привела к тому, что содержания Ca^{2+} и Mg^{2+} не растут и в максимуме в озере составляют 20.4 и 224 мг/л соответственно. Калий активно участвует во вторичном минералообразовании с образованием слюды (рис. 1е) и глинистых минералов (расчет по HG32), поэтому его содержания в воде не превышают 270 мг/л.

Хлор не имеет геохимических барьеров на данном этапе испарительного концентрирования вод, поэтому его содержания синхронно увеличиваются с ростом минерализации воды. Учитывая, что весь Cl является результатом испарительного концентрирования, в тех же масштабах должен был бы накапливаться и Na. Однако оказалось, что величины отношений Na/Cl в расчетном составе (Q_1) составляет 2.5, тогда как в воде оз. Доронинское, по средним оценкам содержаний, равно 2.2. Снижение величины отношения Na/Cl объясняется потерями Na в результате его участия в гидрогенном минералообразовании, однако в сравнении с другими катионами степень такого участия существенно ниже. На это указывают не только отношение Na/Cl, но и количество высаженных из воды аналцита (10^{-3} мг/л), альбита (10^{-6} мг/л) и гейлюссита (табл. 7). Поэтому натрий накапливается в воде озера.

Следовательно, на рассматриваемой стадии эволюции озера возможно накопление Na^+ , HCO_3^- (CO_3^{2-}), т.к. эти компоненты не встречают существенных геохимических ограничений в виде образования вторичных минералов. Рассмотренные тер-

модинамические равновесия с позиции взаимодействия в системе вода-порода подтверждают значительный вклад гидрогенного минералообразования в процессы формирования содовых вод оз. Доронинское.

Третье защищаемое положение. *Микробиологическое восстановление сульфатов происходит в водной толще оз. Доронинское и определяет наличие сероводорода и других восстановленных форм серы (тиосульфатной, элементной). Концентрации форм серы подвержены сезонным и многолетним колебаниям в зависимости от интенсивности бактериальных процессов. Непрерывное развитие сульфатредукции является причиной низких концентраций сульфатов. Сопряженное продуцирование CO_2 обеспечивает дополнительный источник гидрокарбонатов и карбонатов озерной воды.*

Проведенные исследования показали, что в воде повсеместно присутствует сероводород. Сероводород ввиду высокой щелочности озерной воды находится в диссоциированной форме, главным образом в виде гидросульфида HS^- . Максимальные содержания HS^- приходятся на летнее время, что вызвано усилением активности сульфатредуцирующих бактерий (до 10^6 кл/мл). Осенью на фоне сокращения бактериальной численности на 1–2 порядка отмечается снижение содержаний HS^- . Минимум HS^- наблюдается к началу подледной вегетации и сопровождается значительным ростом содержаний растворенного в воде O_2 (табл. 8).

Таблица 8. Средние содержания форм серы (мг/л) в оз. Доронинское

Месяц	O_2	$(\text{HS}^-)\text{S}^{2-}$		$\text{S}^{0;4+}$		S^0		$\sum \text{S}_{\text{восст}}$	
	1	1	2	1	2	1	2	1	2
Июль	0.81	0.69	27.2	4.49	7.05	н.о.	н.о.	5.18	34.6
Август	1.71	0.46	24.9	3.42	4.61	0.056	0.101	6.59	38.6
Сентябрь	1.82	0.05	16.5	0.91	6.69	0.036	0.160	0.99	13.2
Октябрь	2.44	0.04	12.7	1.62	5.45	0.104	0.107	1.71	18.2
Декабрь	2.45	0.02	18.6	4.28	8.7	0.019	0.066	4.30	27.3
Февраль	2.61	0.016	2.71	2.36	7.36	0.002	0.005	2.38	12.6
Март	0.06	0.66	5.91	4.81	5.93	0.068	0.072	5.48	11.8
Апрель	0.23	0.019	3.17	5.43	11.40	н.о.	н.о.	5.45	6.62

Примечание. 1 – кислородный, 2 – сероводородный слой, н.о. – не определялось.

Как во времени, так и по глубине кислородного слоя имеет место обратная зависимость между O_2 и HS^- . Причина сосуществования геохимически несовместимых компонентов кроется в соотношении скоростей, с одной стороны, поступления кислорода в воду из атмосферы и продуцирования его в водной толще, а с другой – образование сероводорода в процессе сульфатредукции толерантными к кислороду бактериями, открытыми в 1980-е годы (Hardy, Hamilton, 1981).

Ход вертикального распределения S^{2-} (HS^-) (рис. 2) свидетельствует о развитии процессов бактериальной сульфатредукции в водной толще озера. Подтверждается это хаотичным распределением HS^- в верхней гидрохимической зоне, существенным ростом его содержаний в хемоклине и снижением ко дну.

Помимо сульфатной и сероводородной вода содержит тиосульфатную $S^{0;4+}$ ($S_2O_3^{2-}$) и элементную S^0 формы серы, являющиеся промежуточными соединениями в окислительно-восстановительном цикле серы между SO_4^{2-} и H_2S . Содержания этих форм серы, как и HS^- , подвержены изменениям по глубине и в сезонном цикле (табл. 8 и рис. 2).

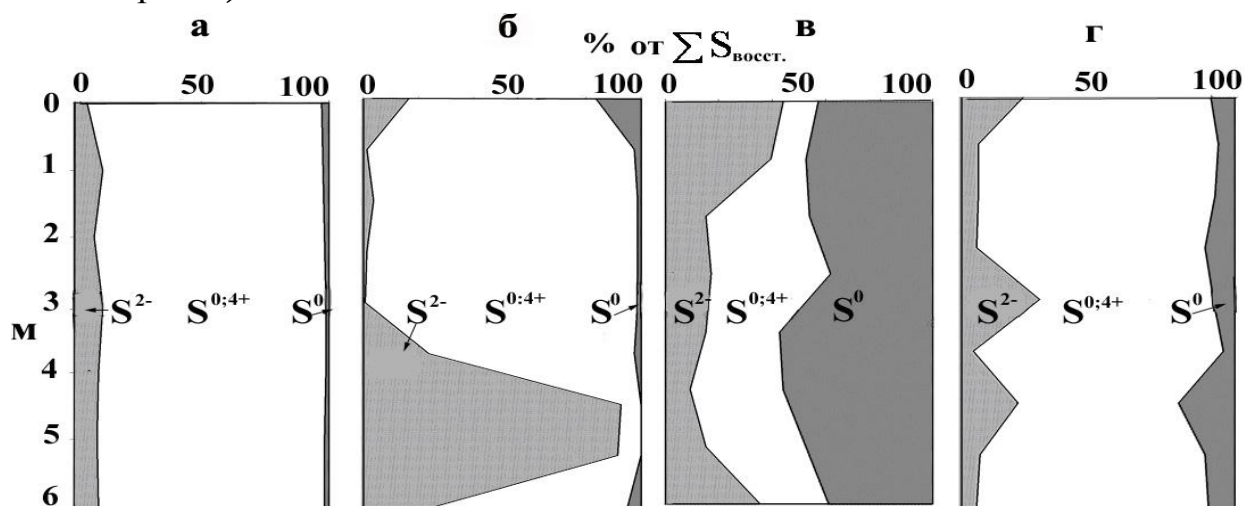


Рис. 2. Динамика содержаний восстановленных форм серы (в % от $\Sigma S_{\text{восст.}}$) по вертикали водной толщи центральной станции оз. Доронинское в годовом цикле: а) 02.03.2007 г., б) 02.09.2007 г., в) 16.10.2007 г., г) 28.02.2008 г.

Динамика содержания $S^{0;4+}$ определялась преимущественно процессом восстановления, т.к. проявлялось чаще всего согласованное изменение концентраций S^{2-} и $S^{0;4+}$, но природа этого соединения двойка — восстановительная и окислительная. В период ледостава, когда при отрицательных температурах, охватывающих в некоторые годы всю водную толщу, интенсивность микробиологических процессов снижается, происходящий рост содержаний $S^{0;4+}$ при уменьшении концентраций HS^- и S^0 указывает на возрастающую роль в его образовании химического окисления.

Элементарная сера образуется в результате окисления бактериального сероводорода химическим путем или за счет активности тионовых бактерий (Волков, 1990), поскольку в реакциях окисления сера является промежуточным продуктом, поэтому она не накапливается в озерной воде в значительных количествах. Она присутствует как минимум в двух формах — полисульфидной, что косвенно подтверждается наличием тесной корреляционной связи ее с HS^- ($r = 0.66$) в летний период, и элементной, что находит отражение в наблюдаемом росте концентраций S^0 со значительным преобладанием над HS^- в октябре (рис. 2).

Отмеченная динамика в распределении восстановленных серы является отражением параллельно протекающих в озере процессов бактериального восстановления сульфатов и процессов окисления образовавшегося сероводорода. В такой системе возможно повсеместное присутствие всех рассмотренных нами производных серы. Однако, скорость бактериального продуцирования сероводорода такова, что он не успевает окисляться и присутствует во всей водной толще озера.

Результаты определения S^{6+} (SO_4^{2-}) в воде за время наблюдений свидетельствуют о неравномерном перераспределении ее содержаний в толще воды, в анаэробных

условиях в большинстве случаев они уменьшаются пропорционально росту содержаний сероводорода. Зеркально-симметричный характер распределения содержаний S^{6+} и S^{2-} особенно четко проявляется в нижней гидрохимической зоне в период круглогодичной активизации бактериальных процессов (2004-2006 гг.) (рис. 3).

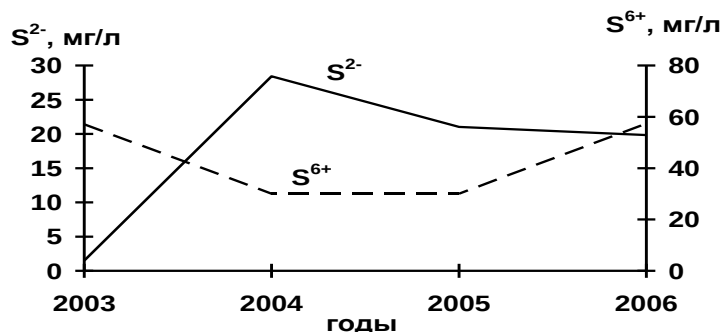


Рис. 3. Распределение среднегодовых содержаний S^{6+} и S^{2-} в воде оз. Доронинское в 2004–2006 гг.

Следовательно, низкие содержания сульфатов в озере объясняются их бактериальной редукцией. Несмотря на то, что имеются доказательства окисления сероводорода, часть сульфатов восстанавливается до сероводорода необратимо, вступая в реакции, главным образом, с железом с образованием троиллита $FeS \cdot 2H_2O$ выводится из раствора. Все эти процессы обеспечивают направленное обессульфачивание озерной воды.

Роль сульфатредукции не ограничивается трансформацией форм серы, поскольку перенос электронов обеспечивается окислением углерода, входящего в состав растворенных органических веществ водной толщи. Исходя из зависимости между S и CO_2 как одним из продуктов реакции сульфатредукции и ее скоростью, которая составляла 29.8 мг S /л сут. (Бурюхаев, 2011), продукция CO_2 может достигать 41 мг CO_2 /л сут. Эти разовые определения не позволяют дать количественную оценку вклада сульфатредукции в общий баланс карбонатных компонентов воды озера, но они свидетельствуют о дополнительном вкладе ее в формирование содового типа воды.

Это же подтверждают и данные изотопного состава углерода растворенных в воде карбонатов (табл. 9), которые показывают, что изотопный состав его обеднен изотопом ^{13}C относительно атмосферного CO_2 на 1.8–5.8 ‰. Известно, что сульфатвосстанавливающие бактерии включают в свой метаболизм ОВ, содержащие легкий изотоп ^{12}C (Галимов, 1968). Взаимосвязь изотопного состава углерода растворенных карбонатов с процессом сульфатредукции наглядно отображается в зеркально-симметричном характере кривых распределения концентраций S^{2-} и $\delta^{13}C$ в водной толще (рис. 4).

Таблица 9. Изотопный состав растворенных карбонатов воды оз. Доронинское по данным опробования в сентябре 2009 г на центральной станции

Изотопный состав, ‰	Глубина, м						
	0	1	2	3	4	5	6
$\delta^{13}C_{PDB}$	0.25	0.05	0.12	0.23	0.12	-0.17	0.27
$\delta^{18}O_{PDB}$	-4.92	-5.24	-5.22	-5.04	-4.69	-5.80	-5.80

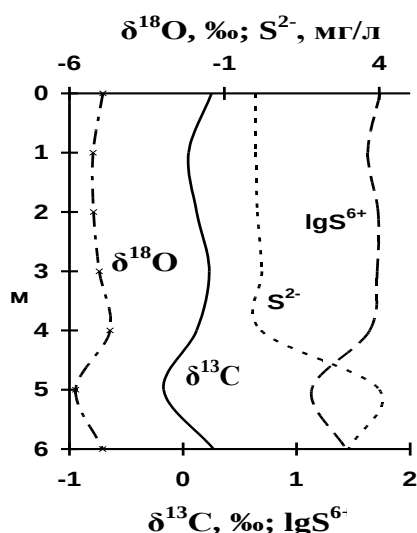


Рис. 4. Распределение S^{6+} , S^{2-} , величин $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ растворенных карбонатов там же и в те же сроки.

В зоне хемоклина, где концентрация сероводорода выше, углерод карбонатного комплекса максимально облегчен ($\delta^{13}C = -0.17$ ‰). Такое возможно вследствие формирования HCO_3^- и производного от него иона CO_3^{2-} в большей степени за счет CO_2 , образующегося в результате бактериального разложения содержащихся в воде ОВ, на высокие концентрации которого указывают значения перманганатной окисляемости (см. табл. 1).

Для образования HCO_3^- наряду с CO_2 требуется, как показывает С.Л. Шварцев (1998), ион OH^- , источником которого выступают воды, участвующие в реакциях гидролиза алюмосиликатов. Следовательно, бактериальное продуцирование CO_2 при участии OH^- обеспечивает пополнение озерной воды карбонатами.

Заключение

Таким образом, в формировании химического состава оз. Доронинское наряду с испарительным концентрированием участвуют внутриводоемные гидробиологические процессы и водородное минералообразование. Эвапоритовая седиментация ограничивает накопление в воде многих компонентов, но концентрирует натрий и карбонаты, т.е. соду. Бактериальное продуцирование карбонатных комплексов вносит дополнительный вклад в природные процессы формирования содовых вод.

Список публикаций по теме диссертации

Монографии

1. Замана Л.В., **Борзенко С.В.** Глава 4. Гидрохимия минеральных озер Восточного Забайкалья // Солоноватые и соленые озера Забайкалья: гидрология, биология / Отв. редактор Намсараев Б.Б. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского гос. университета, 2009. – С. 56-81.

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК

1. Замана Л.В. Бордонский Г.С., **Борзенко С.В.**, Гурулев А.А., Крылов С.Д., Цыренжапов С.В. Кремний в ледяном покрове озер Забайкалья // Докл. АН. – 2005. – Т. 401. – № 2. – С. 248-251.
2. Замана Л.В., **Борзенко С.В.** Сероводород и другие восстановленные формы серы в кислородной воде озера Доронинское (Восточное Забайкалье) // Докл АН. 2007. – Т. 417. – № 2. – С. 232-235.
3. **Борзенко С.В.** Роль вторичного минералообразования в формировании содовых вод озера Доронинское // Вестник ЧитГУ. – 2008. – № 3 (48). – С. 106-112.
4. **Борзенко С.В.**, Замана Л.В. Сульфатредукция как фактор формирования содовых вод озера Доронинское (Восточное Забайкалье) // Вестник Томского государственного университета. № 312, июль. – 2008. – С. 188-193.
5. **Борзенко С.В.** Формы сероводорода в минеральных содовых водах озера Доронинское (Восточное Забайкалье) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. – № 1. – Вып. 13. – С. 54-58.
6. Горленко В.М., Бурюкаев С.П., Матюгина Е.Б., **Борзенко С.В.** и др. Микробные сообщества стратифицированного содового озера Доронинское (Забайкалье) // Микробиология. – 2010. – Т. 79. – № 3. – С. 410-421.
7. Замана Л.В., **Борзенко С.В.** Гидрохимический режим соленых озер Юго-Восточного Забайкалья // География и природные ресурсы. – 2010. – № 4. – С. 100-107.

8. **Борзенко С.В.**, Замана Л.В. Восстановленные формы серы в воде содового озера Доронинское (Восточное Забайкалье) // Геохимия. – 2011. – № 3. – С. 268-278.

9. Medova H., Boldareva E.N., Hrouzek P., **Borzenko S.V.** et al. High abundances of aerobic anoxygenic phototrophs in saline steppe lakes // FEMS Microbiology Ecology. – Vol.: 76. – Issue: 2. – Pages: 393-400. (2011).

10. Замана Л.В., **Борзенко С.В.** Элементная сера в воде озера Доронинское (Восточное Забайкалье) // Докл. АН. – 2011. – Т. 438. – № 4. – С. 515-518.

Работы, опубликованные в других изданиях

1. Замана Л.В., **Борзенко С.В.** Химический состав и минерализация льда озера Доронинское // Природные ресурсы Забайкалья и проблемы геосферных исследований: Материалы научной конференции – Чита: Изд-во ЗабГГПУ. – 2006. – С. 68-70.

2. Юргенсон Г.А., Серебренникова Н.В., **Борзенко С.В.**, Матафонов Д.В. О гейлюс-сайте озера Доронинское // Там же. – С. 167-172.

4. **Борзенко С.В.**, Замана Л.В., Букаты М.Б. Сезонные и межгодовые изменения химического состава и минеральных равновесий содового озера Доронинское (Забайкалье) // Гидрогеохимия осадочных бассейнов: Труды Российской научной конференции. – Томск: Изд-во НТЛ. – 2007. – С. 235-239.

5. Замана Л.В., **Борзенко С.В.** Гидрогеохимия и термодинамическая оценка минеральных равновесий водной толщи содового озера Доронинское // Материалы Всеросс. конференции с иностранным участием, посвященной 50-летию Сибирского отделения РАН и 80-летию чл.-корр. РАН Федора Петровича Кренделева. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН. – 2007. – Ч. 2. – С. 151-153.

6. Замана Л.В., **Борзенко С.В.** Гидрохимия соленых озер Ононской группы (Восточное Забайкалье) на начало XXI века // Материалы XIII научного совещания географов Сибири и Дальнего Востока (Иркутск, 27-29 ноября 2007 г.). – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы. – 2007. – Т. 1. – С. 53-55.

7. **Борзенко С.В.** Основные взгляды на формирование содовых вод (на примере озер Доронинской группы, Россия, Восточное Забайкалье) // Материалы III международной научно-практической конференции «Вода – источник жизни», Казахстан. – Павлодар. – 2008. – С. 222-229.

8. **Борзенко С.В.** Вторичное минералообразование как один из механизмов формирования содовых вод озера Доронинское // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералообразование: Труды II Всероссийского симпозиума с международным участием и VIII Всероссийских чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана 24-27, ноября 2008 г. Чита, Россия. – Чита. – 2008. – С. 93-96.

9. Замана Л.В., **Борзенко С.В.** Термодинамическая оценка эвапоритовой седиментации соленых озер Забайкалья // Фундаментальные проблемы квартера: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: Матер. VI Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода, г. Новосибирск, 19–23 октября 2009 г. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2009. – С. 220-223.

10. Матюгина Е.Б., **Борзенко С.В.** Роль бактерий в формировании и сезонной динамике восстановленных форм серы воды озера Доронинское (Восточное Забайкалье) // Современные проблемы микробиологии Центральной Азии: материалы всероссийской конференции с международным участием (г. Улан-Удэ, 27–28 мая 2010 г.). – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета. – 2010. – С. 93-98.

11. **Борзенко С.В.**, Замана Л.В. Сезонная и межгодовая динамика форм серы в содовом озере Доронинское (Восточное Забайкалье) // Проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии: Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 80-летию кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Томского политехнического ун-та / Под ред. С.Л. Шварцева. – Томск: Изд-во НТЛ. – 2011. – С. 308-317.

12. **Борзенко С.В.** Гидрохимия и формирование содовых соленых вод озера Доронинское // Материалы конференции «Эволюция биогеохимических систем (факторы, процессы, закономерности) и проблемы природопользования» и симпозиума «Геоэкологические, экономические и социальные проблемы природопользования», посвященных 30-летию ИПРЭК СО РАН (27-30 сентября 2011 г., г. Чита, Россия). – Чита: Изд-во ЗабГГПУ. – 2011. – С. 69-72.

13. Матюгина Е.Б., **Борзенко С.В.** Взаимосвязь бактериальных процессов с восстановленными соединениями серы в сезонном цикле оз. Доронинское (Забайкалье) // Экология и геохимическая деятельность микроорганизмов экстремальных местообитаний: Материалы междунар. конф. (Улан-Удэ – Улан-Батор, 5–16 сентября 2011 г.). – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета. – 2011. – С. 127-128.

Подписано в печать 20.02.2012. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Уч.-изд. л. 1,2. Тираж 100. Заказ № 05255.

Забайкальский государственный гуманитарно-педагогический университет
им. Н.Г. Чернышевского
672007, г. Чита, ул. Бабушкина, 129