

СТАТЬИ

УДК 550.42:546.16(571.55)

**ПРИЧИНЫ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ
СОЛЕННЫХ ОЗЕР ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ**

Борзенко С.В.

*ФГБУН Институт природных ресурсов, экологии и криологии
Сибирского отделения Российской академии наук, Чита, e-mail: svb_64@mail.ru*

На территории Восточного Забайкалья в близких геолого-геоморфологических и ландшафтно-климатических условиях встречаются три геохимических типа соленых озер: содовые, сульфатные и хлоридные. Они отличаются химическим составом, pH и минерализацией вод. Содовые озера выделяются относительно высоким содержанием карбонатного комплекса и значением pH. Хлоридные озера по средним оценкам характеризуются максимальной соленостью и концентрацией хлора, но низким значением pH и содержанием карбонатов. Сульфатный тип отличается минимальной соленостью. Показано, что наиболее крупные с большим объемом воды и большей площадью водосборов – это содовые водоемы. Расчет по соотношению объемов вод приходной и расходной частей водного баланса показал, что объем испаряющейся воды по сравнению с объемом поступающей с атмосферными осадками и подземными водами для хлоридных озер существенно выше, чем для содовых озер, поэтому последние в большей степени подвержены испарению, а их воды более минерализованные. Показано, что содовые озера расположены в зоне более интенсивного подземного питания и непосредственно связаны с грунтовыми и трещинно-пластовыми водами осадочных отложений, а в отдельных случаях трещинно-жильными водами разломов, поэтому они имеют достаточно стабильный гидрологический режим, а их морфометрические характеристики в меньшей степени зависят от климатических характеристик. Установлено, что в формировании химического состава вод помимо испарительного концентрирования участвуют внутриводоемные процессы и процессы взаимодействия воды с вмещающими породами.

Ключевые слова: соленые озера, сульфатредукция, вода – горная порода, испарение

**THE REASONS FOR THE HYDROGEOCHEMICAL DIVERSITY
OF THE SALT LAKES OF EASTERN TRANSBAIKAL**

Borzenko S.V.

*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Chita, e-mail: svb_64@mail.ru*

On the territory of Eastern Transbaikalia, in close geological-geomorphological and landscape-climatic conditions, there are three geochemical types of salt lakes: soda, sulfate and chloride. They differ in chemical composition, pH and mineralization of waters. Soda lakes are distinguished by a relatively high content of carbonate complex and pH value. Chloride lakes, according to average estimates, are characterized by maximum salinity and chlorine concentration, but low pH and carbonate content. The sulfate type is characterized by minimal salinity. It is shown that the largest with a large volume of water and a larger catchment area are soda ponds. The calculation of the ratio of water volumes of the incoming and outgoing parts of the water balance showed that the volume of evaporating water compared with the volume of incoming precipitation and groundwater for chloride lakes is significantly higher than for soda lakes, therefore the latter are more susceptible to evaporation, and their waters are more mineralized. It is shown that soda lakes are located in a zone of more intensive underground feeding and are directly connected with ground and fractured-formation waters of sedimentary deposits, and in some cases fractured-vein waters of faults, therefore they have a fairly stable hydrological regime, and their morphometric characteristics depend less on climatic characteristics. It has been established that in addition to evaporative concentration, intra-reservoir processes and processes of interaction of water with host rocks participate in the formation of the chemical composition of waters.

Keywords: salt lakes, sulfate reduction, water-rock, evaporation

Причины гидрохимического разнообразия озер обсуждаются многими исследователями, основной причиной является испарение озерных вод, сопровождающееся последовательным осаждением минералов по мере насыщения ими озерных вод, сначала наименее растворимыми карбонатами кальция и магния, а затем сульфатами кальция, натрия и т.д., со сменой химического типа от карбонатного к сульфатному и далее к хлоридному [1–4]. Однако, как показали многочисленные исследования, выпариванием воды пресной, соленой, морской и т.д. не удастся получить содовые воды [5–8].

В то же время доказано, что содовые воды образуются на определенном этапе взаимодействия воды с вмещающими алюмосиликатными и силикатными породами, а конкретно на этапе достижения равновесия вод с карбонатными минералами [9, 10].

Цель исследования – определение основных процессов, контролирующих формирование различных геохимических типов соленых озер Восточного Забайкалья.

Материалы и методы исследования

На территории Восточного Забайкалья в бассейнах рек Ингоды, Онона и внутрен-

него стока находится более сотни озер, некоторые из них возникли при деградации речной сети на фоне аридизации климата, другой вид встречается в районе Торейских озер и в среднем течении р. Онона, они не обнаруживают связи с речной сетью и представляют собой самостоятельные образования [11]. На левобережье р. Онон цепь озерных котловин тяготеет к тектоническим разрывам, фиксирующим зону сочленения Цасучейской впадины с окружающими ее с севера молодыми поднятиями (рис. 1).

На правобережье р. Онон цепь малых озерных котловин локализована в зоне сочленения Цасучейской впадины с Байн-Цаганским и Кысытуйским поднятиями. Малые озерные котловины широко развиты также вдоль побережья озер Барун-Торей и Зун-Торей. Они приурочены к участкам древней денудационной равнины, перекрытой маломощными рыхлыми осадками, и поверхностям цокольных озерных террас. Линейные озерные котловины здесь располагаются над зонами тектонических разрывов северо-западного простирания.

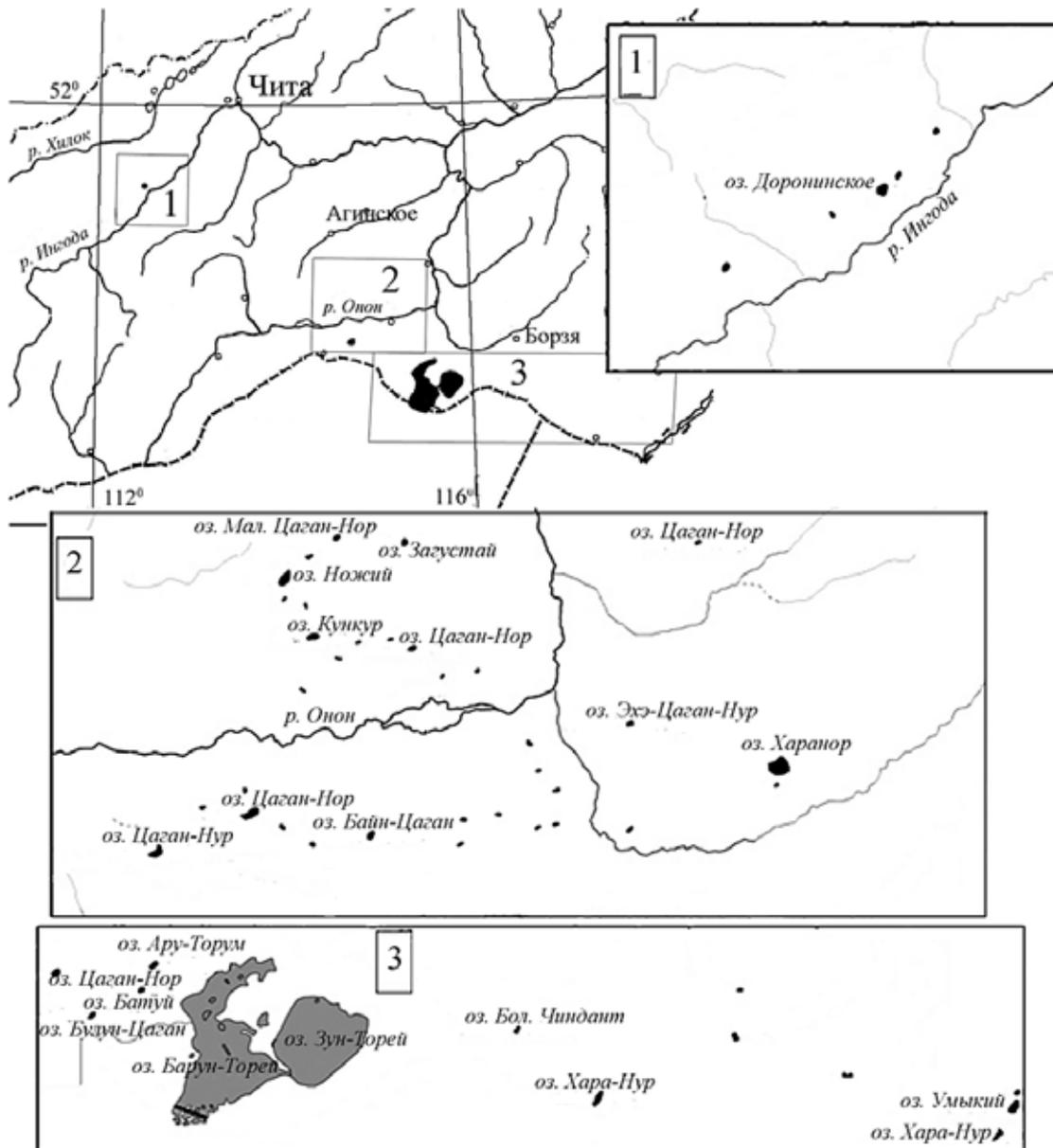


Рис. 1. Схема размещения озер на территории Восточного Забайкалья по приуроченности к речным бассейнам 1 – Ингода, 2 – Онон и области 3 – внутреннего стока

Площади озер варьируют от нескольких десятков квадратных метров до 580 км². Чаще глубина озер не превышает первых метров от зеркала воды. Наиболее глубокие (более 5 м) из изученных озер – Байн-Цаган, Ножий и Доронинское. При всем различии морфометрических параметров водоемов общее у них одно: все они бессточные, с отсутствием поверхностного стока. Многие озера располагаются в замкнутых западинах, имеющих чаще всего характер концевого бассейна, собирающего грунтовые воды определенной территории.

Для того чтобы разобраться во всем многообразии озер, их классифицировали по морфометрическим характеристикам. Для этого были применены снимки с космического аппарата Landsat TM, ETM+ и OLI с разрешением 30 м, с уровнем обработки Level1. Данные были получены посредством сервиса EarthExplorer – <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Обработка снимков и вычисление водных индексов производились с помощью средств Image Classification и Spatial Analyst ArcGIS 10.

Основной отбор проб воды проводился в период с 2013 по 2017 г. Всего было опробовано и проанализировано 97 озер. Исследовался широкий комплекс физико-химических параметров вод, анализ которых был проведен стандартными методами в аттестованной лаборатории ИПРЭК СО РАН. Концентрации кальция Ca²⁺ и магния Mg²⁺ определялись методом атомной абсорбции в закисно-ацетиленовом пламени на спектрофотометре SOLAAR 6M. Для определения натрия Na⁺ и калия K⁺ использован пламенно-эмиссионный метод. Потенциометрически с применением ионселективных электродов находились O₂, F⁻, pH, Eh, Cl⁻. Титрование применялось для определения содержания ионов CO₃²⁻ и HCO₃⁻. Через бихроматную окисляемость рассчитывался органический углерод C_{орг}. Сульфат-ион SO₄²⁻ анализировался турбидиметрическим методом в виде сернокислого бария. Сероводород (S²⁻) определялся фотометрическим методом. Показатели погрешности измерений концентраций компонентов соответствовали международным требованиям.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ распределения озер по морфометрическим характеристикам показал, что подавляющее их большинство (72 %) относится к числу так называемых небольших озер площадью от 1,0 до 10,0 км² (табл. 1).

Озера с площадью зеркала более 10 км² относительно малочисленны (4 %), но их суммарная площадь сравнительно велика и составляет 82,2 % от общей акватории всех озер региона. Самыми крупными водоемами являются озера Барун-Торей и Зун-Торей, акватории которых в многолетний период приближаются к 500 и 380 км² соответственно.

Согласно классификации [7] было выделено три геохимических типа озер: содовые, к которым отнесли озера с pH ≥ 9,0; хлоридные, если pH < 9,0, а среди анионов преобладает хлор, и сульфатные, если pH < 9,0, но среди анионов доминирует сульфат. Такой подход позволяет сравнивать озера не только по химическому их составу, но и по процессам, участвующим в их формировании.

Наибольшим распространением среди изученных водоемов пользуются озера содового типа, на долю которого приходится 87 %, реже встречаются сульфатные (3 %) и хлоридные (10 %). Основным отличительным признаком первых является их высокая щелочность, достигающая максимальных значений в озере Куджертай (pH = 10,7), при среднем значении по выборке pH = 9,54 (табл. 2).

Между минерализацией вод и значением pH имеет место прямая зависимость с коэффициентом парной корреляции r = 0.7. Они характеризуются относительно высокими концентрациями карбонатного комплекса HCO₃⁻+CO₃²⁻, содержание которого варьирует в широком диапазоне с максимумом в рассольном озере Борзинское (30 г/л), при среднем значении по выборке 2,85 г/л. До солености 15 г/л интенсивнее накапливаются карбонаты, если соленость выше, рост хлоридов опережает рост карбонатов и сульфатов. Среди катионов повсеместно доминирует натрий.

Таблица 1

Распределение озер по размерам их акваторий

Градация озер, км ²	Суммарная площадь, км ²	% от общего количества озер	% от суммарной площади озер
Малые (до 1,0)	20,7	24	2,2
Небольшие (от 1,1 до 10,0)	148,8	72	15,7
Большие (от 10,1 до 100 и выше)	781,0	4	82,2

Таблица 2

Основные химические параметры озер Восточного Забайкалья по выделенным типам

Показатели	Содовый тип, n = 84			Сульфатный тип, n = 3			Хлоридный тип, n = 10		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
pH	9,53	9,02	10,74	8,74	8,32	8,90	8,17	7,40	8,70
CO ₂ , мг/л	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	144	132	156
C _{орг} ² , мг/л	190,6	10,3	7600	21,8	11,4	32,3	72,9	113,4	368,0
S ²⁻ , мкг/л	508	<5,00	370200	19	<5,00	278	469	<5,00	1250
CO ₃ ²⁻ +HCO ₃ ⁻ , г/л	3,1	0,05	30	0,81	0,07	1,8	0,50	0,06	2,1
SO ₄ ²⁻ , г/л	2,2	0,01	62	2,9	0,49	7,6	3,5	0,21	14
Cl ⁻ , г/л	4,2	0,03	134	0,90	0,27	2,1	17,8	1,2	101
F ⁻ , г/л	0,01	0,001	0,41	0,002	0,001	0,005	0,007	0,001	0,04
Ca ²⁺ , г/л	0,02	0,001	0,08	0,05	0,005	0,08	0,10	0,006	0,62
Mg ²⁺ , г/л	0,07	0,001	0,40	0,06	0,03	0,09	0,62	0,01	3,8
Na ⁺ , г/л	5,1	0,27	125	2,2	0,39	5,4	13	1,35	65
K ⁺ , г/л	0,06	0,002	0,44	0,02	0,01	0,04	0,08	0,01	0,24
M, г/л	15	3,1	343	6,9	1,8	17	35	4,6	185

Примечание: 1 – среднее, 2 – минимальное, 3 – максимальное содержание, – данные отсутствуют, M – минерализация воды.

Сульфатный тип озер выделяется относительно низкой минерализацией и незначительным диапазоном варьирования pH вод, среднее значение которых составляет 6,90 и 8,74 г/л соответственно. Самое минерализованное в этой группе водоемов озеро Барун-Шивертуй имеет минимальное значение pH воды и отличается максимальными концентрациями SO₄²⁻ (7,58 г/л), Cl⁻ (2,05 г/л) и HCO₃⁻+CO₃²⁻ (1,70 г/л). При этом на долю карбонатной составляющей в среднем приходится 12 мг-экв. %, а сульфат-ионов – 51 мг-экв. %.

Хлоридные озера отличаются максимальной по всей выборке минерализацией (среднее 35,2 г/л) и минимальным значением pH вод (8,17), между значениями которых имеет место обратная зависимость (r = -0,9). Концентрация Cl⁻ в процент-эквивалентных отношениях в среднем равна 80 экв. %, на долю сульфатов приходится 12, а карбонатов – 8 экв. %. Как и в предыдущих двух типах озер, натрий является основным катионом. Калий, кальций и магний находятся здесь в подчиненных количествах.

Анализ значения коэффициента отношений водосборной площади озер S_{водосбор} к площади зеркал самих озер S_{озера} показал, что наиболее крупные с большим объемом воды и большей площадью водосборов – это содовые водоемы, они имеют большие значения коэффициента этого отношения (от 2 до 54, среднее 25). Другая часть озер, отнесенных к малым и небольшим водо-

емам, имеют гораздо меньшее значение (2–10, среднее 9), чаще это относится к хлоридным озерам.

Установлено, что для озер с объемом водной массы от 1 до 0,001 км³ минерализация изменяется от 1,17 до 15 г/л, а при меньших объемах может достигать 50 г/л и более (рис. 2).

Водное питание изученных озер осуществляется атмосферными осадками, выпадающими на зеркало, временными дождевыми потоками и подземными водами [10]. Питание озер небольшими реками и ручьями присуще единичным озерам, но даже в этом случае реки и ручьи существуют периодически во время большого количества атмосферных осадков. Поэтому их доля совместно с ливневым стоком в водном балансе не превышает 10 %, чаще основное питание озера получают с атмосферными осадками [11].

Для пяти содовых и четырех хлоридных типов озер на основе их морфологических и гидроклиматических характеристик проведены расчеты объемов поступающих подземных вод с водосборных площадей озер Vz и испарившейся воды Vx в озерах за год (табл. 3).

Допуская отсутствие подземного стока из озер, поскольку они зачастую являются местным базисом разгрузки подземных вод, принимаем, что расходные статьи представлены только испарением с их водной поверхности.

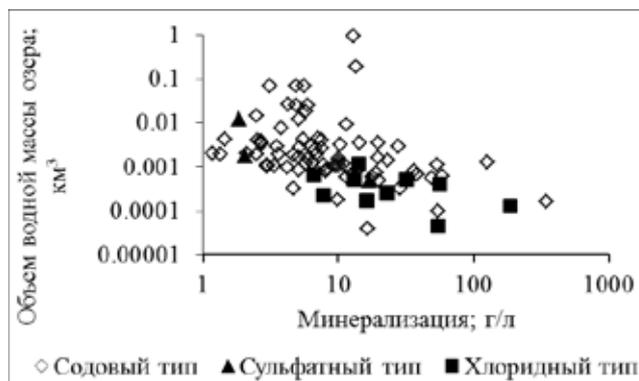


Рис. 2. Зависимость солености озер от их объема

Таблица 3

Основные морфометрические и водно-балансовые характеристики озер

Название	Площадь озера	Глубина	Площадь водосбора	Атмосферные осадки на поверхность озера	Испарение с водной поверхности	Суммарный подземный и поверхностный приток с водосбора	Разница между суммарным притоком и оттоком
	км ²						
Содовый тип							
Зун-Торей	260	7,5	25100	67600	231400	153973	0,96
Доронинское	4,8	8	100	1632	2352	613	0,95
Байн-Цаган	3,36	7,5	65	874	1982	399	0,64
Баян-Булак	1,48	5,5	55	385	873	337	0,83
Ножий	12,3	7,5	171,5	3198	7257	1052	0,60
Хлоридный тип							
Хилганта	0,62	0,5	1,63	161	366	7	0,46
Горбунка	0,95	0,2	2,28	247	561	10	0,46
Бильчир-Нуур	0,65	0,3	5,21	169	384	24	0,50
Дабаса-Нор	0,55	0,3	5,32	143	325	24	0,52

Объем испарения с водной поверхности озера определялся исходя из его площади и величины испарения по [12]. Объем подземного стока, ввиду отсутствия данных, рассчитывался по модулю речного стока определенного района [13] и площади водосбора озера согласно формуле

$$V_z = Q_{cp} \cdot t,$$

где Q_{cp} – модуль стока (л/с км²), t – время (с).

Как показали расчеты, соотношение приходной и расходной составляющих водного баланса в изученных озерах разное.

Так в содовых озерах отношение приходной части воды к расходной колеблется в пределах 0,60–0,99, а в хлоридных оно значительно ниже и составляет только 0,46–0,52, т.е. количество испарившейся воды существенно выше поступившей за счет атмосферных осадков и с водосборов.

В качестве доказательства различного масштаба испарения, влияния на гидрологический и, как следствие, гидрохимический режимы озер сравнительному анализу были подвергнуты 17 водоемов, из которых – с площадью от 300 до 4 км² – Зун-Торей,

Хара-Нуур и Цаган-Нуур; от 4 до 1 км² – Ганга-Нуур, Борзинское, Шварцивское, Доронинское и Шихалин-Нуур; менее 1 км² – Хараганаш, Барун-Шивертуй, Бильчир-Нуур, Бабье, Куджертай, Большая Булугунда, Хилганта, Горбунка, Цаган-Тором.

За начальную точку отсчета изменения площадей акваторий принят 1989 г., который характеризует гидрологический режим озер в фазу нарастания увлажненности. Начало ее приходится на 1982 г. Данные за 1989–2016 гг. относятся к фазе аридизации климатических условий. Анализ космических снимков показал, что за рассматриваемый период существенно изменились преимущественно площади зеркал малых водоемов, в числе которых в основном озера хлоридного и сульфатного типов (за исключением озера Кука-Азырга), которые полностью высохли к 2016 г. (рис. 3).

В меньшей степени изменения коснулись крупных содовых озер Зун-Торей, Цаган-Нуур, Доронинское, Баин-Цаган, Хара-Нуур.

Согласно геоморфологии района наиболее крупные – содовые озера локализованы в центральных частях депрессий или в пределах их бортов. Они чаще занимают более низкие абсолютные отметки. Так, абсолютные отметки уровней воды содовых озер (для бассейнов р. Онон и внутреннего стока) колеблются от 629 до 657 м, а хлоридных – от 661 до 691 м. Это значит, что содовые озера расположены в зоне более интенсивного подземного питания и непосредственно связаны с грунтовыми и трещинно-пластовыми водами осадочных отложений, а в отдельных случаях – с трещинно-жильными водами разломов [14], поэтому они имеют достаточно стабильный гидрологический режим, а их морфометрические характеристики в меньшей степени зависят от климатических характеристик. Хлоридные озера имеют слабую связь с подземными водами, отчего пересыхают в засушливый период, превращаясь в солончаки.

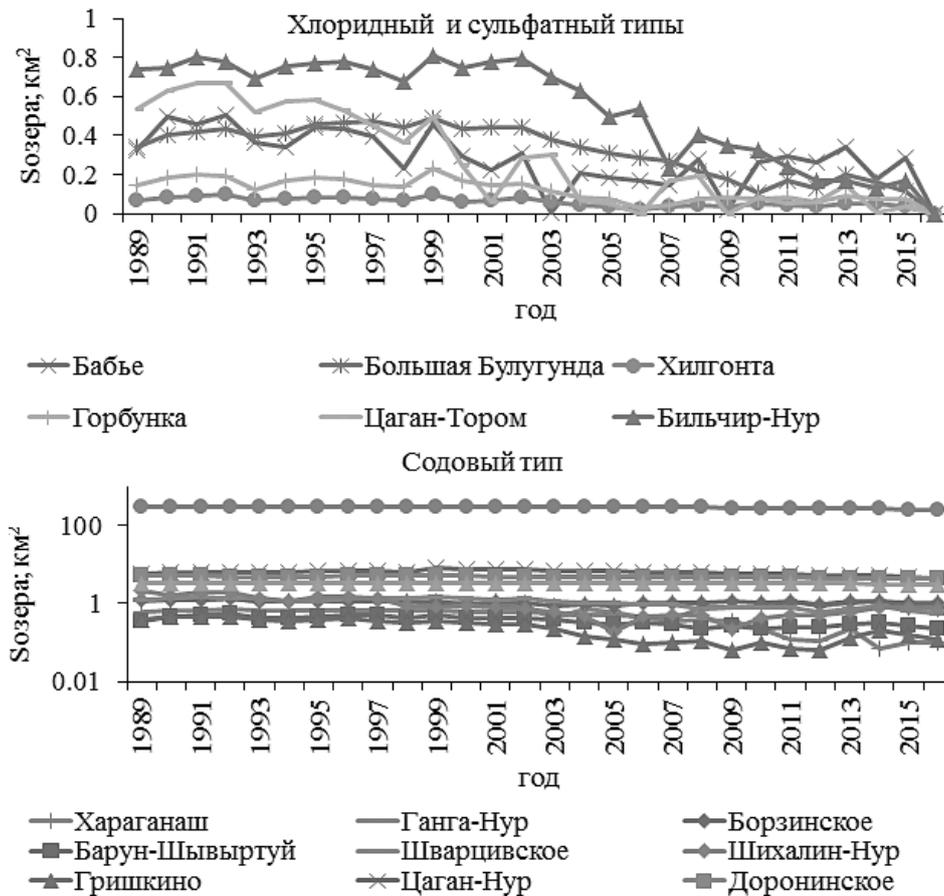


Рис. 3. Изменение площадей водных зеркал соленых озер по выделенным типам за 1989–2016 гг.

Таблица 4

Химический состав озерных вод по данным исследований
в 1987 г. и 2000-х гг. (мг/л)

N п/п	Озера	Дата отбора проб	pH	CO ₃ ²⁻ + HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	F ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	M
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Содовый тип												
1	Нарым-Булак	13.07.87	9,03	657,7	252,0	2816	3,6	13,3	31,4	2113	16,9	5904
		15.08.13	9,11	3679	130,9	2488	11,1	9,2	64,8	2853	145,4	9381
2	Зун-Торей	14.07.87	9,70	3179	1185	2136	9,7	1,2	47,9	3056	27,8	9643
		15.08.15	9,60	4587	1806	2412	14,7	11,3	40,6	4425,0	81,9	13379
3	Балыктуй	20.08.87	9,07	1090	61,5	316,8	5,0	16,9	46,9	524	32,5	2094
		01.09.15	9,33	1734	145,6	447,4	7,7	11,4	31,8	924	16,0	3318
4	Хадатуй	20.08.87	9,45	2795	262,0	2128	19,0	7,7	83,3	2393	40,2	7728
		01.09.13	9,53	1818	665,4	2925	25,0	1,0	7,2	2840	83,4	8365
5	Байм-Булак	21.08.87	9,00	453,0	44,0	346,5	4,8	14,3	78,1	395	20,7	1356
		01.09.15	9,15	902,0	102,3	431,7	4,4	5,6	129	596	3,0	2174
6	Гашкой	11.08.87	9,13	3196	600,0	4704	8,3	3,1	132,8	4624	88,9	13357
		17.08.13	9,38	5145	1650	6103	13,1	2,5	127,3	6386	114,0	19541
7	Баин-Цаган	17.08.87	9,34	1715	183,3	939,1	6,6	14,0	43,9	1276	56,1	4234
		03.09.15	9,44	2146	147,8	1023,0	7,6	11,8	25,8	1472	23,3	4857
8	Ганга-Нур	14.08.13	9,37	767,0	676,5	1415	6,0	7,7	14,1	1489	10,5	4386
		04.09.14	9,71	1236	1416	1651	13,8	39,8	25,5	2100	4,7	6487
9	Харанор	13.08.87	9,40	1180	720,0	790,0	5,5	19,3	55,0	1176	9,9	3956
		06.09.15	9,37	1679	1216	887,2	5,7	18,8	36,0	1765	4,4	5612
10	Хараганаш	14.08.87	9,16	847	1647	634,8	4,5	14,8	245,8	657	120,0	4551
		15.08.13	9,83	1192	1680	886,3	3,4	3,1	54,4	1496	306,3	6622
Хлоридный тип												
11	Укшинда	12.08.09	8,90	1661	166,0	1030	9,5	9,7	94,9	1168	43,6	4183
		06.09.15	8,94	2285	299,1	1697	12,8	6,2	41,8	1945	21,4	6308
12	Горбунка	13.08.13	8,08	109,0	2100	12053	0,7	59,1	468	7830	103	22723
		20.08.14	7,47	355,5	13680	101088	0,4	160	3795	65000	237	184650
13	Дабаса-Нор	13.08.09	8,51	395,8	1710	3727	1,0	58,7	1279	2943	261,0	10375
		18.08.13	7,45	204,0	7500	26580	0,3	129,0	607,6	19475	177,2	54673
14	Бабье	13.08.09	8,88	598,8	170,0	415,3	4,4	73,1	145,2	318,4	2,1	1647
		18.08.13	8,70	377,0	1013	2836	2,6	22,6	104,3	2229	17,4	6602

Примечание: М – минерализация.

Многолетние наблюдения за гидрохимическим состоянием соленых озер показывают, что во влажные периоды происходит разбавление воды, а в засушливые, напротив, ее концентрирование. В качестве примера различных масштабов влияния климатических характеристик на соленость озер выбраны результаты гидрохимических исследований на озерах, локализованных в бассейне р. Онон, выполненных с разрывом более чем

в 20 лет в разные фазы климатического увлажнения территории. В настоящую фазу аридизации климатических условий изменились не только морфометрические характеристики озер, но и существенно выросла соленость вод в сохранившихся озерах (табл. 4).

Соленость воды в рассматриваемых озерах в первый срок варьировала в пределах 1,76–14,4 г/л и была существенно ниже, чем во второй – 2,17–42,4 г/л.

Таблица 5

Состав и индекс насыщения SI озерных вод вторичными минералами по выделенным типам и подтипам минеральных озер (расчет по MINTEQ)

Минералы		Содовый			Сульфатный			Хлоридный		
		Сред.	Мин.	Мак.	Сред.	Мин.	Мак.	Сред.	Мин.	Мак.
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Каолинит	0,63	0,5	5,6	2,5	0,93	5,6	2,8	0,10	11
$Ca(Si_4Al_2O_{12} \cdot 4H_2O)$	Ломонтит	5,1	-2,8	8,7	-2,2	-2,2	-2,5	-2,7	-3,8	-2,9
$CaCO_3$	Кальцит	1,1	-0,12	2,2	0,33	-0,48	1,5	-0,42	-1,7	0,17
$CaMg(CO_3)_2$	Доломит	3,3	-0,02	4,9	2,0	0,26	3,2	0,20	-2,4	1,8
CaF_2	Флюорит	-1,0	-4,9	0,95	-2,0	-2,6	-1,2	-1,5	-3,2	0,29
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Гипс	-2,6	-3,7	-1,4	-1,5	-2,3	-0,95	-1,5	-2,8	0,01
$MgCO_3$	Магнезит	1,0	0,1	1,8	0,20	0,04	0,60	0,53	0,3	0,98
$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$ м	Монтмориллонит	3,8	1,6	3,5	1,4	-1,2	1,5	2,6	-2,2	5,0
$FeS \cdot 2H_2O$	Гидротроилит	-1,9	-11	2,2	-5,1	-12	-1,7	-5,4	-13	-0,36
$FeO(OH)$	Гетит	6,7	3,1	8,5	7,8	7,4	8,1	7,0	5,1	10
Fe_2S_4	Грейгит	4,6	-33	27	-0,03	-28	6,8	-0,81	-28	18
$Fe^{3+}O(OH)$	Лепидокрокит	5,8	2,2	7,6	6,9	6,5	7,2	6,1	4,2	9,5
$(Fe,Ni)_{1+x}S$ (x=0-0,07)	Макинавит	-1,3	-10	2,8	-4,4	-11	-1,0	-4,7	-12	0,30
FeS_2	Пирит	22	-31	44	-16	-69	20	10	-6,4	20
$FeCO_3$	Сидерит	0,20	-5,1	2,3	-0,90	-1,2	-0,5	-1,4	-3,8	3,2
$Mn^{2+}Mn_3^{3+}O_4$	Гаусманнит	-7,2	-62	10	-45	-11	-10	-21	-28	-14
$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	Натрон	-4,7	-9,6	-2,3	-5,6	-6,4	-4,1	-5,4	-7,4	-4,2
$NaCl \cdot 2H_2O$	Гидрогалит	-3,8	-5,6	-2,6	-3,8	-4,5	-3,0	-2,4	-3,6	-0,6

Примечание: отрицательное значение SI означает, что воды недосыщены по отношению к минералу, положительное – пересыщены (возможно, его осаждение в донный осадок). Условие равновесия $SI = \pm 0,3$.

Сравнение результатов за разные периоды показало, что минерализация воды в хлоридных озерах может повышаться за короткий отрезок времени в несколько раз в зависимости от исходной ее величины и объема воды в конкретном водоеме. По средним оценкам соленость содовых озер более чем за 20 лет выросла всего в 2,5 раза, а хлоридных за 1–4 года изменилась в 7 раз. Изменение химического состава вод при увеличении солености также различно. В случаях хлоридных озер происходит закономерный рост преимущественно относительного содержания хлоридов, а в содовых озерах карбонатные компоненты накапливаются более интенсивно, непропорционально хлору в обоих типах увеличиваются содержания сульфатов.

В соленых озерах приходные статьи гидрохимического баланса карбонатов кроме поступления с подземным и поверхностным стоком складываются также за счет двух процессов: разложения воды в результате

гидролиза алюмосиликатных пород ложа озер и минерализации растворенных и накапливающихся в донных осадках органических веществ ($C_{орг}$) [15, 16]. Одним из источников CO_2 служит $C_{орг}$, подвергающийся бактериальной деструкции детрит, который поступает с водосборов и продуцируется в самих водоемах сообществами микроорганизмов. В соленых озерах Восточного Забайкалья суммарная бактериальная продукция ОВ оценивается до 33,6 мг $C/(m^2 \cdot сут.)$ [17], а содержание $C_{орг}$ достигает 7600, при среднем значении 173 мг/л.

С микробиологическими процессами связано и отставание в накоплении в озерных водах сульфат-иона. Происходит это исключительно вследствие процессов сульфатредукции. Содержание S^{2-} в озерах изменяется от предела обнаружения (5 мкг/л) до 370 мг/л. Из рассматриваемых водоемов сульфатредукция максимально проявлена в озерах Доронинское, Хилганта, Горбунка, Хоточей, Шварцивское, Бол. и Мал. Якши.

Из изученных в микробиологическом отношении озер Доронинское, Барун-Торей, Горбунка и Хилганта наиболее интенсивно процесс восстановления сульфатов протекал в первом, скорость сульфатредукции достигала 28 мгS/дм³·сут. И только в редких случаях, когда в озере сульфатредукция проявлена слабо, а горные породы содержат сульфиды, имеет место окисление сульфидов. Содержание сульфатов в таких озерах растет вплоть до образования сульфатных озер.

Важным фактором формирования химического состава озер является осадкообразование, связанное с насыщением воды по определенным минеральным фазам. По данным термодинамических расчетов, для озер характерен карбонатный тип седиментации (табл. 5), в составе гидрогенных выпадений основными являются кальцит, доломит, магнезит, сидерит, в незначительном количестве могут присутствовать глинистые минералы (каолинит, монтмориллониты, иллиты), цеолиты (ломонтит, пренит) и др.

Судя по многим озерам, при сульфатредукции донные осадки содержат сульфиды металлов, в особенности железа. На возможность формирования в озерах сульфидов железа указывают и термодинамические расчеты. Гипсовая стадия минералообразования, несмотря на достаточно высокую в ряде случаев соленость озер, не наступает, что главным образом обусловлено мобилизацией кальция карбонатными минералами. Появление геохимических барьеров в виде вторичных минералов меняет направленность формирования состава вод: ограничение концентрирования Са, Mg и К автоматически обеспечивает среди ведущих катионов рост содержания Na (табл. 1, 2).

Если количество карбонатных ионов в озере не растет или растет медленно из-за связывания их выпадающими карбонатными минералами, а испарение велико, то содержание хлора становится более высоким, а тип переходит в хлоридный. Вероятно, в хлоридных озерах вода испаряется быстрее, чем происходит концентрирование OH⁻, поэтому растут соленость и содержание хлора, а количество карбонатов остается относительно низким [18, 19].

Заключение

В близких ландшафтно-климатических условиях широко распространены разнообразные по составу, солености и морфометрическим характеристикам озера. Аридный климат района исследований

определяет высокую степень их испарения. Проведенный нами расчет по соотношению объемов вод приходной и расходной частей водного баланса показал, что объем испаряющейся воды по сравнению с объемом поступающей с атмосферными осадками и подземными водами для хлоридных озер существенно выше, чем для содовых озер, поэтому последние в большей степени подвержены испарению, а их воды более минерализованные. Испарительное концентрирование вод – важный процесс формирования озер, но далеко не единственный. Другими значимыми процессами являются гидролиз алюмосиликатных пород, осадкообразование и минерализация органического вещества, контролирующая в озерах содержание углекислотных производных и сульфат-ионов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-17-00035 «Экология и эволюция водных экосистем в условиях климатических флуктуаций и техногенной нагрузки».

Список литературы

1. Шварцев С.Л. Созидательная функция воды в формировании окружающего мира // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018. № 9. Вып. 4. С. 1275–1291.
2. Zheng M. Saline lakes and salt basin deposits in China. Beijing: Science Press, 2014. 321 p.
3. Sánchez-España F.J., Díez-Ercilla M., Pérez-Cerdán F., Yusta I. and Boyce A. Hydrological investigation of a multi-stratified pit lake using radioactive and stable isotopes combined with hydrometric monitoring. *Journal of Hydrology*. 2014. No. 511. P. 494–508.
4. Посохов Е.В. Химическая эволюция гидросферы. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 359 с.
5. McCaffrey M.A., Lazar B., Holland H.D. The evaporation path of seawater and the coprecipitation of Br^- with halite. *J. Sedim. Petrol.* 1987. V. 57. P. 928–937.
6. Brooks R., Gibson J.J., Birks J., Weber M.H., Rodecap K.D., Stoddard J.L. Stable isotope estimates of evaporation: inflow and water residence time for lakes across the United States as a tool for national lake water quality assessments. *Limnology Oceanography*. 2014. Vol. 59 (6). P. 2150–2165. DOI:10.4319/lo.2014.59.6.2150.
7. Шварцев С.Л., Колпакова М.Н., Исупов В.П., Владимиров А.Г., Ариунбилэг С. Геохимия и формирование состава соленых озер Западной Монголии // *Геохимия*. 2014. № 5. С. 432–449.
8. Борзенко С.В. Геохимия соленых озер Восточного Забайкалья: дис. ... докт. геол.-минерал. наук. Чита: ФГБУН Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук, 2018. 271 с.
9. Напрасникова В.Т. Анализ составляющих водного баланса озер // *Вопросы гидрологии Забайкалья. Записки Забайкальского филиала Географического общества СССР: темат. сб. / Отв. ред. А.Т. Напрасников, А.И. Сизиков*. Чита, 1972. Вып. 85. С. 17–25.
10. Гидрохимия рек и озер в зоне резко континентального климата / Под ред. А.В. Иванова. Владивосток: ДВГУ, 1977. 128 с.
11. Иванов А.В., Трофимова Л.Н. Гидрохимия озер Центрального Забайкалья. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1982. 140 с.

12. Географический анализ природных ресурсов Иркутской области / АН СССР, Сиб. отделение, Институт географии; отв. ред. А.Н. Антипов. Иркутск, 1985. 174 с.
13. Обязов В.А., Кирилюк В.Е., Кирилюк А.В. Торейские озера как индикатор многолетних изменений увлажненности Юго-Восточного Забайкалья и Северо-Восточной Монголии // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2021. Т. 3. № 3. С. 204–232.
14. Еникеев Ф.И. Происхождение и эволюция озер Забайкалья. Новосибирск: Наука, 2021. 132 с.
15. Shvartsev S.L. The basic contradiction that predetermined the mechanisms and vector of global evolution. Herald of the Russian Academy of Sciences. 2015. № 85. Вып. 4. С. 342–351.
16. Borzenko S.V., Shvartsev S.L. Chemical composition of salt lakes in East Transbaikalia (Russia). Applied Geochemistry. 2019. No. 103. P. 72–84. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.02.014.
17. Намсараев Б.Б., Бархутова Д.Д. Содовые озера южного Забайкалья – уникальные экосистемы // Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география. 2018. № 1. С. 82–86.
18. Лепокурова О.Е., Шварцев С.Л. Геохимические особенности содовых вод Чулымо-Енисейского артезианского бассейна (Западная Сибирь) // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 5. С. 718–731.
19. Шварцев С.Л. Созидательная функция воды в окружающем мире // Подземные воды востока России. Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXII Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием). / Отв. ред. Д.А. Новиков, С.В. Алексеев, А.Ф. Сухорукова. 2018. С. 42–46.