УДК 550.42:546.16(571.55)

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОВЕДЕНИЯ НЕКОТОРЫХ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ
В МИНЕРАЛЬНЫХ ОЗЕРАХ ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ****Борзенко С.В., Фёдоров И.А.***Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения
Российской академии наук, Чита, e-mail: svb_64@mail.ru, fedorowia@gmail.com*

Сопоставление данных по содержанию микрокомпонентов в водах различных геохимических типов озер показало, что в содовых – в больших масштабах концентрируются Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Si, Zn, Al, Y, Hf, Zr, Nb, W, Ta, Re, Mo, As, U, Th, РЗЭ, в хлоридных – Li, Rb, Ba, Sr, B, Se и Br, а в сульфатных – Cu, Ni, Co. Отсутствие соответствующих специализаций на водосборах большинства озер при широкой вариабельности содержаний этих элементов, а также наличие прямых зависимостей от концентраций основных анионов, в содовом типе карбонатной составляющей, а в сульфатном и хлоридном соответствующих доминирующих ионов свидетельствует о значимой роли геохимической среды в их накоплении. Термодинамические расчеты показали, что высокая миграционная способность этих химических элементов обусловлена наличием наиболее устойчивых их форм миграции в определенном типе озер. Источником микроэлементов являются водовмещающие алюмосиликатные горные породы, растворение которых приводит к тому, что содержания только некоторых подвижных в определенных условиях элементов растут и накапливаются до значительных концентраций. Уран находится преимущественно в формах трикарбонат- $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ и дикарбонат-уранилов $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{2-}$. В восстановительной обстановке он может присутствовать в виде гидроксида $\text{U}(\text{OH})_4$. Торий мигрирует в виде ассоциата $\text{Th}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2^{2-}$. Лантаноиды во всех типах озер представлены $(\text{LnCO}_3)^+$. Для фтора наиболее устойчивой его формой в содовых озерах является F^- , а в хлоридных, с ростом минерализации воды, значимыми становятся его комплексы с основными катионами, а именно MgF^+ и NaF .

Ключевые слова: минеральные озера, геохимические типы озер, микрокомпонентный состав, фтор, литий, уран**SOME TRACE ELEMENTS BEHAVIOR REGULARITY IN MINERAL
LAKES OF EASTERN TRANSBAIKALIA****Borzenko S.V., Fedorov I.A.***Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences, Chita, e-mail: svb_64@mail.ru, fedorowia@gmail.com*

Data comparison basing on trace elements content in lake waters of various geochemical types revealed that Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Si, Zn, Al, Y, Hf, Zr, Nb, W, Ta, Re, Mo, As, U, Th, REE are concentrated in soda lakes on a large scale, while Li, Rb, Ba, Sr, B, Se, Br – in chloride ones, and Cu, Ni, Co – in sulphate lakes. Relevant deposits unavailability within watersheds area of most lakes with ample variability of these elements contents, as well as direct dependencies on basic anions concentrations in carbonate component of soda type, and corresponding dominant ions in that of sulphate and chloride one demonstrates the important role geochemical environment plays in the process of their accumulation. Thermodynamic calculations proved the fact that high migration capacity of these chemical elements is due to their most stable migration forms presence in certain lake types. The source of trace elements is water-bearing aluminosilicate rocks. Resulting from their dissolution contents of only some elements becoming movable under certain conditions increase and accumulate to significant concentrations. Uranium is found in tricarboxylate $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ and dicarbonate uranyl $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{2-}$ forms principally. It can be present in the form of hydroxide $\text{U}(\text{OH})_4$ in a reducing environment. Thorium migrates as an associate of $\text{Th}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2^{2-}$. Lanthanides are represented by $(\text{LnCO}_3)^+$ in all types of lakes. Fluoride-ions are most stable form for fluorine in soda lakes, while with an increase water mineralization his complexes with the main cations become significant in chloride ones, namely MgF^+ and NaF .

Keywords: mineral lakes, geochemical lake types, trace element composition, fluorine, lithium, uranium

В последние годы соленые озера все чаще рассматриваются в качестве источников минеральных возобновляемых ресурсов, эксплуатация которых не требует дорогостоящих технологий и считается экологически безопасной [1–3]. Ранее соленые озера изучались преимущественно как объекты возможной добычи солей, в основном соды, мирабилита, галита. Между тем многие минеральные озера Восточного Забайкалья, наряду с озерами Алтая, Китая, Монголии и других стран, могут рассматриваться как перспективные на промышленные воды, аккумулирующие многие химические элементы, в том числе редкие и редкоземельные [4–6 и др.]. Поэто-

му целью данной работы наряду с определением количества микроэлементов в соленых озерах Восточного Забайкалья является выявление их поведения в определенном геохимическом типе водоема.

Материалы и методы исследования

Опробование озер проводилось в 2013–2018 гг. в ходе экспедиционных исследований. Образцы проб воды отфильтровывались на месте отбора через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм и подкислялась особо чистой концентрированной азотной кислотой марки ос.ч (1:1) до $\text{pH} < 2$, сразу после фильтрации. Пробы для подачи в при-

бор разбавляли деионизованной водой с сопротивлением 18,2 мОм/см до общего содержания солей менее 0,01 г/л. Определения микрокомпонентов в озерных водах были выполнены в аналитических центрах Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск) и Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (г. Новосибирск) методом ИСП-МС. В первом случае на приборе ELEMENT 2, фирмы Finnigan MAT с использованием в качестве стандартов сертифицированных растворов ICP Multi Element Standard Solution Sol XII, Sol X CertiPUR (MERCK) и Combined Quality Control Standart IQC-026 (NIST, США). Во втором на приборе Inductivity Coupled Mass Spectrometer Igilent 7500a. Масс-спектрометр настраивали по Tuning Solution Igilent Part Number 5184-3566. Содержание микроэлементов определяли по многоэлементным эталонным растворам (Multi-Element Calibration Standard-2A Igilent Part Number 8500-8940). Пределы обнаружения для As (75), U (238), Li (7) в ppt соответственно 14; 1,4; 3,2. Приготовление образцов вод для анализа растворимых форм проводилось по методу EPA 200.8. Пробы для подачи в прибор разбавляли деионизованной водой с сопротивлением 18,2 мОм/см до общего содержания солей менее 0,01 г/л.

Химический анализ макрокомпонентного состава вод проведен общепринятыми методами в аттестованной лаборатории ИПРЭК СО РАН. Концентрации Ca и Mg определялись методом атомной абсорбции в закисно-ацетиленовом пламени на спектрофотометре SOLAAR 6M. Для определения Na и K использован пламенно-эмиссионный метод. Потенциометрически с применением ионселективных электродов находились O_2 , F, pH, Eh, Cl. Титрование применялось для определения содержания CO_3^{2-} и HCO_3^- . Через бихроматную окисляемость рассчитывался органический углерод $C_{орг}$. Сульфат-ион анализировался турбидиметрическим методом в виде сернокислого бария.

На территории Восточного Забайкалья насчитывается несколько сотен минеральных озер, локализованных во впадинах, выполненных осадочными и эффузивно-осадочными породами [7]. Наиболее крупные озера Зун-Торей, Баин-Цаган, Цаган-Нур, Доронинское даже в период засухи имеют площадь от нескольких до сотен км². Площадь остальных менее 1 км², глубина их редко превышает несколько метров. При этом мелкие озера пересыхают до дна, а в увлажненные периоды вновь наполняются водой. Все рассматрива-

емые озера бессточные, повышенная соленость их вызвана испарительным концентрированием вод. Большая часть озер относится к содовому типу [8] с минерализацией вод от 1,17 в оз. Хойто-Торум до 342 г/л в оз. Борзинское. Анионный состав, как правило, смешанный с доминированием углекислотных ($HCO_3^- + CO_3^{2-}$) или хлоридных ионов. Реже встречаются хлоридные озера, соленость которых в среднем существенно выше. Смешанный катионный состав отмечается в слабоминерализованных озерах, с ростом солености он изменяется на натриевый [9].

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ полученных данных показал, что содержания микрокомпонентов в озерах варьируют от первых микрограммов до нескольких граммов в литре воды. В содовом типе озер концентрируются V, Sc, Cr, Ti, Fe, Mn, Si, Al, Zn, Y, Zr, Ta, Hf, Nb, Mo, W, As, Re, U, Th, PЗЭ (табл. 1). В озерах хлоридного типа накапливаются литофильные элементы, а именно Li, Rb, Sr, Ba, B, Se и Br. В сульфатных озерах список микроэлементов ограничивается Cu, Co и Ni.

В самом соленом содовом оз. Борзинское отмечаются максимальные содержания мышьяка As – 6007 мкг/л, урана U – 10855 мкг/л, тогда как концентрация лития Li (173 мкг/л) немного выше среднего значения по всей выборке (123 мкг/л). Среди хлоридных озер выделяется оз. Горбунка с максимальной минерализацией воды (184 г/л) и с относительно высокими содержаниями хлора Cl (101,1 г/л), брома Br (368,6 мг/л), стронция Sr 18,5 (мг/л), лития Li (1470 мкг/л), в то время как количество урана U не превышает 59 мкг/л.

Отмечается единая направленность в распределениях содержаний Cl и Li (коэффициент корреляции $r = 0,86$). По результатам термодинамических расчетов литий мигрирует преимущественно в катионной форме Li^+ с превалированием его доли в хлоридных озерах (табл. 2). Вторым по значимости в хлоридных озерах выступает LiCl, а в содовых – $LiCO_3^-$. При этом мольная доля соответствующего ассоциата увеличивается по мере роста концентраций основных лигандов. Ввиду высоких значений произведений растворимости соединений лития – хлорида LiCl и карбоната Li_2CO_3 (цзабуелит), насыщение вод этими солями не происходит [4]. Очевидно, что в отсутствие геохимических барьеров литий концентрируется в растворе подобно хлору, при этом чем больше степень концентрирования воды, тем выше содержание лития в озерах.

Таблица 1

Химический состав соленых озер Восточного Забайкалья по выделенным типам и подтипам

Показатели	Ед. изм.	Содовый тип, n = 87			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	144,0	132,0	156,0
CO ₃ ²⁻ +HCO ₃ ⁻		3073	47,2	30129	806,2	71,9	1798	504,0	61,0	2109
SO ₄ ²⁻		2188	10,2	62340	2901	492	7580	3451	210	13680
Cl ⁻		4168	28,2	133740	900,0	266,0	2050	17783	1196	101088
F ⁻		14,3	0,060	414,0	2,05	0,36	5,11	6,59	0,27	37,1
Ca ²⁺		15,4	0,84	80,0	45,2	4,68	79,2	100,4	6,34	617,5
Mg ²⁺		68,9	1,08	395,2	62,4	33,0	89,5	620,3	9,95	3795
Na ⁺		5045	272,0	124800	2180	392,0	5347	12471	1347	65000
K ⁺		58,9	2,30	440,8	21,2	6,22	43,5	76,5	7,47	237,6
M	г/л	15,3	1,17	343,3	6,91	1,83	16,9	35,2	4,63	184,6
Si	мг/л	5,52	2,30	22,1	3,60	2,90	4,10	3,60	3,40	4,50
Li	мкг/л	173,0	2,00	646,4	156,7	85,1	242,0	269,0	62,1	1470
B		3384	0,010	34722	786,3	275,0	1741	4023	754,6	9725
Be		0,12	0,001	4,62	0,050	0,030	0,10	0,050	0,010	0,11
Al		347,7	4,71	16955	203,0	68,3	397,2	133,3	14,7	415,0
V		73,8	0,001	420,3	32,4	16,5	43,6	24,5	5,99	119,1
Mn		66,7	0,36	4048	56,7	12,2	126,0	6,54	0,52	42,5
Fe		437,6	0,35	18101	232,0	74,6	386,1	84,4	6,55	262,0
Co		1,73	0,001	77,6	1,89	0,80	3,33	0,54	0,24	0,93
Ni		8,14	0,94	243,5	8,70	5,00	24,5	4,94	1,18	20,2
Cu		47,0	0,79	437,6	50,1	9,50	236,3	6,00	1,90	21,0
Zn	мкг/л	375,6	0,67	2313	179,2	108,0	231,2	115,0	3,90	754,3
Ga		0,28	0,010	3,74	0,10	0,050	0,18	0,40	0,010	1,86
Ge		0,48	0,010	6,90	1,31	0,080	3,69	0,88	0,18	2,40
As		419,0	0,21	6007	73,2	25,3	140,4	100,3	13,6	279,0
Se		2,46	0,030	27,1	0,62	0,18	0,96	22,2	0,89	191,0
Br		29881	30,0	624292	5005	2107	10095	83510	10580	368587
Rb		5,57	0,43	53,0	5,67	2,51	10,0	7,52	1,30	25,0
Sr		553,4	2,00	9194	586,7	235,0	973,8	4397	130,0	18506
Zr		49,6	0,12	1104	2,01	0,70	4,48	7,80	0,14	47,5
Sc		0,90	0,001	51,5	0,08	0,01	0,19	0,06	0,004	0,34
Nb		0,11	0,001	1,50	0,060	0,010	0,11	0,030	0,001	0,12
Mo		124,1	3,00	2987	69,7	21,2	156,6	88,1	15,4	379,0
Cs		0,060	0,001	0,95	0,13	0,020	0,32	0,050	0,010	0,13
Ba		51,9	4,20	696,7	41,9	18,6	67,5	112,6	43,9	207,0
ΣРЗЭ		8,31	0,040	108,8	0,89	0,82	0,96	0,66	0,050	2,53
Hf		0,43	0,001	11,0	0,040	0,010	0,060	0,040	0,001	0,20
Th		2,92	0,0003	209,3	0,20	0,030	0,53	0,040	0,0003	0,10
U		215,8	2,55	10855	65,1	13,0	138,7	78,3	15,6	246,1

Примечания: М – минерализация воды; ΣРЗЭ – сумма редкоземельных элементов; 1 – среднее, 2 – минимальное, 3 – максимальное значение, n – количество проб.

Таблица 2
Основные формы миграции
микроэлементов в озерах
(расчет по HG по усредненным данным)

Химический тип Компонент	Содовый	Хлоридный	Сульфатный
	мол. %		
$[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$	99,9	97,9	99,5
$[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{2-}$	0,05	2,13	0,42
$\text{Th}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2^{2-}$	70,3	64,4	65,0
$\text{Th}(\text{CO}_3)_5^{6-}$	1,30	—	—
$\text{Th}(\text{OH})_3\text{CO}_3^-$	27,0	35,1	33,8
$\text{Th}(\text{OH})_4(\text{aq})$	1,25	0,06	0,08
H_3AsO_3	—	—	0,92
H_2AsO_3^-	10,6	—	—
HAsO_4^{2-}	89,4	99,9	99,1
$\text{BeCO}_3(\text{aq})$	0,08	0,30	0,11
$\text{Be}(\text{OH})_2(\text{aq})$	99,9	99,7	99,8
$\text{Zr}(\text{OH})_5^-$	51,9	45,6	42,5
$\text{Zr}(\text{OH})_4(\text{aq})$	47,9	54,0	50,3
$\text{Ga}(\text{OH})_4^-$	99,9	99,9	99,5
$\text{Sc}(\text{OH})_2^+$	0,29	0,40	0,45
$\text{Sc}(\text{OH})_3(\text{aq})$	0,95	1,65	1,62
$\text{Sc}(\text{OH})_4^-$	98,6	97,9	97,5
Li^+	97,0	46,0	48,0
$\text{LiCl}(\text{aq})$	2,46	46,7	46,3
LiSO_4^-	0,89	7,20	7,00
Rb^+	98,0	49,0	49,5
$\text{RbCl}(\text{aq})$	1,29	38,0	38,2
RbSO_4^-	0,71	16,7	15,3
Sr^{2+}	39,2	82,4	58,7
SrCl_2	0,21	12,5	0,45
SrSO_4^-	0,09	3,89	2,75
SrCO_3	7,92	0,68	29,8
$(\text{Sr}(\text{CO}_3)_2)^{2-}$	52,1	0,52	7,65
Br^-	100	100	100
H_3BO_3^-	15,0	47,2	78,0
H_2BO_3^-	85,0	53,8	22,0
$(\text{LnCO}_3)^+$	99,8	99,0	98,7
F^-	90,7	90,2	71,1
MgF^+	5,16	5,01	12,4
CaF^+	0,28	0,38	0,61
$\text{NaF}(\text{aq})$	3,82	4,35	10,3

Источником рубидия и цезия, как и в случае с литием, могут быть алюмосиликаты и силикаты. Повышенными содержаниями этих щелочных металлов от-

личаются такие минералы, как микроклин, мусковит, циннвальдит ортоклаз и др. Цезий и рубидий концентрируются в водах до сильвинитовой и карналлитовой стадий, на которых они соосаждаются с калийными солями. Осаждение этих минералов на данном этапе развития озер не отмечается, поэтому они беспрепятственно накапливаются в растворе.

Основное состояние бора в озерах – борокислородные соединения, количественные соотношения между которыми определяются pH вод. Поэтому в хлоридных озерах преобладающей формой ортоборной кислоты является H_3BO_3^- , а в содовых озерах – H_2BO_3^- . Интрузивные и эффузивные горные породы могут выступать источником бора. В них он содержится как в виде сульфидных примесей, так и рассеянном состоянии. Повышенные количества бора обнаружены в приторейском мелкосопочнике и в эффузивах Кулусутаевского вулканического массива, в пределах которых расположена значительная часть озер, отсюда вполне возможен дополнительный источник бора в озерах.

Количество стронция в хлоридных озерах на порядок выше, чем в содовых и сульфатных. В среднем его концентрация в первых достигает 4397 мкг/л, а максимальное значение определено в оз. Горбунка – 18506 мкг/л. Для сравнения, в более минерализованном содовом оз. Борзинское содержание этого элемента на два математических порядка ниже (174 мкг/л). Усредненные значения концентраций стронция для содовых и сульфатных озер соответственно равны 553,4 и 586,7 мкг/л. Данное обстоятельство связано с тем, что стронций мигрирует в хлоридных озерах наряду с катионом Sr^{2+} в формах SrCl_2 и SrSO_4^- , причем имеет место прямая зависимость Sr с Cl⁻ и Sr с SO_4^{2-} ($r > 0,72$). В озерах содового типа он находится преимущественно в карбонатных формах – $(\text{Sr}(\text{CO}_3)_2)^{2-}$ и SrCO_3 . Более того, подвижность Sr ограничивается образованием стронцианита SrCO_3 .

Бром в рассматриваемых озерах собственных минералов не образует, поэтому концентрируется в больших количествах. В слабоминерализованных водах он связывается с элементами-комплексобразователями (Cu, Pb, Zn, Co и др.).

Повышенные содержания урана обнаружены в озерах содового типа, относительно высокие его концентрации фиксируются в области повышенных значений pH вод. Четко прослеживается прямая

связь урана с карбонат- и гидрокарбонат-ионами ($r = 0,78$), что главным образом связано с образованием его карбонатных комплексов. По расчетам в озерах уран образует уранилкарбонатные комплексы типа $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ и $UO_2(CO_3)_2^{2-}$, устойчивость которых находится в прямой зависимости от pH раствора [10]. Снижение pH вод способствует образованию в хлоридных озерах дикарбонат-уранил ионов, наличие которых напрямую зависит от присутствия в водах лиганда CO_3^{2-} . На стадии содообразования накопление урана подтверждается связью урана с натрием ($r = 0,95$). Преобладание концентраций натрия по сравнению с остальными катионами (кальцием, магнием и калием) в водах начинается с момента осаждения карбонатных минералов и глини [4].

Некоторое обеднение ураном содовых вод при относительно высоких содержаниях карбонат-ионов (оз. Доронинское, оз. Куджертай и др.) объясняется наличием в водной толще сероводородной обстановки ($E_h = -380$ мВ в толще воды оз. Доронинское), при которой U^{6+} восстанавливается до U^{4+} . Далее он легко гидролизует и в конечном итоге выводится из раствора в донные осадки в виде твердой фазы $U(OH)_4$. Возможность восстановления U^{6+} в хлоридных озерах в рассматриваемых случаях менее вероятна, так как здесь чаще преобладают окислительные условия, значения E_h не опускаются ниже -35 мВ (оз. Большая Булугунда).

Аналогично урану проявляет себя мышьяк, причем присутствует он как в содовых, так и в хлоридных типах вод преимущественно в форме гидроарсенат-иона $HAsO_4^{2-}$. Исключение составляют озера с сероводородной обстановкой в водной толще, в которых мышьяк восстанавливается до As^{3+} . С геохимической средой связь мышьяка прослеживается через высокий коэффициент корреляции с гидрокарбонат-ионами HCO_3^- ($r = 0,66$).

Торий характеризуется меньшими содержаниями, чем уран, однако значения его концентраций в озерных водах колеблются в широком диапазоне (от 0,0003 до 209 мкг/л). Данный факт подтверждает более слабые водно-миграционные свойства тория, растворимость этих элементов в воде по U^{6+} и Th^{4+} различается на 3 математических порядка. По сравнению с ураном в содовых озерах зависимость содержания тория от минерализации воды видна неявно. В то же время проявляется связь тория от

количества в водах производных угольной кислоты ($r > 0,8$). По проведенным термодинамическим расчетам доминирующей формой является $Th(CO_3)_2(OH)_2^{2-}$, мольная доля которой в содовых озерах составляет до 80%, в хлоридных же снижается, но при этом остается преобладающей. На втором месте по значимости выступает форма $Th(OH)_3CO_3^-$, доля которой, напротив, растет. Возможно существование тория в форме гидроксида $Th(OH)_4$, так как даже при содержании сотых долей мкг/л тория по этому компоненту воды насыщены (ПР равно $2,0 \cdot 10^{-50}$).

В содовых озерах содержатся в больших количествах также такие химические элементы, как скандий Sc, бериллий Be, галлий Ga, цирконий Zr. Максимальные значения их концентраций составляют: Be – 4,62 (оз. Жилино), Ga – 3,74 (оз. Дунда-Нуур), Sc – 51,5, Zr – 1104 мкг/л (оз. Борзинское), превышая тем самым максимумы содержаний в сульфатных и хлоридных озерах по бериллию и галлию на один, по скандию на два, а по цирконию на три математических порядка. По результатам термодинамических расчетов основной формой их миграции являются гидроксиды: $Ga(OH)_4^-$, $Sc(OH)_4^-$, $Be(OH)_2$ (aq), $Zr(OH)_5^-$ и $Zr(OH)_4$ (aq). Связь данных элементов с геохимической средой наиболее выражена в содовых озерах и проявляется через линейную зависимость их содержаний от концентрации производных угольной кислоты с относительно высоким значением коэффициента корреляции ($r > 0,85$). Источниками скандия, бериллия, галлия, циркония преимущественно являются силикатные и алюмосиликатные минералы, для циркония, в частности, циркон $ZrSiO_4$, в составе которого присутствуют в виде изоморфной примеси гафний Hf и иттрий Y, откуда проявляется максимально выраженная в содовых озерах ($r > 0,74$) согласованность в распределениях их содержаний.

В озерах содержания $\Sigma PЗЭ$ варьируют в широком диапазоне. Максимум $\Sigma PЗЭ$ (108,8 мкг/л) определен в содовом оз. Дунда-Нуур. В хлоридных и сульфатных озерах, в сравнении с содовыми, содержание $\Sigma PЗЭ$ существенно ниже. Важная роль геохимической среды для PЗЭ определяется не только их связью с карбонатным ассоциатом, поскольку они мигрируют во всех типах озер преимущественно в форме $(LnCO_3)^+$, но также их четко выраженным фракционированием с накоплением тяжелой фракции в содовом типе озер [5]. Дан-

ное обстоятельство подтверждается значениями нормализованных отношений La_n/Yb_n равными по усредненным данным для содовых озер 0,32, а для сульфатных и хлоридных озер 1,45 и 0,76 соответственно.

По сравнению с сульфатными и хлоридными типами среднее содержание фтора F на порядок выше в содовых озерах. Максимальное значение (414,0 мг/л) определено в содовом безымянном озере, расположенном в районе оз. Зандай, с повышенной щелочностью (рН 9,68) и минерализацией воды (16,5 г/л). Значения одного порядка установлены для фтора в содовых озерах: Дурбачи, Гришкино, Холбо-3, Зандай. Для примера, в хлоридных озерах Холво-Торум-1 и Дабаса-Нор с водородным показателем вод менее 8,06 содержание фтора ниже 1 мг/л. По всей выборке отмечается согласованность в распределении содержаний фтора и карбонатной составляющей ($r > 0,81$). Для фтора наиболее устойчивой его формой миграции в содовых озерах является ионная F^- , а с ростом минерализации воды в хлоридных значимыми становятся его комплексы с основными катионами, а именно NaF и MgF^+ .

Выводы

Анализ распределения концентраций микроэлементов показал, что содержания фтора, лития, урана и мышьяка в соленых озерах Восточного Забайкалья достигают от первых единиц до нескольких сотен миллиграмм на литр раствора. В хлоридных озерах с более высокой минерализацией в больших количествах накапливается литий, бром, бор, стронций и др. элементы, а в содовых более щелочных водах – фтор, уран мышьяк, торий, редкоземельные элементы и др. Сульфатные озера выделяются повышенными концентрациями меди, кобальта и никеля. Источником рассматриваемых элементов являются водовмещающие горные породы, растворение которых приводит к переходу в раствор всех химических элементов. Различная геохимическая среда в разных типах озер способствует тому, что содержания только некоторых подвижных в этих условиях элементов растут и накапливаются до значительных концентраций.

Исследование выполнено в ходе выполнения государственного задания и частично при финансовой поддержке РФФИ № 18-05-00104 «Геохимия озер Восточного Забайкалья: гидрогеохимические условия формирования и их минеральные ресурсы».

Список литературы / References

1. Исупов В.П., Владимиров А.Г., Шварцев С.Л., Ляхов Н.З., Шацкая С.С., Чулахина Л.Э., Куйбида Л.В., Колпакова М.Н., Ариунбилэг С., Кривоногов С.К. Химический состав и гидроминеральные ресурсы соленых озер Северо-Западной Монголии // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2011. Т. 19. № 2. С. 141–150.
2. Isupov V.P., Vladimirov A.G., Shvartsev S.L., Lyakhov N.Z., Shatskaya S.S., Chupakhina L.E., Kuybida L.V., Kolpakova M.N., Sodov A., Krivonogov S.K. Chemical composition and hydromineral resources of salt lakes in the north West Mongolia // *Chemistry for Sustainable Development*. 2011. V. 19. № 2. P. 141–150 (in Russian).
3. Moores S. Between a rock and a salt lake. *Industrial Minerals*. 2007. № 6. P. 58–69.
4. Zheng M. Saline lakes and salt basin deposits in China. Beijing: Science Press, 2014. 321 p.
5. Борзенко С.В., Замана Л.В., Исупов В.П., Шацкая С.С. Уран, литий и мышьяк в соленых озерах Восточного Забайкалья // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2017. Т. 25. № 5. С. 479–488. DOI: 10.15372/KhUR20170502.
6. Borzenko S.V., Zamana L.V., Isupov V.P., Shatskaya S.S. Uranium, Lithium, and Arsenic in Salt Lakes of Eastern Transbaikalia // *Chemistry for Sustainable Development*. 2017. V. 25. № 5. P. 479–488 (in Russian).
7. Борзенко С.В., Замана Л.В., Зарубина О.В. Распределение редкоземельных элементов в водах и донных осадках минеральных озер Восточного Забайкалья (Россия) // *Литология и полезные ископаемые*. 2017. № 4. С. 306–321. DOI: 10.7868/S0024497X17040024.
8. Borzenko S.V., Zamana L.V., Zarubina O.V. Distribution of Rare Earth Elements in Waters and Bottom Sediments of Mineralized Lakes in the Eastern Transbaikalia Region (Russia) // *Lithology and mineral resources*. 2017. 52 (4). P. 263–277 (in Russian).
9. Колпакова М.Н., Гаскова О.Л., Наймушина О.С., Кривоногов С.К. Озеро Эбейты, Россия: химико-органический и минеральный состав воды и донных отложений // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329. № 1. С. 111–123.
10. Kolpakova M.N., Gaskova O.L., Naymushina O.S., Krivonogov S.K. Ebeity lake, Russia: chemical-organic and mineral composition of water and bottom sediments // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018. V. 329. 1. 111–123 (in Russian).
11. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист М-50 – Борзя. Объяснительная записка / Е.А. Шивохин [и др.]; науч. ред. В.В. Старченко. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2010. 553 с.
12. State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (third generation). Series Aldan-Zabaykalskaya. Sheet M-50 – Borzya. Explanatory note. SPb.: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2010. 553 p. (in Russian).
13. 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. DOI: 10.7868/S0016752514030078.
14. Shvartsev S.L., Kolpakova M.N., Isupov V.P., Vladimirov A.G., Ariunbileg S. Geochemistry and chemical evolution of saline lakes of Western Mongolia // *Geochemistry International*. 2014. V. 52. № 5. P. 388–403. DOI: 10.1134/S0016702914030070.
15. Власов Н.А. Минеральные воды южной части Восточной Сибири. В 2 т. Т. 1. Гидрогеология минеральных вод и их народнохозяйственное значение. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 189–245.
16. Vlasov N.A. Mineral waters of the southern part of Eastern Siberia. In 2 vol. Vol. 1. Hydrogeology of mineral waters and their economic importance. M.-L.: Izd-vo AN SSSR, 1961. P. 189–245 (in Russian).
17. Лисицын А.П. О формах нахождения урана в подземных водах и условиях осаждения его в виде UO_2 // *Геохимия*. 1962. № 9. С. 763–769.
18. Lisitsyn A.P. On the forms of uranium in groundwater and its deposition conditions in the form of UO_2 // *Geochemistry*. 1962. № 9. P. 763–769 (in Russian).