

ГИДРОГЕОХИМИЯ ИВАНО-АРАХЛЕЙСКИХ ОЗЕР

С.В. Борзенко, Л.В. Замана

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия



Проведены гидрогеохимические исследования на Ивано-Арахлейских озерах в разные климатические фазы увлажнения территории. Выявлены три группы водоемов: ультрапресные, пресные и солоноватые. Установлено, что наименее минерализованные воды представлены $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ типом, который с ростом солености и pH вод меняется на $\text{HCO}_3\text{-Na}$ и на последнем этапе $\text{SO}_4\text{-Na}$. Показано, что в большей степени изменению подвержены малые солоноватые и в меньшей – более крупные ультрапресные озера.

Ключевые слова: озера, химический тип, трансформация химического состава, сульфатредукция, вода-горная почва.

Введение

Многочисленными исследованиями озер Центральной части России, Западной Сибири, Прибайкалья и Забайкалья [Леонова и др., 2007; Замана Л.В., Борзенко, 2010; Moiseenko et al., 2013; Шварцев и др., 2014; Гаськова и др., 2017; Дину, 2018; Масленникова и др., 2018 и др.] показано, что озерные системы имеют зональную и региональную специфику условий формирования их геохимических параметров. Более того, они реагируют на изменения окружающей среды [Моисеенко и др., 2013, Савичев и др., 2015; Перязева и др., 2016; Fei et al., 2015]. В последние полвека Ивано-Арахлейские озера активно изучаются, в особенности состав их водных биогеоценозов, так как озера заселены рыбой и используются в рыбохозяйственном отношении [Пьянов и др., 1995; Итигилова и др., 2013]. Проведены эколого-экономические исследования территориально-аквальной экосистемы района с 1995 г. получившего статус «Ивано-Арахлейский государственный природный ландшафтный заказник». В то же время гидрогеохимический анализ проводился фрагментарно [Цыбекмитова и др., 2013]. Между тем в последние десятилетия Ивано-Арахлейские озера испытывают большую антропогенную нагрузку, так как на территории работает сельскохозяйственное предприятие, деятельность которого привела к формированию значительных площадей измененных ландшафтов, также активно используются озера и в рекреационных целях. В связи с этим определение диапазонов и темпов изменения гидрохимических показателей озер имеет важное научное и практическое значение, поскольку при изменении физико-химических показателей среды меняется биологическая составляющая водоемов, состав биогеоценозов и, как следствие, кормовая база ихтиофауны. Кроме того, меняется химический и минералогический со-

став донных осадков – высоконформативный материал для палеоклиматических реконструкций [Птицын и др., 2014]. Сама по себе проблема формирования химического состава вод и его трансформация во времени представляют огромный интерес для современной теоретической гидрогеохимии. Приведенным перечнем не исчерпываются научные и прикладные проблемы, связанные с динамикой функционирования озер.

Объект и методы исследований

На территории Центрального Забайкалья в Беклемишевской впадине расположено около двух десятков озер, природа которых остается спорной. По одним данным, они являются реликтами крупного озерного бассейна мелового возраста, по другим – остатками ледниковых образований [Ивано-Арахлейский заказник..., 2006]. Климат района характеризуется как умеренно влажный. Такое положение обусловлено горным характером рельефа. Количество годовых осадков составляет 350–380 мм, при этом на теплый период приходится большая их часть (280–320 мм). Среднегодовая температура воздуха равна $-3,2^{\circ}\text{C}$. По данным [Географический анализ..., 1985], расчетная среднегодовая величина испарения с поверхности озер Беклемишевской впадины составляет 295 мм.

В настоящем сообщении приведены результаты гидрохимических исследований на озерах Ивано-Арахлейской лимнической системы, выполненных с разрывом более чем в 20 лет в разные фазы климатического увлажнения территории. Результаты 1993 г. характеризуют гидрохимический режим озер в fazu нарастания увлажненности. Начало ее приходится на 1982 г. Данные за 2004 и 2012 гг. относятся к fazе аридизации климатических условий, наступившей в 1999 г. [Обязов, 2010, с. 36].

Все рассматриваемые озера (рис. 1) локализованы в Беклемишевской тектонической впадине, расположенной между Яблоновым хребтом, который об-

рамляет ее с юго-востока, и Осиновым хребтом, являющимся отрогом хребта Цаган-Хуртей, – с северо-запада.

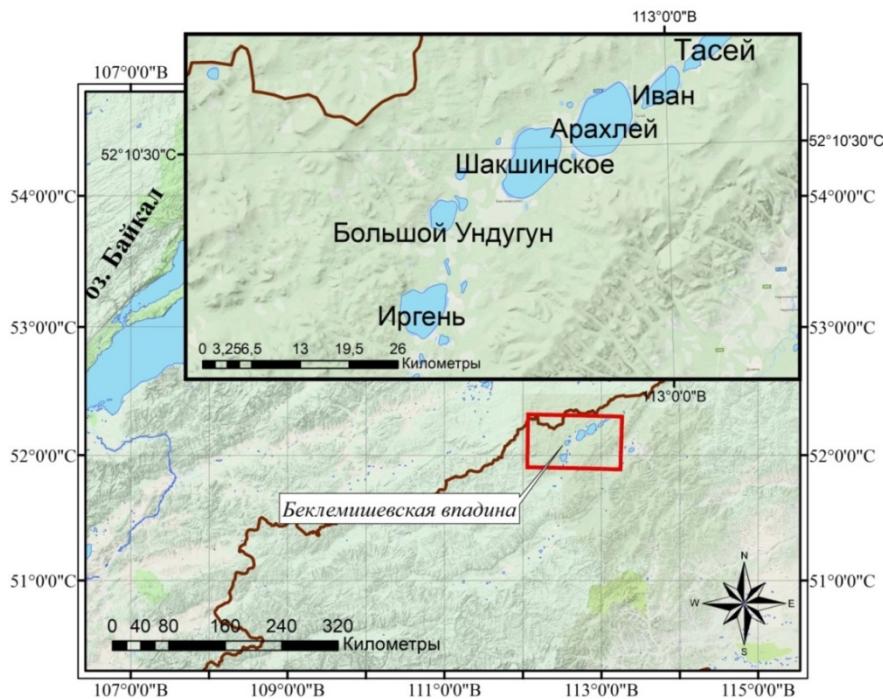


Рис. 1. Схема локализации озер Ивано-Арахлейской системы

Fig. 1. Scheme of localization lakes of the Ivano-Arakhleiskiy system

Впадина протяженностью более 100 км представляет собой слабо всхолмленную равнинную местность с абсолютными отметками 950–980 м. Сложена она осадочными отложениями позднемезозойского и кайнозойского возрастов. Ее горное обрамление выполняют магматические и метаморфические породы протерозоя и палеозоя. Характерной особенностью озерных котловин является то, что они находятся на водоразделах по отношению к бассейнам речных систем, т.е. уровень озер лежит выше уровня ближайших рек. Большинство водотоков, питающих озера, представлено ручьями, протяженность которых не превышает 25 м. Озерно-речная система Беклемишевской впадины относится к бассейнам стока рр. Селенга и Лена. Местный водораздел в Беклемишевской впадине проходит между озерами Иван и Арахлей. В ландшафтах преобладают луговые равнины, лесостепи, переходящие вверх по склонам в тайгу.

Большинство водоемов проточные, чаще водотоки представлены ручьями, длина которых не превышает 10 км. Озера не имеют гидравлической связи между собой, так как разделены водоразделами с небольшими (40–60 м) куполообразными относительными превышениями и тектоническими разло-

мами. В приходной части водных балансов озер на долю атмосферных осадков приходится от 37 до 53 %, а на приток 48–63 %. В расходной части баланса доля испарения варьирует от 57 до 80 %, а сток от 20 до 44 %. При этом озера, не имеющие постоянного поверхностного стока, характеризуются преобладанием испарения в расходной части баланса [Ивано-Арахлейский заказник..., 2002].

Химико-аналитические измерения водных проб выполнены по общепринятым методикам. 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 pH, Eh, Cl⁻. Титрование применялось для определения содержания CO₂, CO₃²⁻, HCO₃⁻. Металлы (Fe, Mn, Cu, Pb, Co, Ni и др.) анализировались атомно-абсорбционным методом на SOLLAR 6M с электротермическим атомизатором Zeeman/3030. Биогенные элементы фосфор и кремний определялись колориметрическими методами. Соединения азота (нитраты и нитриты) проанализированы потенциометрическим и колориметрическим методами соответственно [Новиков и др., 1990]. Сульфат-ион

определялся турбидиметрическим методом в виде сернокислого бария. Статистическая обработка результатов измерений и оценка их неопределенности для всех компонентов осуществлялись по алгоритмам в соответствии с международными требованиями, изложенными в документах [ISO 5725-6:1994, ISO/IEC Guide 98-3:2008].

Результаты и их обсуждение

По классификации П.В. Иванова [Иванов, 1948] Ивано-Арахлейские озера делятся на средние с площадью поверхности 10,1–100,0 км² (Арахлей, Шакшинское, Иргень, Иван, Тасей, Большой Ундугун) и очень малые с площадью поверхности 0,1–1,0 км² (Малый Ундугун, Дедулина, Олозойка, Большое Гужирное, Малое Гужирное, Большой Хутэл-Нур, Малый Хутэл-Нур, Сиротинка, Кергенду). Большинство водоемов мелководны (около 1–5 м), за исключением оз. Арахлей, средняя глубина которого составляет 10,2–13,1 м. Отличие морфометрических характеристик обуславливает также разный объем воды в озерах, меняющийся как в многолетнем, так и сезонном разрезе из-за изменения общей увлажненности территории и водности самих озер [Ивано-Арахлейский заказник..., 2002]. Во влажные периоды происходит увеличение акватории озер и разбавление воды, а в засушливые у многих озер сокращается водная поверхность, происходит концентрирование вод. К примеру, многолетние колебания уровня озер Арахлей и Шакшинское составляют 219 и 201 см. Площадь акватории озер в период засухи сокращается на 4,7 и 3,6 км² соответственно. Малые озера Большое Гужирное и Малое Гужирное усыхают до размеров больших луж. В сезонной динамике колебания не столь значительны и составляют 0,3 м на оз. Арахлей и 0,4 м на оз. Шакшинское с максимумами в наиболее дождливый период (июль–август) и минимумами в период ледостава. Малые озера в ледостав промерзают до дна.

По величине минерализации (по Овчинникову [Алехин, 1970]) озера Ивано-Арахлейской системы делятся на ультрапресные, пресные и солоноватые. К ультрапресным относятся крупные озера Арахлей и Шакшинское, Иван, Тасей, Иргень, Большой Ундугун и несколько малых – Большой Хутэл Нур, Малый Хутэл Нур, Малый Ундугун, Сиротинка (табл. 1).

Подразделение озерных вод по солености показало, что подавляющая часть принадлежит к ультрапресным, на их долю приходится 67% от общего количества. В целом проявляется зависимость морфометрических характеристик от минерализации воды. Для озер с объемом водной массы от 0,0001 до 0,001 км³ минерализация изменяется от 100 до 1 000 мг/л, а при меньших объемах может достигать 5 000 мг/л и более (рис. 2).

По средним оценкам минерализация воды ультрапресных озер колеблется от 89,5 до 163,6 мг/л (среднее 127,8 мг/л) с минимумом для оз. Большой Ундугун и максимумом для оз. Арахлей. Величина pH варьирует от 7,19 до 8,25 со средним значением 8,06. В химическом составе преобладает среди анионов HCO_3^- , а среди катионов чаще Ca^{2+} , химический состав $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ (по классификации Щукарева [Посохов, 1975]). При достижении минерализации 163,0 мг/л доминирующим становится Mg^{2+} , химический состав меняется на $\text{HCO}_3\text{-Mg-Na-Ca}$. Одновременно растет значение pH вод. По количеству биогенных элементов выделяется оз. Арахлей с наиболее высоким содержанием общего фосфора $P_{\text{общ}}$ (0,12 мг/л) и оз. Большой Хутэл-Нур с концентрацией $N_{\text{общ}}$ 0,88 мг/л, при этом доминирующим соединением является нитратная форма (NO_3^-) и аммонийная формы (NH_4^+). Повышенными концентрациями тяжелых металлов выделяются озера Малый Хутэл-Нур (Mn, Fe, Pb, Ni), Большой Ундугун (Zn), Малый Ундугун (Co), Иван (Cu), Иргень (Pb, Mo) и Шакшинское (Cd). В отличие от макро-, связь микрокомпонентов с основными гидрохимическими показателями среди соленостью и pH воды отсутствует.

В толще воды различие в содержаниях макрокомпонентов хорошо прослеживается по наиболее глубоким озерам Арахлей, Иргень и Тасей. Чаще изменяются значение pH, соленость и содержания CO_2 , HCO_3^- , SO_4^{2-} , при этом с глубиной накапливается гидрокарбонат-ион, а концентрация сульфат-иона, напротив, снижается (см. рис. 3). Сезонные изменения основных гидрохимических показателей отчетливо проявляются по оз. Арахлей (см. табл. 2).

Относительно высокая минерализация воды отмечается в апреле, что главным образом связано с поступлением обогащенных солями речных вод, питающих озеро после ледостава. В этот период концентрируются HCO_3^- , Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , напротив, содержание Ca^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} и CO_2 снижается. С июня по август имеет место постепенное снижение солености, что обусловлено разбавлением вод менее минерализованными атмосферными осадками и поступающим в озера поверхностным стоком.

В разные климатические фазы наиболее значительные изменения характерны для ультрапресных озер малого Большой Хутэл-Нур и средних по площади Иргень и Иван, минерализация которых в засушливый период увеличилась в среднем на 72,8, 42,3 и 31,2 мг/л соответственно, в меньшей степени изменения затронули оз. Тасей, соленость вод которого выросла всего на 5,7 мг/л (табл. 3). В целом в этой группе озер за рассматриваемый период соленость вод увеличилась в среднем на 31,7 мг/л. Увеличение минерализации произошло за счет накопления среди анионов HCO_3^- и Cl^- , а среди катионов Mg^{2+} , Na^+ и K^+ , напротив, содержания SO_4^{2-} и Ca^{2+} снизились.

Основные морфометрические и физико-химические показатели озер Ивано-Арахлейской лимнической системы

Table 1
The main morphometric and physico-chemical characteristics of Lakes of the Ivano-Arakhleisky limnic system

Параметр	Ед. измерения	Ультрапресные										Пресные			Солоноватые	
		оз. Б. Ундугун	оз. М. Хутел Нур	оз. М. Ундугун	оз. Иргень	оз. Шакшинское	оз. Тасей	оз. Иван	оз. Б. Хутел Нур	оз. Сиротинка	оз. Арахлей	оз. Ульбутуй	оз. Олозойка	оз. Дедулина	оз. М. Гукирное	оз. Б. Гужирное
F	км ²	11,6	0,9	11,6	33,2	51,8	14,5	15,2	0,2	2,0	59,0	0,5	0,2	0,1	0,1	0,4
h	м	4,5	3,0	2,0	1,8	4,4	3,1	3,1	6,0	2,0	10,2	1,5	1,6	0,15	0,19	0,13
pH	-	7,47	7,59	8,03	8,11	8,28	8,38	8,16	8,24	8,25	8,10	8,52	8,65	9,40	8,73	8,59
M		89,5	92,7	114	121	123	137	144	145	149	164	311	321	951	1200	4718
CO ₃ ²⁻		0,6	<0,3	0,9	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	7,8	<0,3	2,8	4,0	114,0	15,4	39,0
CO ₂		-	-	-	1,5	15,0	4,4	2,7	-	-	4,3	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4
HCO ₃ ⁻		45,6	38,3	75,9	68,0	74,3	79,4	78,9	77,1	94,5	119,0	185,4	195,5	317,0	622,0	421,0
SO ₄ ²⁻		18,8	27,6	0,50	19,1	2,80	20,0	25,2	18,1	1,50	1,14	11,8	14,3	216,2	243,8	4350,0
Cl ⁻		0,7	2,6	5,1	1,1	5,2	2,3	3,2	7,6	5,6	5,1	11,2	14,1	6,3	11,2	631,0
F ⁻		0,3	0,3	0,4	0,3	0,5	0,3	0,3	0,4	0,45	0,4	1,2	1,4	0,67	2,4	2,12
Ca ²⁺		13,3	9,9	16,0	17,7	15,2	19,3	19,6	19,9	18,1	9,9	25,7	21,4	17,1	60,9	81,9
Mg ²⁺	мг/л	4,2	5,2	6,0	5,5	6,0	5,0	6,6	7,6	10,2	9,5	15,7	16,9	14,6	25,6	107,6
Na ⁺		4,0	7,2	7,5	5,3	9,2	8,6	7,6	8,4	9,7	17,1	42,9	42,5	264,2	224,6	1228
K ⁺		1,1	1,6	2,4	1,8	2,4	1,9	2,8	3,4	2,5	1,2	6,6	12,9	0,6	9,1	30,3
Si		-	-	-	1,01	3,85	0,38	3,05	-	0,80	0,80	1,00	7,40	1,70	3,03	0,62
Sr		0,01	0,28	0,03	0,01	0,05	0,08	0,05	0,16	0,06	-	0,18	0,90	0,01	0,01	0,37
NO ₃		2,77		2,47	3,30	2,47	2,91	2,56	3,33	2,77	0,67	2,64	2,77	3,11	3,57	1,13
NO ₂ ⁻		0,03	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03	0,04	0,02	0,01	0,00	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03
NH ₄ ⁺		0,01	0,28	0,03	0,01	0,05	0,08	0,05	0,16	0,06	-	0,18	0,90	0,01	0,01	0,37
P _{общ.}		0,07	-	0,05	0,07	0,07	0,05	0,06	0,06	0,05	0,12	0,05	0,10	0,16	0,09	0,14
Mn		21,9	58,3	28,5	32,2	28,6	46,3	32,4	44,8	16,0	7,53	45,1	62,2	18,2	6,7	17,3
Fe		198	340	223	219	118	226	112	113	74,0	49,0	83,3	136,6	67,8	70,4	99,7
Zn		36,6	28,5	14,7	15,9	16,2	9,60	16,0	5,95	0,02	9,34	13,9	13,8	5,3	0,0	0,02
Cu		25,3	21,3	34,4	14,4	20,3	31,2	40,6	17,7	12,9	3,50	25,6	25,3	32,1	17,0	30,2
Pb	мкг/л	5,08	7,50	3,15	6,02	0,20	3,70	3,70	3,28	5,21	2,06	1,73	3,65	3,30	9,00	2,50
Ni		5,18	7,30	5,75	4,58	3,07	5,75	6,05	0,70	3,95	1,87	5,70	5,12	5,55	6,10	9,20
Cd		0,39	-	0,70	1,23	9,25	2,58	0,20	2,24	8,60	1,34	2,53	0,52	0,35	-	-
Co		2,25	3,20	5,90	2,87	2,40	5,35	5,40	2,80	0,52	5,26	2,98	1,51	5,75	4,30	5,70
Al		73,4	-	70,9	41,6	64,4	40,4	24,1	50,7	46,7	31,3	68,6	39,2	58,2	6,72	3,11

Примечание. F – площадь водной поверхности, h – средняя глубина, M – минерализация воды.

Note. F – water surface area, h – average depth, M – water salinity.

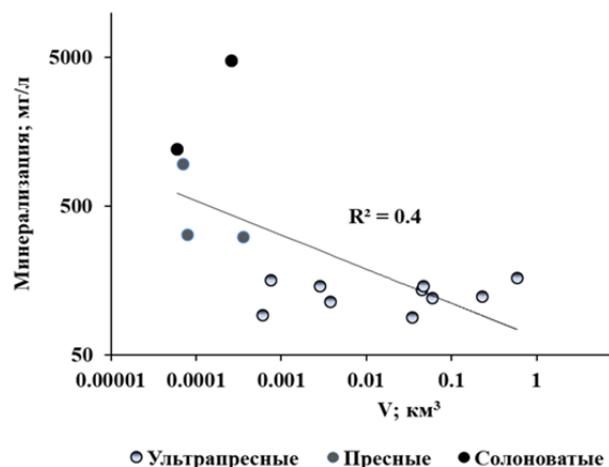


Рис. 2. Зависимость минерализации воды от ее объема (V) в озере

Fig. 2. Dependence of water salinity on its volume (V) in the lake

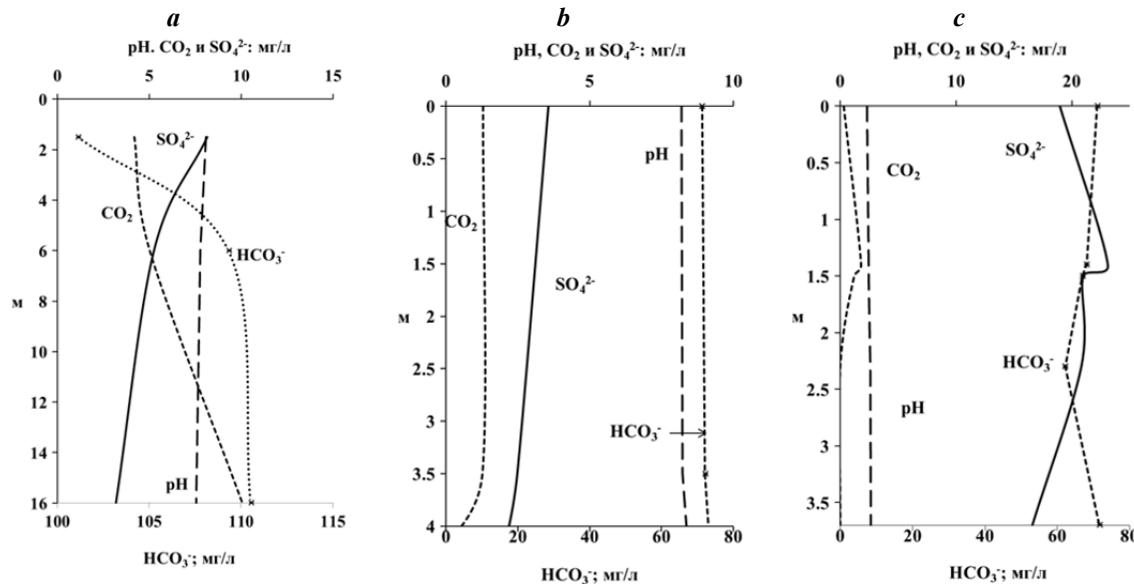


Рис. 3. Изменение основных показателей в толще воды озер: Арахлей (а), Шакшинское (б), Иргень (с)

Fig. 3. Changes in the main indicators in the water column of Lakes: Arakhlei (a), Shakshinskoe (b), Irgen (c)

Таблица 2

Усредненные значения минерализации, содержания основных компонентов, pH воды оз. Арахлей в разные периоды его опробования

Table 2

Average values of mineralization , content of main components, pH of the water Lake Arakhley in different periods of his testing

Месяц	pH	CO ₂	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	M
		мг/л								
Февраль	8,05	2,2	104,1	1,3	3,1	10,8	6,8	10,3	1,9	143,6
Апрель	7,75	0,8	133,0	1,3	3,7	13,1	9,4	14,8	1,3	177,0
Июнь	8,22	8,8	104,9	8,2	3,37	18,0	6,6	11,4	2,3	168,2
Июль	8,05	4,2	107,8	4,3	1,8	20,1	5,9	10,8	2,7	154,0
Август	7,46	6,7	105,2	4,3	1,41	20,2	6,2	9,9	2,5	153,3

Одновременно в остальных водоемах, за исключением оз. Хутэл-Нур, существенно выросло содержание CO₂ и снизилось значение pH. Изменение в химическом составе привело к смене химического типа вод. Если в многоводный период в озерах Иргень, Шакшинское, Иван и малое Большой Хутэл-Нур анионный состав воды представлен HCO₃⁻ и SO₄²⁻, то в период снижения водности озер он исключительно HCO₃⁻. Катионный состав чаще смешанный, при этом зачастую рост Na⁺ опережает рост Mg²⁺.

Пресные озера Олозойка, Ульзутуй представлены HCO₃-Na-Mg-Са химическим типом, меняющимся с ростом солености вод в оз. Дедулина на HCO₃-SO₄-Na. Минерализация в этой группе озер варьирует от 310,9 до 950,7 мг/л, среднее 471,1 мг/л (см. табл. 1). Отсутствие данных по распределению основных физико-химических па-

раметров в толще воды и межсезонье не позволяет провести сравнительный анализ.

В межгодовом разрезе изменения гидрохимических параметров наиболее выражены для оз. Дедулина (табл. 4), минерализация воды которого к засушливому периоду выросла на 363,0 мг/л, параллельно увеличилось pH и содержания CO₃²⁻, SO₄²⁻, Cl⁻ и Na⁺, K⁺, но снизилось HCO₃⁻, Ca²⁺ и Mg²⁺.

Близкая ситуация складывается и для остальных озер этой группы. Однако в оз. Олозойка снижение количества SO₄²⁻ привело к понижению минерализации к последнему сроку. По средним оценкам, в этой группе озер соленость вод в засушливый период по сравнению с многоводным изменилась на 113,0 мг/л. Рост минерализации произошел вследствие концентрирования в озерах всех макрокомпонентов за исключением сульфат-ионов.

Солоноватые озера Малое Гужирное и Большое Гужирное наиболее минерализованные (1 200–7 936 мг/л, среднее 3 545 мг/л) и щелочные (рН=8,12–8,30, среднее 8,19). Они представлены разными типами вод, в первом случае – $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na-Mg}$, во втором в период «большой воды» – $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Mg-Na}$, а в период «малой воды» – $\text{SO}_4\text{-Na}$. Соленость воды за 26 лет выросла в оз. Большом Гужирном на 6435 мг/л. Увеличение минерализации произошло преимущественно за счет концентрирования SO_4^{2-} , Cl^- и Na^+ , в то время как содержания HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} существенно снизились. Количество биоген-

ных элементов, в частности $\text{N}_{\text{общ.}}$ и $\text{P}_{\text{общ.}}$, в последних двух группах озер изменяется в диапазоне от 0,55 до 1,33 и 0,05 до 0,16 мг/л соответственно. Относительно высокие их содержания определены в озерах Олозойка и Дедулина, а низкие – в озерах Ульзутуй и Большое Гужирное.

Анализ распределения макрокомпонентов показал, что во всех выделенных типах вод с ростом солености вод накапливаются все компоненты, с большей величиной достоверности аппроксимации для Cl^- , Na^+ и Mg^{2+} и меньшей HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} и K^+ (рис. 4).

Минерализация (M), содержание основных компонентов (мг/л) и pH вод ультрапресных озер в разные годы опробования

Mineralization (M), the main components (mg/l) and pH of fresh water lakes in different years of testing

Таблица 3

Table 3

№	Годы	Химический тип	pH	M	CO_3^{2-}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
1	1993	$\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$	8,58	150,1	–	98,0	4,4	1,9	19,1	6,2	7,9	2,9
	2011	$\text{HCO}_3\text{-Ca-Na-Mg}$	8,20	159,8	4,4	116,4	1,4	3,1	15,8	6,8	15,3	1,9
2	1993	$\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Mg}$	8,01	120,8	1,1	68,0	19,1	1,1	17,7	5,5	5,3	1,9
	2012	$\text{HCO}_3\text{-Ca-Na-Mg}$	7,58	163,1	2,6	111,0	10,3	4,5	20	7,4	14,5	2,2
3	1993	$\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Mg-Na}$	8,28	127,3	2,4	72,3	21,1	1,1	17,3	4,9	8,1	1,9
	2012	$\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg-Na}$	7,48	156,1	5,9	105,0	3,9	3,9	18,4	6,5	9,8	2,0
4	1993	$\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Mg}$	8,16	144,2	–	78,9	25,2	3,2	19,6	6,6	7,5	2,8
	2012	$\text{HCO}_3\text{-Ca-Na-Mg}$	8,09	175,37	0,9	126,0	1,5	7,1	19,6	7,0	18,4	3,4
5	1993	$\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg-Na}$	8,18	128,9	–	79,4	12,0	2,3	19,3	5,0	8,6	1,9
	2012	$\text{HCO}_3\text{-Ca-Na-Mg}$	7,2	134,6	4,4	85,4	7,2	4,0	15,2	6,5	13,0	2,9
6	1993	$\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Mg}$	7,37	131,4	4,2	49,8	49,0	0,4	49,8	29,4	17,1	3,7
	2004	$\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$	8,10	204,2	0,5	73,4	9,1	15,9	46,3	31,1	17,9	4,6

Примечание. 1 – оз. Арахлей, 2 – оз. Иргень, 3 – оз. Шакшинское, 4 – оз. Иван, 5 – оз. Тасей, 6 – Большой Хутэл-Нур.

Note. Lakes: 1 – Arakhley, 2 – Irgen, 3 – Akshinskoe, 4 – Ivan, 5 – Tasey, 6 – B. Wanted-Nur.

Минерализация (M), содержание основных компонентов (мг/л) и pH вод пресных и солоноватого озер в разные годы опробования

Mineralization (M), content of the main components (mg/l) and pH of fresh and brackish lakes in different years of testing

Таблица 4

Table 4

№	Годы	Химический тип	pH	M	CO_3^{2-}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
			–	МГ/Л								
1	1993	$\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Mg-Na}$	8,00	294,4	<0,3	174,6	39,2	4,46	34,0	10,0	26,7	4,9
	2004	$\text{HCO}_3\text{-Na-Mg-Ca}$	8,04	310,9	10,4	185,4	11,8	11,2	25,7	15,7	32,9	6,6
2	1993	$\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Mg-Na}$	8,05	361,6	<0,3	205,6	55,7	6,16	45,2	13,7	26,1	8,1
	2004	$\text{HCO}_3\text{-Na-Mg-Ca}$	8,24	321,2	12,2	185,4	14,3	14,1	21,4	16,8	32,5	12,9
3	1993	$\text{HCO}_3\text{-Na}$	8,68	587,8	45,9	338,4	17,4	10,7	15,7	13,4	138,1	1,3
	2012	$\text{SO}_4\text{-Cl-HCO}_3\text{-Na}$	9,40	950,7	114,0	317,0	317	216,2	7,1	4,6	264,2	2,6
4	1993	$\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Mg-Na-Ca}$	8,59	1501	8,8	572,7	367,1	147,8	87,5	102,8	183,1	28,4
	2012	$\text{SO}_4\text{-Na}$	9,30	7936	39,0	421,0	4350	631,3	76,2	112,4	2272	32,2

Примечание. 1 – оз. Ульзутуй, 2 – оз. Олозойка, 3 – оз. Дедулина, 4 – оз. Б. Гужирное.

Note. Lakes: 1 – Ulzutuy, 2 – Olsona, 3 – Deblina, 4 – B. Huirne.

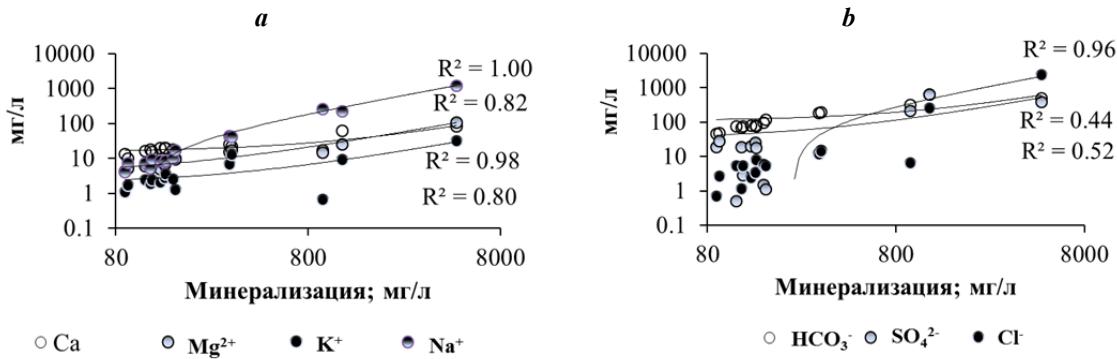


Рис. 4. Связь минерализации воды с содержанием основных катионов (а) и анионов (б)

Fig. 4. Relationship of water mineralization with the content of basic cations (a) and anions (b)

В целом по всей выборке наиболее восстановленные формы азота концентрируются преимущественно в более глубоких ультрапресных озерах, а окисленная его форма – в более мелких пресных. Что касается Р_{общ}, то как по средним (0,10 мг/л), так и максимальным (0,16 мг/л) оценкам солоноватые озера в большей степени обогащены этим элементом. В ультрапресных озерах в больших количествах накапливаются такие микроэлементы, как Si, Li, Fe, Zn, Pb, Cd, Mo, в пресных – Al, Co, а в солоноватых – Sr и Cu.

На формирование химических характеристик озерных вод большое влияние оказывают несколько процессов: взаимодействие вод с горными породами, испарительная концентрация солей, сопровождающаяся эвапоритовой седimentацией, а также сульфатредукция или, напротив, окисление сульфидов [Borzenko, Shvartsev, 2019]. Применение модели Гиббса [Gibbs, 1970] позволяет в первом приближении качественно оценить влияние двух первых процессов (рис. 5).

Получается, что в формировании химического состава воды ультрапресных озер процесс взаимодействия воды с горной породой является основным, а источником элементов выступают алюмосиликатные породы. В формировании химического состава пресных и солоноватых озер имеют место два основных процесса – гидролиз алюмосиликатов и испарение, при этом для последних процесс испарения наиболее весомый, что доказывается более высоким содержанием Cl⁻, концентрация которого растет по мере роста минерализации воды. Что касается HCO₃⁻ наряду с CO₂ требуется, как показывает С.Л. Швартцев [2015], ион OH⁻, источником которого выступает вода, участвующая в реакциях гидролиза алюмосиликатов. Следовательно, при наличии CO₂ и OH⁻ обеспечивается пополнение озерной воды производными угольной кислоты.

Относительно низкие содержания SO₄²⁻ в озерах чаще объясняются эвапоритовой седimentацией сульфатных минералов (гипс, мирабилит, тенардит и др.) и

процессом сульфатредукции [Borzenko et al., 2018]. Ввиду низких концентраций сульфат-ионов в рассматриваемых водоемах гипсовая и тем более мирабилитовая стадия минерализации не достигается. Наличие сульфатредукции подтверждается распределением основных компонентов, участвующих в этом процессе, а именно, снижением концентраций SO₄²⁻, а также ростом HCO₃⁻ и CO₂ как по глубине водоема, так и в межгодовом разрезе по большинству изученных озер.

В то же время для солоноватых и пресного оз. Дедулина имеется дополнительный источник сульфат-иона, в качестве которого, возможно, выступают сульфиды водовмещающих пород, окисление которых приводит к накоплению серы [Borzenko et al., 2018].

Заключение

Проведенные гидрохимические исследования озер Ивано-Арахлейской системы показали, что они отличаются морфометрическими характеристиками, pH, соленостью и химическим составом вод. Ультрапресные озера выделяются низкой минерализацией и pH вод, среди основных анионов превалирует HCO₃⁻, а катионов – Ca²⁺, с ростом солености и pH вод доминирующим становится Mg²⁺. Менее распространены пресные озера. Они более минерализованные и щелочные, анионный состав представлен чаще HCO₃⁻ и SO₄²⁻, а катионный смешанным Ca-Mg-Na, меняющийся с ростом минерализации и pH вод на HCO₃-Na-Mg-Ca, а при более высокой минерализации на SO₄-Cl-HCO₃-Na. Еще реже встречаются более щелочные солоноватые озера. Они имеют HCO₃-SO₄-Mg-Na-Ca состав, который с ростом солености вод трансформируются в SO₄-Na. В межгодовом разрезе наиболее выраженные изменения гидрохимических параметров отмечаются для солоноватых озер, в меньшей степени для ультрапресных.

Очевидно, что гидрохимические характеристики подвержены значительным хронологическим изменениям.

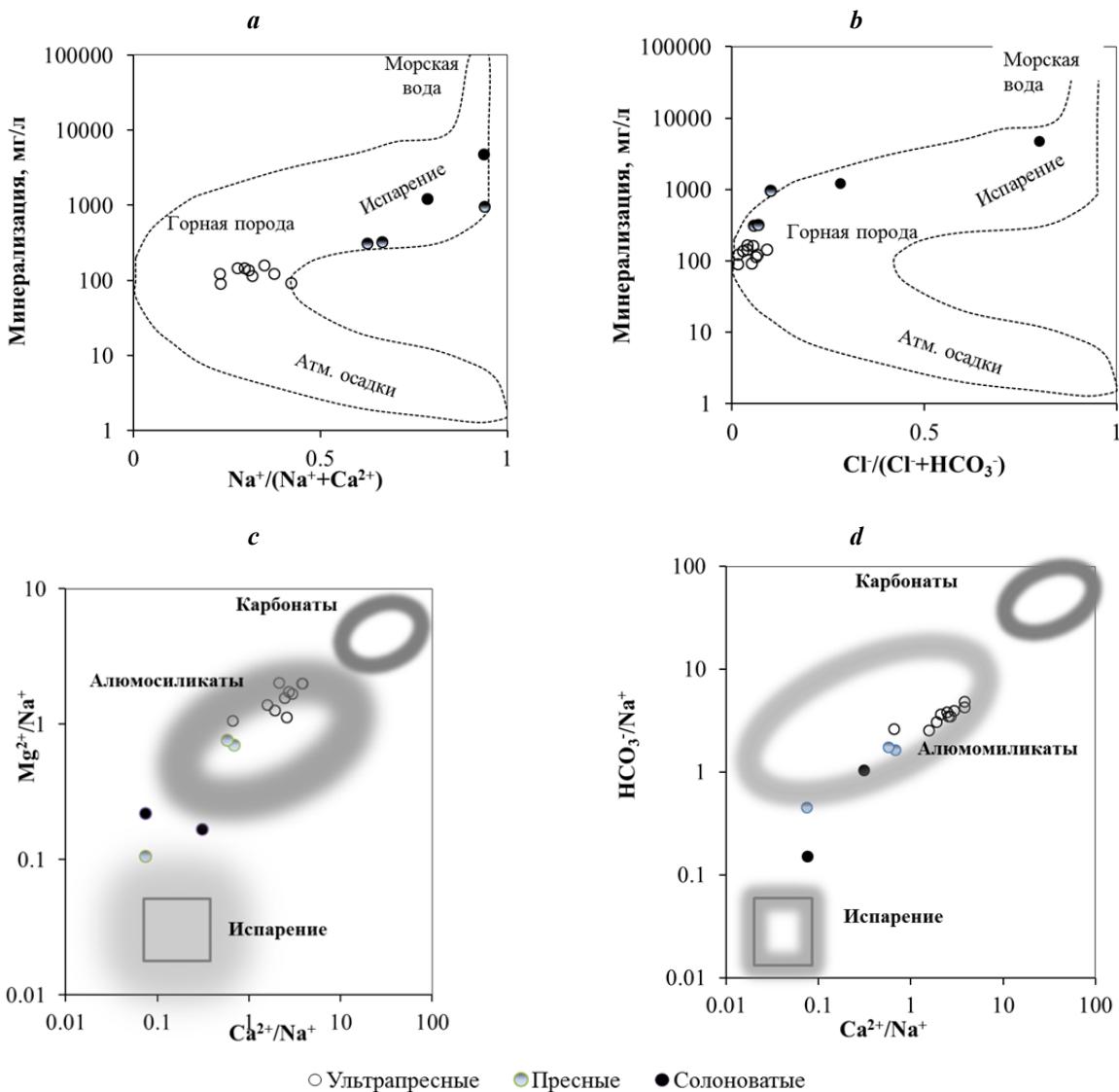


Рис. 5. Диаграммы Гиббса с нанесением данных по минерализации и отношению содержания основных ионов воды озер Ивано-Арахлейской системы

Fig. 5. Gibbs diagrams with application of data on mineralization and the ratio of the content of the main ions of water in the lakes of the Ivano-Arakhleya system

Причина таких трансформаций – изменение климатических условий, вызывающие периодическое повышение и снижение объема воды в озерах.

Исследование выполнено в ходе выполнения государственного задания и частично при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-00104).

ЛИТЕРАТУРА

- Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л. : Гидрометеоиздат, 1970. 443 с.
 Гаськова О.Л., Страховенко В.Д., Овдина Е.А. Состав рассолов и минеральная зональность донных отложений содовых озер Кулундинской степи (Западная Сибирь) // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 10. С. 1514–1527.
Географический анализ природных ресурсов Иркутской области. Иркутск : Изд-во СО РАН, 1985. 174 с.
 Дину М.И. Геохимические особенности распределения элементов по формам существования в озерах европейской территории России и Западной Сибири // Геохимия. 2018. № 10. С. 988–997.
 Замана Л.В., Борзенко С.В. Гидрохимический режим соленых озер Юго-Восточного Забайкалья // География и природные ресурсы. 2010. № 4. С. 100–107.
Ивано-Арахлейский заказник: природно-ресурсный потенциал территории / отв. ред. В.П. Горлачев. Чита : Поиск, 2002. 232 с.
 Иванов П.В. Классификация озер мира по величине и по их средней глубине // Бюллетень ЛГУ. 1948. № 20. С. 29–36.

Итигилова М.Ц., Пронин Н.М., Юргенсон Г.А., Птицын А.Б., Калугин И.А., Дарьин А.В., Решетова С.А., Обязов В.А., Помазкова Н.В., Цыбекмитова Г.Ц., Михеев И.Е., Фалейчик Л.М., Замана Л.В., Субботина В.Н., Корякина Е.А., Куклин А.П., Матафонов П.В., Ташлыкова Н.А., Базарова Б.Б., Соколов А.В. Ивано-Арахлейские озера на рубеже веков (состояние и динамика). Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2013. 337 с.

Леонова Г.А., Богуш А.А., Бобров В.А., Бычинский В.А., Трофимова Л.В., Маликов Ю.И. Эколого-геохимическая оценка соляных озер Алтайского края // География и природные ресурсы. 2007. № 1. С. 51–59.

Масленникова А.В., Удачин В.Н., Дерягин В.В., Штенберг М.В. Реконструкция этапов развития озера Тургояк (Южный Урал) в голоцене // Литосфера. 2018. Т. 18, № 6. С. 914–927.

Моисеенко Т.И., Дину М.И., Гашкина Н.А., Кремлева Т.А. Формы нахождения металлов в природных водах в зависимости от их химического состава // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 4. С. 375–385. DOI: 10.7868/S0321059613040093

Новиков Ю.В., Ласточкина К.О., Болдина З.Н. Методы исследования качества воды водоемов / под ред. А.П. Шицковой. М. : Медицина, 1990. 400 с.

Обязов В.А. Адаптация к изменениям климата: региональный подход // География и природные ресурсы. 2010. № 2. С. 34–39.

Перязева Е.Г., Плюснин А.М., Гармаева С.З., Будаев Р.Ц., Жамбалова Д.И. Особенности формирования химического состава вод озер восточного побережья Байкала // География и природные ресурсы. 2016. № 5. С. 49–59.

Посохов Е.В. Общая гидрогеохимия. Л. : Недра, 1975. 208 с.

Птицын А.Б., Чу Г., Дарьин А.В., Замана Л.В., Калугин И.А., Решетова С.А. Скорость седиментогенеза в озере Арахлей (Центральное Забайкалье) по радиогеохимическим и палинологическим данным // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 3. С. 473–480.

Пьянков А.И., Павлов Д.С., Брагин Н.В., Стрижкова Т.А., Михеев И.Е. Результаты исследования пространственного распределения рыб в озерах Арахлей и Кенон (Читинская область) // Вопросы ихтиологии. 1995. Т. 35, № 5. С. 678–686.

Савичев О.Г., Гусева Н.В., Абдуллаев Б.Д. Водный баланс системы озёр Шира – Иткуль (Хакасия) // Вестник Томского государственного университета. 2015. № 391. С. 214–219.

Цыбекмитова Г.Ц., Фалейчик Л.М., Михеев И.Е. Антропогенная нагрузка на водосборный бассейн Ивано-Арахлейских озер (Восточное Забайкалье) // Вода: химия и экология. 2013. № 2 (56). С. 3–11.

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

Шварцев С.Л. Основное противоречие, определившее механизмы и направленность глобальной эволюции // Вестник Российской академии наук. 2015. Т. 85, № 7. С. 632.

Borzenko S.V., Kolpakova M.N., Shvartsev S.L., Isupov V.P. Biogeochemical conversion of sulfur species in saline lakes of steppe Altai // Chinese Journal of Oceanology and Limnology. 2018. V. 36, is. 3. P. 676–686.

Borzenko S.V., Shvartsev S.L. Chemical composition of salt lakes in East Transbaikalia (Russia) // Applied Geochemistry. 2019. V. 103 P. 72–84. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.02.014.

Zhang Fei, Jin Zhangdong, Yu Jimin, Zhou Yunkai, Zhou Ling. Hydrogeochemical processes between surface and groundwaters on the northeastern Chinese Loess Plateau: Implications for water chemistry and environmental evolutions in semi-arid regions // Journal of Geochemical Exploration. 2015. № 159. P. 115–128.

Gibbs R.J. Mechanisms controlling world water chemistry // Science. 1970. V. 170. P. 1088–1090.

ISO 5725-6:1994 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 6: Use in practice of accuracy values. 2002. 58 p.

ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement. Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). 2008. 120 p.

Moiseenko T.I., Gashkina N.A., Dinu M.I., Kremleva T.A., Khoroshavin V.Y. Aquatic geochemistry of small lakes: effects of environment changes // Journal of Geochemical Exploration. 2013. V. 13. P. 1031.

Авторы:

Борзенко Светлана Владимировна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, и. о. заведующего лабораторией геоэкологии и гидрогеохимии, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия.
E-mail: svb_64@mail.ru

Замана Леонид Васильевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия.
E-mail: l.v.zamana@mail.ru

Geosphere Research, 2020, 3, 69–79. DOI: 10.17223/25421379/16/6

S.V. Borzenko, L.V. Zamana

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS

HYDROGEOCHEMISTRY OF THE IVANO-ARAKHLEISKY LAKES

The main purpose of the study is to determine the ranges of changes in the hydrochemical parameters of lakes in different climatic phases, as well as to identify the main sources of salts and processes that control the main geochemical parameters of lake water. The hydrogeochemical studies were carried out on the Ivano-Arachlea lakes, performed with a gap of more than 20 years. Chemical and analytical measurements of water samples were performed using generally accepted methods. It is shown that all lakes differ in morphometric characteristics, mineralization, chemical composition and pH value of water. According to Ivanov's classification, the studied lakes are divided into medium lakes with a surface area of 10,1–100,0 km² and very small lakes with a surface area of 0,1–1,0 km². Most reservoirs are shallow (about 1–5 m), with the exception of the lake Arachlei, the average depth of which is 10,2–13,1 m accord-

ing to Ovchinnikov's classification of water mineralization, three groups of reservoirs are identified: ultra-fresh, fresh and brackish. Ultra-fresh lakes with a mineralization of less than 200 mg/l and a pH of less than 8,2 are the most common in the region. They are mainly represented by the $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg-Na}$ chemical composition. Freshwater lakes are less common. They are more saline and alkaline, anionic composition represented more often HCO_3^- and SO_4^{2-} and cation mixed Ca-Mg-Na, changing with the growth of salinity and pH of waters in $\text{HCO}_3\text{-Na-Mg-Ca}$, and at a higher salinity to $\text{SO}_4\text{-Cl-HCO}_3\text{-Na}$. Even rarer are more alkaline brackish lakes. They have an $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Mg-Na-Ca}$ composition that transforms into $\text{SO}_4\text{-Na}$ as the salinity of the water increases. It is shown that small brackish lakes are more susceptible to change and larger ultra – fresh lakes are less susceptible to change. Variations of the main physical and chemical parameters can be traced both in the interannual context and in the off-season. Changes in the content of CO_2 , HCO_3^- , pH and SO_4^{2-} were found in the depth of reservoirs. According to the number of biogenic elements, the lake is allocated. Arakhley Lake with the highest content of total phosphorus and lake. Large Hutel-Nur with a relatively high concentration of nitrogen. In this case, the dominant compound is the nitrate and ammonium forms. Increased concentrations of heavy metals such as manganese, iron, lead, Nickel, molybdenum, and cadmium are allocated to the lakes Maly Hutel-Nur, Bolshoy Undugun, Maly Undugun, Ivan, Irgen, and Shakshinskoe. In contrast to macro-coupling of micro-components with the main hydrochemical parameters of the medium, salinity and pH of water is absent. The main processes that control the hydrogeochemical diversity of lakes, including water interactions with aluminosilicate rock, sulfate reduction, sulfide oxidation, and evaporative concentration, have been established.

Keywords: lakes, chemical type, transformation of chemical composition.

References

- Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Fundamentals of hydrochemistry]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1970. 443 p. In Russian
- Gas'kova O.L., Strakhovenko, V.D., Ovdina E.A. Composition of brines and mineral zoning of the bottom sediments of soda lakes in the Kulunda steppe (West Siberia) // Russian Geology and Geophysics. 2017. V. 58. Is. 10. pp. 1199–1210.
- Geograficheskiy analiz prirodnykh resursov Irkutskoy oblasti* [Geographic analysis of natural resources of the Irkutsk region]. Irkutsk: Izd-vo SO RAN, 1985. 174 p. In Russian
- Dinu M.I. Geochemical Specifics of the Distribution of Elements between Their Forms in Lakes in the European Part of Russia and Western Siberia // Geochemistry international. 2018. V. 56. № 10. pp. 1036–1045
- Zamana L.V., Borzenko S.V. Hydrochemical regime of saline lakes in the Southeastern Transbaikalia // Geography and Natural Resources. 2010. V. 31(4). pp. 370–376
- Ivano-Arakhleyskiy zakaznik: prirodno-resursnyy potentsial territorii* [Ivano-Arakhleysky reserve: natural resource potential of the territory] / Otv. red. V.P. Gorlachev. Chita: Poisk, 2002. 232 p.
- Ivanov P.V. *Klassifikatsiya ozer mira po velichine i po ikh srednej glubine* [Classification of lakes of the world by size and by their average depth] // Bulletin of LSU. 1948. № 20. pp. 29–36. In Russian
- Itigilova M.T.S., Pronin N.M., Yurgenson G.A., Ptitsyn A.B., Kalugin I.A., Darin A.V., Reshetova S.A., Obyazov V.A., Pomazkova N.V., Tsybekmitova G.TS., Mikheev I.E., Faleychik L.M., Zamana L.V., Subbotina V.N., Koryakina E.A., Kuklin A.P., Matafonov P.V., Tashlykova N.A., Bazarova B.B., Sokolov A.V. *Ivano-Arakhlejskie ozero na rubezhe vekov (sostoyanie i dinamika)* [Ivano-Arakhlei lakes at the turn of the Century (state and dynamics)]. Novosibirsk: Publishing house of SB RAS. 2013. 337 p. In Russian
- Leonova G.A., Bogush A.A., Bobrov V.A., Bychinsky V.A., Trofimova L.V., Malikov Yu.I. *EHkologo-geokhimicheskaya otsenka solyanykh ozer Altajskogo kraya* [Ecological and geochemical assessment of salt lakes of the Altai territory] // Geography and natural resources. 2007. № 1. pp. 51–59. In Russian
- Maslennikova A.V., Udashin V.N., Deryagin V.V., Shtenberg M.V. Reconstruction of Turgoyak lake (the Southern Urals) ecosystem changes in Holocene // Lithosphere (Russia). 2018;(6), pp. 914–927. In Russian <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-6-914-927>
- Moiseenko T.I., Gashkina N.A., Dinu M.I., Kremleva T.A., Khoroshavin V.Y. Aquatic geochemistry of small lakes: effects of environment changes // Journal of Geochemical Exploration. 2013. V. 13. pp. 1031.
- Novikov Yu.V., Lastochkina K.O., Boldina Z.N. *Metody issledovaniya kachestva vody vodoemov* [Methods of study water quality of reservoirs] / ed. by A.P. Checkoway. Moscow: Medicine. 1990. 400 p. In Russian
- Obyazov V.A. *Izmenenie temperatury vozdukha i uvlazhnennosti territorii Zabajkal'ya i prigranichnykh rajonov Kitaya* [Changes in air temperature and humidity in the territory of Transbaikalia and border areas of China] // Environmental cooperation of the Chita region (Russia) and the Autonomous region of Inner Mongolia (China) in cross- border environmental areas: Mat. Conf. Chita, 2007. Pp. 247–250. In Russian
- Peryazeva E.G., Plyusnin A.M., Garmaeva S.Z., Budaev R.Ts., Zhambalova D.I. Features of the formation of chemical composition of lake waters along the eastern shores of Baikal // Geography and Natural Resources. 2016. № 5. pp. 49–59. In Russian DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2016-5(49-59)
- Posokhov E.V. *Obshhaya gidrogeokhimiya* [General hydrogeochemistry]. Leningrad : Nedra, 1975. 208 p. In Russian
- Ptitsyn A.B., Chu G., Dar'in A.V., Zamana L.V., Kalugin I.A., Reshetova S.A. The rate of sedimentation in Lake Arakhlei (Central Transbaikalia), from radiogeological and palynological data // Russian Geology and Geophysics. 2014. V. 55(3), pp. 369–375.
- Pyanov A.I., Pavlov D.S., Bragin N.V., Strizhova T.A., Mikheev I.E. *Rezul'taty issledovaniya prostranstvennogo raspredeleniya ryb v ozerakh Arakhlei i Kenon (Chitinskaya oblast')* [Results of the study of the spatial distribution of fish in the lakes arakhlei and Canon (Chita region)] // Questions of ichthyology. 1995. V. 35(5). pp. 678–686. In Russian
- Savichev O.G., Guseva N.V., Abdullaev B.D. Water balance of the Shira – Itkul lake system (Khakassia) // Tomsk State University Journal. 2015. № 391. pp. 214–219. In Russian
- Tsybekmitova G.TS., Faleychik L.M., Mikheev I.E. *Antropogennaya nagruzka na vodosbornyy bassein Ivano-Arakhlejskikh ozer (Vostochnoe Zabajkal'e)* [Anthropogenic load on the catchment basin of the Ivano-arakhleisk lakes (Eastern Transbaikalia)] // Water: chemistry and ecology. 2013. V. 2 (56). pp. 3–11. In Russian
- 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). pp. 388–403. DOI: 10.1134/S0016702914030070

- Borzenko S.V., Kolpakova M.N., Shvartsev S.L., Isupov V.P. Biogeochemical conversion of sulfur species in saline lakes of steppe Altai // Journal of Oceanology and Limnology. 2018. V. 36 (3). pp. 676–686.
- Borzenko S.V., Shvartsev S.L. Chemical composition of salt lakes in East Transbaikalia (Russia) // Applied Geochemistry. 2019. V. 103 pp. 72–84.
- Borzenko S.V., Shvartsev S.L. Chemical composition of salt lakes in East Transbaikalia (Russia) // Applied Geochemistry. 2019. V. 103. pp. 72–84, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.02.014>.
- Zhang Fei, Jin Zhangdong, Yu Jimin, Zhou Yunkai, Zhou Ling. Hydrogeochemical processes between surface and groundwaters on the northeastern Chinese Loess Plateau: Implications for water chemistry and environmental evolutions in semi-arid regions // Journal of Geochemical Exploration. 2015. № 159. pp. 115–128.
- Gibbs R.J. Mechanisms controlling world water chemistry // Science. 1970. 170, pp. 1088–1090.
- ISO 5725-6:1994 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results Part 6: Use in practice of accuracy values, 2002. 58 p.
- ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995), 2008. 120 p.
- Moiseenko T.I., Gashkina N.A., Dinu M.I., Kremleva T.A., Khoroshavin V.Y. Aquatic geochemistry of small lakes: effects of environment changes // Journal of Geochemical Exploration. 2013. V. 13. p. 1031.

Author's:

Borzenko Svetlana V., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia. E-mail: svb_64@mail.ru

Zamana Leonid V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Laboratory of Geoecology and Hydrogeochemistry, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chita, Russia. E-mail: l.v.zamana@mail.ru