

М.Ю. СЕМЁНОВ\*, Л.Н. СЕМЁНОВА\*\*, Ю.М. СЕМЁНОВ\*\*, \*\*\*, В.А. СНЫТКО\*\*, \*\*\*\*, А.В. СИЛАЕВ\*\*

\*Лимнологический институт СО РАН,  
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия, smu@mail.ru

\*\*Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,  
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, yumsemenov@mail.ru, vsnytko@yandex.ru, anton\_s@bk.ru

\*\*\*Иркутский государственный университет,  
664003, Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Россия, yumsemenov@mail.ru

\*\*\*\*Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН,  
125315, Москва, ул. Балтийская, 14, Россия, vsnytko@yandex.ru

### МЕТАЛЛЫ В ВОДАХ ЮЖНЫХ ПРИТОКОВ БАЙКАЛА

*Исследован состав металлов вод южных притоков озера Байкал, проведено сравнение с составом металлов в донных отложениях, рассчитаны коэффициенты водной миграции металлов. Выполнено районирование территории южной части водосборного бассейна озера по способности обеспечивать тот или иной состав вод. Оценен вклад южных притоков в макроэлементный состав байкальской воды. Обнаружено, что состав макро- и микроэлементов в водах варьирует в широких пределах. Встречаются воды, минерализация которых как значительно выше, так и значительно ниже минерализации вод Байкала и его главных притоков. В водах всех исследованных водотоков среди макроэлементов абсолютно преобладает кальций, в то же время по содержанию магния и натрия исследованные воды сильно различаются. Среди микроэлементов в водах рек юго-западного побережья, кроме стронция, преобладают ванадий и молибден, что значительно отличает их от вод рек юго-восточного побережья, Байкала и его главных притоков. Величины коэффициентов водной миграции, рассчитанные для макроэлементов вод южных притоков и главных притоков Байкала, близки. Коэффициенты водной миграции микроэлементов для речных вод изученной территории резко отличаются от таковых для вод главных притоков Байкала. Причиной этого является наличие источников растворенного вещества, таких как породы и глубокие подземные воды, с не характерным для соответствующих ландшафтов составом. Вклад южных притоков в макроэлементный состав воды оз. Байкал поддается оценке и находится в пределах 5–30 %, в зависимости от выбранных металлов-трассеров. Вклад южных притоков в макроэлементный состав воды Байкала оценить невозможно в силу гораздо больших их концентраций в реках по сравнению с байкальской водой. Причиной различий в концентрациях микроэлементов в воде Байкала и притоков является их миграция в составе органического вещества. Вследствие длительного периода водообмена в Байкале это вещество осаждается либо разрушается, что способствует выведению микроэлементов из раствора.*

Ключевые слова: металлы, макроэлементы, микроэлементы, миграция, водообмен.

M.Yu. SEMENOV\*, L.N. SEMENOVA\*\*, Yu.M. SEMENOV\*\*, \*\*\*, V.A. SNYTKO\*\*, \*\*\*\*, A.V. SILAEV\*\*

\*Limnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 3, Russia, smu@mail.ru

\*\*V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia, yumsemenov@mail.ru, vsnytko@yandex.ru, anton\_s@bk.ru

\*\*\*Irkutsk State University, 664003, Irkutsk, ul. Karla Marksa, 1, Russia, yumsemenov@mail.ru

\*\*\*\*Vavilov Institute for the History of Science and Technology, Russian Academy of Sciences,  
125315, Moscow, ul. Baltiiskaya, 14, Russia, vsnytko@yandex.ru

### METALS IN THE WATERS OF THE SOUTHERN TRIBUTARIES OF LAKE BAIKAL

*We examine the composition of metals in the waters of the southern tributaries of Lake Baikal as well as comparing it with the composition of metals in bottom sediments and calculating the water migration coefficients of metals. The territory of the southern part of the lake drainage basin was regionalized according to the ability to ensure a particular water composition. The contribution from the southern tributaries to the chemical composition of Lake Baikal water was evaluated. It was found that the composition of macroelements and trace elements in the waters varies over a broad range. There occur waters with salt contents far exceeding those in Baikal water and its main tributaries as well as with considerably lower salt contents. Macroelements in the waters of all the streams studied are absolutely dominated by calcium, whereas the waters differ greatly in magnesium and*

*sodium contents. Trace elements in the waters of the rivers on the southwestern coast are dominated by strontium, vanadium and molybdenum, which significantly differs them from the waters of the rivers of the southeastern coast, Lake Baikal and its main tributaries. The values of the water migration coefficients as calculated for the macroelements in the waters of the southern and main tributaries of Baikal are similar. The water migration coefficient of trace elements for the river waters in the study area differ greatly from the coefficients for the waters of the main tributaries of Baikal. The reason behind this is the existence of sources of dissolved matter, such as rocks and deep underground water, with their composition not characteristic for corresponding landscapes. The contribution from the southern tributaries to the macroelement composition of Lake Baikal waters can be estimated at the range of 5 to 30 % depending on the selected tracer metals. The contribution from the southern tributaries to the trace element composition of the Baikal waters defies estimation because of their much higher concentrations in the rivers when compared with Baikal water. The differences in the trace element concentrations in the water of Baikal water and of its tributaries are caused by their migration in the composition of organic matter. In consequence of a long period of water exchange in Baikal, this matter is deposited or decays thus promoting the removal of trace elements from solution.*

Keywords: metals, macroelements, trace elements, migration, water exchange.

## ВВЕДЕНИЕ

Оценка химического состава речных вод и установление его зависимости от ландшафтных и геологических факторов является условием управления качеством водных ресурсов. Традиционно в литературе значительное внимание уделяется изучению вод главных притоков Байкала — Селенги, Баргузина, Верхней Ангары, сток которых в озеро достигает 70 % от годового стока всех его притоков. За редким исключением, публикации основаны на балансовом подходе: о влиянии притока судят по произведению его водного стока на концентрацию вещества, сравнивая эту величину с вкладами других притоков [1, 2]. В этих работах отсутствует основанная на химических показателях оценка вкладов притоков в состав байкальской воды. Публикаций, посвященных изучению вод рек южного побережья, немало [3–5], однако составу металлов, особенно микроэлементов, уделяется недостаточное внимания. Такие работы единичны [6, 7]. Гораздо чаще исследуется состав металлов речных и озерных взвесей, определяемый с целью установления их происхождения [8, 9]. Традиционно рассматривается изменение содержания компонентов, составляющих основную массу растворенного вещества, — кислорода, органического углерода, кремнезема, а также главных ионов —  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  [10, 11]. Изучение динамики нитрат- и фосфат-иона стало особенно популярным в последнее время в связи с проблемой предполагаемой эвтрофикации озера [12]. Выявление связи природных условий с составом вод либо сводится к сравнению его с составом атмосферных осадков без учета влияния почв и пород [10], либо ограничивается упоминанием названий последних без сравнения химических составов [1, 2]. Настоящее исследование посвящено выявлению пространственных закономерностей формирования химического состава вод южных притоков Байкала и оценке их влияния на воды озера. В качестве исходных данных была выбрана наименее изученная и наиболее вариабельная фракция вещества вод и дренируемых ими почв и пород — металлы.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалами исследования послужили данные эпизодических измерений состава вод и донных осадков рек и ручьев южного побережья оз. Байкал, производившихся на протяжении последних тридцати лет. Объектами исследований стали 75 водотоков: от р. Малая Кочерикова, впадающей в Байкал на юго-западном побережье, в 18 км к северо-востоку от с. Онгурен, до р. Мишихи, впадающей в Байкал на юго-восточном побережье, в Кабанском районе Республики Бурятия. Сравнение химических свойств вод разных территорий проводилось после усреднения их составов для районов бассейна Байкала (рис. 1, а), выделенных путем анализа и интерпретации картографических материалов [13, 14] на основе ландшафтно-геохимических критериев. Названия районам давались в соответствии с их наиболее узнаваемыми топонимами. Для последующего расчета вклада притоков южного Байкала в химический состав байкальской воды была оценена величина водного стока выделенных районов ( $\text{км}^3$  в год/доля в общем стоке): Слюдянский — 0,04/0,01, Байкальский — 2,75/0,53, Листвянский — 0,13/0,03, Голоустненский — 0,65/0,15, Бугульдейский — 0,44/0,13, Крестовский — 0,04/0,01, Еланчинский — 0,09/0,02, Онгуренский — 0,22/0,12 [15].

Всего было проанализировано более 500 проб воды и 200 проб донных осадков, половина которых отобрана в Байкальском районе. Концентрации металлов измерялись в фильтрованных пробах. Исследовалось содержание Ca, Mg, K, Na, Sr, Zn, Cu, Sn, Mo, V, Ti, Ni, Fe, Mn, Al. В работе также были использованы литературные данные о составе вод Байкала и его главных притоков [16, 17]. Методами

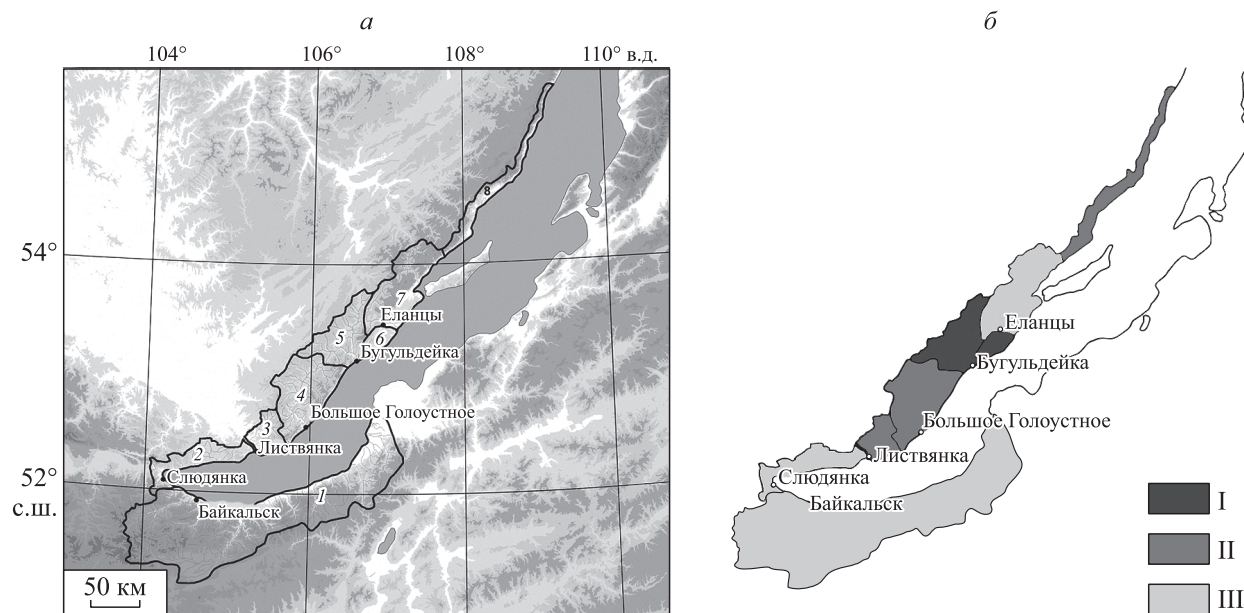


Рис. 1. Зонирование территории по типу ландшафта (а) и минерализации вод (б).

Ландшафтно-геохимические районы: 1 — Байкальский горно-склоновый и подгорно-равнинный таежный, 2 — Слюдянский горно-склоновый и горно-долинный таежно-подтаежный, 3 — Листвянский горно-склоновый и предгорно-равнинный таежно-подтаежный, 4 — Голоустаненский горно-склоновый и предгорно-равнинный таежно-подтаежный, 5 — Бугульдейский предгорно-подгорный таежно-подтаежный, 6 — Крестовский горно-склоновый подтаежный с участками остепненных лугов и горных степей, 7 — Еланцинский холмисто-низкогорный подтаежно-остепненный, 8 — Онгуренский горно-склоновый подтаежно-остепненный. Минерализация: I — выше средней, II — средняя, III — ниже средней.

определения металлов в водах южных притоков в разные годы служили атомно-абсорбционная и атомно-эмиссионная спектрофотометрия, а в донных осадках — методы спектрально-эмиссионного анализа и рентгенофлуоресцентного анализа. Металлы в водах Байкала и его главных притоков определялись методами атомно-абсорбционной и атомно-эмиссионной спектрофотометрии, а также масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. О связи состава вод притоков и Байкала судили по близости их точек на диаграммах смешения.

Проба воды Байкала (точка), лежащая внутри области смешения, ограниченной линиями, соединяющими точки притоков, испытывает в разной степени влияние всех упомянутых рек. На пробу за ее пределами воздействуют притоки, ограничивающие прилежащую к пробе сторону. Чем ближе проба к притоку, тем больше его вклад.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследованные воды значительно различаются по содержанию растворенного вещества (табл. 1). Отмечаются воды с минерализацией в три раза ниже и в два раза выше минерализации вод Байкала и его главных притоков. Наиболее очевидно разделение их на три категории вод с содержанием растворен-

Таблица 1  
Содержание макрокомпонентов в поверхностных водах бассейна оз. Байкал, мг/л

Объект	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Сумма ионов
1	1,07	2,19	1,38	8,57	50,70
2	0,78	2,59	3,3	12,86	80,38
3	0,94	3,93	6,37	18,68	122,69
4	0,56	1,53	8,03	22,3	141,87
5	0,96	2,07	14,57	40,3	256,06
6	2,01	9,65	19,13	52,83	363,72
7	0,99	2,14	3,73	13,99	87,02
8	1,22	2,13	11,28	28,56	189,88
9	1,07	3,28	8,47	24,76	161,54
10	0,41	0,88	0,9	7,32	55,04
11	0,87	1,91	2,02	18,48	106,05
12	1,35	7,06	5,38	15,23	108,14
13	0,97	3,42	3,04	16,58	96,27

Примечание. Здесь и в табл. 2–7. Районы бассейна оз. Байкал: 1 — Слюдянский, 2 — Байкальский, 3 — Листвянский, 4 — Голоустаненский, 5 — Бугульдейский, 6 — Крестовский, 7 — Еланцинский, 8 — Онгуренский; 9 — среднее по всем районам. Главные притоки: 10 — Верхняя Ангара, 11 — Баргузин, 12 — Селенга; 13 — оз. Байкал (средние величины по 23 горизонтам из трех точек, по одной в каждой из трех котловин озера — северной, средней и южной).

ного вещества: 1) значительно превышающим среднее ( $\gg 190$  мг/л); 2) значительно меньше среднего (50–80 мг/л); 3) близким к среднему (140–190 мг/л). Наименьшая минерализация характерна для вод Байкальского, Слюдянского и Еланцинского районов (см. рис. 1, б), при том что последний обладает максимальной по сравнению с другими районами долей степных ландшафтов [18]. Воды с наибольшей минерализацией типичны как для таежных ландшафтов Голоустненского и Онгуренского районов, так и для лесостепных ландшафтов Крестовского района.

Возможно, различия в минерализации обусловлены неодинаковым содержанием легкорастворимого материала в почвах и породах бассейнов рек. В пределах исследованного побережья легкорастворимые метаморфические породы, обеспечивающие высокую минерализацию вод (плагиогнейсы, амфиболитовые сланцы, амфиболиты, мраморы и т. д.), на юго-западе распространены шире, чем на юго-востоке [18, 19].

Благодаря своей высокой биогенности, среди макроэлементов во всех водах абсолютно преобладает Са (~60 %-экв от суммы Са, Mg, К и Na), в меньшем количестве содержится Mg (17–30 %-экв), в наименьшем — Na (3–14 %-экв) и К (1–4 %-экв). Максимальными концентрациями Mg и минимальными Na характеризуются воды Голоустненского, Бугульдейского и Онгуренского районов. Наименьшие концентрации Mg и наибольшие Na наблюдаются в Байкальском и Слюдянском районах. В водах Байкала и его главных притоков доля Mg не превышает 20 %-экв, доля Na равна 12 %-экв, что близко к водам Байкальского и Слюдянского районов, а доля К равна 2 %-экв, что в два раза выше, чем в большинстве южных притоков, за исключением рек Байкальского и Слюдянского районов.

Различия в макроэлементном составе вод также обусловлены неодинаковым минералогическим составом пород. Богатые магнием и бедные натрием породы (магнезиальные разности долеритов, лейкогранитов, известняки, доломиты и т. д.) приурочены к юго-западному побережью, а богатые калиево-натриевыми полевыми шпатами граниты и гнейсы — к юго-восточному [18]. Таким образом, в бассейне Байкала геологический фундамент в гораздо большей мере, нежели климат и растительность, определяет минерализацию и состав вод.

В составе микроэлементов абсолютно преобладает стронций (табл. 2), что неудивительно. Будучи геохимическим аналогом кальция, Sr изоморфно замещает его в большинстве минералов, особенно в карбонатных породах, и, соответственно, в высоких концентрациях присутствует в дренирующих их водах. Содержание других элементов на 2–3 порядка ниже, чем Sr. Самые низкие концентрации отмечены для Sn, Zn, Cu, Ti и Ni. Интересно, что по содержанию Cu и Ni воды южных рек гораздо ближе к водам Байкала, нежели главных притоков [16, 17].

Максимальная вариабельность концентраций отмечается у V, Mo и суммы Fe + Al. Наибольшее содержание V и Mo ((Mo + V) > 8 мкг/л) наблюдается в водотоках Крестовского и Еланцинского районов. В воде Байкала и его главных притоков концентрация V значительно ниже. Повышенное содержание ванадия характерно также для почв и пород района [20]. Воды с повышенным содержа-

Таблица 2

Содержание микроэлементов в поверхностных водах бассейна оз. Байкал, мкг/л

Объект	Элемент										
	Sr	Zn	Cu	Sn	Mo	V	Ti	Ni	Fe	Al	Mn
1	78,33	0,28	0,38	0,07	0,65	0,92	0,10	0,12	0,84	0,77	0,13
2	87,50	0,27	0,25	0,03	0,30	0,62	0,04	0,08	0,46	0,38	0,07
3	123,64	0,25	0,26	0,08	0,65	0,47	0,03	0,07	0,46	0,20	0,07
4	122,50	0,17	0,26	0,05	0,47	0,45	0,02	0,07	0,47	0,16	0,07
5	226,67	0,21	0,25	0,11	0,60	0,90	0,02	0,05	0,48	0,11	0,05
6	268,00	0,64	0,37	0,89	5,90	14,94	0,17	0,11	0,34	1,15	0,05
7	77,27	0,40	0,30	0,15	1,10	8,33	0,23	0,05	0,43	0,95	0,06
8	117,64	0,72	0,41	0,15	1,11	0,90	0,20	0,07	0,64	1,19	0,07
9	137,69	0,37	0,31	0,19	1,35	3,44	0,10	0,08	0,52	0,61	0,07
10	42,06	—	0,72	—	—	0,24	—	0,25	—	0,50	—
11	114,78	—	0,93	—	—	0,96	—	0,36	—	0,32	—
12	168,23	—	0,97	—	—	1,87	—	0,49	—	0,29	—
13	118,53	—	0,21	—	—	0,41	—	0,12	—	0,29	—

Примечание. Здесь и в табл. 3 и 5: прочерк — отсутствие данных.

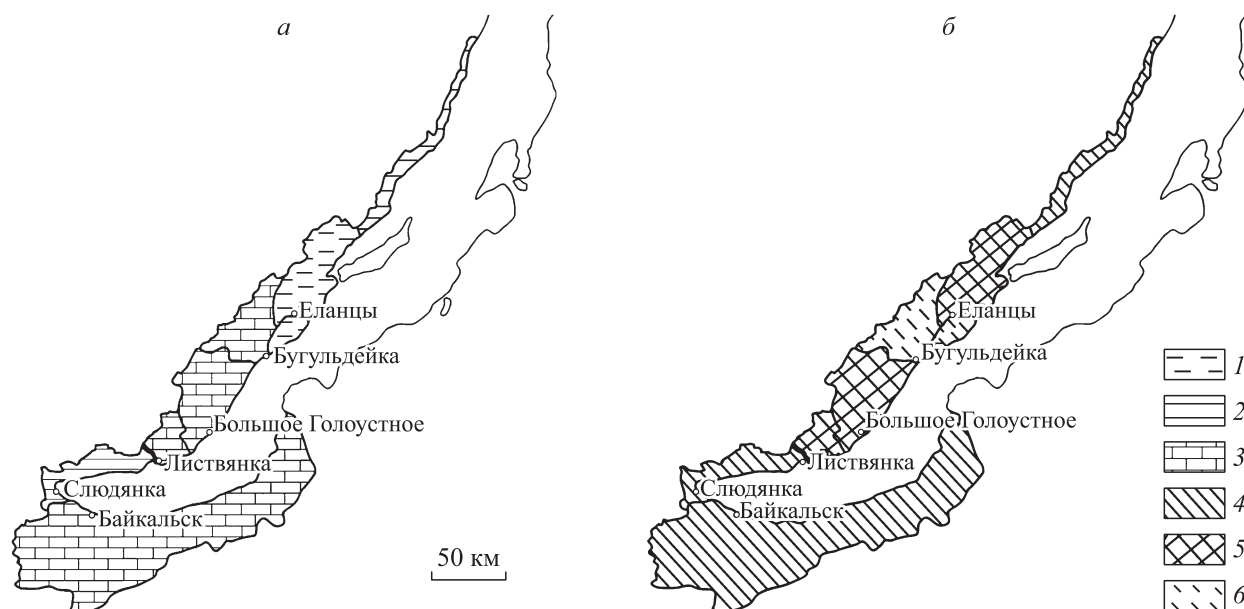


Рис. 2. Зонирование территории по микроэлементному составу вод (а) и химическому составу дренируемых почв и пород (б).

Микроэлементный состав вод: 1 — молибденово-ванадиевый ((Mo + V) > 8 мкг/л), 2 — железо-алюминиевый ((Fe + Al) > 1,5 мкг/л, (Mo + V) < 2 мкг/л), 3 — смешанный ((Fe + Al + Mo + V) < 2 мкг/л). Дренируемые породы: 4 — алюмосиликатные кислые, 5 — алюмосиликатные кислые и щелочные, 6 — алюмосиликатные щелочные и карбонатные.

нием железа и алюминия ((Fe + Al) > 1,5 мкг/л, (Mo + V) < 2 мкг/л) типичны для Слодянского и Онгуренского районов, смешанные ((Fe + Al + Mo + V) < 2 мкг/л) — для всех остальных (рис. 2, а).

Для оценки связи состава вод с почвами и породами также использовали аналог коэффициента водной миграции [21], равный отношению содержания элемента в минеральном веществе воды (см. табл. 1, 2) и в донных осадках рек (табл. 3, 4).

Различия в интенсивности миграции макроэлементов между водами разных местоположений незначительны (см. табл. 4). Это связано с высокими кларками и высокой биогенностью Ca, Mg, K и Na, обеспечивающими их присутствие в сходных количествах в водах, органическом веществе почв и породах. Единственная выявленная аномалия проявляется в низких величинах коэффициентов миграции Mg и Ca в водах рек Бугульдейского и Крестовского районов. По-видимому, она обусловлена тем, что их подземный бассейн не совпадает с наземным [22]: химический состав части под-

Таблица 3

Содержание элементов в донных осадках водных объектов бассейна оз. Байкал, мкг/г

Объект	Элемент										
	Sr	Zn	Cu	Sn	Mo	V	Ti	Ni	Fe	Al	Mn
1	257	42	24	3	2	93	6433	15	73 444	132 989	1133
2	298	43	45	3	2	83	7375	11	76 925	125 950	1100
3	302	29	28	3	1	66	5373	10	58 082	118 245	1264
4	168	26	13	2	1	65	4325	9	44 575	99 675	1100
5	273	25	20	2	2	67	5767	8	71 833	111 533	833
6	665	95	38	4	3	115	11 350	33	81 775	144 750	1275
7	295	63	71	5	4	85	14 236	28	65 155	129 400	1018
8	288	57	132	5	4	120	7214	22	69 686	121 836	1057
9	318	47	46	3	2	87	7759	17	67 684	123 047	1098
10	100	—	100	—	—	200	—	—	—	128 000	1890
11	500	65	—	—	—	84	5000	65	64 000	47 760	3500
12	307	41	—	—	—	78	5100	15	35 000	53 867	1200

Таблица 4

**Коэффициенты водной миграции (Кх) для макрокомпонентов раствора и параметры, использованные для его расчета**

Объект	Концентрация в водах, г/л				Концентрация в осадках, %				Кх			
	К	Na	Mg	Ca	К	Na	Mg	Ca	К	Na	Mg	Ca
1	0,0011	0,0022	0,0014	0,0086	2,03	2,01	1,12	1,99	1,05	2,18	2,46	8,61
2	0,0008	0,0028	0,0033	0,0129	2,19	2,27	1,04	2,22	0,45	1,54	3,97	7,24
3	0,0009	0,0039	0,0064	0,0187	1,76	1,26	0,40	0,90	0,45	2,60	13,27	17,30
4	0,0006	0,0018	0,0080	0,0223	2,07	1,86	0,63	1,48	0,19	0,70	9,10	10,76
5	0,0010	0,0031	0,0146	0,0403	0,30	1,37	2,81	5,43	1,23	0,86	1,99	2,85
6	0,0020	0,0097	0,0191	0,0528	0,27	1,54	3,70	8,38	2,07	1,74	1,44	1,75
7	0,0010	0,0021	0,0037	0,0140	2,31	1,92	1,21	1,79	0,48	1,24	3,43	8,68
8	0,0012	0,0021	0,0113	0,0286	1,69	1,34	0,56	1,14	0,38	0,84	10,60	13,19
9	0,0011	0,0035	0,0085	0,0248	1,58	1,70	1,43	2,92	0,79	1,46	5,78	8,80
10	0,0004	0,0009	0,0009	0,0073	3,94	2,86	0,30	1,16	0,19	0,56	5,45	11,47
11	0,0009	0,0019	0,0020	0,0185	2,26	2,03	0,46	1,32	0,36	0,87	4,07	12,96
12	0,0014	0,0071	0,0054	0,0152	1,87	2,31	1,09	2,10	0,67	2,83	4,57	6,72

Примечание. Здесь и в табл. 5–7 выделены величины коэффициентов: серой заливкой – все более чем в 2 раза больше или меньше средней; курсивом – значительно меньше средней.

земного стока, становящегося впоследствии речным, формируется в другом месте и из другого материала, нежели донные осадки рек. Величины коэффициентов миграции макроэлементов, рассчитанные для южных притоков, близки к таковым для Селенги, но значительно отличаются от рассчитанных для Баргузина и Верхней Ангары.

Различия между районами в интенсивности миграции микроэлементов весьма контрастны. Отчетливо наблюдается обеднение (по сравнению с породами) вод Бугульдейского и Крестовского районов Mo, V, Ti, Ni, Fe, Al, Mn (табл. 5).

Низкие величины коэффициентов их миграции, возможно, обусловлены разбавлением почвенно-грунтовых вод водами регионального подземного стока [22]. Низкие и средние величины коэффициентов миграции Mo, V, Al, характерные для Байкальского, Ливинского и Онгуренского районов, связаны с отсутствием легко выветриваемых минералов в составе почв и отложений межгорных впадин. В случае Байкальского района отсутствие таких минералов объясняется большими скоростями выветривания [23].

Таблица 5

**Коэффициенты водной миграции для микрокомпонентов поверхностных вод бассейна оз. Байкал**

Объект	Элемент										
	Sr	Zn	Cu	Sn	Mo	V	Ti	Ni	Fe	Al	Mn
1	6,10	<b>0,13</b>	<b>0,31</b>	0,43	6,53	0,20	<b>0,00031</b>	<b>0,15</b>	<b>0,00023</b>	<b>0,000120</b>	<b>0,0024</b>
2	3,68	0,08	0,07	0,14	1,56	0,09	0,00007	0,09	0,00007	0,000040	0,0008
3	3,41	0,07	0,08	0,23	4,61	0,06	0,00004	0,06	0,00007	0,000010	0,0005
4	5,22	0,05	0,15	0,15	2,69	0,05	0,00004	0,05	0,00008	0,000010	0,0005
5	3,19	0,03	0,05	0,18	1,38	0,05	0,00002	0,02	0,00003	0,000004	0,0002
6	1,12	0,02	0,03	0,66	5,96	0,36	0,00004	0,01	0,00001	0,000020	0,0001
7	2,91	0,07	0,05	0,33	2,81	<b>1,08</b>	0,00018	0,02	0,00007	0,000080	0,0006
8	2,15	0,07	0,02	0,17	1,51	0,04	0,00015	0,02	0,00005	0,000050	0,0004
9	3,47	0,06	0,09	0,29	3,38	0,24	0,00010	0,05	0,00008	0,000040	0,0007
10	<b>7,65</b>	–	0,13	–	–	0,02	–	–	–	0,000070	–
11	2,13	–	–	–	–	0,11	–	0,05	–	0,000060	–
12	5,07	–	–	–	–	0,22	–	<b>0,30</b>	–	0,000050	–

Примечание. Здесь и в табл. 6, 7 полужирным шрифтом выделены величины коэффициентов, значительно превышающие среднюю.

Высокие величины коэффициентов миграции Zn, Cu, Ti, Ni, Fe, Al, Mn, характерные для водотоков Слюдянского района, в его северной части связаны с повышенной растворимостью амфибол-биотитовых гнейсов и амфиболитов Шумихинской свиты по сравнению с окружающими гранитоидами Шарыжалгайской серии [24]. В южной части района вода обогащается металлами за счет легкорастворимого вещества Перевальной свиты Слюдянской серии (мраморов, апатитов, кальцифира и т. д.), в то время как в донных осадках присутствует и менее растворимое вещество Култукской свиты, представленное гнейсами и кристаллическими сланцами [25]. Ввиду недостаточности данных по главным притокам, судить о различиях в величинах коэффициентов миграции микроэлементов между ними и южными притоками не представляется возможным.

Даже при использовании такого репрезентативного по отношению к породам бассейна материала, как донные отложения, пространственная вариабельность геологического строения не позволяет в полной мере использовать коэффициенты миграции для идентификации пород и продуктов их разрушения, непосредственно участвующих в формировании химического состава вод. Не способствует идентификации и привлечение данных геологических карт. Их контуры объединяют геологические образования одного возраста, но не химического состава. Так, Хангарульская серия раннего протерозоя, занимающая большие площади в Бугульдейском, Голоустненском и Онгуренском районах, включает в себя три вида различающихся по составу силикатных метаморфических пород (гнейсы, сланцы, амфиболиты), одну карбонатную (мрамор) и два вида осадочных (песчаники и алевролиты) [18]. Поэтому о том, какие именно породы влияют на состав вод, лучше судить по относительному содержанию металлов в воде. Для этого концентрации микроэлементов (М) нормировались по данным для наиболее контрастных по подвижности Al и Sr (табл. 6, 7), а затем сравнивались результаты, полученные для разных районов.

Предполагалось, что если концентрация металла, нормированная по малоподвижному Al, понижена относительно средней по южным притокам (см. рис. 2, б), то его источником являются слабо-растворимые кислые силикатные породы (Байкальский, Слюдянский и Онгуренский районы). Если

Таблица 6

Концентрации элементов в поверхностных водах, нормированные по алюминию

Объект	Элемент									
	Sr	Zn	Cu	Sn	Mo	V	Ti	Ni	Fe	Mn
1	101,24	0,36	0,49	0,09	0,84	1,19	0,13	0,15	1,09	0,17
2	233,26	0,73	0,68	0,08	0,79	1,64	0,11	0,21	1,23	0,18
3	607,69	1,25	1,26	0,40	3,21	2,31	0,13	0,35	2,25	0,36
4	749,24	1,04	1,59	0,29	2,87	2,75	0,14	0,42	2,87	0,44
5	<b>2131,66</b>	1,94	<b>2,38</b>	<b>1,03</b>	<b>5,64</b>	8,46	0,23	0,44	4,55	0,45
6	233,45	0,56	0,32	0,77	<b>5,14</b>	<b>13,01</b>	0,15	0,09	0,29	0,04
7	81,26	0,42	0,31	0,16	1,16	8,76	0,24	0,06	0,46	0,06
8	98,74	0,61	0,34	0,13	0,93	0,75	0,17	0,06	0,54	0,06
9	529,57	0,86	0,92	0,37	2,57	4,86	0,16	0,22	1,66	0,22

Таблица 7

Концентрации элементов в поверхностных водах, нормированные по стронцию

Объект	Элемент									
	Al	Zn	Cu	Sn	Mo	V	Ti	Ni	Fe	Mn
1	0,010	0,004	0,005	0,0009	0,008	0,012	0,0013	0,0015	0,011	0,0017
2	0,004	0,003	0,003	0,0003	0,003	0,007	0,0005	0,0009	0,005	0,0008
3	0,002	0,002	0,002	0,0007	0,005	0,004	0,0002	0,0006	0,004	0,0006
4	0,001	0,001	0,002	0,0004	0,004	0,004	0,0002	0,0006	0,004	0,0006
5	0,0005	0,001	0,001	0,0005	0,003	0,004	0,0001	0,0002	0,002	0,0002
6	0,004	0,002	0,001	<b>0,0033</b>	<b>0,022</b>	<b>0,056</b>	0,0006	0,0004	0,001	0,0002
7	0,012	0,005	0,004	0,0019	0,014	<b>0,108</b>	<b>0,0030</b>	0,0007	0,006	0,0008
8	0,010	0,006	0,003	0,0013	0,009	0,008	0,0017	0,0006	0,005	0,0006
9	0,006	0,003	0,003	0,0012	0,009	0,025	0,0009	0,0007	0,005	0,0007

относительная концентрация металла близка к средней, то источником служит комплекс кислых и средних силикатных пород (Листвянский, Голоустненский и Еланцинский районы). Если же концентрация металла, нормированная по подвижному Sr, повышена относительно средней, то его источник — щелочные силикатные и карбонатные породы или воды регионального стока, содержащие продукты их выветривания (Бугульдейский и Крестовский районы).

В рамках исследования сделана попытка выявить связь состава вод Байкала и его главных притоков со взвешенным по стоку [15] составом вод южных притоков. Наибольшее сходство между составами наблюдается в содержании К и Na, наименьшее — Са и Mg. И сходство, и различие обусловлены присутствием соответствующих металлов в горных породах и донных осадках (см. табл. 4). Концентрации К и Na в них примерно одинаковы (за исключением К в осадках Бугульдейского и Крестовского районов), а Са и Mg — крайне различны. Для более точной оценки связи были построены диаграммы смешения. Вклады притоков рассчитывали с использованием уравнений многоком-

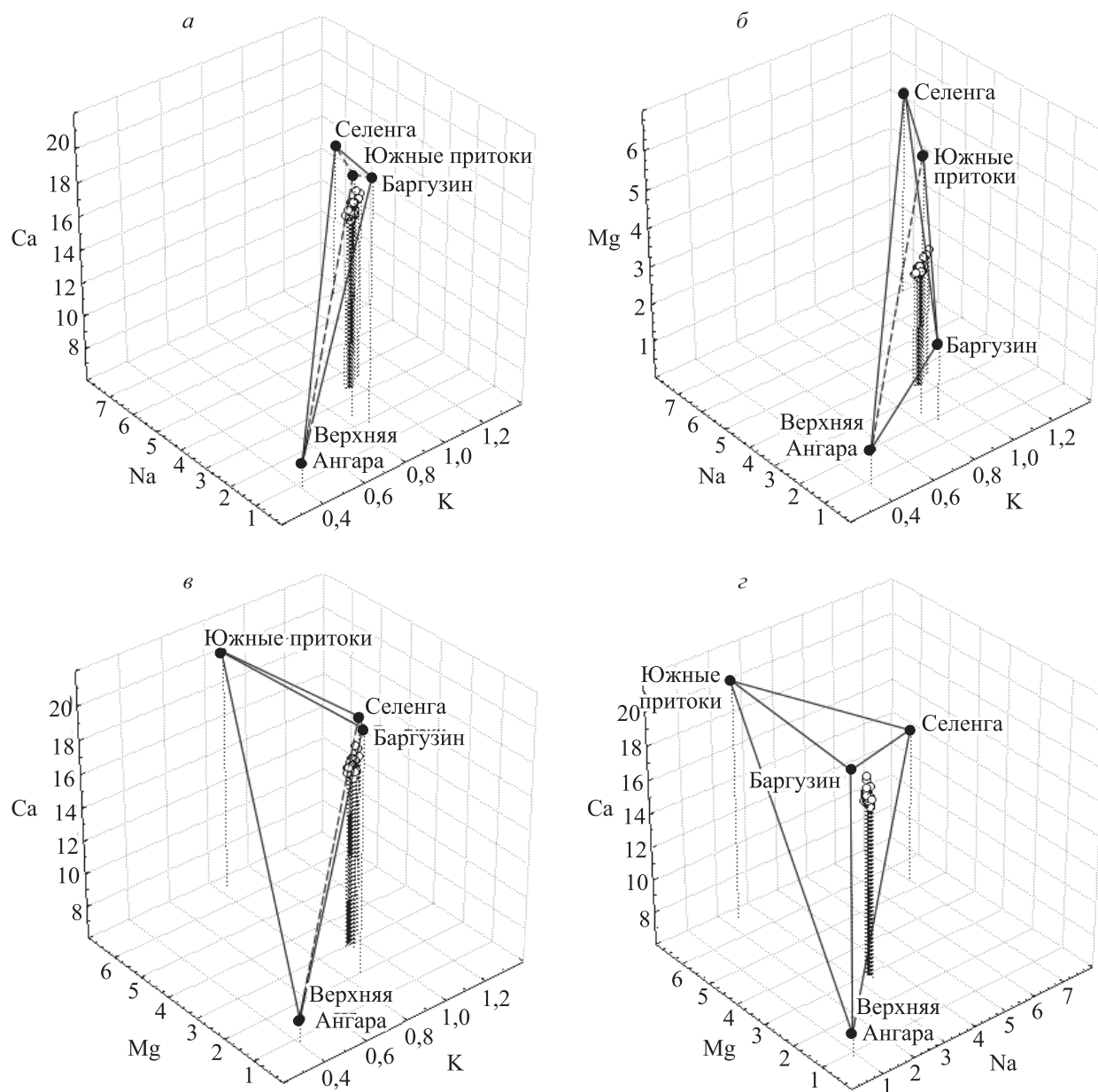


Рис. 3. Диаграммы смешения вод притоков Байкала в координатах макрокомпонентов раствора, мкг/л. Пояснения — см. текст.



понтентного смешения. В координатах концентраций Ca, Mg, K, Na вклад южных притоков в растворенное вещество Байкала варьирует от 30 (рис. 3, а) до 5 % (см. рис. 3, з). Вместе с Верхней Ангарой учитывается также сходная по составу воды р. Тый. Величина вклада зависит от того, насколько концентрация выбранного металла-трассера близка к его концентрации в байкальской воде (см. табл. 1). Соответственно, использование в качестве трассеров щелочных металлов обеспечивает максимальный вклад (см. рис. 3, а, б), а щелочноземельных — минимальный (см. рис. 3, в, з). Наиболее достоверна оценка вклада притоков в координатах преобладающих металлов — Ca, Mg, Na (см. рис. 3, з). Точность определения вклада при этом не столь значима: более важен тот факт, что пробы вод Байкала (точки) укладываются в области смешения притоков в координатах любых сочетаний макрокомпонентов раствора. Это означает, что ни один из выбранных металлов не фракционируется в результате биологических и физико-химических процессов, происходящих в водоеме, а зависимость макроэлементного состава воды Байкала от состава притоков непосредственная.

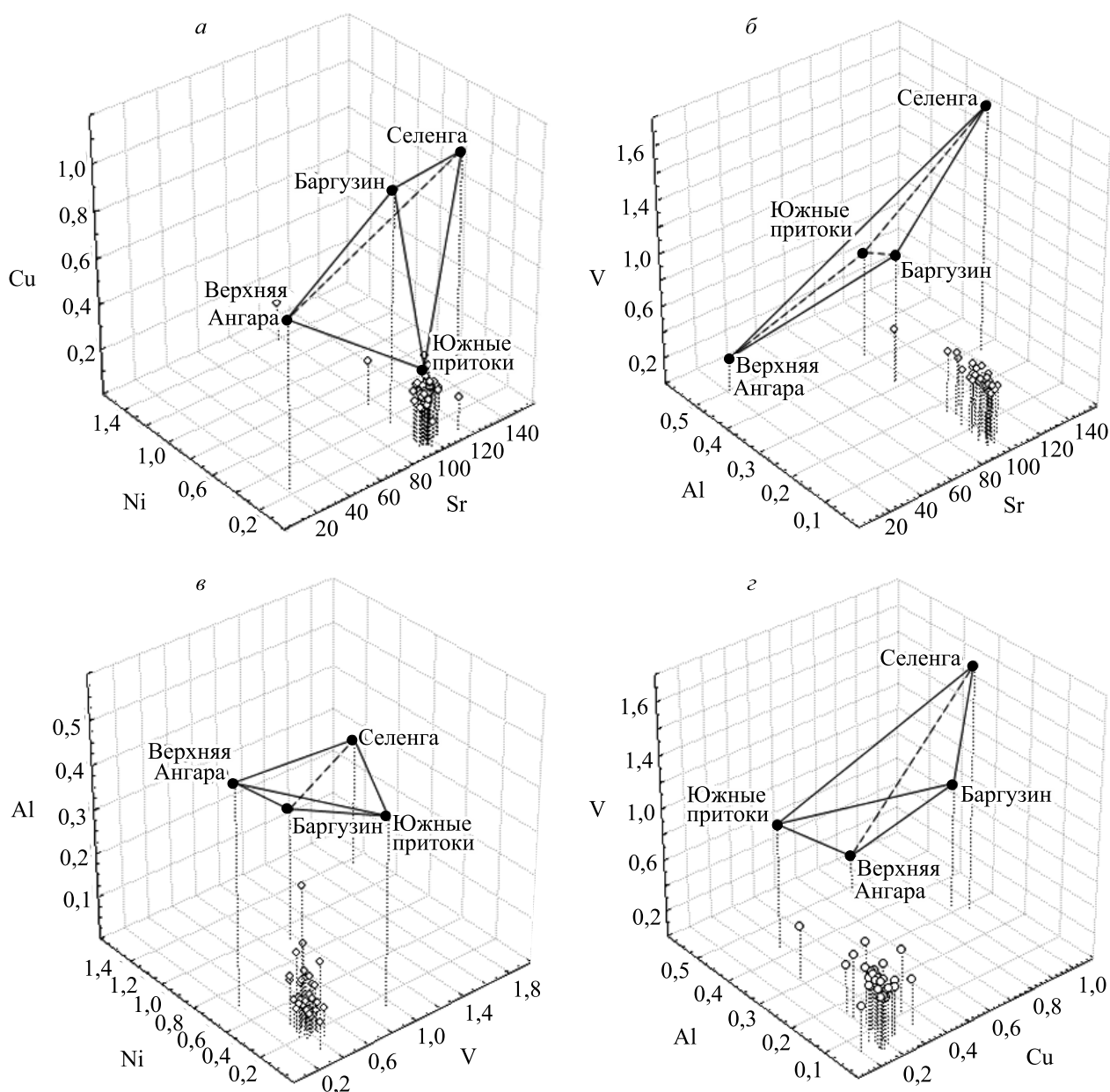


Рис. 4. Диаграммы смешения вод притоков Байкала в координатах микрокомпонентов раствора, мкг/л. Пояснения — см. текст.

Достоверно оценить связь микроэлементного состава воды озера с составом вод южных притоков не удалось. Концентрации микроэлементов в байкальской воде в несколько раз ниже (рис. 4), поэтому области смешения, образованные притоками, не совпадают с массивами точек байкальской воды ни при одной из возможных комбинаций трассеров. Наибольшее сходство наблюдается для Sr (см. рис. 4, а, б), наименьшее — для V (см. рис. 4, в, г).

Причиной различий вод Байкала и притоков по уровню концентраций микроэлементов, по-видимому, является их миграция (за исключением Sr) в составе органического вещества. Вследствие длительного периода водообмена в Байкале эти соединения оседают на дно со взвесями или разрушаются, а металлы выпадают в осадок в виде гидроксидов и комплексных неорганических соединений. Таким образом, микроэлементный состав воды Байкала в большей степени зависит от скорости деструкционных процессов в озере и устойчивости к разложению органического вещества вод притоков, нежели от концентраций микроэлементов в них. Удаленность проб вод Байкала и его главных притоков на диаграммах смешения от южных рек свидетельствует о низком вкладе последних в микроэлементный состав воды озера.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о значительной вариабельности состава вод южных притоков. Существенные различия наблюдаются и в микроэлементном составе вод: минимальные и максимальные концентрации олова и ванадия различаются в 30 раз.

Участие южных притоков Байкала в формировании микроэлементного состава воды озера невелико, но их вклад в макроэлементный состав воды Байкала сопоставим с вкладом Верхней Ангары или даже превышает его. Химические свойства вод южных притоков обусловлены своеобразием литохимических и гидрологических условий ландшафтов южного побережья. Особое место занимает Приольхонье, где на состав вод, формирующийся в условиях нетипичных для побережья горных пород, влияет региональный сток.

Разнообразные и зачастую уникальные условия формирования химического состава вод требуют нестандартных методов установления его происхождения. О связи состава вод с условиями его формирования гораздо больше говорят концентрации металлов, нормированные по концентрациям наиболее контрастных в плане подвижности элементов, нежели коэффициенты водной миграции.

*Работа выполнена в рамках базовых проектов (0345–2019–0008 и 0281–2019–0002) при поддержке правительства Иркутской области и Российского фонда фундаментальных исследований (17–45–388054 и 17–29–05068).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сороковикова Л.М., Синокович В.И., Ходжер Т.В., Голобокова Л.П., Башенхаева Н.В., Нецветаева О.Г. Поступление биогенных элементов и органических веществ в оз. Байкал с речными водами и атмосферными осадками // Метеорология и гидрология. — 2001. — № 4. — С. 78–86.
2. Ходжер Т.В., Сороковикова Л.М. Оценка поступления растворимых веществ из атмосферы и с речным стоком в озеро Байкал // География и природ. ресурсы. — 2007. — № 3. — С. 185–191.
3. Вотинцев К.К., Глазунов И.В., Толмачёва А.П. Гидрохимия рек бассейна озера Байкал. — М.: Наука, 1965. — 494 с.
4. Кузьмин В.А. Химический состав вод притоков Юго-Западного и Южного Байкала и его связь с природной обстановкой // География и природ. ресурсы. — 1998. — № 1. — С. 70–23.
5. Синокович В.Н. Взаимосвязь водного и ионного стока основных притоков оз. Байкал // Водные ресурсы. — 2003. — Т. 30, № 2. — С. 208–212.
6. Гребенщикова В.И., Лустенберг Э.Е., Китаев Н.А., Ломоносов И.С. Геохимия окружающей среды Прибайкалья (Байкальский геоэкологический полигон). — Новосибирск: Акад. изд-во «ГЕО», 2008. — 234 с.
7. Чебыкин Е.П., Сороковикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В., Грачёв М.А. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. — 2012. — Т. 20, № 6. — С. 613–631.
8. Granina L.Z., Baryshev V.B., Grachev A.M. Study of the elemental composition of suspended sediments in Lake Baikal and its tributaries by X-ray fluorescent analysis based on synchrotron radiation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. — 1995. — Vol. 359. — P. 302–304.

9. **Semenov M.Yu., Spolnik Z., Granina L., Van Grieken R.** Ultra-thin window electron probe microanalysis of suspended particles in tributaries of Lake Baikal, Siberia // International Journ. of Environmental Analytical Chemistry. — 2005. — Vol. 85, N 6. — P. 377–386.
10. **Томберг И.В., Сороковикова Л.М., Невцветаева О.Г., Сезько Н.П., Жученко Н.А.** Химический состав и тенденция закисления снеговых вод и вод притоков Южного Байкала // Оптика атмосферы и океана. — 2016. — Т. 29, № 6. — С. 516–520.
11. **Башенхаева Н.В., Синюкович В.Н., Сороковикова Л.М., Ходжер Т.В.** Органическое вещество в воде реки Селенги // География и природ. ресурсы. — 2006. — № 1. — С. 47–54.
12. **Khodzher T.V., Domyshva V.M., Sorokovikova L.M., Sakirko M.V., Tomberg I.V.** Current chemical composition of Lake Baikal water // Inland Waters. — 2017. — Vol. 7, N 3. — P. 250–258.
13. **Суворов Е.Г., Титаев Д.Б.** Структура ландшафтов Южного Прибайкалья // География и природ. ресурсы. — 1999. — № 4. — С. 20–30.
14. **Снытко В.А., Семенов Ю.М., Семенова Л.Н., Данько Л.В.** Геохимия ландшафтов бассейна озера Байкал // География и природ. ресурсы. — 2007. — № 3. — С. 191–197.
15. **Афанасьев А.Н.** Водные ресурсы и водный баланс бассейна оз. Байкал. — Новосибирск: Наука, 1976. — 238 с.
16. **Falkner K.K., Measures C.I., Herbelin S.E., Edmond J.M., Weiss R.F.** The major and minor element geochemistry of Lake Baikal // Limnology and Oceanography. — 1991. — Vol. 36. — P. 413–423.
17. **Falkner K.K., Church M., Measures C.I., Baron G. le, Thouron D., Jeandel C., Stordal M.C., Gill G.A., Mortlock R., Froelich P., Chan L.-H.** Minor and trace element chemistry of Lake Baikal, its tributaries, and surrounding hot springs // Limnology and Oceanography. — 1997. — Vol. 42. — P. 329–345.
18. **Экологический атлас бассейна оз. Байкал** [Электронный ресурс]. — <http://bic.iwlearn.org> (дата обращения 10.06.2018).
19. **Кузьмин М.А., Бычинский В.А, Кербер Е.В., Ощепкова А.В., Горегляд А.В., Иванов Е.В.** Химический состав осадков глубоководных байкальских скважин как основа реконструкции изменений климата и окружающей среды // Геология и геофизика. — 2014. — Т. 55, № 1. — С. 3–22.
20. **Пеллинен В.А., Черкашина Т.Ю., Пашкова Г.В., Густайтис М.А., Журкова И.С., Штельмах С.И., Пантеева С.В.** Оценка экологического состояния почвенного покрова о. Ольхон (по экспериментальным данным) // Изв. Ирк. ун-та. Сер. Науки о земле. — 2016. — Т. 16. — С. 79–90.
21. **Перельман А.И.** Геохимия ландшафта. — М.: Высш. шк., 1975. — 341 с.
22. **Писарский Б.И.** Закономерности формирования подземного стока бассейна оз. Байкал. — Новосибирск: Наука, 1987. — 158 с.
23. **Семёнов М.Ю., Сандимирова Г.П., Коровякова И.В., Троицкая Е.С., Храмцова Т.И., Донская Т.В.** Сравнительная оценка скоростей внутрипочвенного выветривания в ландшафтах северного макросклона хребта Хамар-Дабан // Геология и геофизика. — 2005. — № 1. — С. 50–59.
24. **Туркина О.М., Урманцева Л.Н., Бережная Н.Г., Скублов С.Г.** Формирование и мезоархейский метаморфизм гиперстеновых гнейсов в иркутном гранулитогнейсовом блоке (Шарыжалгайский выступ Сибирского крата) // Геология и геофизика. — 2011. — Т. 52, № 1. — С. 122–137.
25. **Школьник С.И., Резницкий Л.З., Бараш И.Г.** Возможность диагностики задуговых палеобассейнов по высокоградным оргоморфитам (на примере основных кристаллосланцев Слюдянского кристаллического комплекса, Южное Прибайкалье) // Геохимия. — 2011. — № 12. — С. 1253–1270.

*Поступила в редакцию 09.11.2018*

*После доработки 21.03.2019*

*Принята к публикации 06.09.2019*