

УДК 911.9:504.054:547.62

СОСТАВ МЕТАЛЛОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ЮЖНОГО ПРИБАЙКАЛЯ И ЕГО СВЯЗЬ С ЛАНДШАФТНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ

М. Ю. Семенов^{1,*}, член-корреспондент РАН В. А. Снытко^{2,3}, Ю. М. Семенов^{3,4},
А. В. Силаев³, Л. Н. Семенова³

Поступило 26.12.2018 г.

Изучен состав металлов вод и донных отложений южных притоков озера Байкал, рассчитаны коэффициенты их водной миграции. Составлена схема районирования территории по способности обеспечивать тот или иной состав вод. Обнаружена значительная дифференциация вод Байкала и его главных притоков по минерализации, преобладающим макроэлементам и микроэлементам. Оценка вклада южных притоков в состав байкальской воды обнаружила, что коэффициенты водной миграции макроэлементов вод южных и главных притоков близки, а коэффициенты миграции микроэлементов резко различаются. Причиной этого является наличие источников растворённого вещества (пород и глубоких подземных вод) с нехарактерным для соответствующих ландшафтов составом. Вклад южных притоков в макроэлементный состав воды озера Байкал составляет 7–15%, а вклад в микроэлементный состав оценке не поддается из-за их гораздо более высоких концентраций в речных водах. Причина этих различий — миграция микроэлементов в составе органического вещества, которое вследствие большого времени водообмена в Байкале осаждается или разрушается, что способствует выведению микроэлементов из раствора.

Ключевые слова: Байкал, притоки, вода, металлы, макроэлементы, микроэлементы.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524865613-619>

Химический состав вод южных притоков оз. Байкал изучается давно, однако известно о нём немного. Достаточно сведений в литературе о содержании главных ионов вод хр. Хамар-Дабан [1], меньше — об их содержании в водах Приморского хр. [2]. О ионном составе вод большинства водотоков известно лишь из работ К.К. Вотинцева с соавторами [3]. Зависимость состава вод южных притоков от факторов среды изучена ещё меньше. В качестве фактора чаще всего рассматривалась человеческая деятельность [1, 4]. В зависимости от вида антропогенного воздействия оценивались концентрации соответствующих поллютантов [1, 4]. Отсутствие инте-

реса к поиску природных источников вещества объясняется малой информативностью макрокомпонентного состава: почти все поверхностные воды бассейна Байкала относятся к ультрапресным гидрокарбонатно-кальциевым [3]. Для установления и природных и антропогенных источников растворённого вещества нужен единый набор компонентов. Им является наименее изученная и наиболее вариабельная фракция вещества вод и пород — металлы. В настоящем исследовании впервые получены и систематизированы данные о составе металлов вод Южного Прибайкалья, идентифицированы его источники, а территория дифференцирована по составу вод.

Материалами послужили данные по составу вод и донных осадков 75 водотоков, от реки Малая Кочерикова (юго-западное побережье) — до реки Мишиха (юго-восточное побережье). Сравнение свойств вод проводилось после усреднения их составов для районов водосборного бассейна Байкала (рис. 1), выделенных на основе ландшафтно-геохимических критериев. Исследовались содержания как макрокомпонентов вод, таких как Ca, Mg, K и Na, так и микрокомпонентов — Sr, Zn, Cu, Sn, Mo,

¹Лимнологический институт
Сибирского отделения Российской академии наук,
Иркутск

²Институт истории естествознания и техники
им. С.И. Вавилова
Российской академии наук, Москва

³Институт географии им. В.Б. Сочавы
Сибирского отделения Российской академии наук,
Иркутск

⁴Иркутский государственный университет

*E-mail: smu@mail.ru

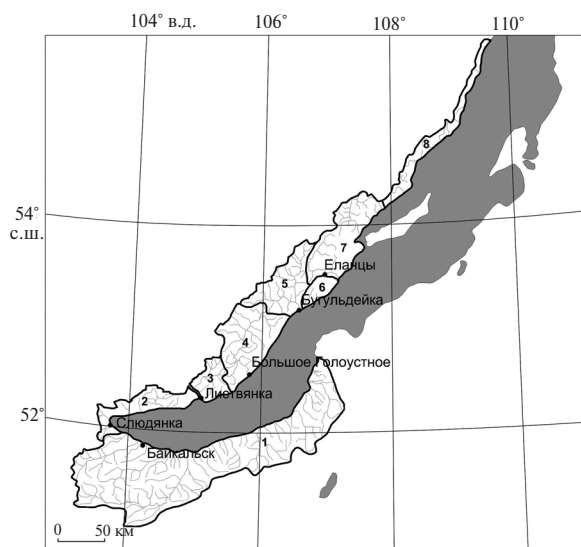


Рис. 1. Landscape-geochemical districts of Southern Baikal: 1 — Байкальский горно-склоновый и подгорно-равнинный таёжный; 2 — Слюдянский горно-склоновый и горно-долинный таёжно-подтаёжный; 3 — Листвянский горно-склоновый и предгорно-равнинный таёжно-подтаёжный; 4 — Голоустненский горно-склоновый и предгорно-равнинный таёжно-подтаёжный; 5 — Бугульдейский предгорно-подгорный таёжно-подтаёжный; 6 — Крестовский горно-склоновый подтаёжный с участками остепненных лугов и горных степей; 7 — Еланцинский холмисто-низкогорный подтаёжно-остепнённый; 8 — Онгуренский горно-склоновый подтаёжно-остепнённый.

V, Ti, Ni, Fe, Mn. Также были использованы литературные данные о составе вод Байкала и его главных притоков [5]. Методами определения металлов служили атомно-абсорбционная и атомно-эмиссионная спектрофотометрия, а также масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой. В донных осадках металлы определяли методом рентген-флуоресцентного анализа.

Исследованные воды значительно различаются по минерализации (табл. 1). Наиболее очевидно разделение их на 3 категории с минерализацией: 1) значительно превышающей среднюю (>140 мг/л); 2) значительно меньше средней (50–80 мг/л); 3) близкой к средней (80–140 мг/л). Наибольшая минерализация характерна для вод Бугульдейского и Крестовского районов, наименьшая — Байкальского, Слюдянского и Еланцинского, промежуточная — Листвянского, Голоустненского и Онгуренского (рис. 2а). Различия обусловлены широким распространением легкорастворимых метаморфических и осадочных пород на юго-западном побережье [6, 7].

Среди макроэлементов во всех водах абсолютно преобладает Ca ($>55\%$ -экв. от суммы Ca, Mg, K и Na). В остальном макроэлементный состав вод весьма неодинаков. Среди них можно выделить магниевые (Mg $> 30\%$ -экв. от суммы Mg, K и Na), натриево-магниевые (Mg 30–40%-экв., Na 5–10%-экв.) и магниевые-натриевые (Na 25–30%-экв., Mg 15–25%-экв.). К первым относятся воды Голоустненского, Бугульдейского и Онгуренского районов, ко вторым — Листвянского, Крестовского и Еланцинского, к третьим — Байкальского и Слюдянского (рис. 2б). Различия в макроэлементном составе вод обусловлены различиями в минералогическом составе пород. Богатые магнием магнезиальные разности магматических пород приурочены к Голоустненскому району [8], а осадочных — к Бугульдейскому и Крестовскому [6].

В составе микроэлементов абсолютно преобладает стронций (табл. 2), содержания других элементов на 2–3 порядка ниже. Самые низкие концентрации отмечены для Sn, Zn, Cu, Ti и Ni. По содержанию Cu и Ni южные реки гораздо ближе к Байкалу, нежели к главным притокам [5]. Наибольшая

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

Район	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Сумма ионов
Слюдянский	1,07	2,19	1,38	8,57	0,41	9,05	27,85	50,70
Байкальский	0,78	2,79	3,30	12,86	0,71	11,24	48,53	80,38
Листвянский	0,94	3,93	6,37	18,68	1,26	26,05	65,23	122,69
Голоустненский	0,56	1,83	8,03	22,30	0,44	15,73	92,63	141,87
Бугульдейский	0,96	3,07	14,57	40,30	0,70	29,57	166,45	256,06
Крестовский	2,01	9,65	19,13	52,83	2,18	18,81	258,92	363,72
Еланцинский	0,99	2,14	3,73	13,99	0,91	4,88	60,07	87,02
Онгуренский	1,22	2,13	11,28	28,56	1,09	14,69	130,68	189,88
Среднее	1,07	3,46	8,47	24,76	0,96	16,25	106,29	161,54

вариабельность концентраций наблюдается у V, Mo и суммы Fe+Al. По ним можно выделить молибденово-ванадиевые ($\text{Mo}+\text{V} > 8$ мкг/л), железо-алюминиевые ($\text{Fe}+\text{Al} > 1,5$ мкг/л, $\text{Mo}+\text{V} < 2$ мкг/л) и смешанные ($\text{Fe}+\text{Al}+\text{Mo}+\text{V} < 2$ мкг/л) воды. В воде Байкала и его главных притоков концентрация V значительно ниже. Молибденово-ванадиевые воды наблюдаются в Крестовском и Еланцинском районах, железо-алюминиевые — в Слюдянском и Онгунском, смешанные — во всех остальных (рис. 2в).

Для оценки интенсивности миграции элемента использовали аналог коэффициента водной миграции, равный отношению доли элемента в минеральном веществе воды (см. табл. 1, 2) к его содержанию

в донных осадках рек (табл. 3). В силу высоких кларков и высокой биогенности Ca, Mg, K и Na, различия в интенсивности их миграции между водами разных районов незначительны. Единственная аномалия проявляется в низких величинах коэффициентов миграции Mg и Ca в водах рек Бугульдейского и Крестовского районов. По-видимому, она является результатом несовпадения их подземного водосборного бассейна с наземным [9].

Интенсивность миграции микроэлементов очень различается между районами. Наблюдается обеднение (по сравнению с породами) вод Бугульдейского и Крестовского районов Mo, V, Ti, Ni, Fe, Al, Mn (табл. 4), обусловленное разгрузкой в реки вод регионального подземного стока [9]. Низкие величины

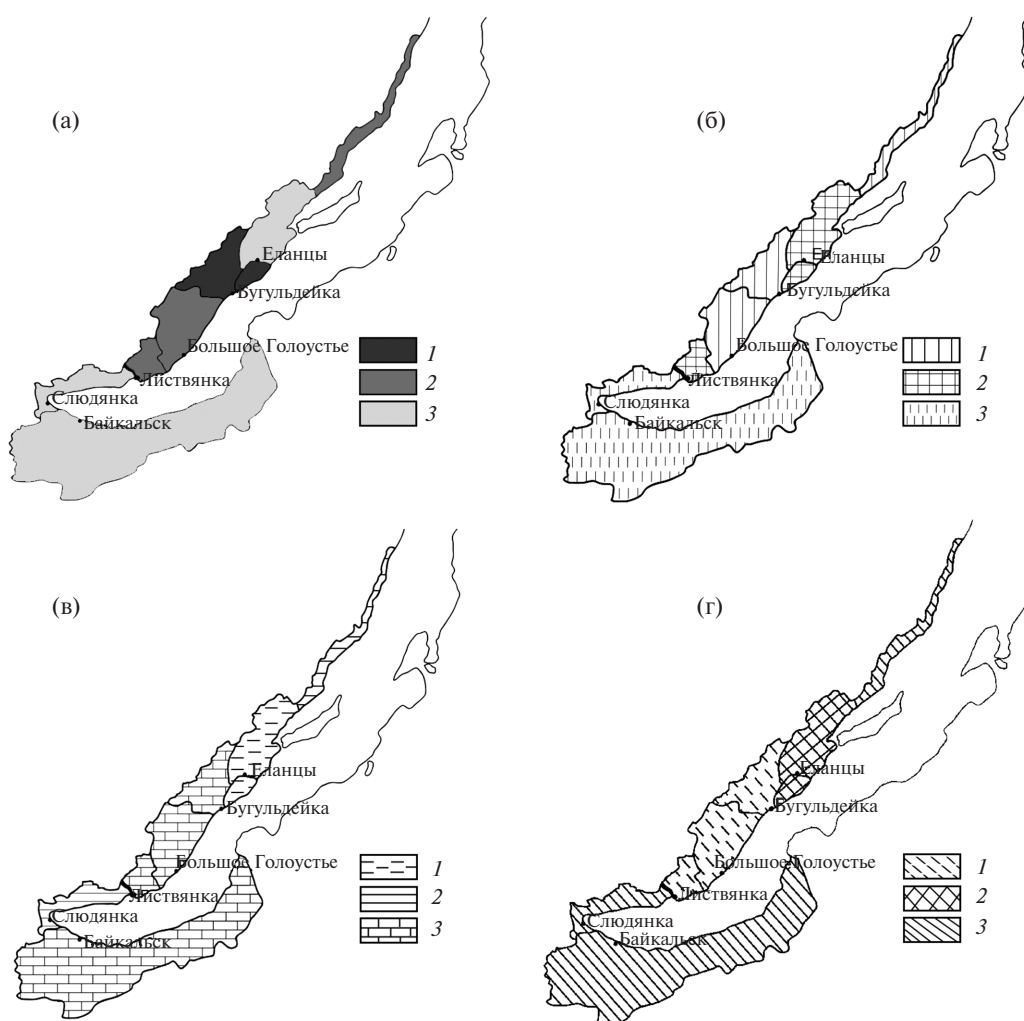


Рис. 2. Ландшафтно-гидрохимические системы Южного Прибайкалья, выделенные: а) по минерализации: 1 — выше средней, 2 — средняя, 3 — ниже средней; б) по макроэлементному составу: 1 — магниевый (Mg от суммы $\text{Mg}+\text{K}+\text{Na}$), 2 — натриево-магниевый (Mg 25–30%-экв., Na 5–10%-экв.), 3 — магниевое-натриевый (Na 10–15%-экв., Mg 15–25%-экв.), в) по микроэлементному составу: 1 — молибденово-ванадиевый ($\text{Mo}+\text{V} > 8$ мкг/л), 2 — железо-алюминиевый ($\text{Fe}+\text{Al} > 1,5$ мкг/л, $\text{Mo}+\text{V} < 2$ мкг/л), 3 — смешанный ($\text{Fe}+\text{Al}+\text{Mo}+\text{V} < 2$ мкг/л); г) по дренируемым породам: 1 — алюмосиликатные кислые, 2 — алюмосиликатные кислые и щелочные, 3 — алюмосиликатные щелочные и карбонатные.

Таблица 2. Содержание микроэлементов в поверхностных водах, мкг/л

Район	Sr	Zn	Cu	Sn	Mo	V	Ti	Ni	Fe	Al	Mn
Слюдянский	78,33	0,28	0,38	0,07	0,65	0,92	0,10	0,12	0,84	0,77	0,13
Байкальский	87,50	0,27	0,25	0,03	0,30	0,62	0,04	0,08	0,46	0,38	0,07
Листвянский	123,64	0,25	0,26	0,08	0,65	0,47	0,03	0,07	0,46	0,20	0,07
Голоустненский	122,50	0,17	0,26	0,05	0,47	0,45	0,02	0,07	0,47	0,16	0,07
Бугульдейский	226,67	0,21	0,25	0,11	0,60	0,90	0,02	0,05	0,48	0,11	0,05
Крестовский	268,00	0,64	0,37	0,89	5,90	14,94	0,17	0,11	0,34	1,15	0,05
Еланцинский	77,27	0,40	0,30	0,15	1,10	8,33	0,23	0,05	0,43	0,95	0,06
Онгуренский	117,64	0,72	0,41	0,15	1,11	0,90	0,20	0,07	0,64	1,19	0,07
Среднее	137,69	0,37	0,31	0,19	1,35	3,44	0,10	0,08	0,52	0,61	0,07

Таблица 3. Содержание элементов в донных осадках, мкг/г

Район	Sr	Zn	Cu	Sn	Mo	V	Ti	Ni	Fe	Al	Mn
Слюдянский	257	42	24	3	2	93	6433	15	73444	132989	1133
Байкальский	298	43	45	3	2	83	7375	11	76925	125950	1100
Листвянский	302	29	28	3	1	66	5373	10	58082	118245	1264
Голоустненский	168	26	13	2	1	65	4325	9	44575	99675	1100
Бугульдейский	273	25	20	2	2	67	5767	8	71833	111533	833
Крестовский	665	95	38	4	3	115	11350	33	81775	144750	1275
Еланцинский	295	63	71	5	4	85	14236	28	65155	129400	1018
Онгуренский	288	57	132	5	4	120	7214	22	69686	121836	1057
Среднее	318	47	46	3	2	87	7759	17	67684	123047	1098

Таблица 4. Коэффициенты водной миграции для микрокомпонентов поверхностных вод

Район	Sr	Zn	Cu	Sn	Mo	V	Ti	Ni	Fe	Al	Mn
Слюдянский	6,10	0,13	0,31	0,43	6,53	0,20	0,00031	0,15	0,00023	0,00012	0,0024
Байкальский	3,68	0,08	0,07	0,14	1,56	0,09	0,00007	0,09	0,00007	0,00004	0,0008
Листвянский	3,41	0,07	0,08	0,23	4,61	0,06	0,00004	0,06	0,00007	0,00001	0,0005
Голоустненский	5,22	0,05	0,15	0,15	2,69	0,05	0,00004	0,05	0,00008	0,00001	0,0005
Бугульдейский	3,19	0,03	0,05	0,18	1,38	0,05	0,00002	0,02	0,00003	0,000004	0,0002
Крестовский	1,12	0,02	0,03	0,66	5,96	0,36	0,00004	0,01	0,00001	0,00002	0,0001
Еланцинский	2,91	0,07	0,05	0,33	2,81	1,08	0,00018	0,02	0,00007	0,00008	0,0006
Онгуренский	2,15	0,07	0,02	0,17	1,51	0,04	0,00015	0,02	0,00005	0,00005	0,0004
Среднее	3,47	0,06	0,09	0,29	3,38	0,24	0,0001	0,05	0,00008	0,00004	0,0007

коэффициентов миграции Mo, V, Al, характерные для Байкальского, Листвянского и Онгуренского районов, связаны с отсутствием легко выветриваемых минералов в составе почв и отложений межгорных впадин. В Байкальском районе отсутствие объясняется высокими скоростями выветривания [10]. Высокие величины коэффициентов миграции Zn,

Cu, Ti, Ni, Fe, Al, Mn, наблюдаемые в Слюдянском районе, в его северной части связаны с повышенной растворимостью амфиболовых гнейсов и амфиболитов Шумихинской свиты по сравнению с окружающими гранитоидами Шарыжалгайской серии [11]. В южной части вода обогащается металлами за счёт метаморфизованных карбонатов Перевальной

свиты Слюдянской серии, в то время как в донных осадках присутствует и менее растворимое вещество Култукской свиты, представленное гнейсами и кристаллическими сланцами [12].

Вариабельность геологического строения не позволяет в полной мере использовать коэффициенты миграции для идентификации источника растворённого вещества вод. Об источниках растворенного вещества судили по содержаниям металлов (М) в воде, нормированным по наиболее контрастным по подвижности элементам - алюминию (Al) и стронцию (Sr). Предполагалось, что если концентрация металла, нормированная по малоподвижному алюминию понижена относительно средней по южным притокам (рис. 2г), то его источником являются слаборастворимые кислые силикатные породы (Байкальский, Слюдянский и Онгуренский районы).

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

Сходство составов речных и озёрных вод (рис. 3) оценивалось по близости их точек в областях смешения (фигурах, ограниченных линиями, соединяющими притоки): чем ближе проба байкальской воды к притоку, тем больше его вклад. В координатах концентраций Ca и Mg (рис. 3а, 3в) вода Байкала гораздо

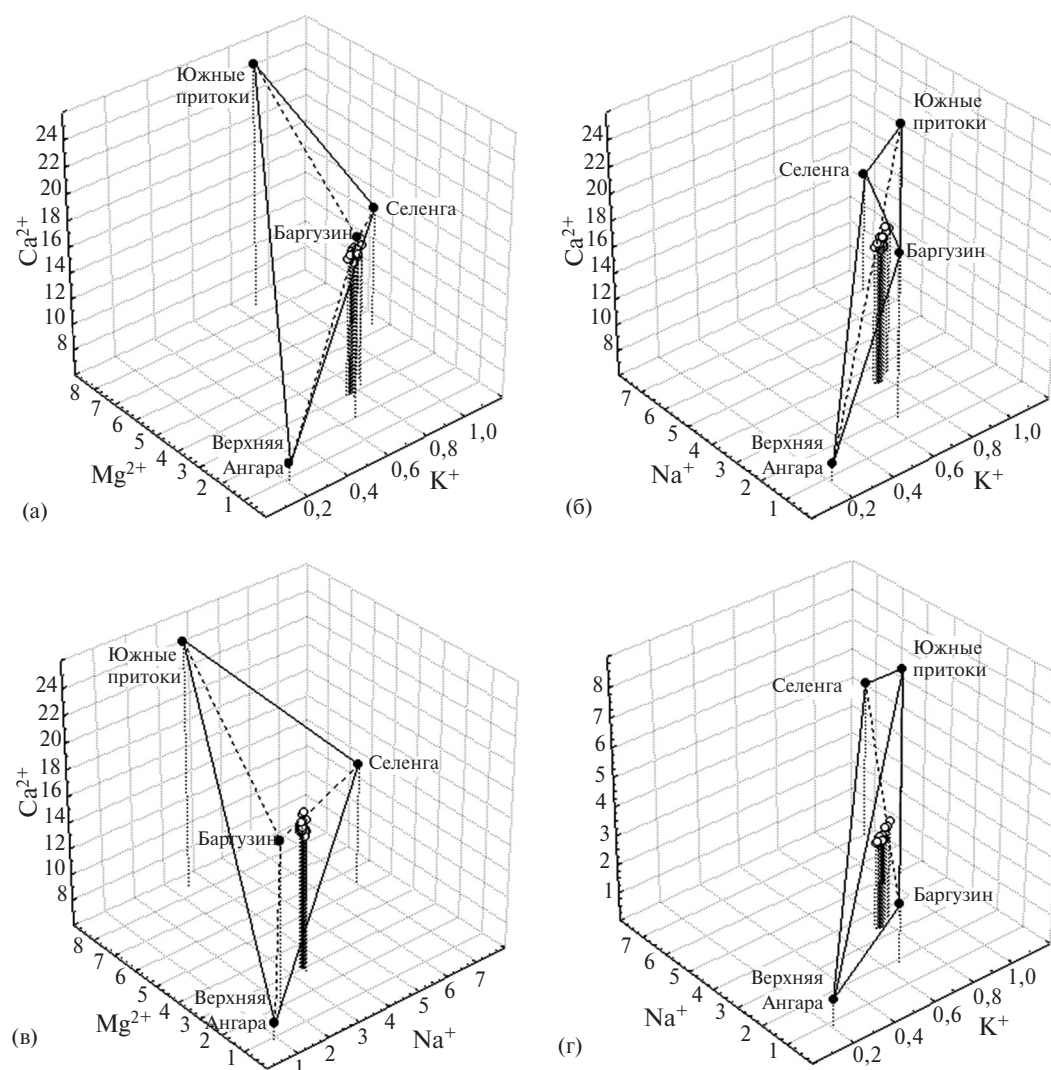


Рис. 3. Диаграммы смешения вод притоков Байкала в координатах концентраций макроэлементов, мг/л.

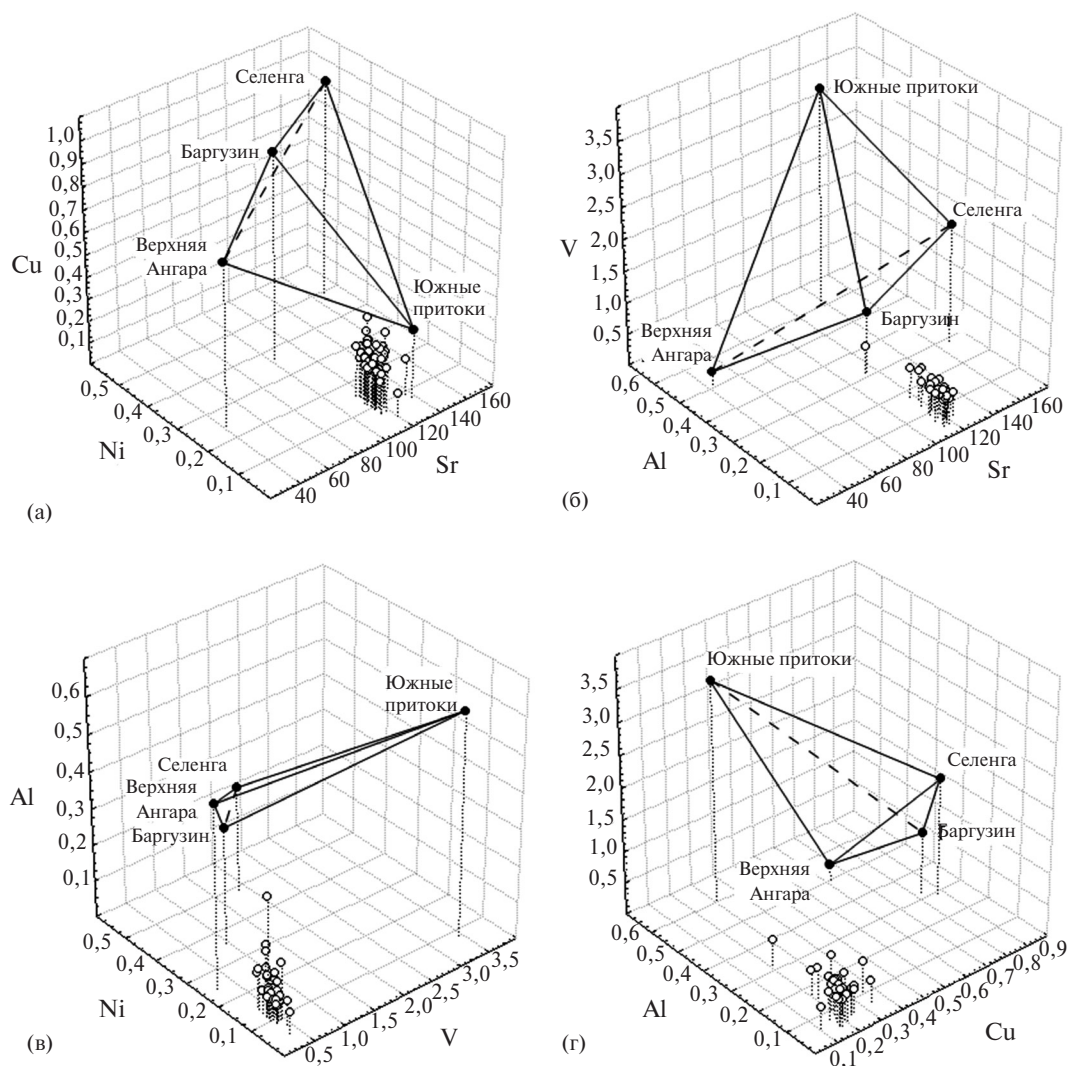


Рис. 4. Диаграммы смешения вод притоков Байкала в координатах концентраций макроэлементов, мкг/л.

ближе к водам Селенги и Баргузина, чем к водам южных притоков. Вклад последних в состав байкальской воды, рассчитанный с использованием уравнений смешения, составляет 5–7%. В координатах концентраций K и Na (рис. 3б, 3г) пробы воды Байкала несколько сдвигаются в направлении южных притоков, и их вклад в растворённое вещество озера увеличивается до 10–15%. Попадание байкальских проб в области смешения, говорит об отсутствии фракционирования макроэлементов.

Достоверно оценить связь микроэлементного состава озера с составом южных притоков не удалось. Концентрации микроэлементов в байкальской воде в разы 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 (рис. 4а, 4б), наимень-

шее — для V (рис. 4в, 4г). Причиной является миграция большинства микроэлементов в составе органического вещества. Вследствие большого времени водообмена в Байкале эти соединения либо оседают на дно, либо разрушаются, а металлы выпадают в осадок в виде гидроксидов и комплексных неорганических соединений. Удалённость проб озёрных вод от проб южных притоков на диаграммах смешения свидетельствует о незначительном вкладе последних в микроэлементный состав воды озера.

Источники финансирования. Исследование осуществлено в рамках базовых проектов № 0345–2019–0008, 0347–2019–0003 при поддержке Правительства Иркутской области и Российского фонда фундаментальных исследований — гранты 17–45–388054 (анализ и обработка данных) и 17–29–05068 (химический анализ и картирование).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сорокикова Л.М., Синюкович В.Н., Томберг И.В., Маринайте И.И., Ходжер Т.В. // География и природные ресурсы. 2015. № 1. С. 37–45.
2. Кузьмин В.А. // География и природные ресурсы. 1998. № 1. С. 70–23.
3. Вотивцев К.К., Глазунов И.В., Толмачева А.П. Гидрохимия рек бассейна озера Байкал. М.: Наука, 1965. 494 с.
4. Semenov M., Marinaite I., Zhuchenko N., Silaev A., Vershinin K., Semenov Yu. // Chem. and Ecol. 2018. V. 34. № 10. P. 901–916.
5. Falkner K.K., Church M., Measures C.I., LeBaron G., Thouron D., Jeandel C., Stordal M.C., Gill G.A., Mortlock R., Froelich P., Chan L.-H. // Limnol. and oceanogr. 1997. V. 42. P. 329–345.
6. Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакшин А.М., Поспеев А.В., Шимараев М.Н., Хлыстов О.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал “Гео”, 2001. 252 с.
7. Кузьмин М.А., Бычинский В. А., Кербер Е.В., Ощепкова А.В., Горегляд А.В., Иванов Е.В. // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 1. С. 3–22.
8. Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Вингейт М.Т.Д., Мазукабзов А.М., Писаревский С.А., Корнилова Т.А. // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 11. С. 1714–1730.
9. Писарский Б.И. Закономерности формирования подземного стока бассейна оз. Байкал. Новосибирск: Наука, 1987. 158 с.
10. Семенов М.Ю., Сандимирова Г.П., Коровякова И.В., Троцкая Е.С., Храмова Т.И., Донская Т.В. // Геология и геофизика. 2005. № 1. С. 50–59.
11. Туркина О.М., Урманцева Л.Н., Бережная Н.Г., Скублов С.Г. // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 1. С. 122–137.
12. Школьник С.И., Резницкий Л.З., Барах И.Г. // Геохимия. 2011. № 12. С. 1253–1270.

METALS COMPOSITION OF THE SURFACE WATERS OF THE SOUTHERN BAIKAL REGION AND ITS CONNECTION WITH LANDSCAPE AND GEOLOGICAL CONDITIONS

M. Yu. Semenov¹, Corresponding Member of the RAS V. A. Snytko^{2,3},
Yu. M. Semenov^{3,4}, A. V. Silaev³, L. N. Semenova³

¹Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

²S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

³V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

⁴Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

Received December 26, 2018

The metal composition of water and bottom sediments of southern Lake Baikal tributaries was studied and the water migration coefficients for micro- and trace elements were calculated. The map showing the study area divided into zones according to their ability to provide the certain water quality was drawn. The significant differences in mineralization, macro- and trace element composition between Lake Baikal water and tributary waters were found out. It was shown that values of water migration coefficients calculated for macro elements are similar in southern and main tributaries whereas coefficient values calculated for trace elements are quite different. This is due to dissolved matter sources such as rocks and deep ground waters which chemical composition is not typical for landscapes of Lake Baikal basin. The contribution of southern tributaries to macro element composition of lake water is between 7 and 15%, whereas tributaries contribution to trace element composition can hardly be evaluated because of higher element concentrations in riverine waters. The lower trace element concentrations in lake water with respect to riverine one is due to trace element migration in the form of complex organic compounds: long water residence time in lake favors to organic compounds decay by means of microbial- and photo-degradation followed by metal precipitation.

Keywords: Baikal, tributaries, water, metals, macro elements, trace elements.