

УДК 550.42(571.53)

ТОКСИЧНЫЕ (РТУТЬ, БЕРИЛЛИЙ) И БИОГЕННЫЕ (СЕЛЕН, ФТОР) ЭЛЕМЕНТЫ В АКВАЛЬНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ¹

© 2011 г. **И. С. Ломоносов***, **В. И. Гребенщикова***, **О. А. Склярова***, **Н. Н. Брюханова***,
Д. А. Носков*, **Л. М. Яновский****, **Ю. Н. Диденков*****

**Институт геохимии Сибирского отделения Российской академии наук
664033 Иркутск, ул. Фаворского, 1а*

**Иркутский государственный медицинский университет
664003 Иркутск, ул. Красного Восстания, 1*

****Иркутский государственный технический университет
664074 Иркутск, ул. Лермонтова, 83*

Поступила в редакцию 18.06.2009 г.

Современными методами анализа получены данные о содержании токсичных (ртуть, бериллий) и биогенных (селен, фтор) элементов в различных аквальных ландшафтно-геохимических системах Байкальской природной территории, включающей центральную, буферную зоны и зону атмосферного влияния. Установлено, что содержание селена и фтора, за редким исключением, значительно ниже их гигиенических норм для питьевых вод, и по этому признаку Байкальская природная территория относится к дефицитным биогеохимическим провинциям. Низкие содержания (вплоть до нанограмм) высокотоксичных элементов – ртути и бериллия в поверхностных и подземных водах аквальных ландшафтов свидетельствует о том, что рассмотренные экологические зоны вполне благоприятны для жизнедеятельности человека. Изучение микроэлементов в ландшафтно-геохимических системах открывает возможность проведения экологически безопасного и оптимального природопользования на рассматриваемой территории и позволяет прогнозировать изменение качества водных ресурсов при увеличении техногенных нагрузок.

Ключевые слова: геохимия, аквальная экосистема, токсичные и биогенные элементы, вода, почва, донные осадки, горные породы.

Изучение загрязнения поверхностных вод – часть общей проблемы охраны природы, а влияние качества воды на здоровье человека в условиях все возрастающего техногенного прессинга – актуальная задача современности. В этой связи важнейшее значение приобретают исследования распределения и миграции необходимых для жизни биогенных элементов, а также токсичных в аквальных ландшафтно-геохимических системах в различных компонентах окружающей среды: горных породах, поверхностных и подземных водах, донных отложениях (ДО) рек и озер, где на геохимических барьерах происходят процессы концентрирования и переход одних форм элементов в другие.

Изучение геохимических барьеров, оценка их параметров дает возможность осуществлять экологически безопасное оптимальное природопользование и прогнозировать состояние водных ресурсов

при увеличении антропогенной нагрузки. Микроэлементы в значительно большей степени фракционированы в процессе выветривания и транспортировки, чем макроэлементы. Это разделение дает ключ к пониманию природы и интенсивности выщелачивания, растворения и, в целом, процессов лито-, гидро- и биогеохимических циклов элементов в аквальных экосистемах.

Большой вклад в геохимическую экологию внесли А.П. Виноградов [3] и В.В. Ковальский [14], разработавшие учение о биогеохимических провинциях, в пределах которых недостаток или избыток отдельных химических макро- и особенно микроэлементов вызывает изменения флоры и фауны. К сожалению, этому вопросу в последние десятилетия уделяется мало внимания несмотря на то, что при биогеохимическом районировании территорий особую роль играет изучение концентрации элементов в природных водах, служащих источником питьевого водоснабжения.

Установлено, что состав природных вод определяет частоту и тяжесть ряда эндемических (неин-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 05-05-97302, 06-05-65054, 09-05-00884) и интеграционных проектов СО РАН (38 и 122).

фекционных) заболеваний (микроэлементозов). Например, избыток Si и высокая жесткость воды может вызывать уролитиаз, а недостаток I и Co — эндемический зоб и другие [9–11]. Не исключение в этом отношении и такие элементы, как Se, F, Hg и Be. Так, недостаток Se приводит к повышению риска сердечно-сосудистых, онкологических заболеваний, снижению противоинфекционной резистентности организма, а избыток — к нарушению функции гемоглобина и снижению тканевого дыхания в организме [16, 17]. Избыточное поступление фторидов с питьевой водой приводит к флюорозу, а дефицит фторидов в организме вызывает высокую пораженность зубов кариесом [30–32]. Избыточное поступление фторидов в организм с возрастом может приводить к значительной кальцификации твердых тканей и связочного аппарата, а также к другим нежелательным склеротическим изменениям. Избыток Hg в питьевой воде вызывает различные патологии, приводит к нервным расстройствам и нарушениям работы сердечно-сосудистой системы [15], а избыток Be в воде и пище наряду с другими патологическими изменениями в организме способен вызывать и онкологические заболевания. Примечательно, что Be в биологических процессах практически не участвует, не происходит его накопления в тканях живых организмов. Для большинства из них этот элемент токсичен, вызывает у животных специфическое заболевание (бериллиоз), а у растений — появление различных уродливых форм [9].

Рассмотрение современного состояния аквальных ландшафтно-геохимических систем, основанное на изучении микроэлементного состава различных компонентов окружающей среды, включая горные породы, почву, воду, ДО рек и озер, а также выделение на этой основе биогеохимических провинций, особенно актуально для Байкальской природной территории (БПТ), расположенной в южной части Восточной Сибири. После многолетних дискуссий 27 ноября 2006 г. Распоряжением № 1641-р Правительства Российской Федерации были утверждены границы БПТ. Она включает в себя три экологические зоны: центральную, буферную и зону атмосферного влияния [5] (рис. 1). Площадь БПТ — 386158 км². Границы центральной экологической зоны совпадают с границами территории Всемирного природного наследия “озеро Байкал”, существующей с 1996 г. В состав буферной зоны входит водосборная площадь оз. Байкал в пределах Российской Федерации. Прилегающая к оз. Байкал территория шириной до 200 км на запад и северо-запад от него, охватывающая бассейны верхнего течения рек Ангары, Лены и Киренги, отнесена к зоне атмосферного влияния.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Более десяти последних лет на различных участках Байкальской природной территории сотрудниками Института геохимии СО РАН проводился отбор образцов и анализ объектов окружающей среды. В конце июля 2007 г. в сжатый временной интервал (14 дней) по всему периметру оз. Байкал проведено комплексное опробование вблизи устьев рек: воды притоков (64 пробы), ДО и почв (по 52 пробы) и слагающих Ангаро-Витимский батолит гранитоидов (к востоку от оз. Байкал) (68 проб). В этот же период отобраны пробы воды оз. Байкал на трех станциях с разных глубин (9 проб) по разрезу Северобайкальск — бух. Фролиха (северная котловина озера) и образцы воды четырех термальных источников. Кроме этого, в работе систематизированы данные многолетних наблюдений за вариациями состава на опорных пунктах бассейна оз. Байкал (исток Ангары, реки Крестовая, Селенга, Баргузин, Снежная).

Все пробы воды на месте отбора были отфильтрованы (0.45 мкм) и законсервированы азотной кислотой для определения Se и Be, серной кислотой и перманганатом калия — для определения Hg.

Отбор проб ДО (илисто-глинистые или тонкопесчаные фракции) проводился на тех же станциях, что и отбор проб воды. Опробование обычно проводилось с поверхности на 3–5 станциях, ориентированных вкост водотока.

Отбор проб почв выполнялся методом конверта с охватом всех генетических горизонтов почв и почвообразующих пород.

Пробы ДО, почв и пород готовились к анализу методом кислотного разложения (навеска 0.1 г + 5 мл HF + 5 мл HNO₃ + 5 мл H₂ClO₄) [24]. Все пробы анализировались в Институте геохимии СО РАН.

Определение концентраций F выполнено фотометрическим методом с ализарин-комплексом [33] на спектрофотометре СФ-46, предел обнаружения (DL) — 0.05 мг/дм³; относительное стандартное отклонение (*s_r*) — 15% (аналитик М.И. Арсенюк).

Концентрации Se и Be определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе ELEMENT 2 (фирма Finnigan MAT, Германия). При расчетах содержаний элементов в пробах использован стандартный раствор CLMS-2 (фирма SPEX CertiPrep, США) (DL для Be — 0.003 мкг/дм³, *s_r* = 28%). Предел обнаружения Se значительно изменялся в различных съемках. В зависимости от настройки прибора вариации DL составляли 0.03, 0.23 и 0.26 мкг/дм³, *s_r* ≤ 40% (аналитики В.И. Ложкин, Н.Н. Пахомова, Е.В. Смирнова, О.А. Склярова). Правильность и воспроизводимость анализов контролировались с помощью стандартных растворов для водных образцов — IQC-026 (фирма ULTRA SCIENTIFIC, США), пород —

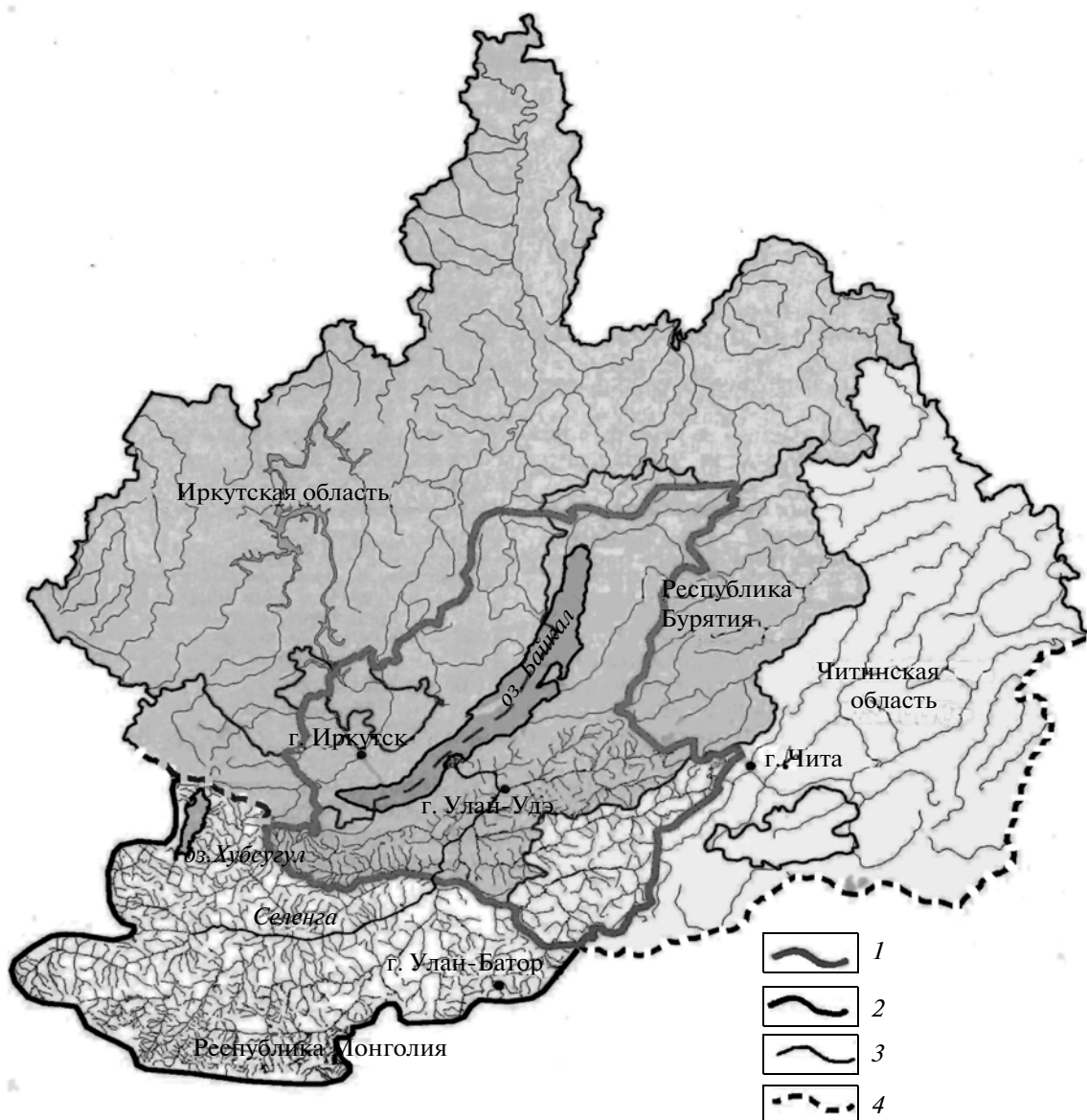


Рис. 1. Карта-схема Байкальской природной территории и ее окружения [5]. Границы: 1 – Байкальской природной территории, 2 – бассейн р. Селенги на территории Республики Монголия, 3 – субъектов Российской Федерации, 4 – государственная.

GSR-1, ДО – GSD, для почв (стандарты с различным содержанием органического вещества) – GSS.

Hg определялась атомно-абсорбционным методом на приборе РА-915+ с приставкой РП-91 при компьютерной регистрации. Снижение предела обнаружения до 0.0005 мкг/дм³ достигалось концентрированием: пары восстановленной Hg из водного образца улавливались поглотительным раствором ($s_r = 39\%$) (аналитики Л.Д. Андрулайтис и О.С. Рязанцева).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Центральная экологическая зона

Центральная экологическая зона включает оз. Байкал, береговую зону и особо охраняемые территории. Байкал – хранилище чистой пресной воды, объем которой составляет 23.6 тыс. км³, или ~20% общемировых запасов пресных поверхностных вод. Уникальная экосистема оз. Байкал обеспечивает постоянное воспроизводство ультрапресной воды с минерализацией до 0.1 г/дм³ в объеме много-

летнего ежегодного речного стока р. Ангары (58.5 км³). Традиционно считается, что оз. Байкал и прилегающая к нему территория — экологически благополучны. Вместе с тем, анализ экологической ситуации прибрежной акватории озера свидетельствует о том, что по отдельным параметрам она не соответствует санитарно-гигиеническим и рыбохозяйственным нормам, принятым в России, что при возрастающем антропогенном прессинге через некоторое время может привести к разрушению прибрежных экосистем. Впоследствии такая ситуация не может не отразиться и на глубоководной части Байкала. В связи с этим изучение микрокомпонентного состава воды пелагиали озера имеет актуальное значение. Следует акцентировать внимание на том, что объем прибрежных вод, ограниченный 50-м изобатой (фотический слой), равен 1400 м³, что составляет лишь 6% объема воды Байкала. Прибрежная акватория Байкала выступает как первый и самый мощный участок самоочищения при поступлении в водоем хозяйственно-бытовых сточных вод и играет решающую роль в транспортировке и дифференциации природного терригенного материала, растворенных веществ и химических элементов, приносимых реками. Эта часть акватории оз. Байкал — геохимический седиментационный барьер [4]. Именно здесь, на геохимическом барьере, идет наиболее интенсивное накопление химических элементов в растворенной и минеральной формах. В области расположения геохимического барьера находятся объекты водопотребления (водозаборы, пляжи и т.д.). Пляжи нельзя вынести в пелагическую (глубинную) часть водоема, а строительство и эксплуатация водозаборов в пелагической части Байкала экономически не выгодны и не по силам для бюджетов местных населенных пунктов. Следовательно, водные ресурсы водоема, которые доступны для потребителей воды, определяются объемом прибрежных вод до глубины 50 м. Таким образом, доступные водные ресурсы Байкала составляют всего лишь 6% объема его водной массы. Прибрежная область оз. Байкал как геохимический барьер сильно ослабляет влияние антропогенного фактора на пелагические (глубинные) воды озера. Решение проблемы влияния антропогенного фактора на доступность водных ресурсов, на качество воды в экосистеме Байкала должно быть связано с изучением процессов на геохимических барьерах в системе река — озеро. В этой связи целесообразно рассмотреть полученные в последние годы данные о концентрации в водной толще Байкала биогенных (Se, F) и токсичных (Hg, Be) микроэлементов как в прибрежной зоне, так и в пелагиали озера.

Первые многоэлементные анализы воды оз. Байкал, включая Se, были получены нейтронно-активационным методом [2]. Среднее значение растворимых форм Se в воде южного Байкала оказалось равным 0.06 мкг/дм³ при изменении концентраций от

0.04 до 0.16 мкг/дм³, в основном притоке озера (р. Селенга) — 0.2–0.8 мкг/дм³, тогда как в речных водах мира среднее содержание Se составляет 0.04–1.6 [7]. Оптимальным содержанием Se в питьевой воде гигиенистами принято считать 2.5–3.3 мкг/дм³ [22] при предельно допустимой концентрации (ПДК) 10 мкг/дм³.

ПДК фторид-иона в воде составляет 1.50 мг/дм³ [25], в то время как в воде оз. Байкал его концентрации изменяются от 0.18 до 0.21 (среднее 0.19) мг/дм³ (таблица).

Содержание Hg в воде оз. Байкал — 0.00014–0.00077 мкг/дм³ [34]. Согласно гигиеническим требованиям к качеству питьевой воды централизованных систем питьевого водоснабжения, действующих с 1 января 2002 г., ПДК суммарного содержания Hg в питьевой воде России принято 0.5 мкг/дм³, а для водоемов рыбохозяйственного назначения — 0.01 мкг/дм³, при этом ее поступление за счет промышленных сбросов в такие водоемы как р. Ангара, оз. Байкал и другие недопустимо. В девяти пробах воды, отобранных в акватории оз. Байкал, содержание Hg не превысило 0.0006 мкг/дм³ (таблица).

Содержание Be в речных водах, по оценке разных авторов, колеблется от 0.01 до 0.3 мкг/дм³ [10]. Допустимое содержание Be в водопроводной воде США составляет 0.03–0.06 мкг/дм³ [1], в России ПДК на содержание Be — 0.2 мкг/дм³. По данным авторов статьи в воде оз. Байкал его максимальные концентрации не превышают 0.003 мкг/дм³ (таблица) и только для воды двух притоков (реки Слюдинка и Рель) в северо-западной оконечности оз. Байкал отмечаются повышенные концентрации Be (0.159 и 0.225 мкг/дм³).

Береговая зона Байкала

Природные ландшафты побережья озера живописны, богаты термальными минеральными источниками, имеют особую эстетическую и рекреационную ценность. Здесь находятся заповедники, национальные парки и заказники. Содержание рассматриваемых элементов в воде термальных источников значительно выше, чем в воде оз. Байкал. Так, в термальной воде Котельниковского источника содержания F и Se достигают соответственно 20 и 2.61 (источник Змеиный), Hg — 0.001, а Be — 0.48 мкг/дм³ (скважина у д. Сухой — водолечебница “Байкальская волна”), в источнике п-ова Святой Нос содержания Se, F и Be составляют соответственно 2.09, 0.22, <0.001 мкг/дм³.

Буферная зона

Буферная зона включает водосборную площадь БПТ. Содержание исследуемых элементов в речных водах бассейна Байкала обусловлено как физико-

Содержание Se, F, Hg и Be, мкг/дм³, в воде оз. Байкал, его притоков и истока р. Ангары (прочерк – отсутствие данных; концентрации: 1 – средняя, 2 – минимальная, 3 – максимальная; s^* – стандартное отклонение)

Место отбора		Число проб	Концентрации	Se	F	Hg	Be
Оз. Байкал	Южно-Байкальская впадина	4	1	<0.26	0.19	–	<0.003
			2		0.18		
			3		0.20		
			s^*		0.01		
Северо-Байкальская впадина	11	1	<0.23	0.20	<0.0005	<0.003	
		2		0.18	<0.0005		
		3		0.21	0.0005		
		s^*		0.01	–		
Крупные притоки оз. Байкал	Селенга	28	1	0.10	0.27	0.0021	0.006
			2	0.09	0.21	0.0005	<0.003
			3	0.25	0.49	0.0038	0.015
			s^*	0.12	0.05	0.0015	0.004
Баргузин	9	1	0.15	0.34	0.0016	0.014	
		2	0.07	0.27	0.0012	0.003	
		3	0.27	0.39	0.0027	0.040	
		s^*	0.07	0.03	0.0008	0.016	
Голоустная	5	1	0.11	0.14	0.0005	<0.003	
		2	0.07	0.12	<0.0005		
		3	0.17	0.17	0.0008		
		s^*	0.04	0.02	0.0001		
Верхняя Ангара	1	–	0.15	0.19	0.0010	0.003	
	1	–	<0.03	0.17	0.0005	<0.003	
Притоки оз. Байкал по петрографическим провинциям	Хребты	23	1	0.14	0.13	0.0029	0.007
			2	<0.03	0.05	0.0005	<0.003
			3	0.48	0.27	0.0340	0.020
			s^*	0.13	0.05	0.0071	0.006
Приморский	7	1	0.08	0.28	0.0035	0.012	
		2	<0.03	0.13	0.0006	<0.003	
		3	0.15	0.51	0.0126	0.033	
		s^*	0.06	0.15	0.0051	0.011	
Байкальский	7	1	0.17	0.29	0.0009	0.073	
		2	0.06	0.10	0.0005	0.003	
		3	0.54	0.51	0.0014	0.225	
		s^*	0.18	0.18	0.0003	0.089	
Хамар-Дабан	14	1	0.06	0.09	0.0019	0.005	
		2	<0.03	0.05	<0.0005	<0.003	
		3	0.17	0.14	0.0023	0.024	
		s^*	0.06	0.03	0.0029	0.007	
Олхинское плато	8	1	0.11	0.14	0.0011	0.009	
		2	0.07	0.12	0.0005	0.006	
		3	0.17	0.20	0.0015	0.015	
		s^*	0.05	0.03	0.0003	0.004	
Исток р. Ангары	23	1	0.04	0.20	0.0009	<0.003	
		2	<0.03	0.18	0.0005		
		3	0.09	0.22	0.0020		
		s^*	0.06	0.02	0.0004		

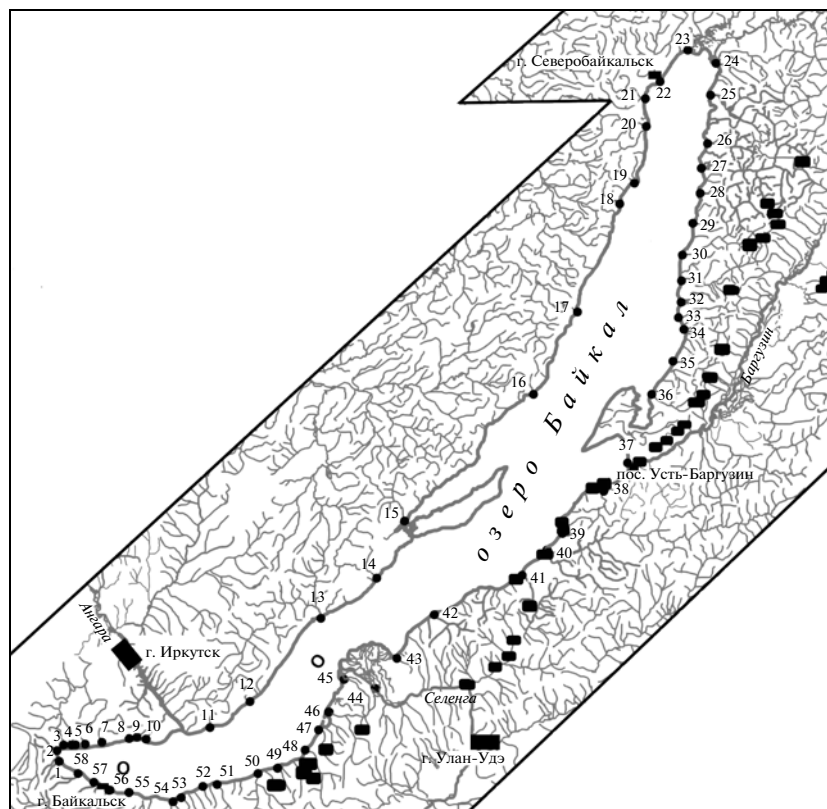


Рис. 2. Карта-схема расположения станций отбора проб воды, ДО рек (кружки) и коренных пород (квадраты) бассейна вблизи оз. Байкал. Реки: 1 – Слюдянка, 2 – Култучная, 3 – Крутая губа, 4 – Ангасолка, 5 – Шабартуй, 6 – Маритуй, 7 – Половина, 8 – Ивановка, 9 – Шумиха, 10 – Баранчики, 11 – Котинка, 12 – Голоустная, 13 – Бугульдейка, 14 – Анга, 15 – Сарма, 16 – Рита, 17 – Заворотная, 18 – Молокон, 19 – Куркула, 20 – Рель, 21 – Слюдинка, 22 – Тья, 23 – Кичера, 24 – В. Ангара, 25 – Фролиха, 26 – Ширильда, 27 – Томпуда, 28 – Шегнанда, 29 – Урбикан, 30 – Кабанья, 31 – Большая, 32 – Давша, 33 – Таркулик, 34 – Сосновка, 35 – Б. Черемшанка, 36 – Б. Чивыркуй, 37 – Баргузин, 38 – Максимиха, 39 – Налимовка, 40 – Турка, 41 – Кика, 42 – Б. Сухая, 43 – Сырая Молька, 44 – Селенга, 45 – Шумиха, 46 – Б. Речка, 47 – Б. Култучная, 48 – Мантуриха, 49 – Б. Ивановка, 50 – Мишиха, 51 – Переемная, 52 – Аносовка, 53 – Выдренная, 54 – Снежная, 55 – Хара-Мурин, 56 – Солзон, 57 – Утулик, 58 – Безымянная.

химическими факторами, так и низким их содержанием в породах, дренируемых речными системами. Реки, впадающие в озеро, переносят растворенное и твердое вещество с площади водосборного бассейна, в котором ранее были выделены Приморская, Байкальская, Хамар-Дабанская и Баргузинская питающие петрографические провинции [17]. Они сложены древними вулкано-плутоническими породами субщелочного и известково-щелочного состава, гранитоидами Ангаро-Витимского батолита, занимающими >70% площади водосборного бассейна, глубоко метаморфизованными породами докембрийского фундамента и кайнозойскими осадочными образованиями во впадинах байкальского типа Байкальской рифтовой зоны.

Геохимические особенности коренных пород отражаются в гидро- и литогеохимических потоках рассеяния, где микроэлементы находятся в растворе и минеральных фазах, а также мигрируют в сорбированном состоянии на органических взвешах и

глинистых минералах (сметиты, иллиты и смешаннослойные фазы).

Одной из задач было определение концентрации исследуемых элементов в потоках рассеяния палеозойских гранитоидов Ангаро-Витимского батолита. С этой целью в замыкающих створах бассейнов дренирующих его рек и по всему периметру оз. Байкал были отобраны пробы воды (таблица), ДО и слагающих батолит гранитоидов (рис. 2).

Низкие концентрации Se, F и Be характерны для гранитогнейсов и гранитов, повышенные – для долеритов и габброидов (рис. 3). Содержания Se, F и Be в породах Ангаро-Витимского батолита составляют соответственно 0.03–0.18 (среднее 0.065), 5–6000 (969) и 0.7–2.3 (1.53) г/т при кларковом содержании этих элементов 2.9, 700 и 0.072 г/т соответственно [6]. Для коренных пород региона характерно фоновое содержание Hg (0.004 г/т) и ниже.

В воде 64 исследованных в 2007 г. притоков оз. Байкал (рис. 2) содержание Se не превышает 0.20 мкг/дм³. Исключение составляют р. Риты (за-

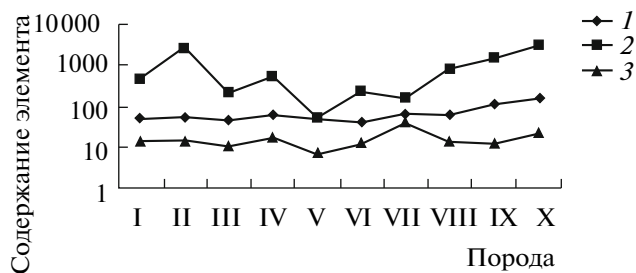


Рис. 3. Средние концентрации Se, мг/т, 1 F, г/т, 2 и Be, × 10³ г/т, 3 в различных типах пород Ангаро-Витимского батолита. I — граниты (14 проб), II — гнейсы (4), III — гранитогнейсы (5), IV — щелочные граниты (3), V — лейкогранит (1), VI — граносиенит (1), VII — аплит (1), VIII — монзониты (4), IX — долериты (3), X — габбро (4).

падное побережье) — 0.54 мкг/дм³, а также реки Шегнанда и Томпуда (восточное побережье) — 0.25 и 0.48 мкг/дм³ соответственно (таблица).

Содержание F в воде большинства рек не превышают 0.3 мг/дм³. На территории буферной зоны в речных водах выявлены площадные аномалии F, приуроченные к бассейну р. Баргузин, две из которых сопутствуют оруденению Турокчанской ураново-рудной площади, а третья, находящаяся в верховье р. Баргузин, может быть связана с рудопроявлениями полиметаллов и флюорита. В районе северной части оз. Байкал на известном Барвинском месторождении полиметаллов в рудах присутствует флюорит, который фиксируется аномалией F в воде. Ряд аномалий F выявлен в бассейнах рек Селенги и Джиды, которые приурочены к известному Тоширскому флюоритовому рудному району. Следует отметить, что повышенное содержание F в водах потоков рассеяния флюоритового оруденения достаточно широко распространено на территории западного Забайкалья [8]. Кроме природных аномалий, на территории этой экологической зоны есть аномалии F, обусловленные техногенным загрязнением. Так, аномалия F на уровне ПДК и выше в районе г. Закаменска (р. Модонкуль — правый приток р. Джиды) обусловлена промышленными стоками Джидинского горно-обогатительного комбината, при этом водный поток повышенных концентраций F прослеживается до р. Джиды и даже на несколько километров ниже по течению.

Содержание Hg в исследованных притоках оз. Байкал колеблется от <0.0005 до 0.009 мкг/дм³. Исключение — максимальные концентрации, установленные в воде рек Таркулик (0.034 мкг/дм³) и Большой Котинки (0.013 мкг/дм³) (таблица). Следует отметить, что впервые данные о содержании Hg в подземных водах экологической зоны были получены в конце 1960-х—начале 1970-х гг. [16]. Результаты этих исследований свидетельствуют об определенных закономерностях распределения Hg

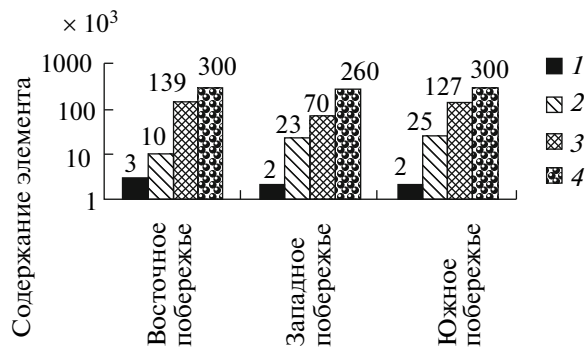


Рис. 4. Средние концентрации Se, мкг/дм³, 1; F, мг/дм³, 2; Be, мкг/дм³, 3 и Hg, мкг/дм³, 4 в воде притоков оз. Байкал.

в различных типах природных вод и в целом о достаточно широком ее распространении, особенно в современных гидротермах Байкальской рифтовой зоны. Из 53 проб воды, проанализированных атомно-абсорбционным методом, Hg была обнаружена в 42 пробах при средней ее концентрации 0.4–1.5 мкг/дм³. Обращает на себя внимание почти повсеместная приуроченность повышенных концентраций Hg в подземных водах к зонам тектонических нарушений и к областям молодой вулканической деятельности [12], что подтверждает гипотезу “ртутного дыхания” глубинных разломов земной коры. Локализация ртутной минерализации в зонах молодых разломов свидетельствует о кайнозойском возрасте ртутных руд, а также о поступлении по глубинным сейсмогенерирующим разломам паров ртути из подкорковых источников. Не случайно к сейсмогенерирующим разломам Байкальской рифтовой зоны приурочены многочисленные выходы современных азотных, метановых и углекислых гидротерм с повышенным содержанием Hg (Баргузинская, Тункинская и другие кайнозойские впадины байкальского типа).

Средние концентрации Se, F, Hg и Be в воде притоков оз. Байкал приведены на рис. 4. Максимальное содержание Se характерно для вод притоков восточного (Баргузинская петрографическая провинция), а F и Be — западного (Приморская) побережий оз. Байкал.

В результате проведенных исследований получены первые сведения о содержании Se, свидетельствующие, за редким исключением, о его низких концентрациях, не превышающих 1 г/т как в породах, так и в литохимических потоках рассеяния (рис. 5). Близкое к кларку содержание Se (0.36 г/т) характерно для ДО Байкальской впадины. Так, в поверхностном слое ДО, представленных пелитовыми илами, содержание Se не превышает 0.8 г/т, а в стандартном образце глубоководного ила оз. Байкал (БИЛ-1) — 0.97 г/т.

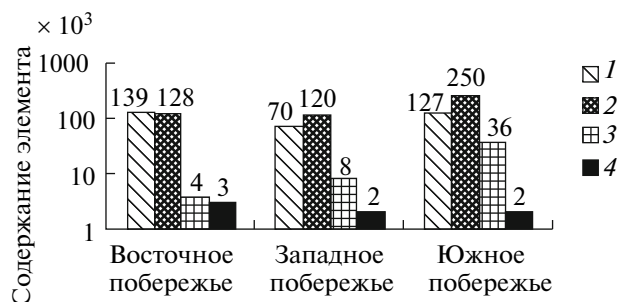


Рис. 5. Средние концентрации Hg, мкг/дм³, 1 в воде и Hg, г/т, 2 в ДО; Se, мкг/дм³, 3 в воде и Se, г/т, 4 в ДО притоков оз. Байкал.

Количества Se в ДО и в дренируемых породах сопоставимы между собой, но иногда за счет сорбционных процессов количество Se несколько больше в ДО рек, чем в дренируемых породах. Повышенное содержание Se в ДО рек бассейна оз. Байкал обнаружено в притоках восточного побережья – р. Давше (1.31), южного побережья – р. Большой Култунской (0.98), западного – р. Сарме (0.81 г/т).

Hg в ДО притоков распространена относительно равномерно, в большинстве случаев ее содержание не превышает 0.05 г/т. Максимальное содержание Hg характерно для ДО р. Большой Котинки – 0.107 г/т. В реках Баранчики, Ивановке, Маритуй (юго-западное побережье) и Давше (восточное побережье) содержание Hg изменяется от 0.066 до 0.086 г/т (при кларке для глин и сланцев – 0.089 г/т [6]). Средние содержания Hg и Se в воде и ДО притоков оз. Байкал показаны на рис. 5.

Зона атмосферного влияния

Прилегающая к озеру территория Прибайкалья шириной до 200 км на запад и северо-запад от него охватывает юг Сибирской платформы (бассейны верхнего течения рек Ангары, Лены и Киренги). По своему геологическому строению она резко отличается от центральной и буферной зон, сложенных преимущественно изверженными и метаморфическими породами. Здесь широко развиты терригенные и карбонатные породы фанерозоя и угленосные отложения юрского возраста Иркутского угленосного бассейна. На рассматриваемой территории в различных компонентах окружающей среды менее всего изучено распределение Se и Be. Вместе с тем, по имеющимся данным [18, 19] часть территории, входящая в состав Иркутской обл., относится к селенодефицитной провинции. Подтверждение сказанному – исследования авторов статьи по изучению содержания Se в почвах, отобранных в районе истока р. Ангары близ пос. Листвянка, где преобладают горно-таежные, дерновые лесные и дерново-подзолистые почвы.

Среднее содержание Se, по данным 55 проб, отобранных в различных типах почв (горизонт А), меняется от 71 до 43.6 (при кларке 300) мг/т. Содержание Se в почвах обусловлено, главным образом, его содержанием в почвообразующих породах и климатическими особенностями региона. В районах с гумидным и семигумидным климатом соединения Se выщелачиваются из почв. Исследованные почвы имеют слабо развитый гумусовый горизонт, где концентрация Se в горизонте А незначительна. Кроме того, эти почвы относятся к кислым и обладают низкой накопительной способностью. Se в почвах связан, главным образом, с гуминовыми кислотами. Накопление Se и повышенная его концентрация отмечаются в нижней части горизонта В, особенно в его карбонатной фракции, так как наибольшее содержание Se совпадает с максимальным содержанием CaCO₃. Кроме того, концентрация Se в значительной степени зависит от содержания и состава глинистых минералов. В почвах Se присутствует в виде элементарного Se, селенидов, селенатов, селенитов и органических соединений [23].

Полученные данные о содержании Se в почвах и поверхностных водах вкупе с данными о его содержании в продуктах питания местного производства, в сыворотке крови человека (54–101 мкг/л при норме 81–115 мкг/л) [26] позволили отнести Прибайкалье к селенодефицитным биогеохимическим провинциям России [18, 19].

На территории этой экологической зоны наиболее изучено распределение фторидов в природных водах [20, 30, 32]. На основании этих данных она отнесена к биогеохимической провинции с недостатком F, в которой выделены ареолы эндемического флюороза и совмещенной с ним патологией твердых тканей зубов некариозного характера. Совместно с Л.М. Яновским (Иркутский государственный медицинский университет) создана карта фтороносности природных ландшафтов Прибайкалья, составленная на основе данных о содержании фторид-иона в водах 687 водоисточников различных видов в лесостепном и таежном геохимических ландшафтах (рис. 6) [30–32]. Наиболее высокие концентрации фторид-иона обнаружены в открытых водоемах лесостепи: оз. Ордынском (3.0, в конце ледостава – 3.53 мг/дм³), реках бассейна верхней Лены – р. Кудонец (1.63) и ее притоке р. Унгуре (1.54), а также р. Куда (1.2, в конце ледостава – 1.45 мг/дм³). Из таежных ландшафтов лишь в карбонатном обнаружены воды с относительно высоким содержанием фторид-иона – в реках Киренге (от 0.55 до 0.85 мг/дм³), Балдахине (0.78), Ключи (0.81), Тырке (1.02 мг/дм³). Для открытых водоемов других классов таежных ландшафтов характерны очень низкие содержания фторид-иона, за исключением р. Непы (приток Нижней Тунгуски), где оно изменяется от 0.6 до 1.2 мг/дм³. Это явление объясняется наличием бассейна калийных солей, в пре-

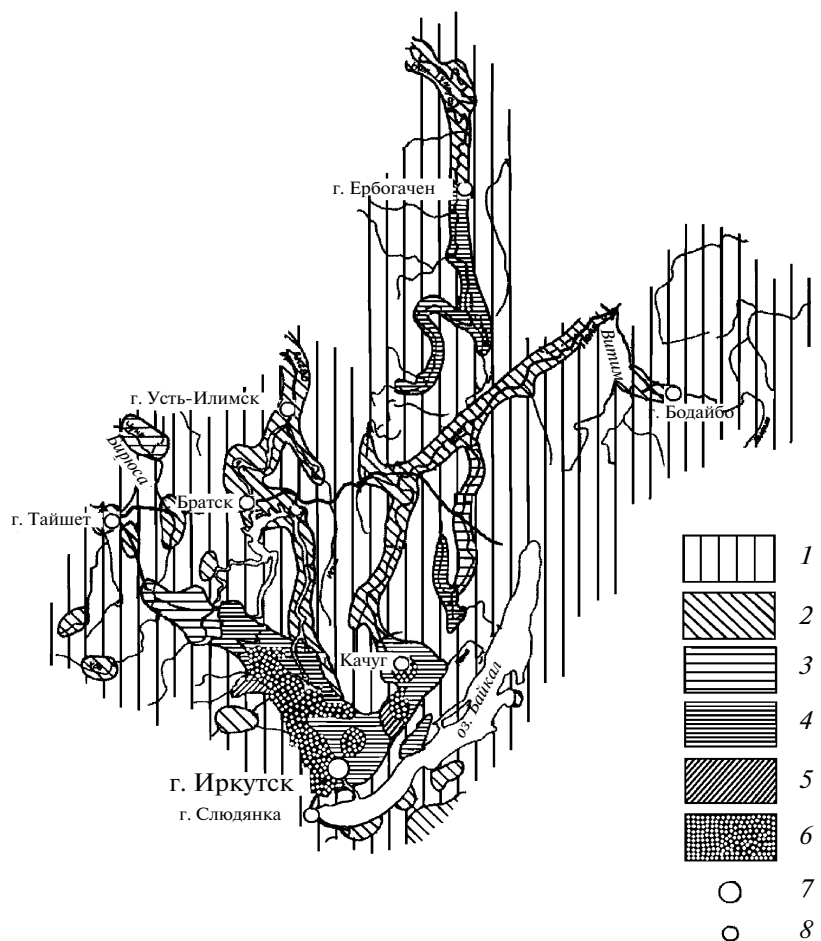


Рис. 6. Фториды в природных водах Прибайкалья [31]. Концентрации фторидов в водах: 1 – до 0.20, 2 – 0.21–0.49, 3 – 0.50–0.75, 4 – 0.76–1.50, 5 – 1.51–2.50, 6 – 2.51–4.50 мг/дм³; 7, 8 – центры области и района соответственно.

делах которого находятся источники, питающие р. Непу.

Подземные воды таежных ландшафтов характеризуются очень низкой концентрацией фторид-иона, исключение составляет минеральный источник – ключ в пос. Верхоленье (карбонатный ландшафт) – 2.65 мг/дм³. В лесостепном ландшафте наиболее высокие концентрации фторидов среди шахтных колодцев обнаружены в с. Семеновск Заларинского р-на (2.73 и 2.80 мг/дм³), в дер. Ординской (от 2.60 до 4.90), в пос. Усть-Орде (до 2.90 мг/дм³); среди скважин – в селах Мейеровка и Большой Карлук Заларинского р-на (2.58 и 2.77 мг/дм³), в поселках Залари и Тыреть (3.10 и 3.16), с. Куданцы (4.6 мг/дм³); среди ключей и родников – в с. Мейеровка (2.49 и 2.61) и в сероводородном источнике с. Семеновск (3.4 мг/дм³). Из всего ряда исследованных водоисточников была сделана выборка тех источников, непосредственно в районах которых проводилось обследование пользующегося ими населения.

При анализе данных о содержании фторидов в 205 источниках питьевого водоснабжения, расположенных в населенных пунктах лесостепного ландшафта, средняя их концентрация составила 1.06 ± 0.07 мг/дм³. Аналогичный анализ 196 питьевых водоисточников таежных ландшафтов показал среднюю концентрацию фторид-иона 0.30 ± 0.01 мг/дм³. Необходимо отметить неоднородность концентраций фторидов в каждом из ландшафтов. Так, в поселках, расположенных в карбонатном таежном ландшафте, среднее содержание фторидов в водоисточниках составляет 0.45 ± 0.04 мг/дм³, а в поселках кислых и кислых глеевых ландшафтов – 0.27 ± 0.02 мг/дм³. В лесостепном ландшафте по содержанию фторидов были выделены три провинции: Унгино-Заларинская (1.33 ± 0.1), Манзурско-Бирюльская (1.15 ± 0.12) и Аларско-Каменская (0.55 ± 0.04 мг/дм³). Названия провинций – это производное от названий рек.

Приведенные данные отражают природную обстановку, на которую практически не оказывают

влияния техногенные процессы, связанные с поступлением F. При исследовании содержания F в снежном покрове были выявлены площади распространения и установлены пути поступления F в техногенные потоки рассеяния, так как фильтрат талого снега отражает степень загрязнения воздушного бассейна наиболее растворимыми формами микроэлементов, в том числе F. Рассматриваемая экологическая зона атмосферного влияния наиболее подтверждена, по сравнению с другими зонами, техногенному прессингу, так как здесь расположены предприятия химической (“Усольехимпром”, “Саянскхимпласт”), алюминиевой (“Ирказ” в г. Шелехов), нефтеперерабатывающей (г. Ангарск) промышленности и сконцентрированы наиболее крупные городские агломерации.

F в фильтрате талого снега определялся в пробах, отобранных как в черте промышленных центров, так и на удалении от них по направлению основных автомагистралей. Особое внимание было уделено г. Шелехову, где действует алюминиевый завод. При этом за фоновое содержание было принято содержание F в снежной воде в южной части побережья оз. Байкал, где в поселках Култук и Листвянка оно составляет 0.3 и 0.37 мг/дм³ соответственно. Оказалось, что в атмосферном воздухе г. Иркутска содержание F выше фона в 4 раза, а в районе г. Шелехова – в 29 раз. Шлейф загрязнения F снежного покрова от Шелеховского алюминиевого завода прослеживается через пос. Большой Луг (превышение фона в 4.6 раза) до пос. Курма (превышение фона в 3.3 раза) на расстоянии 50 км в сторону оз. Байкал по направлению преобладающих северо-западных ветров.

Hg в окружающей среде рассматриваемой экологической зоны изучалась на основе эколого-геохимической съемки Байкальского геоэкологического полигона. Среднее содержание ртути в коренных породах составляет $1.1 \times 10^{-6}\%$, в пойменных почвах горизонта А – 2.89×10^{-6} , в склоновых почвах горизонта А – 2.17×10^{-6} , в склоновых почвах горизонта В – 1.69×10^{-6} , в ДО рек – $2.14 \times 10^{-6}\%$, в поверхностных водах – 0.07 мкг/дм³ [13]. Проведенные исследования показали, что среднее содержание Hg в компонентах окружающей среды этой экологической зоны не превышает соответствующих средних концентраций по мировым данным. Повышенное содержание Hg отмечается преимущественно в широкой полосе по левобережью верхнего течения р. Ангары от оз. Байкал до зоны подпора Братского водохранилища, т.е. до г. Усолье-Сибирское, где преимущественно распространены карбонатно-галогенно-гипсоносные и алевро-песчаниковые отложения фанерозоя и терригенные породы Иркутского угленосного бассейна. Повышенное содержание Hg в этой области связано с угленосными породами, а также отражает зону глубинного разлома, к которому приурочена долина р. Ангары [15].

Другие источники поступления Hg в водные системы этой экологической зоны – расположенные на ее территории промышленные предприятия “Усольехимпром” и “Саянскхимпласт”, использовавшие ранее технологию электролиза на ртутном катоде и сбрасывавшие промышленные стоки в Братское водохранилище. Несмотря на большой техногенный пресс за счет промышленных стоков, содержание Hg в воде водохранилища в настоящее время < ПДК для питьевой воды, так как ртуть локализуется, в основном, на геохимических барьерах, которые приурочены к зоне выклинивания подпора Братского водохранилища в районе г. Усолье-Сибирское. Это обстоятельство в определенной степени предохраняет водохранилище от загрязнения Hg. Однако при аварийных сбросах седиментационный барьер “не справляется”, и Hg распространяется на значительной части акватории.

Кроме перечисленных причин, на поверхностные и подземные воды этой экологической зоны оказывает влияние агрохимический фактор, в частности, широко применявшийся в сельском хозяйстве препарат “Гранозон”. Вне хозяйственно освоенной территории большинство опробованных водных объектов не содержат Hg, т.е. ее концентрация ниже предела обнаружения (0.0005 мкг/дм³). Подтверждением изложенному могут служить данные по содержанию Hg в грунтовых водах региона [29]. В частности, показано, что в подземном стоке на территории Приангарья и Прибайкалья содержание Hg на ненарушенных водосборах ничтожно и, как правило, в различных по возрасту породах естественный фон Hg в грунтовых водах равен аналитическому нулю, а в случае, если водосбор частично или полностью аграрно освоен, то Hg обязательно фиксируется. Таким образом, в своей массе Hg в подземных водах имеет агрогенное происхождение [29]. Об этом свидетельствует и крайняя неустойчивость загрязнения по Hg по сезонам года. Если бы Hg продуцировалась водовмещающими породами, то структура естественного фона отличалась бы относительной пространственно-временной стабильностью. По токсикологическим критериям экологической опасности территорию зоны атмосферного влияния, где содержание ртути в природных водах не превышает ПДК, а роль коренных пород в загрязнении их Hg незначительна, можно рассматривать экологически благоприятной.

Содержание Be в различных компонентах окружающей среды Байкальского региона близко к кларку и составляет: в коренных породах 3.0, в ДО 3.95, в почвах 3.42–3.86 мг/кг, а в поверхностных водах 0.03 мкг/дм³, что соответствует среднему содержанию Be в поверхностных водах мира [9]. При этом из 472 проб поверхностных вод, отобранных на территории байкальского региона, охватывающего южную часть территории зоны атмосферного влияния, 91.8% проб содержат Be меньше предела

обнаружения. Основным природным источником Ве в поверхностных водах — породообразующие силикатные минералы. При выветривании, например, полевых шпатов, большая часть Ве прочно связывается с глинистыми минералами [21]. Эта часть Ве не участвует в водной миграции, а аккумулируется в ДО рек и осадочных породах, которые слагают южную часть Сибирской платформы.

Низкая концентрация Ве в природных водах обусловлена его сорбцией глинистыми минералами, гидроксидами Fe, а также органическим веществом. При этом органическое вещество обуславливает подвижность Ве в виде Ве-органических комплексов. Работами последних лет установлено, что Ве — достаточно подвижный водный мигрант, образующий в водах вторичные ореолы рассеяния вокруг бериллиевых месторождений, с концентрацией до десятков мкг/дм³ [26].

Данные о содержании Ве в речных водах ограничены и противоречивы. Как уже отмечалось, среднее содержание Ве в речных водах мира составляет 0.03 мкг/дм³ [9]. Значительно больше данных о содержании Ве в водах зоны гипергенеза. Более детально распределение Ве в водах различных типов ландшафтов рассмотрено в [28]. При среднем содержании Ве в водах зоны гипергенеза — 0.19 мкг/дм³ в ландшафтах умеренного климата, к которым относится рассматриваемая экологическая зона, эта величина составляет 0.24, в ландшафтах многолетней мерзлоты — 0.05, в ландшафтах горных областей — 0.19 мкг/дм³. При этом морская вода содержит Ве всего 0.0006 мкг/дм³.

Приводимые показатели наиболее полно воссоздают общую картину распространения Ве, представляют количественную характеристику содержания Ве в природных пресных водах и, соответственно, дают основание для оценки экологической безопасности в поверхностных водах зоны атмосферного влияния БПТ. В целом благоприятная экологическая ситуация в регионе осложняется лишь в двух районах, где содержание элемента в речных водах находится в пределах 0.2–1.1 мкг/дм³, т.е. >ПДК водоемов санитарно-хозяйственного назначения, что связано с техногенным загрязнением природных вод. Наибольшее количество Ве (0.1–1 мкг/дм³) в поверхностных водах региона выявлено в районе г. Шелехова, что обусловлено его поступлением с привозным сырьем для Иркутского алюминиевого завода. Подтверждение сказанному, в частности, — установленное локальное загрязнение грунтовых вод Ве (3.96 мкг/дм³) в районе складирования отходов этого производства [27]. Меньшее содержание Ве в речных водах (0.8 мкг/дм³) выявлено в районе г. Усолье-Сибирское, где сосредоточены предприятия химической промышленности, что связано с его техногенным происхождением, хотя источники поступления пока не установлены.

ВЫВОДЫ

В результате выполненных исследований установлено, что содержание Se и F в природных пресных водах Байкальской природной территории, за редким исключением (термальные источники — высокие содержания Se и F, техногенные зоны — повышенный F), значительно ниже их гигиенических норм для питьевых вод. Таким образом, по содержанию этих биологически активных элементов территория может быть отнесена к дефицитным биогеохимическим провинциям.

Выявленное в пределах Байкальской природной территории низкое содержание таких высокотоксичных элементов как Hg и Ве в питьевых водах аквальных ландшафтов свидетельствуют о том, что рассмотренные экологические зоны благоприятны для проживания и жизнедеятельности человека. Дальнейшее проведение исследований позволит провести районирование Байкальской природной территории по условиям миграции химических элементов как базовой основы экологического мониторинга, а также рассчитать баланс химических элементов, в том числе — техногенного генезиса. В конечном итоге это даст возможность проводить экологически безопасное оптимальное природопользование в бассейнах оз. Байкал и верхнего течения р. Ангары, прогнозировать состояние водных ресурсов при увеличении техногенных нагрузок.

Авторы благодарят аналитиков Института геохимии СО РАН за участие в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беус А.А.* Геохимия бериллия и генетические типы бериллиевых месторождений. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 328 с.
2. *Ветров В.А., Белова Н.И., Пословин А.Н. и др.* Мониторинг уровней тяжелых металлов и микроэлементов в природных средах Байкала. Предварительные результаты и проблемы // Проблемы регионального мониторинга состояния озера Байкал. Л.: Гидрометеиздат, 1983. С. 66–77.
3. *Виноградов А.П.* Биогеохимические провинции и их роль в органической эволюции // Геохимия. 1963. № 3. С. 199–214.
4. *Галкин Л.М., Ломоносов И.С., Гапон А.Е.* О сепарации терригенного материала твердого стока рек Южного Байкала при его седиментации // Вестн. ГеоИГУ. 2000. № 2. С. 241–251.
5. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2003 году. Иркутск: Облмашинформ, 2004. 296 с.
6. *Григорьев Н.А.* О кларковом содержании химических элементов в верхней части континентальной коры // Литосфера. 2002. № 1. С. 61–71.
7. *Ермаков В.В.* Биогеохимия селена и его значение в профилактике эндемических заболеваний человека // Вестн. Отделения наук о Земле РАН. 2004. № 1 (22). С. 1–17.

8. *Замана Л.В., Гладкая Н.М., Лесников Ю.В. и др.* Техногенные гидрогеохимические аномалии горнорудных районов Забайкалья // *Геохимия техногенеза*. Иркутск: Сибирский ГЕОХИ, 1985. Т.3. С. 143–146.
9. *Иванов В.В.* Экологическая геохимия элементов. М.: Недра, 1994. Кн. 1. 304 с.
10. *Иванов В.В.* Экологическая геохимия элементов. М.: Недра, 1994. Кн. 2. 303 с.
11. *Иванов В.В.* Экологическая геохимия элементов. М.: Недра, 1996. Кн. 3. 352 с.
12. *Кандер В.М.* Ртутное оруденение зон активизации юга Сибирской платформы и ее складчатого обрамления. Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Новосибирск: Ин-т геологии и геофизики СО РАН СССР, 1969. 25 с.
13. *Китаев Н.А., Гребенщикова В.И., Лустенберг Э.Е. и др.* Ртуть в окружающей среде Южного Прибайкалья // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2008. № 6. С. 517–530.
14. *Ковальский В.В.* Геохимическая экология. М.: Наука, 1974. 222 с.
15. *Коваль П.В., Руш Е.А., Удодов Ю.Н. и др.* Геоэкология: воздействие сосредоточенного источника ртутного загрязнения на компоненты природной среды Приангарья // *Инженерная экология*. 2004. № 6. С. 18–45.
16. *Ломоносов И.С.* Геохимия формирования современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука, 1974. 166 с.
17. *Ломоносов И.С., Антипин В.С., Ломоносова Т.К. и др.* Сопоставление состава и геохимических особенностей коренных пород и твердого стока крупных рек водосборного бассейна озера Байкал // *Геология и геофизика*. 2001. Т. 42. №1–2. С. 278–296.
18. *Ломоносов И.С., Брюханова Н.Н., Трошин Ю.П.* Роль органического вещества в осадочном процессе при формировании селенодефицитной провинции природных вод Байкальской рифтовой зоны // *Матер. 4-го Всерос. литохимического совещ.* М.: ГИН, 2006. Т. 2. С. 25–28.
19. *Ломоносов И.С., Гребенщикова В.И., Брюханова Н.Н. и др.* Распределение селена и фтора в компонентах окружающей среды Прибайкалья // *Проблемы региональной экологии*. 2008. № 5. С. 28–32.
20. *Ломоносов И.С., Покатилов Ю.Г.* Биогеохимическая оценка природных вод Прибайкалья // *Геохимия техногенеза*. Новосибирск: Наука, 1986. С. 76–117.
21. *Мицкевич Б.Ф., Сущик Ю.Я. и др.* Бериллий в зоне гипергенеза. Киев: Наук. думка, 1977. 167 с.
22. *Никитина Л.П., Аникина П.В., Иванов и др.* Величины подвижных форм селена в водах Мирового океана // *Селен в жизни человека и животных*. М.: ВИНТИ РАН, 1995. С. 19–20.
23. *Никитина Л.П., Иванов В.Н., Аникина Л.В.* Селен в горных породах и почвах // *Селен в жизни человека и животных*. М.: ВИНТИ РАН, 1995. С. 17–19.
24. *Новиков Ю.В.* Методы исследования качества воды. М.: Медицина, 1990. 400 с.
25. *Питьевая вода. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы 2.1.4.-1074-18.* Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества // *Рос. газета*. 2001. № 223 (2835). С. 10–15.
26. *Савченков М.Ф., Решетник Л.А. и др.* Клинико-гигиеническая оценка обеспеченности селеном населения Иркутской области. (Пособие для врачей и специалистов медико-биологического профиля). Иркутск: ИГМУ, 2001. 25 с.
27. *Удодов Ю.Н., Шенькман Б.М.* Качественное состояние грунтовых вод Шелеховской промышленной зоны // *Подземные гидросфера. Матер. Всерос. совещ. по подземным водам Востока России*. Иркутск: ИрГТУ, 2006. С. 446–449.
28. *Шварцев С.Л.* Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1998. 366 с.
29. *Шенькман И.Б., Шенькман Б.М.* Гидрогеохимические провинции Fe, Mn, F, Sr, P, Si пресных и солоноватых вод Ангаро-Ленского артезианского бассейна // *Фундаментальные проблемы современной гидрогеохимии*. Тр. междунар. конф. Томск: Изд-во науч.-техн. лит. 2004. С. 205–210.
30. *Яновский Л.М.* Клинико-гигиенический анализ распространения неинфекционной патологии в Прибайкалье в зависимости от природных условий. Автореф. ... дис. докт. мед. наук. Иркутск: Иркутский гос. мед. ун-т, 2003. 42 с.
31. *Яновский Л.М., Ломоносов И.С.* Фториды в природных ландшафтах Прибайкалья // *Сибирь–Восток*. 2003. № 9. С. 25–28.
32. *Яновский Л.М., Мещенко В.М.* Гидрохимические параметры фтора и жесткости питьевых вод геохимических ландшафтов и стоматологическая патология населения Предбайкалья // *Микроэлементы в Сибири*. Улан-Удэ, 1975. Вып. 10. С. 25–29.
33. *Jarvis K.E., Gray A.L., Houk R.S.* Handbook of Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. London: Viridian Publ., 2003. 375 p.
34. *Leermakers M., Menleman C., Baeyens W.* Mercury distribution and fluxes in Lake Baikal // *Global and regional mercury cycles: sources, fluxes and mass balances* / Eds. Baeyens W.W., Ebinghaus R., Vasiliev O. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publ., NATO ASI, 1996. Ser.2.V. 21. P. 303–315.