

И.А. БЕЛОЗЕРЦЕВА***, И.Б. ВОРОБЬЕВА*, Н.В. ВЛАСОВА*

*Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 664033, Иркутск,
Улан-Баторская, 1, Россия, belozia@mail.ru, Irene@irigs.irk.ru, vlasova@irigs.irk.ru**Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия, belozia@mail.ru

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ ЮГО-ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ БАЙКАЛА (СЛЮДЯНСКИЙ РАЙОН)

Представлены результаты исследований, выполненных на основе полевых и камеральных, аналитических исследований, проведенных в 2024 г. на юго-западном побережье оз. Байкал. На ключевых участках отобраны образцы снега, поверхностных вод, почв и растительности. Приведены геохимические показатели основных компонентов природной среды вблизи отстойников, промышленной площадки БЦБК, населенных пунктов побережья с высокой рекреационной нагрузкой. Обнаружено, что содержание тяжелых и щелочноземельных металлов, ионов SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} в снегу вблизи пос. Култук, городов Слюдянки и Байкальска превышает фоновые значения; концентрации NH_4^+ , Pb и нефтепродуктов в снеговой воде превосходят ПДК и ОДК. Основные источники загрязнения — строительные и дорожные предприятия, ТЭЦ, котельные, железнодорожный и автомобильный транспорт, свалки, отстойники. Источники загрязнения поверхностных вод фосфатами и аммонием — объекты жилищно-коммунального хозяйства. Обнаружено загрязнение почв тяжелыми металлами в рекреационной и промышленной зонах, расположенных на побережье озера. Выявлены региональные особенности корреляционных связей между концентрациями макро- и микроэлементов в почвах и водородным показателем, содержанием органического углерода, фракцией физической глины, что говорит о наличии биогеохимических барьеров, на которых они накапливаются в концентрациях выше ПДК. Коэффициент биологического поглощения показал зависимость от кислотно-щелочных условий. Коэффициент миграции микроэлементов в поверхностные воды из почв низкий. Однако в прибрежных водах озера концентрации тяжелых металлов превышают ПДК для вод водных объектов рыбохозяйственного значения ввиду их большого количества в почвах. Более высокую интенсивность миграции имеют макроэлементы. Установлено, что в воде отстойника, устьевых зон рек Хара-Мурино, Харлакта, Утулик и в прибрежных водах озера около Байкальска, Утулика, Слюдянки и Култука концентрации фторидов, фосфатов, аммонийного, нитратного и нитритного азота превышают фоновые уровни.

Ключевые слова: поверхностные воды, снег, почвы, растительность, техногенез, рекреация.

I.A. BELOZERTSEVA***, I.B. VOROBYEVA*, N.V. VLASOVA*

*V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia, belozia@mail.ru, Irene@irigs.irk.ru, vlasova@irigs.irk.ru**V.M. Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 664033, Irkutsk, ul. Lermontova, 134, Russia,
belozia@mail.ru

CURRENT STATE OF THE NATURAL ENVIRONMENT OF THE SOUTHWESTERN SHORE OF LAKE BAIKAL (SLYUDYANSKY DISTRICT)

The article presents the results of the research carried out on the basis of field and desktop analytical studies conducted in 2024 on the southwestern shore of Lake Baikal. Samples of snow, surface waters, soil and vegetation were collected at key sites. Geochemical parameters of the main components of the natural environment near the settling tanks, industrial site of the BPPM, and coastal settlements with a high recreational load are presented. It was found that the content of heavy and alkaline earth metals, SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} ions in snow near the village of Kultuk and the towns of Slyudyanka and Baikal'sk exceeded background values; concentrations of NH_4^+ , Pb and petroleum products in snow water exceeded the MAC and APC. The main sources of pollution are construction and road enterprises, thermal power plants, boiler houses, railway and automobile transport, waste landfills, and settling tanks. The sources of surface water pollution with phosphates and ammonium are housing and

communal service facilities. Soil pollution with heavy metals has been detected in the recreational and industrial zones located on the lake shore. Regional features of correlations between the concentrations of macro- and microelements in soils and the hydrogen index, organic carbon content, and physical clay fraction have been identified, which indicates the presence of biogeochemical barriers where they accumulate in concentrations above the MAC. The biological absorption coefficient showed a dependence on acid-alkali conditions. The coefficient of migration of microelements into surface waters from soils is low. However, in the coastal waters of the lake, concentrations of heavy metals exceed the MAC for fishery waters due to their large amount in soils. Macroelements have a higher migration intensity. It has been established that, the concentrations of fluorides, phosphates, ammonium, nitrate and nitrite nitrogen exceed the background levels in the waters of the settling tank, the estuary zones of the Khara-Murino, Kharlakta, Utulik rivers and in the coastal waters of the lake near Baikalsk, Utulik, Slyudyanka and Kultuk.

Keywords: surface waters, snow, soils, vegetation, technogenesis, recreation.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на большой исследовательский интерес к оз. Байкал, в научной литературе [1–4] источники загрязнения и геохимические связи территории побережья освещены недостаточно. В основном изучаются отдельные компоненты ландшафтов локальных участков. Мало работ по исследованию внешних и внутренних факторов возникновения опасных экологических ситуаций [1].

Наибольший урон Байкальской природной территории наносят туризм и промышленные предприятия. До 1990 г. оз. Байкал посещало около 600 тыс. чел/год с целью лечения, отдыха и туризма, затем рекреационная нагрузка сократилась на 40 %. В 2014–2018 гг. поток туристов увеличился до 300–500 тыс. чел/год (организованный туризм — 350 тыс. чел/год, «дикий» — 150 тыс. чел/год) [5, 6]. Специально оборудованных стоянок на юго-западном побережье с большой рекреационной нагрузкой очень мало, как и санитарных точек.

Туристы добираются к местам отдыха на машинах, располагаются в палатках на расстоянии менее чем 50 м от уреза воды, для приготовления пищи разводят костры. Многие используют переносные «палатки-туалеты», но есть и те, кто в качестве туалета используют ландшафты побережья.

Значительное влияние на экосистему озера оказывает Южно-Байкальский промышленный узел. Область его воздействия распространяется вдоль Транссибирской железнодорожной магистрали. Здесь располагаются крупные транспортно-промышленные узлы — города Байкальск и Слюдянка, а также ряд поселков и железнодорожных станций.

Основные источники загрязнения исследуемой территории — это выбросы и отходы действующих и закрытых предприятий, котельных. В Байкальске это тепловая электростанция (ТЭЦ) закрытого в 2013 г. ОАО «Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат» (БЦБК) и котельные. В Слюдянке к источникам загрязнения относятся предприятия строительной индустрии (мраморные карьеры с интенсивным пыле- и газовойделением, асфальтобитумный завод), 59 котельных, частный сектор с печным отоплением и автотранспорт. Среднегодовой валовой выброс в последние годы составляет около 4500 т/год, из них пыли — 3500 т/год. Основными предприятиями раб. пос. Култук являются автотранспортная компания и нефтебаза. По данным Государственного доклада, в 2022 г. уровень загрязнения атмосферного воздуха (по индексу загрязнения атмосферы) в Байкальске, Слюдянке и Култуке определялся как низкий [7].

После закрытия БЦБК осталось более 6,5 млн т отходов производства, накопленных в картнакопителях на берегу Байкала, а также золошлаков от функционирования ТЭЦ. В 2021 г. был введен режим чрезвычайной ситуации в связи с риском перелива надшламовых вод. В 2021–2022 гг. предприятие «Федеральный экологический оператор» откачало и очистило часть надшламовых вод из 13 картнакопителей Солзанского и Бабхинского полигонов, понизив их уровень.

Главными источниками загрязнения вод оз. Байкал являются предприятия, осуществляющие непосредственный сброс сточных вод в озеро (МУП «Канализационные очистные сооружения Байкальского муниципального образования», г. Байкальск Слюдянского района) и в притоки 1-го порядка — р. Похабиху (ООО «Управление коммунальными системами», г. Слюдянка Слюдянского района), р. Правую Ангасолку (ООО «Комплекс коммунальных систем», раб. пос. Култук Слюдянского района) [7].

Цель исследования — оценка современного состояния и степени загрязнения основных компонентов природной среды юго-западного побережья оз. Байкал.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования — почвы, растительность, снежный покров, поверхностные воды юго-западного побережья оз. Байкал. В качестве ключевых участков выбраны территории с наибольшим антропогенным воздействием — побережье и устьевые зоны рек (рис. 1–3).

В 2024 г. в ходе ландшафтно-геохимических исследований были отобраны: 91 образец снега (март); 88 — почв и растительности (июль); 89 — поверхностных вод (март, июль). Пробы снега отбирались снегомером «ВС-43» по всей толще снежного покрова с определением его высоты и плотности, воды — батометром с глубины 0,5 м, пробы прибрежных вод озера — в 5–10 м от берега с глубины 0,5 м с лодки. Отбор почв и растительности производился на основных элементах рельефа территории на расстоянии 0,5, 1, 2, 6 км от источников загрязнения.

Аналитические работы проводились в Институте географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (Иркутск) в лабораторных условиях по стандартизованным методикам на современном оборудовании [8–12]. Величину pH, содержание растворенного кислорода, фторидов, хлоридов, гидрокарбонатов, фосфатов, аммония, нитритов, взвешенных веществ в воде определяли в полевых условиях с помощью полевой комплексной химической лаборатории с дополнительным оборудованием (pH-метр, фотоколориметр и др.) в день отбора проб. Содержание металлов установлено количественным атомно-эмиссионным спектральным методом с использованием прибора Optima 2000DV. Концентрация нефтепродуктов измерялась с помощью флюората. Реакция почвенной среды ($pH_{водн}$) определялась потенциометрическим методом, а органического углерода ($C_{орг}$) — методом мокрого сжигания по Тюрину, гранулометрический состав почв — по методу Робинсона — Качинского. Содержание основных элементов питания растений установлено с помощью агрохимических методов исследования почв [8].

Для оценки снеговых и поверхностных вод использованы нормативы питьевых вод (ПДКпв) и вод водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение (ПДКрх) [13, 14]. Выбор ПДКпв обусловлен имеющимися подземными, поверхностными водозаборами в Байкальском муниципальном образовании. Использование ПДКрх определено статусом оз. Байкал как объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО с ценными и эндемичными видами фауны. В настоящее время отсутствуют санитарно-гигиенические нормы содержания токсичных элементов в снеговой воде.

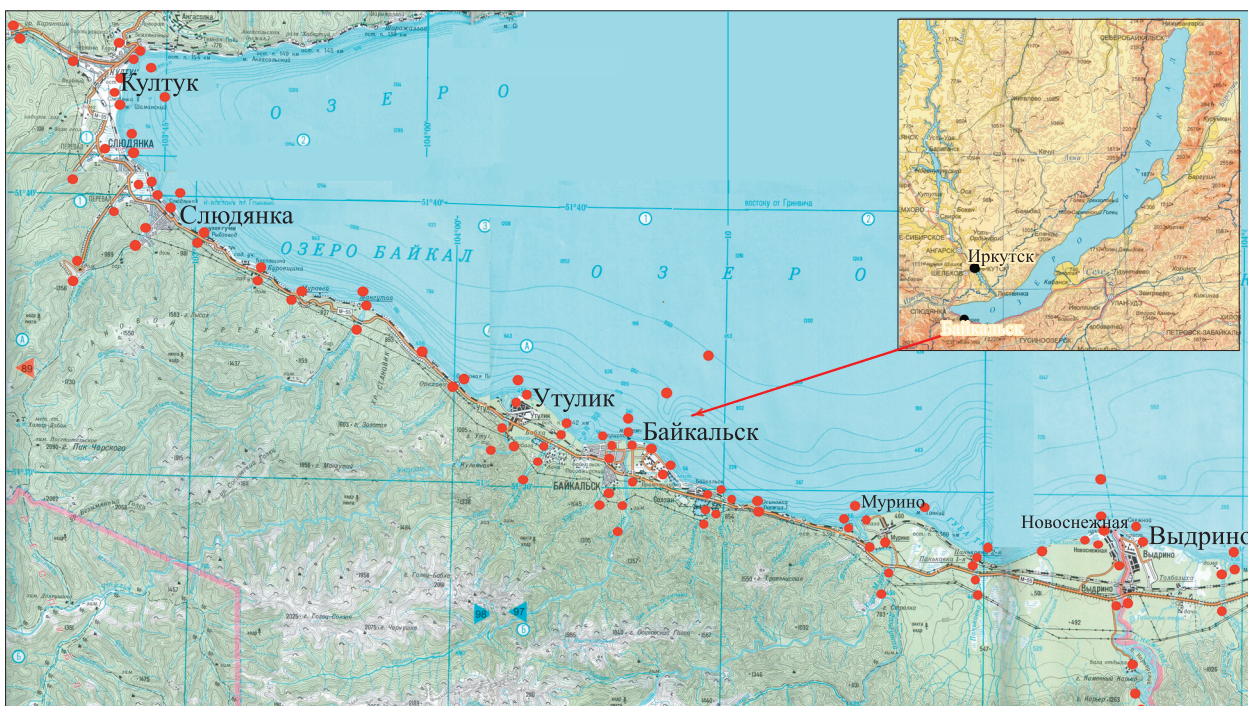


Рис. 1. Территория исследования (зима–весна, лето, осень 2017, 2024 гг.).

Красными пунсонами показаны ключевые площадки отбора проб снега, вод, почв и растительности (на акватории озера только снега и вод).



Рис. 2. Устья рек Бабха (*а*) и Утулик (*б*).



Рис. 3. Отстойники БЦБК (*а*) и заросшая свалка по дороге к ним (*б*) на юго-западном побережье оз. Байкал.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Снежный покров является депонирующей средой, на которой отражаются все техногенные выпадения из атмосферы в течение зимнего периода. Содержание в нем твердого осадка характеризует запыленность территории, фильтрат снеговой воды показывает степень загрязнения воздушного бассейна растворимыми формами соединений, токсичных для растений и животных. При снеготаянии растворенные вещества поступают в поверхностные, подземные воды и почву.

Установлено, что для снеговых вод характерны слабокислые и нейтральные значения pH (6,3–7,1) (табл. 1). Среднее содержание в сухом остатке минеральных веществ составляет 7–17 мг/дм³ и растворимых — 17–70 мг/дм³, которые близки к фоновым значениям, характерным для Южной котловины оз. Байкал. Исключением является раб. пос. Култук, где минерализация снеговых вод достигает 26 мг/дм³, а количество взвешенных частиц — 146. Содержание нефтепродуктов превышает санитарно-гигиенические нормативы для вод рыбохозяйственного назначения [14] в 1,2–2,0 раза, но не превосходит ПДК для питьевых вод. В снеговой воде установлены повышенные концентрации кадмия (0,002 мг/дм³) в районе Байкальска, фтора (0,066–0,111 мг/дм³) — в окрестностях Байкальска, Утулика, Слюдянки, ст. Бабха, ТЭЦ БЦБК (см. табл. 1; табл. 2).

В водах рек и в прибрежных водах озера, по данным ранее проведенных исследований авторов [18, 19], наибольшие концентрации химических элементов и веществ фиксировались в феврале и июле. В феврале это связано с режимом подледного периода и увеличением в питании рек доли подземных вод, в июле — с возрастающей антропогенной нагрузкой и наибольшим количеством осадков в этот период года (в среднем 88 мм в месяц). Фиксируются также ливневые осадки, максимум которых отмечался 26 июля 1971 г. в Байкальске — 156 мм за 12 ч, а на хребтах Хамар-Дабана их количество было еще больше. С паводковыми водами привносятся частицы почв и грунтов побережья. Минерализация и мутность воды в этот период года имеют более высокие значения. Реки Слюдянского района селеопасны, на них отмечаются оползни и обвалы горных пород. Последний крупный селевой поток в Байкальске был зафиксирован в июле 2019 г.

Установлено, что вода в устьевых зонах рек и озера слабощелочная (pH от 7,9 до 8,4), относится к гидрокарбонатно-кальциевому классу. Исключение составили прибрежные воды Байкала около промышленной площадки БЦБК, где наблюдается гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатный состав с pH 6,4 (при рекомендуемом диапазоне от 6,0 до 9,0 [14]). Высокое содержание хлорид- и сульфат-ионов для данной территории может быть следствием бывшего хлорирования сульфатного лигнина. Отстойники бывшего БЦБК в настоящее время находятся в стадии рекультивации (см. табл. 1, 2).

Содержание растворенного кислорода в поверхностных водах служит косвенной характеристикой оценки их качества. На его концентрацию оказывает влияние температура, атмосферное давление, количество осадков, а также степень минерализации. Обнаружено, что во время проведения экспедиционных работ содержание O₂ в водах колебалось от 8,9 до 16,3 мг/дм³ при среднем значении 11,9, что соответствует санитарно-гигиеническим нормам [14]. Минимальные значения определялись в пробах прибрежных вод оз. Байкал около отстойников БЦБК, максимальное — в самой западной точке озера, вблизи Култука, где наблюдается активное «цветение» воды.

Повышенная минерализация (147–186 мг/дм³) выявлена для прибрежных вод Байкала около устья р. Бабхи и вблизи Слюдянки, среднее значение для вод южного побережья — 89,7 мг/дм³ (колебания от 57 до 97 мг/дм³) (см. табл. 1).

В устьевых зонах рек Похабиха, Харлакта, Хара-Мурино, Снежная и в прибрежных водах Байкала около Култука, а также в надшламowych водах отстойника выявлены повышенные концентрации фторид-ионов — от 0,096 до 0,136 мг/дм³, что превосходит ПДК_{рх}, но ниже ПДК_{пв}.

Концентрации фосфат-ионов (0,05–0,06 мг/дм³), превышающие ПДК_{рх}, установлены в устьевых зонах рек Снежная и Хара-Мурино. Антропогенным источником загрязнения вод являются моющие средства, содержащиеся в сточных водах, поступающих от объектов жилищно-коммунального хозяйства.

Количество нитратного азота больше ПДК_{рх} в устьевых зонах рек Бабха и Утулик в прибрежных водах озера около Слюдянки. Аномально высокое его содержание (55 мг/дм³), превышающее ПДК_{пв}, обнаружено в прибрежных водах Байкала около устья р. Бабхи. Концентрации ионов аммония, превышающие ПДК_{рх}, выявлены в воде устьев рек Утулик и Похабиха, а в прибрежных водах Байкала вблизи Слюдянки и на территории промышленной площадки БЦБК выявлены аномальные концентрации NH₄⁺ (1,7 мг/дм³), превосходящие ПДК_{пв}. Источником загрязнения могут быть объекты жилищно-коммунального хозяйства, выгребные ямы, а также продукты жизнедеятельности крупного рогатого скота, поскольку на данной территории периодически происходит подтопление побережья озера. В зону затопления попадают пастбища и приусадебные участки.

Таблица 1

Величина pH, содержание нефтепродуктов и основных ионов в снеговой воде и прибрежных водах ключевых участков юго-западного побережья оз. Байкал, мг/дм³

Номер ключевого разреза, местоположение	pH	O ₂	Анион						Катион					Взве- шенное веще- ство	Минерализа- ция	Нефте- продук- ты	
			F ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺				NH ₄ ⁺
Снеговая вода, февраль–март 2024 г.																	
339, Байкальск	6,94	–	0,066	3,66	2,80	4,95	0,038	0,010	0,012	2,07	0,25	0,026	0,149	0,01	17	14,04	0,046
340, ТЭЦ, БЦБК	7,14	–	0,060	3,05	2,90	4,95	0,041	0,011	0,001	1,45	0,25	0,004	0,118	0,01	62	12,85	0,047
317, Байкальск, оз. Байкал	6,41	–	0,020	3,66	3,33	0,11	0,022	0,280	0,001	0,28	0,09	0,049	0,160	0,001	85	8,00	0,029
320, напротив Байкальска, оз. Байкал	6,29	–	0,068	2,44	3,85	0,11	0,040	0,404	0,002	1,28	0,73	0,303	0,429	0,001	63	9,66	0,040
323, Байкальск, около БЦБК, оз. Байкал	6,44	–	0,047	3,66	4,20	0,22	0,040	0,250	0,001	0,75	0,14	0,156	0,365	0,15	66	9,98	0,027
327, ст. Бабха, побережье оз. Байкал	6,36	–	0,091	3,66	3,33	0,11	0,044	0,205	0,001	0,45	0,101	0,098	0,225	0,001	70	8,32	0,035
328, пос. Утулик, оз. Байкал	6,54	–	0,074	2,44	1,75	15,4	0,050	0,804	0,001	0,38	0,10	0,059	0,157	1,00	5	22,22	0,024
336, Слюдянка, оз. Байкал	6,84	–	0,111	6,10	3,68	5,50	0,013	0,010	0,001	0,72	0,16	0,126	0,317	0,02	39	16,76	0,060
338, пос. Култук, около метеостанции, оз. Байкал	6,65	–	0,032	4,27	4,20	0,11	0,025	0,008	0,001	0,62	0,16	0,078	0,146	0,03	146	9,68	0,062
Снеговая вода в Южной котловине, февраль–март 2015 г., n = 86, по данным авторов [15]																	
Содержание фоновое среднее максимальное	6,40	–	0,020	0,61	1,75	0,11	0,001	0,001	0,01	0,028	0,06	0,004	0,118	0,001	1	5,87	0,008
	6,44		0,066	4,11	3,37	2,09	0,04	0,29	0,004	1,15	0,27	0,270	0,540	0,32	70	10,8	0,050
	7,14		0,950	11,20	6,65	19,25	0,51	5,65	0,073	3,54	1,24	1,163	4,427	9,60	559	20,1	0,202
Вода в устьевых зонах рек и озера, июль 2024 г.																	
65, устье р. Снежной, пос. Новоснежная	8,35	10,1	0,136	52,0	0,18	5,0	0,005	0,25	0,040	21,32	3,20	0,62	1,33	0,05	38	83,93	0,009
66, оз. Байкал, около р. Снежной	7,86	10,4	0,030	20,1	0,20	22,50	0,005	0,00	0,054	14,89	1,68	0,44	0,47	0,05	54	60,42	0,010
72, устье р. Хара-Мурино, пос. Мурино	7,98	11,0	0,096	39,7	5,33	14,50	0,035	0,19	0,040	16,48	2,65	0,67	1,32	0,18	47	43,3	0,005
71, оз. Байкал около р. Хара-Мурино	7,82	10,9	0,020	27,5	4,97	14,50	0,040	0,19	0,058	12,99	2,66	0,98	1,81	0,22	49	36,2	0,005
84, оз. Байкал, около отстой- ников БЦБК	6,40	8,9	0,040	6,1	10,30	12,50	0,032	0,10	0,001	7,23	0,89	0,37	2,07	1,70	50	28,3	0,003

85, устье р. Харлакты (Байкальск)	8,21	14,2	0,126	61,0	3,91	10,00	0,020	0,13	0,003	24,79	4,67	0,84	3,10	0,38	50	66,5	0,005
74, отстойник	8,36	13,6	0,088	64,1	3,91	11,00	0,040	0,38	0,020	22,92	4,62	0,99	2,50	0,48	58	62,6	0,004
65, устье р. Бабха	7,90	10,4	0,040	30,5	4,97	12,50	0,020	0,20	0,014	11,45	2,68	1,03	1,08	0,15	46	50,7	0,006
66, оз. Байкал, около устья р. Бабха	8,15	10,8	0,063	60,1	1,78	11,20	0,040	55,0	0,020	12,71	2,49	0,96	2,38	0,48	34	147,2	0,026
82, устье р. Похабиhi (Слюдянка)	7,98	13,4	0,074	42,7	3,91	11,00	0,037	0	0,0	17,16	3,60	0,84	2,33	1,20	50	50,1	0,007
68, устье р. Утулик	8,20	10,0	0,089	50,4	4,62	4,05	0,650	0,74	0,012	24,98	5,45	1,30	2,70	0,71	46	68,0	0,009
69, оз. Байкал, около устья р. Утулик	8,37	11,2	0,114	51,9	4,26	4,00	0,040	0	0,015	21,82	4,10	0,87	3,06	0,32	46	98,6	0,012
81, оз. Байкал, около Слюдянки	8,29	14,3	0,040	106,8	3,91	12,00	1,200	4,13	0,017	43,69	10,51	0,59	1,92	1,04	50	185,9	0,007
86, устье р. Култучной	8,21	13,2	0,030	94,6	4,26	19,70	0,030	0,38	0,001	35,64	9,46	0,88	2,14	0,37	54	96,9	0,009
88, оз. Байкал, около пос. Кулук	8,04	12,8	0,113	76,3	4,62	17,90	0,028	0	0,001	25,68	4,89	1,18	4,83	0,40	50	77,0	0,008
89, оз. Байкал, около пос. Кулук	8,20	16,3	0,127	79,3	3,91	10,00	0,040	0	0,001	26,33	4,963	0,91	3,41	0,54	48	71,4	0,007
Базовые уровни содержания																	
Исток Ангарты (1950–2009 гг.), по [17]	7,08 8,5	10,1 14,4	–	62,7 67,5	0,37 0,90	3,44 6,70	–	–	–	14,6 1,68	2,0 3,6	3,47– 5,60	–	–	92 98	–	–
Вода в Южной котловине оз. Байкал, февраль–сентябрь 2017–2018 гг., n = 53, по данным авторов [18, 19]																	
Содержание фоновое	6,97	–	0,020	32,1	1,01	4,95	0,010	0,010	0,001	10,21	2,01	0,32	1,24	0,10	40	63,2	0,005
среднее	7,35	–	0,074	57,4	1,24	6,07	0,030	0,010	0,001	17,34	3,88	0,84	2,65	0,40	46	89,7	0,016
максимальное	7,80	–	0,650	93,3	2,02	8,80	0,050	0,020	0,001	30,52	7,48	1,99	4,78	0,10	86	135,5	0,029
максимальное в прибрежных водах	8,37	–	1,060	104,1	3,57	25,08	1,260	50,00	0,061	41,10	8,78	2,18	8,51	0,64	110	160,3	0,338
Класс опасности	–	3	–	4	–	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	–	3
ПДК _{рх} [13]	–	–	0,05	–	300	100	0,08	40	0,05	180	40	10	120	0,5	10000	–	0,05
ПДК _{пв} [13]	6–9	–	0,7–1,5	–	350	500	–	45–130	3,5	–	–	–	180	–	–	1000	–
ПДК [14]	6–9	≥4	1,5	–	350	500	3	45	–	–	50	–	200	1,5	–	1500	0,10

Примечание. Прочерк — не установлено. Жирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК; 0 — менее 0,001 мг/дм³.

Таблица 2

**Содержание макро- и микроэлементов в снеговой воде
и прибрежных водах ключевых участков юго-западного побережья оз. Байкал, мг/дм³**

Номер разреза	Mo	Mn	Ba	Al	Pb	Ni	Cu	Fe	Si	Zn	Sr	Ti	Co	Cr	V	Cd
Снеговая вода, февраль–март 2024 г.																
339	0,001	0,004	0,007	0,003	0,004	0,002	0,009	0,004	0,001	0,001	0,009	0,001	0,002	0,001	0,001	0,002
340	0,001	0,006	0,004	0,004	0,001	0,001	0,008	0,006	0,001	0,001	0,009	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001
317	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
320	0,002	0,001	0,002	0,013	0,001	0,002	0,002	0,007	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
323	0,021	0,005	0,003	0,019	0,006	0,001	0,002	0,012	0,001	0,003	0,011	0,002	0,001	0,002	0,002	0,001
324	0,006	0,001	0,001	0,006	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
325	0,009	0,001	0,001	0,008	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
326	0,001	0,001	0,001	0,009	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,004	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
327	0,010	0,002	0,003	0,012	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
328	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
336	0,001	0,001	0,001	0,008	0,001	0,001	0,001	0,004	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
337	0,002	0,001	0,002	0,013	0,001	0,001	0,002	0,007	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
338	0,001	0,001	0,001	0,008	0,001	0,001	0,002	0,002	0,168	0,001	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Снеговая вода в Южной котловине, февраль–март 2015 г., n = 86, по данным авторов [15]																
Содержание фоновое среднее максимальное	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	0,005	0,008	0,005	0,018	0,002	0,001	0,003	0,009	0,108	0,004	0,008	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
	0,021	0,054	0,062	0,097	0,006	0,003	0,009	0,066	2,107	0,026	0,031	0,007	0,002	0,002	0,006	0,002
Вода в устьевых зонах рек и озера, июль 2024 г.																
67	0,0160	0	0,002	0	0	0	0,002	0	0,00	0,0915	0,002	0,0009	0,002	0	0	0
66	0,0993	0	0,036	0,0083	0,018	0	0,001	0,003	2,79	0,0025	0,293	0	0,003	0,001	0	0
72	0	0	0,034	0,0102	0,024	0	0,004	0	4,46	0,0052	0,196	0,0017	0,004	0,001	0	0,0010
71	0,0439	0,001	0,044	0,0006	0	0	0,001	0	1,23	0,0022	0,339	0	0,005	0,001	0	0
84	0,1064	0	0,072	0,0083	0,019	0	0,003	0	0,76	0,0006	0,479	0,0004	0,003	0,001	0	0,0004
85	0,1589	0	0,052	0,0083	0,015	0	0,003	0	5,11	0,0025	0,191	0,0006	0,004	0,002	0	0
85	0,0318	0	0,053	0,0235	0,017	0	0,003	0	1,28	0,0007	0,396	0,0001	0,004	0,001	0,001	0
74	0,0505	0,059	0,070	0,0092	0	0	0,001	0,015	0,08	0,0134	0,148	0,0006	0,001	0,001	0	0
65	0,0190	0,001	0,050	0	0,013	0	0,001	0	0,89	0,0002	0,446	0,0006	0,007	0,001	0,002	0

66	0,0180	0,001	0,050	0	0	0	0,001	0,20	0,0002	0,520	0,0001	0	0	0,001	0
82	0,1418	0	0,089	0,0084	0,003	0	0,002	5,06	0,0010	0,567	0	0,003	0,002	0,004	0
68	0,0220	0,003	0,058	0	0,023	0,016	0,003	2,38	0,0011	0,455	0,0014	0,005	0,001	0	0,0010
69	0,0230	0,006	0,043	0	0,018	0,001	0,003	0,18	0,0014	0,461	0,0010	0,005	0,001	0	0,0010
81	0,0981	0	0,055	0,0005	0,031	0	0,002	0,52	0,0015	0,495	0	0,007	0,001	0,001	0
86	0,1225	0	0,067	0	0,058	0	0,002	7,76	0,0001	0,826	0	0,004	0,001	0,004	0
88	0,0825	0	0,048	0,0027	0,006	0	0,002	0,54	0	0,563	0	0,004	0	0	0,0007

Базовые уровни содержания (оз. Байкал), min–max, среднее															
I (1940–1950-е гг. [16])	–	0,0012–0,0023	–	0,047 ср.	–	0,003 ср.	0,005–0,006	0,035 ср.	1,07	–	–	0,0023 ср.	0,006 ср.	–	–
II (1997–2004 гг. [20])	–	0,0017–0,0046	–	–	0,00001–0,00008	0,0002–0,0005	0,0007–0,0043	–	0,0030–0,0035	–	–	0,0001–0,0005	0,0001–0,0004	0,0003–0,0005	0,0001–0,00012
III (2013 г. [21])	0,008–0,015	–	0,009–0,011	0,0001–0,001	0,0003–0,00006	–	0,0002–0,001	0,001–0,016	0,0005–0,0002	0,096–0,107	–	0,00002–0,00005	0,00003–0,00009	0,003–0,006	0,000001–0,00001

Воды в Южной котловине оз. Байкал, февраль–сентябрь 2017 г., n = 53, по данным авторов [18, 19]

Содержание	0,001	0,001	0,007	0,017	0,001	0	0,001	0,001	0,001	0,001	0	0,001	0,001	0	0
фоновое	0,003	0,012	0,019	0,026	0,001	0,001	0,004	0,006	1,120	0,003	0,107	0,001	0,001	0,001	0,001
среднее	0,022	0,080	0,070	0,049	0,010	0,001	0,009	0,022	7,144	0,015	0,620	0,001	0,002	0,001	0,001
максимальное	0,102	0,080	0,070	0,120	0,023	0,010	0,026	0,165	6,510	0,090	0,620	0,002	0,010	0,007	0,003
максимальное в прибрежных водах															
ПДК _{рх} [13]	–	0,01	0,74	0,04	0,006	0,01	0,01	0,1	–	0,01	0,4	0,06	0,07	0,001	0,005
ПДК _{пв} [13]	0,25	0,1	0,7	0,5	0,03	0,02	1	0,3	10	5,0–1,0	7	–	0,05	0,1	–
ПДК [14]	0,07	0,1	0,7	0,2	0,01	0,02	1	0,3	25	–	7	–	–	0,1	0,001
Класс опасности	–	4	4	4	2	3	3	2	–	3	3	4	3	3	2

Примечание. Местоположение разрезов — см. табл. 1. Жирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК. 0 — менее 0,0001 мг/дм³ для Al, Zn, Ti, Cd и менее 0,001 мг/дм³ для остальных элементов. Прочерк — не установлено.

Концентрации Mo, Mn, Pb, Ni, Zn, Sr, V в воде устьев рек Хара-Мурино, Снежная, в прибрежных водах вблизи Култука, Слюдянки, Утулика, Байкальска, отстойника, промышленной площадки БЦБК превышают ПДК_{рх}. Источником загрязнения могут быть ТЭЦ, печное отопление, строительный мусор, автомобильный и железнодорожный транспорт (см. табл. 2).

По данным полевых исследований, почвенный покров юго-западного побережья оз. Байкал представлен в основном комплексом почв аллювиального отдела — гумусовыми, перегнойно-глеевыми, торфяно-глеевыми и др. Встречаются почвы слаборазвитого отдела (слоисто-аллювиальные и др.). На присклонной поверхности и в нижней части склонов распространены дерново-подзолистые почвы, имеют место серые и др.

По содержанию основных элементов питания растений почвы характеризуются очень низкими, низкими и средними значениями, за исключением почв в устьях рек Хара-Мурино и Харлакта, на побережье озера около Култука и Байкальска, а также вблизи отстойника. Максимальные концентрации подвижного фосфора и калия в почвах варьируют от 107 до 189 и от 325 до 418 мг/кг соответственно, что, согласно шкале [22], оценивается как выше среднего и высокие (табл. 3). Относительно высокие концентрации аммонийного азота (17–52 мг/кг) установлены в почвах устьев рек Хара-Мурино, Бабха, Харлакта [14]. По водородному показателю водной вытяжки ($pH_{\text{водн}}$) почвы относятся к слабокислым, нейтральным и слабощелочным. Кислой реакцией отличаются аллювиальные торфяно-глеевые почвы устьев рек Снежная и Утулик, что характерно и для почв заболоченных ландшафтов. Щелочную реакцию имеют почвы на территории Култука и Слюдянки, что в отношении последней может быть связано с наличием почвообразующих пород, а в случае Култука — с большим включением угольных шлаков (более 50 %).

Отмечено, что верхние горизонты почв побережья под лугово-заболоченной растительностью торфянистые, а под луговой растительностью характеризуются высоким содержанием гумуса. Установлено, что почвы в основном легкого гранулометрического состава. Исключение составили минеральные горизонты почв в устьях рек Снежной и Похабики, около Слюдянки и Култука, с содержанием фракции физической глины от 34 до 40 %, что является геохимическим барьером на пути миграции загрязняющих веществ.

Загрязнение почв побережья оценено по концентрации в них нефтепродуктов в сравнении с фоновым содержанием, которое, согласно ранее проведенному исследованию [23], составляет 21,7 мг/кг. Выявлено, что аллювиальные почвы устьевой части рек Снежная и Хара-Мурино обладают высокими показателями коэффициента аномальности (K_a) — 6,7 и 7,6 соответственно.

Обнаружено, что содержание Pb, Ni, Zn, Sr и Co превышает ПДК и ОДК в аллювиальных почвах тех же районов, а также в устьевых зонах рек Утулик и Похабики, около Култука, Слюдянки и отстойника (табл. 4). На фоне низких значений (63–337 мг/кг) остальных исследованных участков повышенные концентрации натрия (1516–1776 мг/кг) обнаружены в почвах на побережье Байкала, в границах промышленной площадки БЦБК и в устье р. Снежной. Загрязнение почв имеет локальный характер. Высокие концентрации токсичных элементов и веществ установлены в торфянистых, щелочных и суглинистых горизонтах, которые являются геохимическим барьером.

Для установления миграционной способности элементов был рассчитан коэффициент водной миграции, который показал, что к легко выносимым в поверхностные воды элементам из почв относятся Ca, Mg и K, к подвижным — P и Na. Несмотря на подвижность натрия, выявлено его накопление в почвах промышленной площадки БЦБК и в устье р. Снежной. Это говорит о том, что источник поступления элемента на момент исследований еще не был ликвидирован или имелась утечка из имеющихся накопителей. В прибрежных водах также фиксируется содержание ионов Na^+ выше фонового уровня. В дальнейшем, учитывая миграционную активность элемента, ситуация может усугубиться.

Коэффициенты корреляции (r_{xy}) между содержанием загрязняющего элемента в почве и такими физико-химическими показателями, как реакция среды (pH), содержание органического углерода (C_{орг}), фракция физической глины (ФГ), составили следующие ряды:

Pb: 0,20 (pH); 0,03 (C_{орг}); 0,42 (ФГ),
 Ni: 0,25 (pH); 0,027 (C_{орг}); 0,47 (ФГ),
 Zn: 0,02 (pH); 0,44 (C_{орг}); 0,38 (ФГ),
 Sr: 0,17 (pH); 0,20 (C_{орг}); 0,06 (ФГ),
 Co: 0,02 (pH); 0,52 (C_{орг}); 0,25 (ФГ),
 Na: 0,15 (pH); 0,48 (C_{орг}); 0,04 (ФГ),
 Mn: 0,07 (pH); 0,48 (C_{орг}); 0,22 (ФГ).

Таблица 3

 Физико-химические показатели почв некоторых ключевых участков
юго-западного побережья оз. Байкал (2024 г.)

Местоположение участка	Номер разреза, почва	Горизонт	Глубина, см	pH	Гумус, ППП*	Фракция физ. глины <0,01	NO ₃	NH ₄	P ₂ O ₅	K ₂ O	Нефтепродукты
					%						
Устье р. Снежной	66, аллювиальная торфяно-глеевая торфяно-минеральная	Tmr	0–12	5,62	26,6, 44,8*	19,2	5,21	1,20	8	122	146,1
		CG	12–20	4,86	0,2	8,0	0,34	3,55	62	116	6,40
	67, аллювиальная гумусовая	AY	0–19	5,57	10,3	36,5	0,19	1,52	7	106	165,9
		C	19–27	5,57	0,6	37,2	0,23	1,20	8	105	10,3
Устье р. Хара-Мурино	71, слоисто-аллювиальная гумусовая пирогенная	WC~~	0–17	5,67	10,8	18,3	1,72	52,17	13	364	165,3
		C	17–29	6,11	13,5	13,5	1,23	1,20	8	125	18,2
	72, аллювиальная гумусовая пирогенная	AY	0–14	5,44	4,3	22,1	0,45	11,52	77	89	119,5
		C	14–27	6,18	0,8	17,9	0,34	2,15	45	80	19,7
Устье р. Харлакты (Байкальск)	85, урбо-аллювиальная гумусовая	UY	0–18	6,15	9,6	9,8	0,89	16,85	107	418	8,3
Около ближнего отстойника	74, аллювиальная торфяно-глеевая	T	0–17	7,04	60,2*	—	5,9	8,40	112	41	3,4
		G	17–28	7,34	0,6	22,7	5,9	7,97	121	44	2,1
Побережье оз. Байкал, промзона БЦБК	84, серая	AY	0–14	6,48	9,2	22,4	0,30	13,22	22	329	6,8
Устье р. Бабхи	75, слоисто-аллювиальная гумусовая глееватая	OCg~~	0–27	6,62	12,8	17,7	5,67	35,68	63	533	6,9
		Cg	27–35	7,43	10,5	4,9	5,23	2,20	58	325	7,0
	76, аллювиальная гумусовая оподзоленная	AYe	0–17	5,88	1,1	6,4	5,23	1,20	8	125	9,5
Устье р. Утулик	77, слоисто-аллювиальная глееватая	OC~~	0–18	7,39	0,9	4,0	5,33	3,22	9	159	10,2
		Cg	18–27	6,65	0,6	9,8	5,20	1,20	8	145	11,3
	79, аллювиальная торфяно-глеевая минерально-глеевая	Tmr	0–34	4,69	26,3, 39,3*	—	4,23	0,64	19	145	4,6
		CG	34–42	4,81	0,6	10,3	3,25	0,70	19	125	5,0
Устье р. Похабиhi (Слюдянка)	81, слоисто-аллювиальная на торфяно-глеевой торфяно-минеральной	OC~~	0–14	6,25	0,9	15,1	4,28	0,20	9	115	9,1
		Tmr	14–31	8,61	10,6	33,6	2,23	0,18	19	125	10,3
	83, аллювиальная гумусовая глееватая	CG	29–35	8,57	0,6	4,0	4,27	0,15	18	142	8,3
		AY	0–6	6,05	10,3	10,4	0,74	3,70	11	179	6,3
пос. Култук	86, аллювиальная торфяно-глеевая	Cg	6–23	8,02	0,5	4,0	3,23	1,20	11	165	7,1
		T	0–15	6,48	72,8*	-	0,19	3,56	71	391	6,8
	88, урбослоисто-аллювиальная гумусовая	HCG	15–22	8,10	0,6	13,0	0,23	0,20	69	225	9,0
		UC~~	0–12	6,23	21,0	39,5	1,23	11,20	189	325	9,1
		YC~~	12–19	6,39	1,2	15,8	1,03	3,20	169	225	8,4
Фон**				—	—	—	—	—	—	21,7	
ПДК, ОДК [14]				—	—	—	130	—	—	—	—

Примечание. ФГ — фракция физической глины <0,01. Жирным шрифтом выделены значения, превышающие фон. Прочерк — не определялось.

* Потери при прокаливании.

** Региональный фон в почвах [23].

Таблица 4

Содержание микроэлементов в почвах ключевых участков (2024 г.)

Номер разреза	Горизонт	Ca	Mg	P	Ti	K	Na	Mn	Ba	Mo	Pb	Ni	Cu	V	Cr	Zn	Sr	Co
		%					мг/кг											
66	Tmr	0,5	0,7	0,4	0,31	0,17	1776	195	324	3,3	8	38	17	48	50	51	148	13
	CG	1,1	0,8	0,4	0,56	0,47	209	319	456	9,4	8	16	14	41	26	63	129	12
67	AY	0,2	0,4	0,2	0,47	0,19	232	151	159	4,3	124	10	10	29	23	50	54	10
71	WC~~	0,3	0,9	0,3	0,68	0,02	203	426	445	2,9	37	31	20	57	67	103	68	13
	C	0,3	1,0	0,3	0,80	0,38	188	682	439	3,5	8	34	17	64	76	92	48	19
72	AY	0,3	1,1	0,5	0,86	0,63	202	594	561	3,1	10	40	24	70	83	95	61	19
85	UY	0,4	0,8	0,3	0,29	0,28	100	568	357	6,7	8	26	28	22	27	50	172	10
74	T	0,4	0,8	0,3	0,05	0,03	100	26	129	11,5	4	7	8	4	8	8	35	4
	G	1,4	0,6	0,3	0,70	0,28	114	245	508	3,6	9	45	36	74	71	66	74	16
84	AY	3,9	1,0	0,4	0,20	0,29	1516	291	399	4,5	4	12	19	18	17	32	399	6
	C	0,7	0,9	0,4	0,48	0,22	130	199	382	2,3	12	33	18	43	65	48	56	11
75	OCg~~	0,3	0,3	0,3	0,63	0,19	275	269	411	1,1	3	15	10	46	26	47	51	12
76	AYe	0,6	0,9	0,3	0,73	0,22	247	419	525	1,3	6	53	17	62	80	76	96	19
77	OC~~	0,6	1,4	0,3	0,64	0,09	343	410	563	1,0	7	45	19	54	57	70	80	17
	Cg	0,5	1,4	0,4	0,66	0,47	308	444	565	5,2	6	57	18	62	86	77	87	22
79	Tmr	0,5	1,3	0,4	0,19	0,62	337	160	337	9,6	7	24	26	18	20	38	160	8
	CG	0,2	1,3	1,0	0,14	0,61	79	158	314	7,1	8	11	14	19	21	37	152	9
81	OC~~	1,6	0,9	0,3	0,14	0,50	172	2292	468	8,3	9	11	17	11	11	36	251	8
	Tmr	1,9	0,3	0,3	0,14	0,04	115	143	452	8,7	4	28	17	27	27	36	223	11
	CG	4,8	1,7	0,4	0,47	0,07	168	227	452	12,4	12	36	37	35	35	86	339	11
83	AY	2,8	1,8	0,2	0,47	0,05	241	318	358	1,4	10	41	21	56	85	60	82	15
	Cg	0,4	0,8	0,7	0,44	0,15	115	288	314	1,1	11	38	24	49	72	57	82	11
86	T	0,6	0,9	0,4	0,63	0,52	123	493	471	3,0	5	38	32	38	41	62	68	18
	HCG	1,4	0,6	0,6	0,64	0,29	114	488	414	2,1	8	31	24	29	32	57	62	11
88	UC~~	0,5	0,5	0,3	0,62	0,18	63	507	359	0,6	9	26	13	15	25	53	61	14
	YC~~	0,4	0,8	0,3	0,69	0,14	235	551	343	0,8	13	25	19	14	27	57	58	15
Класс опасности		—	—	—	—	—	—	3	3	2	1	2	2	3	2	1	3	2
Фон*		2,2	1,9	—	—	1,7	—	1046	—	—	10	44	51	100	100	—	265	17
ПДК [14]		—	—	—	—	—	—	1500	—	—	32— 130	20— 80	33— 132	150	100	55— 220	—	17

Примечание. Жирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК/ОДК, для натрия и кальция — средние значения. Местоположение участка и название почвы — см. табл. 3.

* Региональный фон в аллювиальных почвах [17].

Таким образом, на органическом биогеохимическом барьере накапливаются Mn, Na, Zn, Co, на щелочном — Ni, Sr, Pb, сорбционно-седиментационном и глеевом — Pb, Ni и Zn.

Для установления уровня интенсивности поглощения химических элементов растительностью из почв был рассчитан коэффициент биологического поглощения элементов растениями из почв (Ах) по [25]. Для этого была отобрана травянистая растительность на наиболее репрезентативных точках устьев рек, около отстойников, в населенных пунктах и на побережье Байкала около БЦБК. Расчет велся относительно почв:

$$\text{р. Снежная} \quad \frac{K}{1,9} > \frac{Mn}{0,9} > \frac{Ni}{0,9} > \frac{Ca}{0,4} > \frac{Zn}{0,3} > \frac{Cu}{0,3} > \frac{Cd}{0,3} > \frac{Mg}{0,2},$$

$$\text{р. Хара-Мурино} \quad \frac{K}{3,9} > \frac{Ca}{1,7} > \frac{Na}{1,4} > \frac{Mn}{1,3} > \frac{Sr}{0,5} > \frac{Zn}{0,4} > \frac{Cd}{0,3} > \frac{Cu}{0,3} > \frac{Mg}{0,2},$$

$$\text{р. Хартахта} \quad \frac{K}{8,0} > \frac{Ni}{2,5} > \frac{Na}{1,9} > \frac{Ca}{1,3} > \frac{Zn}{0,9} > \frac{Sr}{0,7} > \frac{Mg}{0,4} > \frac{Cu}{0,3} > \frac{Mn}{0,2} > \frac{Cd}{0,2} > \frac{Ba}{0,1},$$

р. Бабаха	$\frac{K}{8,0} > \frac{Ca}{2,8} > \frac{Ni}{0,8} > \frac{Zn}{0,4} > \frac{Sr}{0,2} > \frac{Mn}{0,1} > \frac{Mg}{0,1} > \frac{Cd}{0,1} > \frac{Cu}{0,1},$
р. Утулик	$\frac{Mn}{1,0} > \frac{Zn}{0,6} > \frac{Ca}{0,5} > \frac{K}{0,4} > \frac{Cd}{0,2},$
р. Похабиха	$\frac{K}{6,0} > \frac{Mn}{0,2} > \frac{Zn}{0,2} > \frac{Na}{0,2} > \frac{Cu}{0,1} > \frac{Ca}{0,1},$
Отстойник 1	$\frac{Na}{3,4} > \frac{K}{2,7} > \frac{Mg}{2,5} > \frac{Mn}{1,8} > \frac{Ni}{0,55} > \frac{Zn}{0,5} > \frac{Cd}{0,3} > \frac{Ca}{0,3} > \frac{Sr}{0,22},$
Отстойник 2	$\frac{K}{5,0} > \frac{Na}{1,3} > \frac{Mn}{1,0} > \frac{Ca}{0,8} > \frac{Ni}{0,6} > \frac{Zn}{0,5} > \frac{Mg}{0,3} > \frac{Sr}{0,3} > \frac{Cu}{0,3} > \frac{Cd}{0,2},$
БЦБК	$\frac{K}{9,0} > \frac{Ni}{2,0} > \frac{Zn}{0,5} > \frac{Mn}{0,3} > \frac{Mg}{0,3} > \frac{Cd}{0,3} > \frac{Cu}{0,3} > \frac{Ca}{0,2} > \frac{Co}{0,2} > \frac{Sr}{0,2} > \frac{Na}{0,1},$
г. Байкальск	$\frac{K}{2,3} > \frac{Na}{1,3} > \frac{Ca}{1,3} > \frac{Mn}{1,2} > \frac{Zn}{1,2} > \frac{Sr}{0,8} > \frac{Ni}{0,8} > \frac{Mg}{0,4} > \frac{Cu}{0,3} > \frac{Cd}{0,2},$
пос. Култук	$\frac{Zn}{0,8} > \frac{K}{0,2} > \frac{Cr}{0,1} > \frac{Co}{0,1}.$

Согласно полученным рядам, некоторые элементы накапливаются в наземной растительности, но большая часть относится к элементам слабого биологического захвата, за исключением Mn и Ni. В кислых и щелочных условиях, а также на урбанизированных территориях интенсивность биологического поглощения элементов снижается. Например, интенсивность поглощения растительностью Mn, Ca, Mg, Al, K, Pb, Ni, Sr, Zn, Cd из почв с щелочной реакцией значительно меньше. Поэтому на территории Слюдянки и пос. Култук, где наблюдается экологически неблагоприятная ситуация с почвами, загрязняющие химические элементы Pb, Zn, Co растительностью не поглощаются.

Вычислен коэффициент миграции (Kx) микроэлементов из почв в поверхностные воды [14, 25]. Наиболее подвижные макроэлементы — Ca, Mg, K, P, Na — имеют следующие значения Kx: 5,3–90,2; 1,3–12,2; 1,56–2,95; 0,07–0,25; 0,0004–0,05 соответственно. В то же время такие элементы, как Mo, Sr, Cd, Pb, Zn, V и Ni, оказались слабоактивными: 0,029–0,076; 0,002–0,017; 0,005–0,010; 0,0003–0,002; 0,0003–0,002; 0,0001–0,0002; 0,0001–0,001 соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно проведенным ландшафтно-геохимическим исследованиям, экосистемы юго-западного побережья Байкала продолжают находиться под сильным влиянием действующих и закрытых предприятий, транспортных магистралей вдоль побережья, котельных, нерегулируемой деятельности частного сектора и неорганизованного туризма.

Анализ снежного покрова показал аномально высокие концентрации F^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , NH_4^+ , Cd и нефтепродуктов в снегу прибрежных населенных пунктов.

В водах рек и в прибрежных водах озера вблизи населенных пунктов и отстойников установлено высокое содержание фтора, фосфатов. Повышенные концентрации разных форм азота (нитратного, нитритного и аммонийного) обнаружены в прибрежных водах вдоль побережья Байкала от Байкальска до Слюдянки, в водах устья р. Утулик, промышленной площадки БЦБК. Источниками загрязнения являются бытовые и хозяйственные отходы, поверхностные воды с промышленной площадки БЦБК, не исключено влияние вод из перезаполненных отстойников.

Большинство ключевых участков, за исключением устья р. Харлакты и пос. Култук, характеризуются в основном малыми и средними значениями основных элементов питания растений в почвах (NO_3^- , NH_4^+ , P_2O_5 , K_2O). В почвах побережья содержание Mn, Cu, Zn, Sr, Ni, Co превышает санитарно-гигиенические нормы. Цинк мигрирует в поверхностные воды и поглощается растительностью. Марганец, никель и стронций, концентрации которых превышают ПДК, обнаружены в почвах и поверхностных водах, несмотря на низкий коэффициент водной миграции.

Установлено, что в щелочных условиях, а также на урбанизированных территориях интенсивность биологического поглощения растениями макро- и микроэлементов, кроме Pb, Zn и Cd, из почв уменьшается.

Выявленные корреляционные связи свидетельствуют о том, что биогеохимическими барьерами на пути миграции загрязняющих веществ выступают органические, щелочные и суглинистые горизонты почв. Присутствие в почвах биогеохимических барьеров, с одной стороны, повышает устойчивость почв, так как способствует переходу элементов-загрязнителей в малоподвижные формы, с другой — накопление техногенных элементов ведет к усилению экологического риска, и при благоприятных условиях, например подкислении, ряд загрязнителей может попасть в растительность пастбищ, приусадебных участков побережья и в прибрежные воды Байкала.

Результаты ландшафтно-геохимических исследований на юго-западном побережье Байкала выявили еще много нерешенных проблем, что требует проведения дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках задания Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (075–15–2024–533).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гребенщикова В.И., Лустенберг Э.Е., Китаев Н.А., Ломоносов И.С. Геохимия окружающей среды Прибайкалья. Байкальский геоэкологический полигон. — Новосибирск: Гео, 2008. — 234 с.
2. Оболкин В.А., Нецветаева О.Г., Голобокова Л.П., Потемкин В.Л., Зимник Е.А., Филиппова У.Г., Ходжер Т.В. Результаты многолетних исследований кислотных выпадений в районе Южного Байкала // География и природ. ресурсы. — 2013. — № 2. — С. 66–73.
3. Семенов М.Ю., Семенов Ю.М., Силаев А.В. Исследование происхождения микроэлементов в речных водах западного побережья озера Байкал // Естественные и технические науки. — 2021. — Т. 42, № 1. — С. 76–81.
4. Ходжер Т.В., Сорокикова Л.М. Оценка поступления растворимых веществ из атмосферы и с речным стоком в озеро Байкал // География и природ. ресурсы. — 2007. — № 3. — С. 185–191.
5. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2011–2013 гг.» / Мин-во природных ресурсов и экологии РФ [Электронный ресурс]. — <http://www.mnr.gov.ru/regulatory/list.php?part=1101> (дата обращения 10.04. 2024).
6. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2011–2018 гг.». — М.: Мин-во природных ресурсов и экологии РФ, 2019. — 888 с.
7. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2022 г.». — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2023. — 372 с.
8. Ильковская З.Г., Коновалов А.С., Пономарев В.В. Агрохимические методы исследования почв. — М.: Наука, 1975. — 656 с.
9. Алекин О.А., Семенов А.Д., Скопинцева Б.А. Руководство по химическому анализу вод суши. — Л.: Гидрометеиздат, 1973. — 269 с.
10. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. — 487 с.
11. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л.А. Воробьева. — М.: ГЕОС, 2006. — 399 с.
12. Шпейзер Г.М., Минеева Л.А. Руководство по химическому анализу вод. — Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2006. — 55 с.
13. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» [Электронный ресурс]. — https://www.chemanalytica.ru/f/prikaz_minselkhoza_rossii_ot_1312-2016_n_552_ob_utverzhenii_pdk.pdf (дата обращения 30.01.2025).
14. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания [Электронный ресурс]. — https://ds278-krasnoyarskr04.gos-web-gosuslugi.ru/netcat_files/19/8/SP123685_21_0.pdf (дата обращения 10.04.2024).
15. Belozertseva I.A., Vorobjeva I.B., Vlasova N.V., Janchuk M.S., Lopatina D.N. Chemical Composition of Snow in the Water Area of Lake Baikal and on the Adjacent Territory // Geography and Natural Resources. — 2017. — Vol. 1. — P. 68–77. — DOI: 10.1134/S1875372817010097
16. Витинцев К.К. Гидрохимия озера Байкал. — М.: Изд-во АН СССР, 1961. — 310 с.
17. Гребенщикова В.И., Загорюлько Н.А., Пастухов М.В. Мониторинговые исследования ионного состава воды истока р. Ангара (озеро Байкал) // Вода: химия и экология. — 2011. — № 4. — С. 2–8.
18. Белозерцева И.А., Воробьева И.Б., Власова Н.В., Гагаринова О.В., Янчук М.С., Лопатина Д.Н. Экологическое состояние побережья озера Байкал и его влияние на загрязнение озера // Успехи современного естествознания. — 2018. — № 11. — С. 85–95.

19. Belozertseva I.A., Vorobeva I.B., Vlasova N.V., Gagarinova O.V., Yanchuk M.S., Lopatina D.N. Ecological status of the atmosphere and snow cover of the water area of Lake Baikal and its surrounding territories and its influence on the Lake pollution // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2018. — Vol. 190 (1). — 012024. — DOI: 10.1088/1755-1315/190/1/012024
20. Коваль П.В., Удодов Ю.Н., Андрулайтис Л.Д., Гапон А.Е., Склярова О.А., Чернигова С.Е. Гидрохимические характеристики поверхностного стока озера Байкал (1997–2003 гг.) // Докл. АН. — 2005. — № 5. — С. 663–667.
21. Ветров В.А., Кузнецова И.А., Склярова О.А. Базовые уровни химических элементов в воде озера Байкал // География и природ. ресурсы. — 2013. — № 3. — С. 41–45.
22. **Агрохимическая** характеристика почв сельскохозяйственных угодий и рекомендации по применению удобрений в ООО «Бильчир» Осинского района Иркутской области / Ред. М.В. Бутырин. — Иркутск: Центр агрохимической службы «Иркутский», 2009. — 29 с.
23. Белозерцева И.А. Интегральная оценка экологического состояния почвенного покрова при добыче газа в Среднем Приангарье // Почвоведение. — 2020. — № 2. — С. 244–258.
24. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов [Электронный ресурс]. — <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293855/4293855259> (дата обращения 10.04.2024).
25. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. — М.: Астерия-2000, 1999. — 768 с.

Поступила в редакцию 05.06.2024

После доработки 17.03.2025

Принята к печати 21.05.2025