

УДК 504.05

## Геоэкологическая оценка антропогенно-преобразованных почв в районе Солзанского полигона БЦБК (южное побережье оз. Байкал)

О. Н. Гордеева\*, В. И. Полетаева, М. В. Пастухов, Е. В. Чупарина, Е. С. Фереферов

\*Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия;  
e-mail: [gordeeva@igc.irl.ru](mailto:gordeeva@igc.irl.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5406-1130>

### Информация о статье Реферат

Поступила  
в редакцию  
29.01.2026;

получена  
после доработки  
19.02.2026;

принята  
к публикации  
16.03.2026

### Ключевые слова:

почва,  
концентрации элементов,  
загрязнение,  
оценка уровня  
загрязнения почв,  
побережье оз. Байкал

Масштабное загрязнение окружающей среды, связанное с работой Байкальского целлюлозно-бумажного комбината и его техногенными отходами, обуславливает актуальность исследований, направленных на изучение химического состава абиотических и биотических компонентов в районе воздействия техногенного источника. Цель исследования – изучение химического состава и оценка уровня загрязнения почв Солзанского полигона и прилегающих к нему территорий, включая прибрежную зону оз. Байкал. Определены концентрации Hg, As, Pb, Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Mn, Sr, Ba, Rb и  $C_{орг}$  в почвах вблизи и на удалении от карт-накопителей Солзанского полигона. Результаты свидетельствуют о крайне неоднородном распределении элементов на территории исследования. Аномальные содержания элементов, превышающие кларки, региональные фоновые концентрации и критерии санитарно-гигиенической оценки почв, зафиксированы вблизи карт-накопителей. Неоднородное распределение элементов, высокое содержание органического вещества и широкий диапазон значений pH почв указывают на техногенное преобразование их химического состава. На удалении от импактной зоны концентрации химических элементов в почвах снижаются. Установлено повсеместное загрязнение почв цинком, содержание которого выше регионального фона и санитарно-гигиенических нормативов как вблизи, так и на удалении от источника загрязнения. По суммарному показателю загрязнения антропогенно-преобразованные почвы на территории исследования преимущественно имеют допустимый уровень загрязнения. Вместе с тем зафиксированы умеренно опасный и опасный уровни загрязнения почв как вблизи, так и на удалении от карт-накопителей Солзанского полигона.

### Для цитирования

Гордеева О. Н. и др. Геоэкологическая оценка антропогенно-преобразованных почв в районе Солзанского полигона БЦБК (южное побережье оз. Байкал). Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 2. С. 253–264. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-2-253-264>.

## Geocological assessment of anthropogenically transformed soils in the Solzan landfill area of the Baikal Pulp and Paper Plant (Southern Coast of Lake Baikal)

Olga N. Gordeeva\*, Vera I. Poletaeva, Mikhail V. Pastukhov,  
Elena V. Chuparina, Evgeniy S. Fereferov

\*Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia;  
e-mail: [gordeeva@igc.irl.ru](mailto:gordeeva@igc.irl.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5406-1130>

### Article info

Received  
29.01.2026;

received  
in revised form  
19.02.2026;

accepted  
16.03.2026

### Key words:

soil,  
concentrations  
of elements,  
pollution,  
assess the level  
of soil contamination,  
coast of Lake Baikal

### Abstract

Large-scale environmental contamination caused by the Baikal Pulp and Paper Plant and its industrial waste determines the relevance of studying the chemical composition of abiotic and biotic components in the impact area of the anthropogenic source. The aim of the research is to investigate the chemical composition and assess the level of soil contamination in the Solzan landfill and adjacent areas, including the coastal area of Lake Baikal. The study has determined the concentrations of Hg, As, Pb, Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Mn, Sr, Ba, Rb, and TOC (total organic carbon) in soils near and far from the lignin sludge storage cell in the Solzan landfill. The obtained results show an extremely uneven distribution of elements across the study area. Abnormal element concentrations exceeding Clarke values, regional background concentrations, and soil sanitary and hygienic assessment criteria have been revealed near the lignin sludge storage cell. The uneven distribution of elements, high organic matter content, and wide range of pH values in the soils indicate an anthropogenic transformation of their chemical composition. The concentration of chemical elements in the soil decreases with distance from the impact area. Widespread soil contamination with zinc has been identified, with concentrations exceeding regional background levels and sanitary and hygienic standards both near and far from the source of contamination. According to the total pollution index, anthropogenically transformed soils in the study area mainly have an acceptable level of contamination. Nevertheless, moderately hazardous and hazardous levels of soil contamination have been detected both near and far from the Solzan landfill.

### For citation

Gordeeva, O. N. et al. 2026. Geocological assessment of anthropogenically transformed soils in the Solzan landfill area of the Baikal Pulp and Paper Plant (Southern Coast of Lake Baikal). *Vestnik of MSTU*, 29(2), pp. 253–264. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-2-253-264>.

## Введение

Значительные поступления органических и неорганических веществ антропогенного происхождения в окружающую среду по всему миру вызвали развитие научных исследований, направленных на выявление загрязненных территорий и проведение оценки качества абиотических и биотических компонентов экосистем (Горелова и др., 2020; Fang et al., 2025). К индикаторным компонентам, позволяющим выявлять проблемные в экологическом отношении территории, относится почвенный покров, который является средой, депонирующей загрязняющие вещества из различных точечных и диффузных источников (Li et al., 2018). Известно, что накопление веществ антропогенного происхождения в почвах особо опасно в связи с тем, что их естественное самоочищение происходит крайне медленно, а во многих случаях практически невозможно (Янин, 2014). Загрязняющие вещества, концентрируясь в верхнем слое почвы, встраиваются в трофические цепи и представляют угрозу для живых организмов, включая человека (Li et al., 2015).

Актуальность проведения исследований, направленных на изучение природных и антропогенных факторов, влияющих на состояние абиотических и биотических компонентов окружающей среды уникального оз. Байкал, не вызывает сомнения. Не менее важным является изучение геоэкологических процессов, протекающих на прилегающих к озеру территориях и способных оказать влияние на всю его экосистему. Для южной части оз. Байкал к таким территориям относится протяженная зона (от г. Байкальск до пос. Солзан), на которой негативные преобразования всех компонентов окружающей среды связаны с долговременной работой Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК). Запуск в эксплуатацию комбината осуществлен в 1966 г., а остановка его работы, имевшая место благодаря объединенным усилиям научного сообщества и общественных организаций, произошла только в 2013 г. Большой научно-общественный резонанс получила экологическая опасность Солзанского и Бабхинского полигонов БЦБК, оставшихся после закрытия комбината на побережье озера в нескольких десятках метров от уреза воды. Эти полигоны были предназначены для складирования техногенных отходов химического производства. Основная масса отходов складировалась на Солзанском полигоне, на котором с 1966 по 1976 гг. было сооружено 10 карт-накопителей. Помимо технического шлам-лигнина, образующегося в процессе целлюлозного производства, в эти карты поступали золошлаки от сжигания углей ТЭЦ (Чебыкин и др., 2020). Сейчас шлам-лигнин, в состав которого входят хлорорганические и полиароматические соединения (Сутурин и др., 2021; Вахромеев и др., 2022), представляет собой многокомпонентную коллоидную систему, содержащую различные токсичные вещества в твердом и растворенном состоянии.

В настоящее время часть исследований направлена на разработку проектов, позволяющих как можно безопасней провести ликвидацию накопленных техногенных отходов на полигонах БЦБК. Изучаются факторы, оказывающие влияние на экосистему озера, среди которых химический и микробиологический состав шлама и надшламовых вод карт-накопителей (Максимова и др., 2014; Мальник и др., 2017; Сутурин и др., 2021), концентрации загрязняющих веществ в воде (Афоница и др., 2015; Белозерцева и др., 2018), донных осадках (Никаноров и др., 2013; Халиков и др., 2023) и снеговом покрове (Сороковикова и др., 2015; Белозерцева и др., 2017; Чебыкин и др., 2018) оз. Байкал в зоне воздействия БЦБК.

Целью исследования является изучение распределения концентраций элементов и оценка уровня загрязнения антропогенно-преобразованных почв Солзанского полигона и прилегающих к нему территорий, включая прибрежную зону оз. Байкал.

## Материалы и методы

Район исследования территориально находится в пределах Иркутской области вблизи пос. Солзан. Солзанский полигон БЦБК расположен на побережье южной части оз. Байкал по обоим берегам его притока – р. Большая Осиновка. Общая площадь полигона составляет 138,09 га.

Объект исследования – загрязнение антропогенно-преобразованных почв вблизи карт-накопителей Солзанского полигона БЦБК (42 станции наблюдения), а также на удалении от них (13 станций наблюдений), включая побережье оз. Байкал и пос. Солзан (рис. 1).

Отбор образцов почв проведен в августе 2024 г. Глубина пробоотбора составляла 0–15 см, где наблюдаются основные, связанные с антропогенной нагрузкой, изменения физико-химических свойств. Пробоподготовка включала сушку почв до воздушно-сухого состояния, ситование до размера частиц меньше 2 мм и истирание.

Химический анализ образцов почв проведен в Центре коллективного пользования Института геохимии им. А. П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (ЦКП "Изотопно-геохимических исследований" ИГХ СО РАН), г. Иркутск. Для контроля аналитической точности химический анализ образцов почвы проводили в двух повторностях для всех химических элементов. Валовые концентрации Hg определены атомно-абсорбционным методом на спектрометре "РА-915+" с приставкой "РП-91С" (Lutех, Россия). Относительная погрешность измерений Hg в данном исследовании составляет 0,5–7 %. При анализе концентраций Hg в почвах использовали сертифицированные стандартные образцы СЧТ-3 (чернозем типичный), СДПС-2 (почва дерново-подзолистая супесчаная).

Методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) на спектрометре S4 Pioneer (Bruker, Германия) установлены содержания As, Pb, Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Mn, Sr, Ba, Rb. В зависимости от содержания

определяемого элемента относительные погрешности в данном исследовании составляли, % отн.: Cr (5–10), Mn (7–10), Co (12–14), Ni (5–12), Cu (4–10), Zn (2–10), As (5–15), Rb (5–10), Sr (6–11), Ba (10–15) и Pb (9–14). При определении концентраций As, Pb, Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Mn, Sr, Ba, Rb в почвах использовали сертифицированные стандартные образцы СП-1, СП-2, СП-3.



Рис. 1. Карта-схема точек отбора проб почв в зоне воздействия Солзанского полигона БЦБК  
Fig. 1. Location of soil sampling sites in the area of the Solzan Landfill of the Baikal Pulp and Paper Plant (BPPP)

Гравиметрическим методом определены потери при прокаливании (ППП). Величина рН определена в водном отфильтрованном растворе при помощи рН-метра "Эксперт-рН", концентрация  $S_{орг}$  – мокрым сжиганием по методу Тюрина<sup>1</sup>.

Статистическая обработка (минимум, максимум, среднее, медиана, стандартное отклонение (SD), корреляционные зависимости) данных выполнена с помощью программного обеспечения PASW Statistics 10.0 software.

Расчет индексов загрязнения. Для оценки загрязнения почв рассчитаны:

1) коэффициент концентрации ( $K_c$ ) – показатель кратности превышения содержаний химических элементов в каждой точке отбора проб над его содержанием на условно фоновом участке.  $K_c$  рассчитан по формуле (Саен и др., 1990)

$$K_c = \frac{C_i}{C_\phi},$$

где  $C_i$  – концентрация элемента в  $i$ -й точке отбора проб;  $C_\phi$  – фоновая концентрация элемента. В исследовании в качестве фоновой концентрации использован региональный фон, рассчитанный для почв территории Прибайкалья в работе (Гребенщикова и др., 2008);

2) суммарный показатель загрязнения почв ( $Z_c$ ) вредными веществами различных классов опасности определен как сумма коэффициентов концентрации отдельных компонентов загрязнения по формуле<sup>2</sup>

$$Z_c = \sum_{i=1}^n (K_{ci} \cdot K_{ti}) - (n-1),$$

где  $n$  – число определяемых компонентов,  $K_{ci}$  – коэффициент концентрации  $i$ -го элемента,  $K_{ti}$  – коэффициент токсичности  $i$ -го элемента.

<sup>1</sup> Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 488 с.

<sup>2</sup> СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. М., 2021. 496 с.

Для расчета использованы концентрации девяти элементов: ртуть, свинец, цинк, медь, кобальт, никель, хром, марганец, стронций.  $K_d$  для элементов 1-го класса опасности (Hg, Pb, Zn) принимался равным 1,5, для 2-го класса (Cu, Co, Ni, Cr) – 1, для 3-го класса (Mn, Sr) – 0,5 (*Ушакова и др., 2020*). В соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 суммарный показатель загрязнения почв < 16 показывает допустимый уровень загрязнения, от 16 до 32 – умеренно опасный уровень загрязнения, от 32 до 128 – опасный уровень загрязнения, > 128 – чрезвычайно опасный уровень загрязнения.

### Результаты и обсуждение

Значения ППП являются показателем органической части почвы, сгораемой при температуре выше 400 °С (помимо связанной и свободной воды, диоксида углерода из карбонатных минералов). По этой причине  $C_{орг}$  и ППП почв взаимосвязаны. Как показали результаты исследования (табл. 1), высокие концентрации  $C_{орг}$  (до 32,5 %) в исследованных почвах значительно превышают средние значения для типичных черноземов<sup>3</sup>. Высокие величины ППП (до 84 %) указывают на преимущественно техногенное происхождение органических компонентов почв. Количества  $C_{орг}$  и ППП в почвах территории БЦБК даже на удалении от импактной зоны снижаются незначительно. По-видимому, такое увеличение органических веществ связано с загрязнением почв шлам-лигнином – основным отходом производства БЦБК, в составе которого высока доля органики растительного происхождения.

Таблица 1. Концентрации  $C_{орг}$ , величины ППП и pH в почвах вблизи и на удалении от карт-накопителей Солзанского полигона БЦБК  
Table 1. Concentrations of  $C_{орг}$  (%), the losses on ignition (%) and pH values in the soils nearby and at a distance from the lignin sludge storage cell of the BPPP Solzan Landfill

Почва	$C_{орг}$	ППП	pH
Вблизи карт-накопителей	$13,2 \pm 9,2^*$	$35 \pm 24,5$	$5,9 \pm 0,88$
	1,6–32,5	9,4–84	4,6–7,8
На удалении от карт-накопителей	$10,0 \pm 6,0$	$25,9 \pm 14,7$	$5,4 \pm 0,8$
	3,1–21,5	8,9–54	4,6–6,9

Примечание. \* в числителе – средняя концентрация  $\pm$  SD, в знаменателе – минимальная и максимальная концентрации.

Значения pH почв вблизи карт-накопителей Солзанского полигона БЦБК находятся в пределах от средне-кислых (4,6) до слабо-щелочных (7,8), на удалении от них – от средне-кислых (4,6) до нейтральных (6,9) (табл. 1). Широкий диапазон pH почв связан с воздействием различных компонентов промышленных отходов БЦБК. Высокие концентрации органических компонентов, имеющих кислую реакцию из-за присутствия гумусовых кислот, приводят к подкислению почв. Подщелачивание некоторых образцов почв вблизи карт-накопителей обусловлено поступлением золошлаковых отходов ТЭЦ, сбрасываемых в карты-накопители комбината в разные годы (*Чебыкин и др., 2020*), а также использованием натрийсодержащих реагентов в производстве целлюлозы. В работе (*Белозерцева и др., 2025*) установлены высокие концентрации натрия в почвах вблизи отстойников БЦБК (до 1516 мг/кг). При этом его концентрации в почвах, удаленных от источника загрязнения, составляли 63–337 мг/кг.

В табл. 2 представлены основные статистические параметры концентраций химических элементов в антропогенно-преобразованных почвах вблизи карт-накопителей БЦБК, в табл. 3 – на удалении от источников загрязнения. Результаты исследования показывают, что содержания элементов на разных станциях наблюдения изменяются в широком диапазоне, что характерно для почв антропогенно-нагруженных территорий (*Wilding, 1985*). Высокая величина стандартного отклонения (SD) подтверждает неоднородность распределения химических элементов в почвах импактной зоны. Для Hg, Cu и Zn стандартное отклонение превышает средние и медианные значения. Максимальные концентрации Mn, As, Pb, Cu, Zn, Co, Ni и Cr зафиксированы в почвах вблизи карт-накопителей № 1–7. Наибольшие концентрации Hg и повышенные содержания As, Hg, Ni, Cr, Zn, Mn установлены в почвах вблизи карт № 8–10. При этом выявленные аномалии для каждого элемента в почвах носят локальный характер и зачастую не совпадают между собой.

Концентрации большинства химических элементов в почвах, удаленных от карт-накопителей БЦБК, закономерно снижаются. Исключением являются Sr, Ba, Rb, которые входят в состав минералов горных пород, слагающих приуроченный к территории исследования Ангаро-Витимский батолит (*Гребенищикова и др., 2009*). Максимальное накопление Ba и Sr происходит в удаленных от импактной зоны почвах, что с большой долей вероятности является естественным процессом. Более низкие концентрации этих элементов в районе источников загрязнения могут отражать трансформации, связанные с условиями формирования почвенного покрова. К таким условиям в техногенно-преобразованных ландшафтах относится частичное

<sup>3</sup> Национальный атлас почв Российской Федерации. М. : Астрель: АСТ, 2011. 632 с.

или полное срезание естественного почвенного профиля, перемешивание горизонтов, погребение почвенного профиля под минеральным и органическим материалом отходов производства.

Для выделения ассоциаций элементов, объединенных по источникам поступления, в почвах территории исследования сформирована матрица парных корреляций (табл. 4, 5). В матрице корреляций, построенной для элементов на удалении от Солзанского полигона, нет As, так как в основном его содержание в почве этого участка не превышает предела обнаружения РФА. Установлено, что Hg является единственным элементом, положительно коррелирующим с  $C_{орг}$  и ППП как в почвах вблизи карт-накопителей, так и на удалении от них. Максимальное накопление Hg,  $C_{орг}$  и высокие значения ППП обнаружены в почвах вблизи карт № 8–10. Значимые положительные корреляции отражают широко известное свойство ртути связываться с органическими компонентами почв (*Silva et al., 2025; Tian et al., 2025*). В то же время с ростом значений  $C_{орг}$  и ППП наблюдается тенденция уменьшения концентраций Cr, Mn, Sr, Ba, Rb как вблизи, так и на удалении от карт-накопителей БЦБК.

Таблица 2. Концентрации химических элементов в почвах вблизи карт-накопителей Солзанского полигона БЦБК ( $n = 42$ ), мг/кг

Table 2. Concentrations of chemical elements in the soils nearby the lignin sludge storage cell of the BPPP Solzan Landfill ( $n = 42$ ), mg/kg

Элемент	Среднее	SD	Медиана	Мин	Макс	Кларк <sup>1</sup>	РегФ <sup>2</sup>	ПДК/ОДК <sup>3</sup>
Hg	0,27	0,39	0,08	0,01	1,3	0,01	0,02	2,1/ –
As	7,1	6,1	5	< 10	38	4,0	–	–/2–10
Pb	28	25	20	13	145	5,0	10	–/32–130
Cu	80	91	46	22	430	20	46	–/33–132
Zn	219	815	87	21	5430	50	91	–/55–220
Co	21	12	18	10	62	10	17	–
Ni	50	21	49	20	110	50	43	–/20–80
Cr	99	48	100	36	287	190	98	–
Mn	908	518	953	172	3254	850	1200	1500/ –
Sr	255	154	240	38	800	300	208	–
Ba	463	187	540	91	690	400	–	–
Rb	33	16	39	10	55	50	–	–

Примечание. <sup>1</sup> Кларк (*Виноградов, 1957*); <sup>2</sup> РегФ – региональный фон (*Гребенщикова и др., 2008*); <sup>3</sup> Гигиенические нормативы<sup>4</sup>; прочерк – нет данных.

Таблица 3. Концентрации химических элементов в почвах, удаленных от карт-накопителей Солзанского полигона БЦБК ( $n = 13$ ), мг/кг

Table 3. Concentrations of chemical elements in the soils at a distance from the lignin sludge storage cell of the BPPP Solzan Landfill ( $n = 13$ ), mg/kg

Элемент	Среднее	SD	Медиана	Мин	Макс	Кларк <sup>1</sup>	РегФ <sup>2</sup>	ПДК/ОДК <sup>3</sup>
Hg	0,09	0,05	0,08	0,02	0,18	0,01	0,02	2,1/ –
As	–	–	–	< 10	< 10	4	–	–/2–10
Pb	23	11	19	14	46	5	10	–/32–130
Cu	38	18	34	20	83	20	46	–/33–132
Zn	163	232	104	40	890	50	91	–/55–220
Co	17	8	15	11	40	10	17	–
Ni	43	19	43	16	90	50	43	–/20–80
Cr	97	30	102	52	150	190	98	–
Mn	964	378	892	349	1790	850	1200	1500/ –
Sr	344	252	240	100	930	300	208	–
Ba	562	124	600	363	750	400	–	–
Rb	40	12	43	18	61	50	–	–

Примечание. См. таблицу 2.

Как в районе источника техногенного загрязнения, так и на удалении от него Hg отрицательно коррелирует с Mn, Sr, Ba, Rb (табл. 4), относящимся к группе пороодо- и почвообразующих элементов

<sup>4</sup> СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. М., 2021. 496 с.

и входящих в состав различных почвенных минералов. Корреляционный анализ показал отсутствие взаимосвязей между Hg и элементами, увеличение концентраций которых в окружающей среде зачастую связано с техногенным поступлением – As, Pb, Cu, Zn, Co, Ni, Cr. Эти элементы, объединенные между собой положительными коэффициентами корреляции, образуют в почвах вблизи карт-накопителей Солзанского полигона БЦБК ассоциацию технофильных элементов. Поступление их в окружающую среду связано как с производственными отходами БЦБК, так и с золошлаками ТЭЦ, образовавшимися при сжигании угля. Повышенные концентрации Cr, Co, Ni, Cu, Mn, Sr, а также соотносимые концентрации Ba и Rb в золах углей БЦБК, установленные ранее (Парадина и др., 2012), подтверждают влияние золошлаковых отходов на загрязнение почв импактной зоны. На удалении от источников загрязнения связи между выделенными в ассоциацию элементами не значимы (табл. 5). Помимо этого, в почвах, удаленных от карт-накопителей, установлено меньше значимых коэффициентов корреляции, что закономерно объясняется меньшей загрязненностью почв от техногенных объектов Солзанского полигона и, следовательно, увеличением влияния природных факторов на формирование химического состава почвенного покрова.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции элементов в почвах вблизи карт-накопителей БЦБК  
Table 4. Correlation coefficients of elements in soils nearby the lignin sludge storage cell of the BPPP

	Hg	As	Pb	Cu	Zn	Co	Ni	Cr	Mn	Sr	Ba	Rb	ППП	C <sub>орг</sub>	pH
Hg	1,00	-0,01	0,07	-0,07	-0,08	-0,32	-0,36	-0,35	<b>-0,52</b>	<b>-0,57</b>	<b>-0,84</b>	<b>-0,80</b>	<b>0,86</b>	<b>0,79</b>	<b>-0,44</b>
As		1,00	<b>0,44</b>	<b>0,64</b>	0,31	<b>0,60</b>	<b>0,65</b>	0,33	0,34	0,37	-0,05	-0,15	-0,01	0,00	0,39
Pb			1,00	<b>0,49</b>	0,17	0,34	<b>0,42</b>	0,34	0,27	0,12	-0,04	-0,20	0,06	0,08	0,23
Cu				1,00	<b>0,63</b>	<b>0,72</b>	<b>0,83</b>	<b>0,52</b>	<b>0,62</b>	<b>0,41</b>	-0,01	-0,22	-0,07	-0,03	<b>0,46</b>
Zn					1,00	0,09	<b>0,44</b>	0,34	<b>0,73</b>	0,39	0,04	-0,13	-0,05	0,02	0,28
Co						1,00	<b>0,78</b>	0,32	<b>0,41</b>	<b>0,52</b>	0,14	0,04	-0,25	-0,23	<b>0,43</b>
Ni							<b>1,00</b>	<b>0,70</b>	<b>0,65</b>	<b>0,47</b>	0,32	0,16	-0,36	-0,33	<b>0,45</b>
Cr								1,00	<b>0,50</b>	0,37	<b>0,51</b>	0,25	<b>-0,49</b>	<b>-0,46</b>	0,32
Mn									1,00	<b>0,72</b>	<b>0,51</b>	0,28	<b>-0,53</b>	<b>-0,46</b>	<b>0,52</b>
Sr										1,00	<b>0,48</b>	0,23	<b>-0,56</b>	<b>-0,52</b>	<b>0,49</b>
Ba											1,00	<b>0,84</b>	<b>-0,89</b>	<b>-0,85</b>	<b>0,48</b>
Rb												1,00	<b>-0,87</b>	<b>-0,85</b>	0,29
ППП													1,00	<b>0,99</b>	<b>-0,47</b>
C <sub>орг</sub>														1,00	<b>-0,46</b>
pH															1,00

Примечание. Жирным шрифтом выделены значимые ( $p < 0,01$ ) значения корреляции.

Таблица 5. Коэффициенты корреляции в почвах на удалении от карт-накопителей БЦБК  
Table 5. Correlation coefficients of elements in soils at a distance from the lignin sludge storage cell of the BPPP

	Hg	Pb	Cu	Zn	Co	Ni	Cr	Mn	Sr	Ba	Rb	ППП	C <sub>орг</sub>	pH
Hg	1,00	-0,03	-0,35	-0,22	-0,20	-0,47	-0,50	-0,37	-0,41	<b>-0,79</b>	-0,11	<b>0,72</b>	<b>0,70</b>	-0,26
Pb		1,00	0,63	0,68	0,00	0,22	0,12	-0,21	0,01	0,08	-0,11	-0,03	-0,13	0,67
Cu			1,00	<b>0,84</b>	0,51	0,61	0,35	0,15	0,43	0,25	-0,43	-0,12	-0,24	<b>0,90</b>
Zn				1,00	0,05	0,18	-0,02	-0,08	0,19	-0,01	-0,37	0,12	0,01	0,68
Co					1,00	0,61	0,34	0,52	<b>0,71</b>	0,38	-0,49	-0,14	-0,17	0,39
Ni						1,00	<b>0,89</b>	0,14	0,21	0,50	0,12	-0,51	-0,56	0,60
Cr							1,00	0,15	0,05	0,56	0,44	<b>-0,75</b>	<b>-0,78</b>	0,38
Mn								1,00	<b>0,84</b>	0,67	-0,30	-0,50	-0,49	0,05
Sr									1,00	0,59	-0,59	-0,32	-0,35	0,26
Ba										1,00	0,19	<b>-0,85</b>	<b>-0,84</b>	0,24
Rb											1,00	-0,40	-0,36	-0,32
ППП												1,00	<b>0,99</b>	-0,15
C <sub>орг</sub>													1,00	-0,26
pH														1,00

Примечание. Жирным шрифтом выделены значимые ( $p < 0,01$ ) значения корреляции.

Предельно и ориентировочно допустимые концентрации (ПДК, ОДК) являются одним из главных критериев санитарно-гигиенической оценки почв. В исследовании установлено, что в почвах вблизи карт-накопителей Солзанского полигона БЦБК максимальные концентрации большинства изученных химических

элементов превышают ОДК для почв (табл. 2). В соответствии с СанПиН 1.2.3685-21<sup>5</sup>, утверждающими гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности качества почв для человека, Hg и Mn нормируют по ПДК. В почвах территории исследования максимальные содержания Hg составляют 0,9 ПДК, Mn – 2,2 ПДК. Средние концентрации Zn близки к верхнему уровню диапазона значений ОДК, As, Cu и Ni – находятся в диапазоне значений ОДК. В почвах, удаленных от карт-накопителей, средние концентрации элементов снижаются, но максимальные значения Pb, Cu, Zn, Ni, Mn остаются выше критериев санитарно-гигиенической оценки почв или находятся в их диапазоне. Среди изучаемых элементов в почве всех территорий исследования особо выделяется превышение допустимых концентраций для цинка. Вблизи карт-накопителей БЦБК его максимальные концентрации выше порогового значения ОДК в 24 раза, на удалении от них – в 4 раза. Учитывая, что Zn, наряду с Cu, Ni и Pb, относится к числу приоритетных загрязняющих веществ для почв (Иванов и др., 2016), накопление этого элемента в почвенном покрове особо опасно для всех живых организмов, в том числе для проживающих на территории исследования местных жителей.

Оценка аккумуляции рассматриваемых элементов в антропогенно-преобразованных почвах зоны воздействия Солзанского полигона БЦБК, проведенная по среднему значению  $K_c$ , показала, что вблизи карт-накопителей уровни концентрирования элементов располагаются в следующем порядке: Hg (14) < Pb (3) < Cu, Zn (2) < Co, Ni, Cr, Mn, Sr (1).  $K_c$ , рассчитанный для максимальных концентраций элементов, более значителен: Hg (67) < Zn (60) < Pb (15) < Cu (9) < Co, Sr (4) < Cr, Mn, Ni (3). Ранжированный ряд средних значений  $K_c$  для концентраций элементов в почвах на удалении от карт-накопителей следующий: Hg (4) < Pb, Zn, Sr (2) < Cu, Co, Ni, Cr, Mn (1), ряд максимальных значений: Zn (10) < Hg (9) < Pb, Sr (5) < Cu, Co, Ni, Cr, Mn (2).

Расчет суммарного показателя загрязнения ( $Z_c$ ) показал, что образцы почвы вблизи карт-накопителей преимущественно имеют допустимый уровень загрязнения, 5 образцов почв – умеренно опасный уровень загрязнения, 10 образцов почв – опасный уровень загрязнения (рис. 2). Почвы на удалении от карт-накопителей характеризуются, в основном, допустимым уровнем загрязнения, отражая тенденцию к снижению техногенной нагрузки на окружающую среду. Исключением является точка наблюдения, расположенная вблизи железной дороги, в которой величина  $Z_c$  (24) определяет умеренно опасный уровень загрязнения.

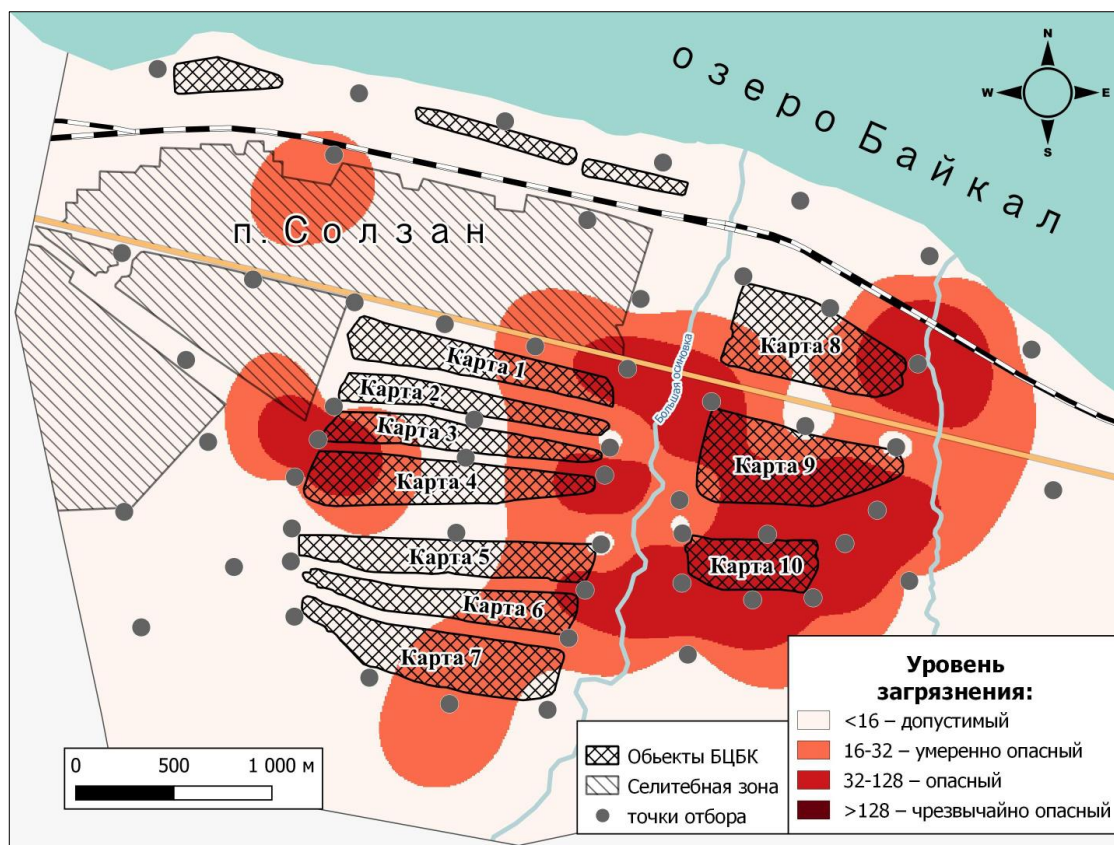


Рис. 2. Карта-схема суммарного загрязнения почв в зоне воздействия Солзанского полигона БЦБК  
Fig. 2. Map of total pollution of the soils in the area of the BPPP Solzan Landfill

<sup>5</sup> СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. М., 2021. 496 с.

Учитывая, что исследуемая территория расположена в селеопасном районе (Сутурин и др., 2021) и непосредственной близости к оз. Байкал, возникает потенциальная угроза смыва в водную экосистему отходов из карт-накопителей и загрязненного поверхностного слоя окружающих почв. Основным негативным экологическим фактором, влияющим на местное население исследуемого района, является атмосферный перенос загрязненных почвенных частиц из импактной зоны на территорию пос. Солзан и садоводств, окружающих полигон. В связи с этим, помимо ликвидации отходов Солзанского полигона БЦБК, необходимо проведение работ по рекультивации почв на участках, имеющих высокие уровни загрязнения токсичными элементами.

### **Заключение**

В работе представлено распределение концентраций Hg, As, Pb, Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Mn, Sr, Ba, Rb, а также  $C_{\text{орг}}$  и ППП в антропогенно-преобразованных почвах в зоне воздействия Солзанского полигона БЦБК. Установлено значительное обогащение органическими веществами и изменение в широком диапазоне значений pH почв, вызванное влиянием карт-накопителей полигона. Учитывая неоднородный состав шлам-лигнина, содержащего как собственно отходы производства БЦБК, так и золошлаковые отходы ТЭЦ, загрязнение почв территории исследования крайне контрастно. Аномальные концентрации Mn, As, Pb, Cu, Zn, Co, Ni и Cr зафиксированы в почвах вблизи карт-накопителей № 1–7, Hg и  $C_{\text{орг}}$  – вблизи карт-накопителей № 8–10. При этом выявленные аномалии элементов носят локальный характер и, как правило, не совпадают между собой территориально. На удалении от карт-накопителей концентрации большинства элементов снижаются, за исключением Sr, Ba, Rb, поступающих в почвы из горных пород и слагающих территорию исследования. Выделенные корреляционные зависимости показали взаимосвязь Hg с  $C_{\text{орг}}$  и ППП, обусловленные одновременным загрязнением территории ртутью и отходами производства с высоким содержанием органических компонентов. Взаимосвязи между As, Pb, Cu, Zn, Co и Ni вблизи карт-накопителей указывают на существование в почвах ассоциаций техногенного происхождения, причинами которых, в том числе, являются золошлаки ТЭЦ.

В результате геоэкологической оценки почв зоны воздействия карт-накопителей Солзанского полигона БЦБК установлены концентрации элементов, превышающие региональный фон, кларковые значения и ПДК/ОДК. Среди изученных элементов особо выделяется цинк, относящийся к элементам первого класса опасности. Его концентрации вблизи карт-накопителей достигают 24 ОДК, на удалении от них – 4 ОДК. Расчет суммарного показателя загрязнения показал преимущественно допустимый уровень загрязнения. Вместе с тем вблизи карт-накопителей на локальных участках установлен умеренно опасный и опасный уровень загрязнения. На удалении от карт-накопителей почвы характеризуются допустимым уровнем загрязнения, в одном образце зафиксирован умеренно опасный уровень загрязнения. Риск дальнейшего распространения поверхностным стоком и ветровым переносом загрязненных потенциально токсичными элементами почвенных частиц с территории Солзанского полигона в акваторию оз. Байкал и на населенные пункты указывает на необходимость проведения регулярного эколого-геохимического мониторинга и работ по рекультивации почв.

### **Благодарности**

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект "Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды").

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

- Афонина Т. Е., Коломина Т. М., Пономаренко Е. А., Слаута А. А. Оценка качества водных ресурсов в прибрежной части оз. Байкал и источники их загрязнения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 6(101). С. 37–43. EDN: UNRZRR.
- Белозерцева И. А., Воробьева И. Б., Власова Н. В. Современное состояние природной среды юго-западного побережья Байкала (Слюдянский район) // География и природные ресурсы. 2025. Т. 46, № 3. С. 67–81. DOI: <https://doi.org/10.15372/gipr20250307>. EDN: JTUFES.
- Белозерцева И. А., Воробьева И. Б., Власова Н. В., Гагаринова О. В. [и др.]. Экологическое состояние побережья озера Байкал и его влияние на загрязнение озера // Успехи современного естествознания. 2018. № 11. С. 85–95. EDN: YNWFIL.

- Белозерцева И. А., Воробьева И. Б., Власова Н. В., Лопатина Д. Н. [и др.]. Загрязнение снега на акватории оз. Байкал и прилегающей территории // Водные ресурсы. 2017. Т. 44, № 3. С. 340–353. DOI: <https://doi.org/10.7868/s032105961703004x>. EDN: YRWHQN.
- Вахромеев А. Г., Щербин С. А., Брагина О. А., Евдокименко Д. С. [и др.]. Способы утилизации и применения содержимого шламовых накопителей Байкальского целлюлозно-бумажного комбината для нужд нефтегазового комплекса Восточной Сибири // Химия в интересах устойчивого развития. 2022. Т. 30, № 4. С. 354–363. DOI: <https://doi.org/10.15372/khur2022390>. EDN: MNFGQU.
- Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М. : АН СССР, 1957. 238 с.
- Горелова С. В., Горбунов А. В., Ляпунов С. М., Окина О. И. [и др.]. Оценка воздействия крупной промышленной агломерации на загрязнение воздушной среды и почвы токсичными элементами (на примере г. Тулы) // Экология урбанизированных территорий. 2020. № 2. С. 6–20. DOI: 10.24411/1816-1863-2020-12006. EDN: SWZUPF.
- Гребенщикова В. И., Лустенберг Э. Е., Китаев Н. А., Ломоносов И. С. Геохимия окружающей среды Прибайкалья. Байкальский геоэкологический полигон. Новосибирск : Гео, 2008. 234 с.
- Гребенщикова В. И., Носков Д. А., Герасимов Н. С. Геохимия и условия формирования Ангаро-Витимского гранитоидного батолита (Прибайкалье) // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2009. № 3(39). С. 24–30. EDN: KVQQBF.
- Иванов С. А., Дмитриева О. Ф., Кульмакова Н. И., Дмитриев Ю. О. Загрязненность токсичными веществами почвы береговой зоны реки Волги в окрестностях Чебоксарской ГЭС // Экология человека. 2016. № 5. С. 3–8. DOI: <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2016-5-3-8>. EDN: VWSENV.
- Максимова Е. Н., Симонова Е. В. Оценка состояния шлам-лигнина БЦБК по санитарно-микробиологическим показателям // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 5–1. С. 35–38. EDN: SGIOAN.
- Мальник В. В., Сутурин А. Н. Разнообразие микроорганизмов, обитающих в шламонакопителях Байкальского целлюлозно-бумажного комбината // Acta Biologica Sibirica. 2017. Т. 3, № 3. С. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.14258/abs.v3i3.3613>. EDN: YMKYD.
- Никаноров А. М., Резников С. А., Матвеев А. А., Аракелян В. С. [и др.]. Загрязнение донных отложений оз. Байкал полициклическими ароматическими углеводородами // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2013. № 1. С. 105–117. EDN: PUWVIX.
- Парадина Л. Ф., Павлова Л. Ф., Чупарина Е. В., Пахомова Н. Н. [и др.]. Особенности состава зол углей ТЭЦ Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) // Современные проблемы геохимии : материалы Всероссийского совещания, посвященного 95-летию со дня рождения академика Л. В. Таусона, Иркутск, 22–26 октября 2012 года. Иркутск, 2012. В 3-х т. Т. 1. С. 223–226.
- Саэт Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П., Смирнова Р. С. [и др.]. Геохимия окружающей среды. М. : Недра, 1990. 335 с.
- Сороковикова Л. М., Синюкович В. Н., Нецветаева О. Г., Томберг И. В. [и др.]. Химический состав снеговых и речных вод юго-восточного побережья оз. Байкал // Метеорология и гидрология. 2015. № 5. С. 71–83. EDN: TRKYUB.
- Сутурин А. Н., Гончаров А. И., Дамбинов Ю. А., Куликова Н. Н. [и др.]. Ремедиация Солзанского полигона промтоходов Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25, № 2. С. 41–47. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-2-41-47>. EDN: TKXTEX.
- Ушакова Е. С., Караваева Т. И., Белкин П. А. Экологическое состояние почв промышленных территорий (на примере г. Березники, Пермский край): сравнение отечественных и зарубежных методов оценки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 10. С. 58–70. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/10/2850>. EDN: KAVBYZ.
- Халиков И. С., Лукьянова Н. Н. Особенности сезонного изменения концентрации ПАУ в донных осадках южного Байкала в районе г. Байкальска // Экологическая химия. 2023. Т. 32, № 2. С. 105–113. EDN: VZONKI.
- Чебыкин Е. П., Дамбинов Ю. А., Сутурин А. Н. Многоэлементный анализ надшламовых вод карт-накопителей Байкальского целлюлозно-бумажного комбината для выбора стратегии ремедиации территории // Вода и экология: проблемы и решения. 2020. № 4(84). С. 67–80. DOI: <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2020.25.4.67-80>. EDN: NAVTBZ.
- Чебыкин Е. П., Дамбинов Ю. А., Хахураев О. А., Сутурин А. Н. Источники поступления химических элементов в снежный покров береговой зоны поселка Листвянка (озеро Байкал) // География и природные ресурсы. 2018. № 3. С. 74–85. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(74-85). EDN: XYUICT.
- Янин Е. П. Ремедиация территорий, загрязненных химическими элементами: общие подходы, правовые аспекты, основные способы (зарубежный опыт) // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2014. № 3. С. 3–105. EDN: SBPIED.

- Fang S., Hua C., Yang J., Liu F. [et al.]. Combined pollution of soil by heavy metals, microplastics, and pesticides: Mechanisms and anthropogenic drivers // *Journal of Hazardous Materials*. 2025. Vol. 485. Article number: 136812. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136812>.
- Li G., Sun G.-X., Ren Y., Luo X.-S. [et al.]. Urban soil and human health: A review // *European Journal of Soil Science*. 2018. Vol. 69, Iss. 1. P. 196–215. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12518>.
- Li N., Kang Y., Pan W., Zeng L. [et al.]. Concentration and transportation of heavy metals in vegetables and risk assessment of human exposure to bioaccessible heavy metals in soil near a waste-incinerator site, South China // *Science of The Total Environment*. 2015. Vol. 521–522. P. 144–151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.081>.
- Silva G. H. M. C., Araújo P. R. M., Vieira C. B., Araujo J. K. S. [et al.]. The role of soil organic matter quality and mineralogy controlling the highest mercury concentration of the Brazilian mangroves // *Science of The Total Environment*. 2025. Vol. 975. Article number: 179274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179274>.
- Tian S., Wang X., Kaal J., Zhu S. [et al.]. Elevation-dependent soil organic matter persistence and molecular traits influence mercury storage in timberline ecotones // *Journal of Hazardous Materials*. 2025. Vol. 499. Article number: 140155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.140155>.
- Wilding L. P. Spatial variability: Its documentation, accommodation, and implication to soil surveys // *Soil Spatial Variability* / eds.: D. R. Nielsen, J. Bouma. Pudoc, Wageningen, The Netherlands, 1985. P. 166–194.

## References

- Afonina, T., Kolomina, T., Ponomarenko, E., Slauta, A. 2015. Water quality assessment in lake Baikal coastal areas and their pollution sources. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 6(101), pp. 37–43. EDN: UNRZRR. (In Russ.)
- Belozertseva, I. A., Vorobyeva, I. B., Vlasova, N. V. 2025. Current state of the natural environment of the Southwestern shore of Lake Baikal (Slyudyansky district). *Geography and Natural Resources*, 46(3), pp. 67–81. DOI: <https://doi.org/10.15372/gipr20250307>. EDN: JTUFES. (In Russ.)
- Belozertseva, I. A., Vorobeva, I. B., Vlasova, N. V., Gagarinova, O. V. et al. 2018. Ecological status of the coast of Lake Baikal and its influence on the lake pollution. *Advances in Current Natural Sciences*, 11, pp. 85–95. EDN: YNWFIL. (In Russ.)
- Belozertseva, I. A., Vorobyeva, I. B., Vlasova, N. V., Lopatina, D. N. et al. 2017. Snow pollution in Lake Baikal water area in nearby land areas. *Water Resources*, 44(3), pp. 340–353. DOI: <https://doi.org/10.7868/s032105961703004x>. EDN: YRWHQN. (In Russ.)
- Vakhromeev, A. G., Shcherbin, S. A., Bragina, O. A., Evdokimenko, D. S. et al. 2022. Methods of utilization and application of the contents of sludge storage facilities of the Baikal pulp and paper mill for the needs of the oil and gas complex of Eastern Siberia. *Chemistry for Sustainable Development*, 30(4), pp. 354–363. DOI: <https://doi.org/10.15372/khur2022390>. EDN: MNFGQU. (In Russ.)
- Vinogradov, A. P. 1957. Geochemistry of rare and dispersed chemical elements in soils. Moscow. (In Russ.)
- Gorelova, S. V., Gorbunov, A. V., Lyapunov, S. M., Okina, O. I. et al. 2020. Assessment of an industrial agglomeration impact on soil and air pollution with toxic elements (on the example of the Tula City). *Ecology of Urban Areas*, 2, pp. 6–20. DOI: 10.24411/1816-1863-2020-12006. EDN: SWZUPF. (In Russ.)
- Grebenschikova, V. I., Lustenberg, E. E., Kitaev, N. A., Lomonosov, I. S. 2008. Geochemistry of Baikal environmental. Baikal geoecological polygon. Novosibirsk. (In Russ.)
- Grebenschekova, V. I., Noskov, D. A., Gerasimov, N. S. 2009. Geochemistry and formation conditions of Angaro-Vitimskii granitoid batholite (Pribaikalje). *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 3(39), pp. 24–30. EDN: KVQQBF. (In Russ.)
- Ivanov, S. A., Dmitrieva, O. F., Kulmakova, N. I., Dimitriev, Yu. O. 2016. Soil pollution from toxins of the Volga river shoreland in the area of Cheboksary hydropower station. *Human Ecology*, 5, pp. 3–8. DOI: <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2016-5-3-8>. EDN: VWSENV. (In Russ.)
- Maximova, E. N., Simonova, E. V. 2014. Assessment of the state of sludge-lignin of the Baikalsk pulp and paper mill according to sanitary and microbiological indicators. *Current Issues in the Humanities and Natural Sciences*, 5–1, pp. 35–38. EDN: SGIOAN. (In Russ.)
- Malnik, V. V., Suturin, A. N. 2017. The diversity of microorganisms inhabiting the sludge tanks of Baikalsk pulp and paper plant (BPPP). *Acta Biologica Sibirica*, 3(3), pp. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.14258/abs.v3i3.3613>. EDN: YMKYYD. (In Russ.)
- Nikanorov, A. M., Reznikov, S. A., Matveev, A. A., Arakelian, V. S. et al. 2013. Pollution of the sediments of Lake Baikal by polycyclic aromatic hydrocarbons. *Regional Research of Russia*, 1, pp. 105–117. EDN: PUWVIX. (In Russ.)
- Paradina, L. F., Pavlova, L. F., Chuparina, E. V., Pakhomova, N. N. et al. 2012. Features of the composition of coal ash from the thermal power plant of the Baikal Pulp and Paper Plant (BPPP). Materials of the All-Russian conf. *Modern Problems of Geochemistry*, Irkutsk, 22–26 October, 2012. Irkutsk, 2012. Vol. 1, pp. 223–226. (In Russ.)

- Sayet, Yu. E., Revich, B. A., Yanin, E. P., Smirnova, R. S. et al. 1990. Environmental geochemistry. Moscow. (In Russ.)
- Sorokovikova, L. M., Sinyukovich, V. N., Netsvetaeva, O. G., Tomberg, I. V. et al. 2015. Chemical composition of snow water and river water on the Southeastern shore of Lake Baikal. *Russian Meteorology and Hydrology*, 5, pp. 71–83. EDN: TRKYIB. (In Russ.)
- Suturin, A. N., Goncharov, A. I., Dambinov, Yu. A., Kulikova, N. N. et al. 2021. Remediation of the Solzan industrial waste landfill at the Baikal Pulp and Paper Mill (BPPM). *Ecology and Industry of Russia*, 25(2), pp. 41–47. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-2-41-47>. EDN: TKXTEX. (In Russ.)
- Ushakova, E. S., Karavaeva, T. I., Belkin, P. A. 2020. Ecological condition of soils in industrial areas (as in the case of Berezniki, Perm Region): Comparison of Russian and foreign methods of assessment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. GEO Assets Engineering*, 331(10), pp. 58–70. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/10/2850>. EDN: KABBYZ. (In Russ.)
- Khalikov, I. S., Lukyanova, N. N. 2023. Features of seasonal changes in PAH concentration in bottom sediments of Southern Baikal in the area of the city of Baikalsk. *Ecological Chemistry*, 32(2), pp. 105–113. EDN: BZOHKI. (In Russ.)
- Chebykin, E. P., Dambinov, Yu. A., Suturin, A. N. 2020. Multi-element analysis of above-sludge waters in the accumulation cells of Baikalsk pulp and mill for territory remediation strategy choosing. *Water and Ecology*, 4(84), pp. 67–80. DOI: <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2020.25.4.67-80>. EDN: NABTBZ. (In Russ.)
- Chebykin, E. P., Dambinov, Yu. A., Khakhuraev, O. A., Suturin, A. N. 2018. Sources of chemical elements in the snow cover in the shore zone of the settlement of Listvyanka (Lake Baikal). *Geography and Natural Resources*, 3, pp. 74–85. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(74-85). EDN: XYUICT. (In Russ.)
- Yanin, E. P. 2014. Remediation of the territories contaminated with chemical elements: general approaches, legal aspects, main methods (foreign experience). *Environmental and Natural Resource Issues*, 3, pp. 3–105. EDN: SBPIED. (In Russ.)
- Fang, S., Hua, C., Yang, J., Liu, F. et al. 2025. Combined pollution of soil by heavy metals, microplastics, and pesticides: Mechanisms and anthropogenic drivers. *Journal of Hazardous Materials*, 485. Article number: 136812. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136812>.
- Li, G., Sun, G.-X., Ren, Y., Luo, X.-S. et al. 2018. Urban soil and human health: A review. *European Journal of Soil Science*, 69(1), pp. 196–215. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12518>.
- Li, N., Kang, Y., Pan, W., Zeng, L. et al. 2015. Concentration and transportation of heavy metals in vegetables and risk assessment of human exposure to bioaccessible heavy metals in soil near a waste-incinerator site, South China. *Science of The Total Environment*, 521–522, pp. 144–151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.081>.
- Silva, G. H. M. C., Araújo, P. R. M., Vieira, C. B., Araujo, J. K. S. et al. 2025. The role of soil organic matter quality and mineralogy controlling the highest mercury concentration of the Brazilian mangroves. *Science of The Total Environment*, 975. Article number: 179274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179274>.
- Tian, S., Wang, X., Kaal, J., Zhu, S. et al. 2025. Elevation-dependent soil organic matter persistence and molecular traits influence mercury storage in timberline ecotones. *Journal of Hazardous Materials*, 499. Article number: 140155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.140155>.
- Wilding, L. P. 1985. Spatial variability: Its documentation, accommodation, and implication to soil surveys. In *Soil Spatial Variability*. Eds.: D. R. Nielsen, J. Bouma. Pudoc, Wageningen, The Netherlands, pp. 166–194.

#### Сведения об авторах

**Гордеева Ольга Николаевна** – ул. Фаворского, 1А, г. Иркутск, Россия, 664033;  
Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, канд. геол.-минерал. наук, науч. сотрудник;  
e-mail: [gordeeva@igc.irk.ru](mailto:gordeeva@igc.irk.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5406-1130>

**Olga N. Gordeeva** – 1A Favorsky Str., Irkutsk, Russia, 664033;  
Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Dr Sci. (Geol.&Miner.), Researcher;  
e-mail: [gordeeva@igc.irk.ru](mailto:gordeeva@igc.irk.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5406-1130>

**Поletaева Вера Игоревна** – ул. Фаворского, 1А, г. Иркутск, Россия, 664033;  
Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, д-р геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник;  
e-mail: [alieva@igc.irk.ru](mailto:alieva@igc.irk.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3139-5864>

**Vera I. Poletaeva** – 1A Favorsky Str., Irkutsk, Russia, 664033;  
Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Dr Sci. (Geol.&Miner.), Senior Researcher;  
e-mail: [alieva@igc.irk.ru](mailto:alieva@igc.irk.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3139-5864>

**Пастухов Михаил Владимирович** – ул. Фаворского, 1А, г. Иркутск, Россия, 664033;  
Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник;  
e-mail: mpast@igc.irk.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1078-7145>

**Mikhail V. Pastukhov** – 1A Favorsky Str., Irkutsk, Russia, 664033;  
Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher;  
e-mail: mpast@igc.irk.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1078-7145>

**Чупарина Елена Владимировна** – ул. Фаворского, 1А, г. Иркутск, Россия, 664033;  
Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник;  
e-mail: lchup@igc.irk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4093-5348>

**Elena V. Chuparina** – 1A Favorsky Str., Irkutsk, Russia, 664033;  
Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Cand. Sci. (Chemistry), Senior Researcher;  
e-mail: lchup@igc.irk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4093-5348>

**Фереферов Евгений Сергеевич** – ул. Лермонтова, 134, г. Иркутск, Россия, 664033;  
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН,  
канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник;  
e-mail: fereferov@icc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7316-444X>

**Evgeniy S. Fereferov** – 134 Lermontov Str., Irkutsk, Russia, 664033;  
Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS,  
Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher;  
e-mail: fereferov@icc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7316-444X>