



ГЕОЭКОЛОГИЯ/GEOECOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.8> EDN: REVILL**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЧВОГРУНТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ОТХОДОВ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ФИТОТОКСИЧНОСТЬ ЗЕМЕЛЬ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ПРИ ИХ РЕКУЛЬТИВАЦИИ**

Научная статья

Шатрова А.С.^{1,*}, Богданов А.В.², Немчинова Н.В.³, Коновалов Н.П.⁴¹ ORCID : 0000-0001-8054-1680;² ORCID : 0000-0002-7519-1126;³ ORCID : 0000-0001-9895-1709;⁴ ORCID : 0000-0001-6786-2711;^{1, 2, 3, 4} Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (shatrova.irk[at]gmail.com)

Аннотация

Целью статьи является исследование влияния почвогрунтов-сорбентов из вымороженных лигнинсодержащих осадков ОАО «Байкальский ЦБК» на миграцию токсичных компонентов в растения при рекультивации загрязненных тяжелыми металлами техногенных грунтов. Испытания проводились на двух участках промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент». Загрязненный почвогрунт опытных делян обрабатывался различными способами, при этом на контрольные и обработанные деляны высаживалось просо посевное. Для оценки динамики поглощения растениями тяжелых металлов использовался коэффициент биологического поглощения (КБП), для установления специфики растений в поглощении тяжелых металлов рассчитывали коэффициент биогeoхимической подвижности (КБХП).

Исследования показали, что наиболее оптимальным является рекультивация почвогрунтов со средней степенью загрязнения тяжелыми металлами посредством их совместной обработки полученным почвогрунтом-сорбентом и гуматами в соотношении 10:1:0,2, что позволяет значительно снизить степень подвижности тяжелых металлов, их поступление и накопление в биомассе растений, а также увеличить биомассу растений без снижения их защитной барьерной функции.

Ключевые слова: тяжелые металлы, рекультивация, почвогрунт-сорбент, лигнинсодержащие осадки, коэффициент биологического поглощения.

A STUDY OF THE EFFECT OF SOIL-GROUND DERIVED FROM PULP AND PAPER INDUSTRY WASTE ON THE PHYTOTOXICITY OF LAND CONTAMINATED WITH HEAVY METALS DURING ITS RECULTIVATION

Research article

Shatrova A.S.^{1,*}, Bogdanov A.V.², Nemchinova N.V.³, Konovalov N.P.⁴¹ ORCID : 0000-0001-8054-1680;² ORCID : 0000-0002-7519-1126;³ ORCID : 0000-0001-9895-1709;⁴ ORCID : 0000-0001-6786-2711;^{1, 2, 3, 4} Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

* Corresponding author (shatrova.irk[at]gmail.com)

Abstract

The aim of the article is to study the effect of sorbent soil-grounds derived from frozen lignin-containing sediments of "Baikal PPM" OJSC on the migration of toxic components into plants during the recultivation of technogenic soils contaminated with heavy metals. The tests were carried out on two plots of the industrial site of the former 'Vostsibelement' battery manufacturing plant. The contaminated soil of the experimental plots was treated using various methods, with brown millet being planted on both the control and treated plots. The biological absorption coefficient (BAC) was used to evaluate the dynamics of heavy metal uptake by plants, while the biogeochemical mobility coefficient (BMC) was calculated to determine the specific characteristics of plants in heavy metal uptake.

Studies have shown that the most optimal method is the recultivation of soil-grounds with a moderate degree of heavy metal contamination by treating it with a mixture of the obtained sorbent soil and humates in a ratio of 10:1:0, which significantly reduces the mobility of heavy metals, their uptake and accumulation in plant biomass, and increases plant biomass without compromising their protective barrier function.

Keywords: heavy metals, recultivation, sorbent soil-ground, lignin-containing sediments, biological absorption coefficient.

Введение

Особое внимание на сегодняшний день уделено проблемам восстановления нарушенных земель. Под нарушенными понимаются земли, утратившие хозяйственную ценность или загрязняющие окружающую среду в результате производственной деятельности, природных катаклизмов или других воздействий, например, карьеры,



отвалы, свалки, эрозия и техногенные провалы. Их рекультивация — восстановление в состояние, пригодное для их использования, в том числе путем устранения последствий загрязнения почвы, является обязательным процессом.

В России нарушенные земли характерны для всех категорий земель — более 40% составляют земли промышленности, а нарушенные земли сельскохозяйственного назначения составляют 19,1%, что определяет потери сельского хозяйства [1]. Только на территории Иркутской области зафиксирована площадь нарушенных земель, которая составляет 22,8 тыс. га. Наибольшая площадь нарушенных земель была выявлена на землях лесного фонда — 11 тыс. га (заготовка древесины, лесные пожары) и землях промышленности, транспорта, связи, и иного специального назначения — 10,4 тыс. га (предприятия горнодобывающей, угольной и металлургической промышленности) [2]. Промышленные центры Прибайкалья сформировали зоны загрязненных тяжёлыми металлами почв в таких крупных промышленных городах, как Братск (алюминиевый завод, завод ферросплавов), МО «г. Свирск» (бывший металлургический и аккумуляторный заводы), Иркутск (строительные, машиностроительные заводы), Черемхово (заводы тяжелого машиностроения, механический, химический, а также добыча угля открытым способом). Стоит отметить, что наиболее сложной проблемой, препятствующей проведению рекультивации земель, нарушенных в ходе деятельности таких предприятий, является их аномально высокое загрязнение тяжёлыми металлами.

Одним из крупнейших аномальных источников загрязнения почв тяжёлыми металлами является промплощадка бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент», расположенная в природно-техногенном комплексе района верхней части Братского водохранилища МО «г. Свирск» Иркутской области. На промплощадке бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент», площадью 33 га находятся развалины цехов (более — 100 тыс. куб. м.), загрязнённый техногенный почвогрунт (110 тыс. куб. м) и неустановленные отходы (около 20 тыс. куб. м.). При этом превышение ПДК в почве по подвижным формам меди составило более 80 ПДК, цинка более 20 ПДК, а основного токсичного компонента — свинца — в более чем 1500 ПДК [3].

Таким образом, крайне актуальной задачей является поиск способов рекультивации почв, загрязнённых аномально высокими концентрациями тяжёлых металлов. Одним из таких способов может являться использование вымороженных лигнинсодержащих осадков целлюлозно-бумажной промышленности в качестве сорбентов в отношении тяжёлых металлов с целью их иммобилизации [4]. Однако при этом необходимо учитывать не только химические и агрохимические показатели рекультивируемых земель и сорбента, но и влияние технологии рекультивации на миграцию токсичных компонентов в растения.

Методы и принципы исследования

С апреля по ноябрь 2025 г. аккредитованной лабораторией экологического мониторинга природных и техногенных сред ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» совместно с администрацией МО «г. Свирск» были выполнены опытно-промышленные испытания рекультивации нарушенных земель промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» с использованием почвогрунта-сорбента, полученного из отходов ОАО «Байкальский ЦБК» [4]. Применяемый почвогрунт-сорбент соответствует ГОСТ 54534-2011 «Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель» и ГОСТ Р 54651-2011 «Удобрения органические на основе осадков сточных вод. Технические условия» и содержит большое количество необходимых для растений питательных элементов (N, P, K) и органического вещества. Ранее были изучены сорбционные свойства полученного почвогрунта, которые подтвердили его эффективность в отношении иммобилизации тяжёлых металлов [4]. Испытания проводились на двух наиболее типичных для промплощадки участка — высокозагрязнённый тяжёлыми металлами почвогрунт третьего класса опасности (участок № 1) и почвогрунт со средней степенью загрязнения тяжёлыми металлами четвертого класса опасности (участок № 2) на рис. 1.

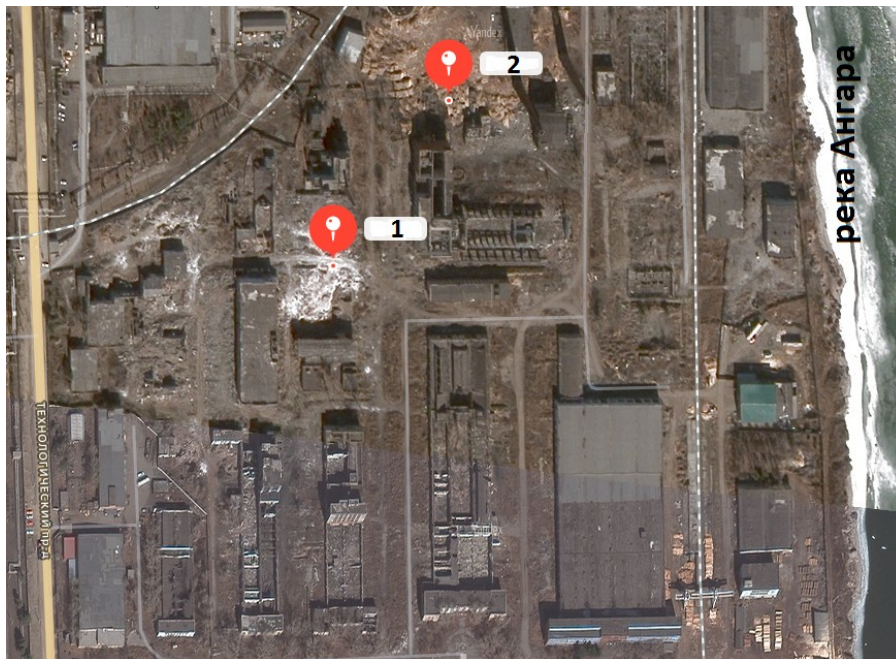


Рисунок 1 - Космический снимок территории промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент», МО «г. Свирск» Иркутской области: 1 – участок № 1; 2 – участок № 2
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.8.1>

Примечание: составлено авторами из космического снимка Яндекс

Загрязненный почвогрунт опытных делян промплощадки был обработан тремя различными способами:

- обработка полученным почвогрунтом-сорбентом в соотношении 1:0,1 (П);
- обработка раствором гумата (1:0,05) (Г);
- совместная обработка полученным почвогрунтом-сорбентом и гуматами в соотношения 10:1:0,2 (П+Г).

Также, на контрольные и обработанные деляны высаживалось просо посевное (*Panicum miliaceum*).

Определение валовых форм металлов в загрязненном почвогрунте и золе растений осуществлялось согласно методики ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 «Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой». Определение подвижных форм металлов в почве осуществлялось согласно ПНД Ф 16.1:2.3:3.50-08 «Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовых долей подвижных форм металлов (цинка, меди, никеля, марганца, свинца, кадмия, хрома, железа, алюминия, титана, кобальта, мышьяка, ванадия) в почвах, отходах, компостах, кеках, осадках сточных вод атомно-эмиссионным методом с атомизацией в индуктивно-связанной аргоновой плазме».

Для оценки динамики поглощения растениями тяжелых металлов использовался коэффициент биологического поглощения (КБП), который показывает, во сколько раз содержание элемента в золе растения больше, чем в подстилающей его косной среде (почва, техногенно преобразованный грунт, горная порода) [5]. Стоит отметить, что по величине этого коэффициента Б.Б. Полюновым и А.И. Перельманом [6], [7] были построены ряды биологического поглощения токсикантов, характеризующиеся различной интенсивностью, от энергичного накопления до очень слабого захвата. По интенсивности биологического поглощения все элементы были разделены на четыре группы:

- первая группа — элементы энергичного накопления (КБП = 10–100);
- вторая группа — сильного накопления (КБП = 1–10);
- третья группа — слабого накопления и среднего захвата (КБП = 0,1–1);
- четвертая группа — элементы слабого и очень слабого захвата (КБП = 0,001–0,1).

На основе значений КБП для количественного выражения общей способности растений к концентрированию тяжелых металлов рассчитывали биогеохимическую активность (БХА), которая показывает суммарную степень поглощения всех определяемых в растении химических элементов, т.е. насколько активно растение поглощает химические элементы из почвы и рассчитывается как сумма КБП по всем исследуемым элементам.

Для установления специфики растений в поглощении тяжелых металлов также рассчитывали коэффициент биогеохимической подвижности (КБХП) (индекс аккумуляции – количественный показатель перехода химических элементов из почвы в растение), который точнее отражает реальную биодоступность элементов и определяется как отношение содержания элемента в золе растений к содержанию подвижных форм данного элемента в почве. Для расчета фоновых значений КБП и КБХП была отобрана фоновая проба почвы, не подверженная воздействию источников загрязнения, на которой также был выращен просо посевное.



Основные результаты

В табл. 1 приведены полученные результаты по содержанию тяжелых металлов в исследуемых объектах — участок № 1 (У-1), участок № 2 (У-2) и золе растений, а также в фоновой пробе почвы (Ф). Также в таблице приведены значения КБП, БХА, КБХП и ΣКБХП с указанием рядов содержания металлов.



Таблица 1 - Содержание тяжелых металлов и КБП/КБХП в исследуемых объектах

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.8.2>

Объект исследований		Содержание металлов в образцах, мг/кг							Ряды содержаний
		Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	
У-1	зола растений	23,1	67,6	4773	565	25,6	831	310	Fe>Pb>Mn>Zn>Cu>Ni>Cr
	почва (валовые формы)	906	606	81720	1650	147	42710	273	Fe>Pb>Mn>Cr>Cu>Zn>Ni
	почва (подвижные формы)	1,9	284	710	252	26,1	29300	117	Pb>>Fe>Cu>Mn>Zn>Ni>Cr



Объект исследований		Содержание металлов в образцах, мг/кг							Ряды содержаний
		Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	
	КБП	0,03	0,11	0,06	0,34	0,17	0,02	1,1	Zn>Mn>Ni>Cu >Fe>Cr>Pb (БХА = 1,8)
	КБХП	12,2	0,24	6,7	2,2	0,98	0,03	2,6	Cr>Fe>Zn>Mn> >Ni>Cu>Pb (ΣКБХП = 25)
У-2	зола растений	5,7	72,6	2276	260	11,2	167	333	Fe>Mn>Zn>Pb> Cu>Ni>Cr
	почва (валовые формы)	101	56,4	35100	927	47,6	1435	201	Fe>Pb>Mn>Zn> Cr>Cu>Ni



Объект исследований		Содержание металлов в образцах, мг/кг							Ряды содержаний
		Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	
	почва (подвижные формы)	0,16	0,3	9,6	89,7	0,30	620	24	Pb>Mn>Zn>Fe> Cu=Ni>Cr
	КБП	0,06	1,3	0,06	0,28	0,24	0,12	1,7	Zn>Cu>Mn>Ni >Pb>Fe>Cr (БХА = 3,8)
	КБХП	35,6	242	237	2,9	37,3	0,27	13,9	Cu>Fe>Ni>Cr> Zn>Mn>Pb (ΣКБХП = 569)
Ф	зола растений	2,4	7,6	412	175	1,4	1,5	32	Fe>Mn>Zn>Cu >Cr>Pb>Ni



Объект исследований		Содержание металлов в образцах, мг/кг							Ряды содержаний
		Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	
	почва (валовые формы)	80	46	32201	908	42	14	59	Fe>Mn>Cr>Zn> Cu>Ni>Pb
	почва (подвижные формы)	0,3	0,4	112	87,1	0,1	0,9	1,6	Fe>Mn>Zn>Pb> Cu>Cr>Ni
	КБП	0,03	0,17	0,013	0,19	0,03	0,11	0,54	Zn>Mn>Cu>Pb >Cr>Ni>Fe (БХА = 1,1)
	КБХП	8,0	19,0	3,7	2,0	14	1,7	20,0	Zn>Cu>Ni>Cr> Fe>Mn>Pb (ΣКБХП = 68)



Как видно из таблицы 1, наиболее загрязненным является участок № 1 с превышением свинца до 1335 ОДК, меди 18,4 ОДК, никеля 7,4 ОДК, цинка 5,0 ОДК. Участок № 2 также существенно загрязнен тяжелыми металлами — свинца до 45 ОДК, цинка 3,7 ОДК, никеля 2,4 ОДК, меди 1,7 ОДК. При этом ряд содержания металлов в фоновой почве имеет следующий вид Fe>Mn>Cr>Zn>Cu>Ni>Pb, что является типичным распределением для незагрязненных почв. Для загрязненных участков № 1 и № 2 ряд содержания металлов имеет следующий вид: Fe>Pb>Mn>Cr>Cu>Zn>Ni и Fe>Pb>Mn>Zn>Cr>Cu>Ni соответственно, что говорит об аномально высоком в них содержании свинца. При этом содержание свинца в золе растений превышает фоновые значения на участках № 1 и № 2 в 554 и 111 раз соответственно, меди в 8,9 и 9,6 раз соответственно, цинка в 9,7 и 10,4 раз соответственно, никеля в 18,3 и 8 раз соответственно, хрома в 9,6 и 2,4 раз соответственно.

Как видно из таблицы 1, значение БХА участка № 2 в 3,5 раза выше фонового, что говорит об активном поглощении растениями тяжелых металлов, содержащихся в почвогрунтах участка № 2. При этом относительно низкое значение БХА участка № 1 может говорить о том, что на данном участке ввиду аномального содержания тяжелых металлов срабатывают биохимические защитные механизмы, которые снижают избыточное поступление ТМ в растения, что подтверждается исследованиями различных авторов [8], [9], [10].

Как видно из таблицы 1, элементом сильного накопления (КБП > 1) в загрязненных почвогрунтах является цинк, а также медь на участке № 2. По содержанию подвижных форм тяжелых металлов, как и в случае с валовым содержанием, наиболее загрязненным является участок № 1 с превышением свинца 4883 ПДК, меди до 94,7 ПДК, никеля до 6,5 ПДК, цинка до 5,1 ПДК. Участок № 2 также существенно загрязнен подвижными формами свинца — до 103 ПДК. При этом ряд содержаний подвижных форм тяжелых металлов фоновой пробы (Fe>Mn>Zn>Pb>Cu>Cr>Ni) имеет типичное распределение содержания металлов, тогда как в исследуемых загрязненных почвогрунтах наблюдается несвойственное почвам нахождение свинца в начале ряда.

Как видно из таблицы 1, в ряду КБХП, как в фоновой пробе, так и в загрязненных почвогрунтах свинец находится в конце ряда и значения КБХП по свинцу в загрязненных пробах участка № 1 и №2 значительно ниже значений КБПХ фоновой почвы — в 56,7 и 6,3 раз соответственно. Это может быть объяснено тем, что растения вырабатывают барьерные механизмы, препятствующие высокому поглощению и дальнейшему накоплению тяжелых металлов, особенно таких особо токсичных, как свинец в своей наземной части. Так как почвогрунт участка № 1 значительно загрязнен тяжелыми металлами, то наблюдается схожая с КБП картина — значение ΣКБХП участка даже ниже ΣКБХП фона за счет барьерной защиты растений. Аналогичные результаты были получены другими авторами [8], [9], [10]. Однако ΣКБХП участка № 2 со средней степенью загрязнения превышает фон в 8,8 раз.

В ранее проведенных исследованиях, авторами было установлено, что для аномально загрязненных участков целесообразно предварительное применение воздушной сепарации тонкодисперсных частиц металлического свинца, содержание которого в почвогрунте достигает более 5% [11]. Тогда как на почвогрунтах, со средней и низкой степенью загрязнения наиболее эффективна рекультивация полученным почвогрунтом-сорбентом [4].

В табл. 2 приведены результаты по расчету КБП и КБХП на делянках участка № 2 после их рекультивации обработкой тремя различными способами: 1 — обработка полученным почвогрунтом-сорбентом в соотношении 1:0,1 (П), 2 — обработка раствором гумата (1:0,05) (Г), 3 — совместная обработка полученным почвогрунтом-сорбентом и гуматами в соотношения 10:1:0,2 (П+Г).



Таблица 2 - Содержание тяжелых металлов и КБП/КБХП в исследуемых объектах после рекультивации

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.8.3>

Объект исследований		Содержание металлов в образцах, мг/кг							Ряды содержаний
		Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	
П	зола растений	6,2	60,1	4250	405	9,6	85,4	175	Fe>Mn>Zn>Cu >Pb>Cr>Ni
	почва (валовые формы)	110	71,3	35360	893	51,2	1102	212	Fe>Pb>Mn>Zn> Cr>Cu>Ni
	почва (подвижные формы)	2,5	0,4	20,5	75,2	51,2	103	19	Pb>Mn>Ni>Fe> Zn>Cr>Cu



Объект исследований		Содержание металлов в образцах, мг/кг							Ряды содержаний
		Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	
	КБП	0,06	0,84	0,12	0,45	0,19	0,08	0,83	Cu>Zn>Mn>Ni >Fe>Pb>Cr (БХА = 2,6)
	КБХП	2,5	150	207	5,4	0,19	0,83	9,2	Fe>Cu>Zn>Mn >Cr>Pb>Ni (ΣКБХП = 375)
Г	зола растений	3,8	80,1	3950	338	8,4	309	502	Fe>Zn>Pb>Mn> Cu>Ni>Cr
	почва (валовые формы)	93	63,7	38970	963	50,0	1370	208	Fe>Pb>Mn>Zn> Cr>Cu>Ni



Объект исследований		Содержание металлов в образцах, мг/кг							Ряды содержаний
		Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	
	почва (подвижные формы)	0,9	0,5	21,2	69,8	50,0	136	18	Pb>Mn>Ni>Fe> Zn>Cr>Cu
	КБП	0,04	1,3	0,10	0,35	1,7	0,23	2,4	Zn>Ni>Cu>Mn >Pb>Fe>Cr (БХА = 6,6)
	КБХП	4,2	160	186	4,8	0,17	2,3	27,9	Fe>Cu>Zn>Mn >Cr>Pb>Ni (ΣКБХП = 385)
П+Г	зола растений	5,7	55,3	3618	287	8,5	80,3	183	Fe>Zn>Mn>Pb> Cu>Ni>Cr



Объект исследований		Содержание металлов в образцах, мг/кг							Ряды содержаний
		Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	
	почва (валовые формы)	109	65,8	34470	984	50,4	1250	226	Fe>Pb>Mn>Zn>Cr>Cu>Ni
	почва (подвижные формы)	0,7	0,4	28,4	70,1	50,4	105	16	Pb>Mn>Ni>Fe>Zn>Cr>Cu
	КБХП	8,1	126	127	4,1	0,17	0,76	11,4	Fe>Cu>Zn>Cr>Mn>Ni>Pb (ΣКБХП = 278)
	КБП	0.05	0,84	0,10	0,29	0,17	0,06	0,81	Cu>Zn>Mn>Ni>Fe>Pb>Cr (БХА = 2,3)

Как видно из таблицы 2, наименьшее значение БХА наблюдается на деляне, совместно обработанной полученным почвогрунтом-сорбентом и гуматами (П+Г). Также наблюдается снижение концентрации свинца в золе растений участка № 2 до и после рекультивации в 2,1 раз, меди в 1,3 раза, цинка в 1,8 раз. Наименьшее значение ΣКБХП наблюдается на деляне, обработанной полученным почвогрунтом-сорбентом и гуматами (П+Г), которое снижается в 2,1 раза, а содержание подвижного свинца снижается в 5,9 раз, что говорит о его эффективной иммобилизации. Так же как и в случае с КБП наблюдается резкое увеличение КБХП при использовании для рекультивации только одного гумата.

На рис. 2 представлена гистограмма значений КБП почвогрунтов участка № 2 до и после рекультивации.

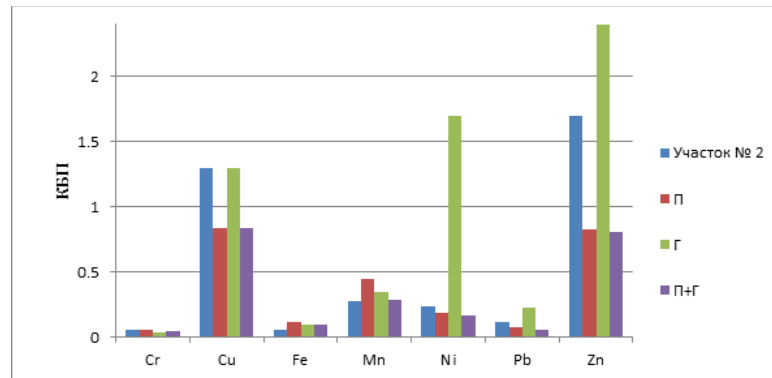


Рисунок 2 - Гистограмма значений КБП почвогрунтов участка № 2 до и после рекультивации
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.8.4>

Как видно из рис. 2, использование полученного почвогрунта-сорбента совместно с гуматами позволяет значительно снизить поглощение токсичных тяжелых металлов растениями и увеличить поглощение таких ключевых микроэлементов, необходимых для фотосинтеза, образования хлорофилла и дыхания растений, как марганец и железо. Наблюдается резкое увеличение КБП в случае использования для рекультивации только гумата, что можно объяснить как снижением водородного показателя почвогрунтов и увеличением подвижности тяжелых металлов, так и тем, что использование гумата повышает устойчивость растений к токсическому воздействию тяжелых металлов, что способствует снижению барьерной защиты и увеличению наземной биомассы, в которой активно накапливаются тяжелые металлы.

Также была проведена оценка средней массы растений, выращенных на деляне участка № 2 до и после рекультивации. Для нерекультивированной деляны (контроль) средняя масса наземной части одного растения составила 0,19 г, для деляны с почвогрунтом-сорбентом — 1,13 г, для деляны почвогрунт-сорбент + гуматы — 1,63 г, для деляны, обработанной гуматами — 1,91 г. (рис. 3).



Рисунок 3 - Образцы просо посевного, выращенного на исследуемых делянках
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.8.5>

Примечание: а) до рекультивации; б) обработка полученным почвогрунтом-сорбентом; в) обработка раствором гумата; г) совместная обработка полученным почвогрунтом-сорбентом и гуматами

Наибольшую среднюю массу на одно растение имеют образцы, выращенные при обработке только гуматами, что, возможно, происходит за счет более активного поглощения тяжелых металлов в наземную часть биомассы растений. Однако, по сравнению с выращенным на делянке с совместной обработкой полученным почвогрунтом-сорбентом и гуматами, растение начинает быстрее засыхать и погибать.

Заключение

Проведенные исследования выявили, что исследуемые почвогрунты промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» — аномально загрязненный тяжелыми металлами почвогрунт третьего класса опасности (участок № 1) и почвогрунт со средней степенью загрязнения тяжелыми металлами четвертого класса опасности (участок № 2) имеют следующий ряд содержания металлов: Fe>Pb>Mn>Cr>Cu>Zn>Ni и Fe>Pb>Mn>Zn>Cr>Cu>Ni соответственно, что говорит об аномально высоком в них содержании свинца. Содержание свинца в золе растений превышает фоновые значения на участках № 1 и № 2 в 554 и 111 раз соответственно, меди в 8,9 и 9,6 раз соответственно, цинка в 9,7 и 10,4 раз соответственно, никеля в 18,3 и 8 раз соответственно, хрома в 9,6 и 2,4 раз соответственно, что говорит о миграции тяжелых металлов в биомассу растений. Однако стоит отметить, что БХА почвогрунтов наиболее загрязненного участка ниже фонового, что, предположительно, связано с барьерной функцией, которая блокирует высокое поступление тяжелых металлов в наземную биомассу растений, т.е. растения вырабатывают механизмы устойчивости к накоплению тяжелых металлов. БХА и СКБХП участка № 2 превышает фоновые в 3,5 и 8,8 раз соответственно.

После проведения опытно-промышленных испытаний по рекультивации посредством обработки загрязненных участков различными было установлено, что наименьшее значение БХА наблюдается на делянке, обработанной полученным почвогрунтом-сорбентом и гуматами, сопровождающееся снижением концентрации свинца в золе растений по сравнению с исходным почвогрунтом участка № 2 в 2,1 раз, меди в 1,3 раза, цинка в 1,8 раз. Исследования показали, что наиболее оптимальным является рекультивация почвогрунтов со средней степенью загрязнения тяжелыми металлами посредством их совместной обработки полученным почвогрунтом-сорбентом и гуматами в соотношения 10:1:0,2, что позволяет значительно снизить степень подвижности тяжелых металлов, их поступление и накопление в биомассе растений, а также увеличить биомассу растений без снижения их защитной барьерной функции.

**Финансирование**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-20048. URL: <https://rscf.ru/project/25-27-20048/>.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 25-27-20048. URL: <https://rscf.ru/project/25-27-20048/>.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Медведева М.А. Нарушенные Земли на территории Российской Федерации / М.А. Медведева // Интеллектуальный потенциал молодых ученых как драйвер развития АПК : материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и обучающихся, Санкт-Петербург — Пушкин, 15–17 марта 2023 года. — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2023. — С. 557–562.
2. Баянова А.А. Анализ состояния нарушенных земель в Иркутской области / А.А. Баянова // Климат, экология и сельское хозяйство Евразии : материалы XII международной научно-практической конференции, п. Молодежный, 27–28 апреля 2023 года. — П. Молодежный : Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2023. — С. 16–20.
3. Богданов А.В. Оценка воздействия промплощадки бывшего аккумуляторного завода "Востсибэлемент" Иркутской области на объекты окружающей среды / А.В. Богданов, А.С. Шатрова, О.В. Тюкалова // Экология и промышленность России. — 2022. — № 26(3). — С. 52–57.
4. Шатрова А.С. Сорбция тяжелых металлов лигнинсодержащими осадками целлюлозно-бумажной промышленности / А.С. Шатрова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2024. — № 335(5). — С. 66–74.
5. Дегтярев А.П. Коэффициенты биологического накопления как основа биохимической классификации химических элементов / А.П. Дегтярев // Биосфера. — 2024. — № 16(1). — С. 5–19.
6. Перельман А.И. Геохимия / А.И. Перельман. — Москва : Высшая школа, 1989. — 528 с.
7. Польшов Б.Б. Избранные труды / Б.Б. Польшов. — Москва : Изд-во АН СССР, 1956. — 751 с.
8. Гиниятуллин Р.Х. Интенсивность биологического поглощения тяжелых металлов в органах березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в условиях промышленного загрязнения / Р.Х. Гиниятуллин, А.Х. Ибрагимов // Лесной вестник. — 2016. — № 2. — С. 74–81.
9. Бускунова Г.Г. Тяжелые металлы в системе «почва – дикорастущее лекарственное растение» (на примере *Sichorium intybus* L.) / Г.Г. Бускунова, Г.А. Ягафарова // Самарский научный вестник. — 2022. — № 11(1). — С. 36–42.
10. Старикова Е.А. Аккумуляция тяжелых металлов в почве и надземных вегетативных органах *Juniperus sabina* L. в условиях г. Йошкар-Олы / Е.А. Старикова, О.Л. Воскресенская, Е.А. Алябышева // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. — 2023. — № 2(46). — С. 129–139.
11. Богданов А.В. Оценка эффективности методов воздушной сепарации загрязненной почвы промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» / А.В. Богданов, А.С. Шатрова, А.И. Шкрабо и др. // Вестник евразийской науки. — 2025. — № 17(2). — URL: <https://esj.today/PDF/35NZVN225.pdf> (дата обращения: 18.09.25).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Medvedeva M.A. Narushennye Zemli na territorii Rossiiskoi Federatsii [Disturbed Lands on the Territory of the Russian Federation] / M.A. Medvedeva // *Intellectual Potential of Young Scientists as a Driver of Agricultural Development* : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students, St. Petersburg — Pushkin, March 15–17, 2023. — Saint Petersburg : Sankt-Peterburgskii gosudarstvennii agrarnii universitet, 2023. — P. 557–562. [in Russian]
2. Bayanova A.A. Analiz sostoyaniya narushennikh zemel v Irkutskoi oblasti [Analysis of the state of disturbed lands in the Irkutsk region] / A.A. Bayanova // *Klimat, ekologiya i sel'skoe hozyajstvo Evrazii* [Climate, ecology and agriculture of Eurasia] : Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference, Molodezhny, April 27–28, 2023. — P. Molodezhny : Irkutskii gosudarstvennii agrarnii universitet im. A.A. Yezhevskogo, 2023. — P. 16–20. [in Russian]
3. Bogdanov A.V. Ocenka vozdeystviya promploshhadki by'vshego akkumulyatornogo zavoda "Vostsibe'lement" Irkutskoj oblasti na ob'ekty okruzhayushhej sredy' [Impact Assessment of the Industrial Site at Former Battery Plant "Vostsibelement" in Irkutsk Region on Environmental Compartment] / A.V. Bogdanov, A.S. Shatrova, O.V. Tyukalova // *Ecology and Industry of Russia*. — 2022. — № 26(3). — P. 52–57. [in Russian]
4. Shatrova A.S. Sorbciya tyazhelyx metallov ligninsoderzhashhimi osadkami cellyulozno-bumazhnoj promy'shlenosti [Heavy metal sorption with lignin-containing sludge from the pulp and paper industry] / A.S. Shatrova // *Proceedings of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. — 2024. — № 335(5). — P. 66–74. [in Russian]
5. Degtyarev A.P. Koeffitsienty' biologicheskogo nakopleniya kak osnova bioximicheskoy klassifikacii ximicheskix e'lementov [Biological accumulation coefficients as a basis for biochemical classification of chemical elements] / A.P. Degtyarev // *Biosphere*. — 2024. — № 16(1). — P. 5–19. [in Russian]



6. Perelman A.I. Geokhimiya [Geochemistry] / A.I. Perelman. — Moscow : Visshaya shkola, 1989. — 528 p. [in Russian]
7. Polinov B.B. Izbrannie trudi [Selected Works] / B.B. Polinov. — Moscow : Izd-vo AN SSSR, 1956. — 751 p. [in Russian]
8. Giniyatullin R.X. Intensivnost' biologicheskogo pogloshheniya tyazhely'x metallov v organax berezy' povisloj (Betula Pendula Roth.) v usloviyax promy'shlennogo zagryazneniya [The intensity of biological absorption of heavy metals in the organs of silver birch (Betula Pendula Roth.) under conditions of industrial pollution] / R.X. Giniyatullin, A.X. Ibragimova // Forestry Bulletin. — 2016. — № 2. — P. 74–81. [in Russian]
9. Buskunova G.G. Tyazhely'e metally' v sisteme «pochva – dikorastushhee lekarstvennoe rastenie» (na primere Cichorium intybus L.) [Heavy metals in the soil-wild medicinal plant system (using Cichorium intybus L. as an example)] / G.G. Buskunova, G.A. Yagafarova // Samara Scientific Bulletin. — 2022. — № 11(1). — P. 36–42. [in Russian]
10. Starikova E.A. Akkumulyaciya tyazhely'x metallov v pochve i nadzemny'x vegetativny'x organax Juniperus sabina L. v usloviyax g. Joshkar-Oly' [Accumulation of heavy metals in soil and aboveground vegetative organs of Juniperus sabina L. in the conditions of Yoshkar-Ola] / E.A. Starikova, O.L. Voskresenskaya, E.A. Alyaby'sheva // Bulletin of the Orenburg State Pedagogical University. Electronic scientific journal. — 2023. — № 2(46). — P. 129–139. [in Russian]
11. Bogdanov A.V. Ocenka e'ffektivnosti metodov vozdushnoj separacii zagryaznennoj pochvy' promplohhadki by'vshego zavoda «Vostsibe'lement» [Evaluation of the effectiveness of air separation methods for contaminated soil at the industrial site of the former Vostsibelement plant] / A.V. Bogdanov, A.S. Shatrova, A.I. Shkrabo et al. // The Eurasian Scientific Journal. — 2025. — № 17(2). — URL: <https://esj.today/PDF/35NZVN225.pdf> (accessed: 18.09.25). [in Russian]