

DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-3-366-379

EDN: TCIUVN

УДК 550.47:631.4

Научная статья / Research article

Влияние полимерных материалов на подвижные формы тяжелых металлов при разном уровне полиметаллического загрязнения дерново-подзолистой почвы

В.Ю. Березкин^{1,2}, В.Д. Волкова³, А.П. Дегтярёв¹,
В.К. Калеро Эррера², О.С. Якименко³, В.А. Терехова³

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Российская Федерация

²Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

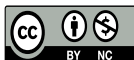
victor76@list.ru

Аннотация. В модельном эксперименте проведено сравнение эффекта полимерных сорбентов разного происхождения – синтетических и природных – на примере гидролизованного полиакрилонитрила (ГИПАН), бинарной структуры (ГС) (ГИПАН и гумата калия «Гумат Сахалинский») и порошка грибного мицелия (ГБ), на содержание подвижных форм тяжелых металлов (ТМ). Сравнение проводилось в модельных опытах с разным уровнем загрязнения дерново-подзолистой почвы (УОПЭЦ «Чашниково», Московская обл.) солями меди, цинка, свинца. Показано, что положительный эффект от обработки загрязненной почвы полимерами выявлен при всех уровнях нагрузки ТМ. При этом наибольший эффект от ремедиации всеми испытанными препаратами наблюдался в варианте ГС (при сочетании ГИПАНа и сахалинского гумата). Наиболее эффективное снижение подвижных форм отмечено при максимальной нагрузке – 6 ОДК ТМ.

Ключевые слова: ремедиация, тяжелые металлы, полимеры, сорбция, ГИПАН, сахалинский гумат, препарат сухого мицелия, гриб *Alternaria alternata*, медь, цинк, свинец, агродерново-подзолистая почва

Финансирование. Работа выполнена по государственному заданию в лаборатории биогеохимии окружающей среды ГЕОХИ РАН и на факультете почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, при участии специалистов института экологии РУДН имени Патриса Лумумбы.

© Березкин В.Ю., Волкова В.Д., Дегтярёв А.П., Калеро Эррера В.К., Якименко О.С., Терехова В.А., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Вклад авторов. *Березкин В.Ю.* – администрирование проекта, проведение исследования, создание рукописи и ее редактирование; *Волкова В.Д.* – проведение исследования; *Дегтярёв А.П.* – проведение исследования; *Калеро Эррера В.К.* – проведение исследования; *Якименко О.С.* – концептуализация, руководство исследованиями и проведение исследования; *Терехова В.А.* – концептуализация, методология, написание-рецензирование и редактирование рукописи. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

История статьи: поступила в редакцию 25.11.2024; доработана после рецензирования 05.04.2025; принята к публикации 16.04.2025.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: *Березкин В.Ю., Волкова В.Д., Дегтярёв А.П., Калеро Эррера В.К., Якименко О.С., Терехова В.А.* Влияние полимерных материалов на подвижные формы тяжелых металлов при разном уровне полиметаллического загрязнения дерново-подзолистой почвы // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 3. С. 366–379. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-3-366-379>

Influence of polymeric materials on mobile forms of heavy metals at different levels of polymetallic pollution of sod-podzolic soil

Victor Yu. Berezkin^{1,2}  , Veronika D. Volkova³ ,
Alexander P. Degtyarev¹ , Vanessa Katherine Calero Errera² ,
Olga S. Yakimenko³ , Vera A. Terekhova³ 

¹*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

²*RUDN University, Moscow, Russian Federation*

³*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

victor76@list.ru

Abstract. The model experiment shows the effect of natural sorbents, such as hydrolysed polyacrylonitrile (HYPAN), HYPAN + potassium humate (Sakhalin humate) and mycelium of species *Alternaria alternata* on the content of mobile forms of heavy metals (HM) in sod-podzolic soil (Chashnikovo, Moscow region) before and after the application of copper, zinc and lead salts. It is shown that the positive effect of treatment of contaminated soil with polymers is observed at all levels of TM load. At the same time, the greatest effect of remediation with sorbents used by the authors was observed in the presence of ‘Sakhalin humate’. In general, the most effective reduction of mobile forms was observed at maximum soil contamination (in the experiment – 6 ODK TM).

Keywords: remediation, heavy metals, HYPAN, Sakhalin humate, mycelia of *Alternaria alternata* fungus, copper, zinc, lead, sod-podzolic soil

Funding. The work was carried out under the state assignment at the Laboratory of Environmental Biogeochemistry of Geochemical Institute of the Russian Academy of Sciences and at the Faculty of Soil Science of Lomonosov Moscow State University, with the participation of specialists from the RUDN University (Institute of Environmental Engineering).

Authors' contribution. *V.Yu. Berezkin* – Project administration, Investigation, Writing – review and editing; *V.D. Volkova* – Investigation; *A.P. Degtyarev* – Investigation; *V.K. Calero Errera* – Investigation; *O.S. Yakimenko* – Conceptualization, Supervision, Investigation; *V.A. Terekhova* – Conceptualization of work, Methodology, Writing – review & editing. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Article history: received 25.11.2024; revised 05.04.2025; accepted 16.04.2025.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Berezkin VYu, Volkova VD, Degtyarev AP, Calero Errera VK, Yakimenko OS, Terekhova VA. Influence of polymeric materials on mobile forms of heavy metals at different levels of polymetallic pollution of sod-podzolic soil. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(3):366–379. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-3-366-379>

Введение

Почва – важнейший компонент современного сельскохозяйственного ландшафта. Загрязнение почв тяжелыми металлами как из региональных источников, так и за счет глобальных выпадений не только снижает почвенное плодородие, но и самым пагубным образом может отразиться на выращиваемой сельскохозяйственной продукции, а как следствие, на жизни и здоровье населения. Кроме того, будучи загрязненной тяжелыми металлами (ТМ), почва оказывает неблагоприятное воздействие на все контактирующие среды: атмосферу, воду, растительность, животный мир [1; 2].

Многие микроэлементозы человека связаны с загрязнением почв сельскохозяйственного назначения, элементами, как эссенциальными, так и условно токсичными [3]. Одно из решений обозначенной выше проблемы – ремедиация загрязненных почв с помощью сорбентов, иммобилизующих тяжелые металлы как природными, так и синтетическими полимерами. При этом эффективность полимерных сорбентов, предлагаемых к использованию для рекультивации почв, загрязненных ТМ, зависит от многих факторов, в первую очередь от уровня нагрузки и типа почв [4]. Сравнительные эксперименты сорбционной активности ремедиантов разной природы на одних и тех же образцах почв в градиенте концентраций ТМ ранее не проводились.

Цель исследования – изучить влияние полимерных сорбентов (ГИПАН, гумат сахалинский (СГ), препарат грибного мицелия *Alternaria alternata*) на изменение содержания подвижных и валовых форм катионов металлов (меди, цинка, свинца) при разном уровне загрязнения почвы.

Выбор ремедиантов обусловлен недостаточной изученностью полимерных материалов как сорбентов при полиметаллическом загрязнении в разных почвенных условиях. Гидролизированный полиакрилонитрил (ГИПАН) широко используется в промышленных (нефтедобывающая отрасль) и сельскохозяйственных технологиях, однако его влияние на экотоксикологические показатели почв при разных уровнях загрязнения комплексом тяжелых металлов

остается практически не исследованным. Для усиления ожидаемого положительного эффекта ГИПАНа его испытывали в комплексе с препаратом гумата калия (ГС), который широко востребован в ремедиационных мероприятиях и коммерчески доступен. Для сравнения с синтетическим сорбентом дополнительно использовали природный полимер – препарат сухого мицелия гриба (ГБ), который, как показано ранее, обладает высоким сорбционным потенциалом по отношению к меди [5].

Материалы и методы

Полевой этап. Исследования проводили с образцом почвы, отобранным в июле 2023 г. из верхнего горизонта (глубина отбора 0–20 см от поверхности) с поля на территории Учебного опытного экологического центра МГУ (УОПЭЦ) «Чашниково» (Солнечногорский район Московской области). Почва классифицирована в полевых условиях как дерново-подзолистая постагрогенная по наличию обособленного серо-гумусового аккумулятивного горизонта и последующего текстурного горизонта. Верхняя толща серых тонов имеет непрочную мелкокомковатую структуру, супесчаная. Поле ранее использовалось для выращивания сельскохозяйственных культур, в последние годы периодически подвергается вспашке в целях борьбы с сорняками. Содержание органического углерода $C_{орг} = 1,11\%$, рН водн. – 6,92. Почвенные образцы предварительно были высушены до воздушно сухой массы, растерты и просеяны через почвенное сито (2 мм).

Эксперимент (лабораторный этап). Для оценки сорбционной активности ремедиантов разной природы образец верхнего серо-гумусового горизонта дерново-подзолистой почвы предварительно был разделен на 16 частей методом квартования. Для моделирования загрязнения ТМ в двенадцать образцов почвы массой 200 г пипеткой добавляли раствор, содержащий смесь тяжелых металлов в виде растворимых солей (нитратов) меди, цинка, свинца и тщательно перемешивали. Доза внесения каждого элемента составляла 2, 4 и 6 ОДК для супесчаных почв в каждые из четырех образцов (табл. 1).

Таблица 1. Добавка катионов исследуемых металлов в образцы дерново-подзолистой почвы при моделировании загрязнения с последующим применением сорбентов

Применяемый сорбент	Фоновое содержание ТМ	Добавление меди, свинца и цинка, мг/кг (*)		
		2 ОДК	4 ОДК	6 ОДК
Без сорбента (контроль)	Cu, Zn, Pb (фон)	Cu (66), Zn (110), Pb (64)	Cu (132), Zn (220), Pb (128)	Cu (198), Zn (330), Pb (192)
ГИПАН (Г)	Cu, Zn, Pb (фон)	Cu (66), Zn (110), Pb (64)	Cu (132), Zn (220), Pb (128)	Cu (198), Zn (330), Pb (192)
ГИПАН + гумат Сахалинский (ГС)	Cu, Zn, Pb (фон)	Cu (66), Zn (110), Pb (64)	Cu (132), Zn (220), Pb (128)	Cu (198), Zn (330), Pb (192)
Грибной мицелий (ГБ)	Cu, Zn, Pb (фон)	Cu (66), Zn (110), Pb (64)	Cu (132), Zn (220), Pb (128)	Cu (198), Zn (330), Pb (192)

* Cu (ОДК = 33 мг/кг), Zn (ОДК = 55 мг/кг), Pb (ОДК = 32 мг/кг).

Источник: составлено В.Ю. Берёзкиным.

Table 1. Content of cations of investigated metals and applied sorbents in samples of sod-podzolic soil at modelling of contamination

The sorbent used	Background content of Heavy Metals	Added copper, lead and zinc, mg/kg (approximately permissible concentration*)		
		2	4	6
Without sorbent (control)	Cu, Zn, Pb (0 mg/kg)	Cu (66), Zn (110), Pb (64)	Cu (132), Zn (220), Pb (128)	Cu (198), Zn (330), Pb (192)
Hypan (H)	Cu, Zn, Pb (0 mg/kg)	Cu (66), Zn (110), Pb (64)	Cu (132), Zn (220), Pb (128)	Cu (198), Zn (330), Pb (192)
HYPAN + Sakhalin Humate (HS)	Cu, Zn, Pb (0 mg/kg)	Cu (66), Zn (110), Pb (64)	Cu (132), Zn (220), Pb (128)	Cu (198), Zn (330), Pb (192)
Mushroom mycelium (MM)	Cu, Zn, Pb (0 mg/kg)	Cu (66), Zn (110), Pb (64)	Cu (132), Zn (220), Pb (128)	Cu (198), Zn (330), Pb (192)

*Approximately permissible concentration: Cu = 33 mg/kg, Zn = 55 mg/kg, Pb = 32 mg/kg.

Source: compiled by V.Y. Berezkin.

Образцы контрольные и загрязненные ТМ увлажняли внесением дистиллированной воды до достижения 60 % полной влагоемкости. Выдерживали 7 сут при комнатной температуре для равномерного распределения воды и солей ТМ. После чего вносили полимерные препараты, инкубировали 7 сут и отбирали на анализ. Опыт проводили в трех повторностях.

В качестве сорбентов катионов ТМ исследовали гидролизированный полиакрилонитрил ГИПАН бинарную структуру ГИПАН и промышленный препарат гумата калия – «Сахалинский гумат», а также препарат сухого грибного мицелия.

При взаимодействии исследуемых природных и синтетических ремедиантов с почвенной матрицей ГИПАН (рис. 1) проявляет себя прежде всего как структурообразователь, формируя устойчивые почвенные агрегаты с почвенными частицами за счет водородных связей, ван-дер-ваальсовых взаимодействий и даже электростатических связей.

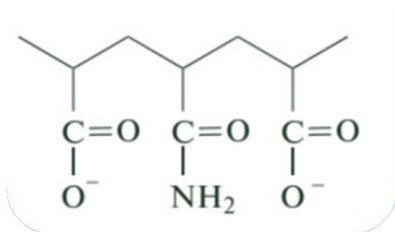


Рис. 1. Схематическое изображение структурной формулы ГИПАНА

Источник: составлено В.Ю. Берёзкиным.

Figure 1. Schematic representation of the structural formula of GIPAN

Source: compiled by V.Y. Berezkin.

Сахалинский гумат выступает как стимулятор биологической активности почвы и смягчает токсические эффекты поллютантов [6; 7]. Мы предположили, что совместное применение ГИПАНА с гуминовыми веществами будет иметь преимущество перед вариантом с внесением только одного синтетического препарата.

Мицелий меланизированного гриба *Alternaria alternata* Fr. Keissl. выращивали в лабораторных условиях в жидкой питательной среде Чапека в течение 14 сут. Затем биомассу мицелия отделяли от среды роста фильтрованием, многократно промывали дистиллированной водой, высушивали и измельчали до стадии порошка, который, как было показано ранее, обладал высокой сорбционной активностью [5].

Обработку почвы из расчета 0,2 % препарата проводили растворами 1 % ГИПАНа и в композиции с 0,1 % гуматом сахалинским, при этом pH всех растворов доводили до 7,0. Порошок мицелия вносили в виде водной суспензии в той же дозе (0,2 %).

Таким образом, в эксперименте использовали 16 образцов: загрязненные исследуемыми ТМ: 2 ОДК, 4 ОДК, 6 ОДК и контрольный образец (незагрязненный), с внесением в почвенные образцы с каждым вариантом загрязнения трех полимерных препаратов в отдельности и воды (один контрольный – без сорбента) (табл. 1). Подготовленные таким образом почвенные образцы (12 вариантов) инкубировали еще 7 суток при комнатной температуре. Из каждого варианта отбирали пробы для дальнейших химических анализов, по 3 аналитические повторности из каждого сосуда.

Определение содержания исследуемых ТМ после эксперимента. Атомно-абсорбционная спектроскопия (ААС) в ее пламенном варианте в настоящее время является одним из распространенных методов многоэлементного анализа различных по природе объектов [8]. Пробоподготовка твердых образцов, в частности почв, для ААС-анализа проводится растворением 0,5 г почвы в смеси концентрированных $\text{HClO}_4 + \text{HNO}_3$ и последующим разбавлением полученных солей в 2 % азотной кислоте.

Валовые формы исследуемых ТМ (свинец, медь и цинк) определялись в почвенном образце, измельченном до размера частиц менее 1 мм. Следовала стандартная пробоподготовка образца [9] и определение тяжелых металлов методом ААС в полученной вытяжке.

Содержание подвижных форм свинца, цинка и меди в тех же почвах определяли с помощью ацетатно-аммонийного буферного раствора с $\text{pH} = 4,8$ при соотношении почва:раствор, равном 1:10 (в результате из почвы извлекают ТМ, способные к миграции по почвенному профилю и поглощению растениями). Из образца каждой почвы отбирали навеску 5 г в коническую колбу, заливали предварительно приготовленным ацетатно-аммонийным буфером (50 мл) и подвергали взбалтыванию в течение 1 ч. После взаимодействия почвы с раствором полученную суспензию сепарировали на центрифуге лабораторной СМ-12. В полученных вытяжках пламенным вариантом ААС определялись подвижные формы исследуемых элементов.

Результаты и обсуждение

Как уже упоминалось выше, эффект добавок полимерных препаратов оценивали как в образцах с модельным загрязнением дерново-подзолистой почвы, так и без внесения ТМ (К – контрольные пробы, исходная почва).

Влияние полимерных препаратов на подвижные формы ТМ в исходной почве (без внесения ТМ)

Исходное содержание валовых форм исследуемых ТМ в почве без модельного загрязнения (серия 1, или контрольная) не превышала допустимые нормы: свинец – 9,3–17,4 мкг/г (ПДК = 30 мкг/г), медь – 8,1–9,3 мкг/г (ПДК = 55 мкг/г), цинк – 46–84,9 мкг/г (ПДК = 100 мкг/г). При этом значительная часть меди находилась в доступной для растений форме (Cu подвижные формы = 7–9 мкг/г воздушно-сухой почвы), в то время как подвижные формы свинца (Pb = 1,2–1,9 мкг/г) и цинка (Zn = 4–6,9 мкг/г) составляли незначительный процент от его общего содержания в почве (см. рис. 1).

Применение полимерных препаратов разной природы незначительно увеличило подвижность некоторых из исследуемых металлов: грибной мицелий (ГБ1) – Cu (0,99 % подвижные/валовые); ГИПАН (Г1) – Pb 0,15 % подвижные/валовые) и бинарная структура ГИПАН + сахалинский гумат (ГС1) – Zn (0,12 % подвижные/валовые) (рис. 2).

При модельном загрязнении ТМ почвы применение ГИПАНа гарантировало пусть незначительное, но снижение содержания подвижных форм свинца, меди и цинка в независимости от величины внесенной дозы исследуемых элементов.

Следует отметить, что наименьший процент подвижных форм к валовым установлен для свинца и цинка (Pb – 7 %; Zn – 6 %), а наибольший – для меди (Cu – 75 %).

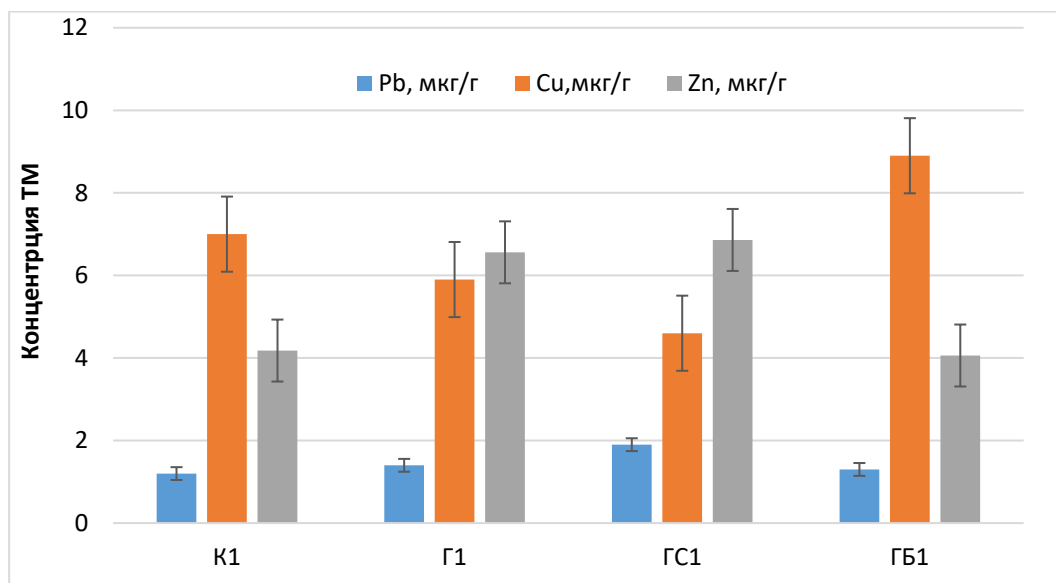


Рис. 2. Фоновые образцы почв (без внесения ТМ) – содержание подвижных форм Pb, Cu, Zn (в пересчете на мкг/г-почвы) в контрольных (незагрязненных) образцах дерново-подзолистой почвы:

K1 – без полимеров (фон); Г1 – с ГИПАНОм; ГС1 – с ГИПАНОм и сахалинским гуматом; ГБ1 – с мицелием.

Источник: составлено В.Ю. Берёзкиным.

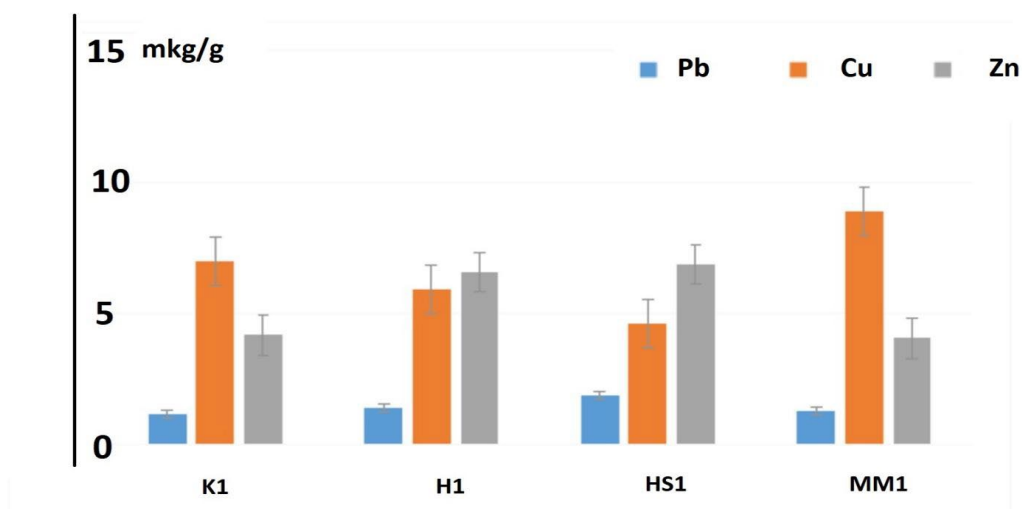


Figure 2. Background soil samples (without contamination of heavy metals). Content of mobile forms of Pb, Cu, Zn (in terms of $\mu\text{g}/\text{gram-soil}$) in control (not contaminated) samples of sod-podzolic soil:

K1 – without polymers (control); H1 – with HYPAN; HS1 – with HYPAN and Sakhalin humate;

MM – with mushroom mycelium.

Source: compiled by V.Y. Berezkin.

Наибольший процент перехода свинца и цинка в почвенный раствор отмечен для загрязненных почв с применением в качестве сорбента бинарной структуры ГС (ГИПАН + сахалинский гумат) (Pb – 50 %; Zn – 77 %). Наименьший процент меди переходил в раствор в почвах разной степени загрязненности, но с применением в качестве сорбента – ГС или ГБ (табл. 2).

Таблица 2. Процент подвижных форм меди, свинца и цинка в исследуемых пробах дерново-подзолистой почвы

№ образцов	Модельное загрязнение ТМ	Подвижные формы			Валовые формы			Процент подвижных форм от валовых		
		Pb, мкг/г	Cu, мкг/г	Zn, мкг/г	Pb, мкг/г	Cu, мкг/г	Zn, мкг/г	Pb, %	Cu, %	Zn, %
K1	фон	1,2	7	4,18	16,8	9,3	66	7,1	75,3	6,3
Г1	фон	1,4	5,9	6,56	9,3	8,7	84,9	15,1	67,8	7,7
ГС1	фон	1,9	4,6	6,86	17,4	8,1	58,5	10,9	56,8	11,7
ГБ1	фон	1,3	8,9	4,06	13,5	9	46,8	9,6	98,9	8,7
K2	2 ОДК	14	27,1	60,56	60	87,9	145	23,3	30,8	41,8
Г2	2 ОДК	11,5	21,7	50,76	64,2	90,9	148,8	17,9	23,9	34,1
ГС2	2 ОДК	20,3	31,4	85,76	57	87,9	156,3	35,6	35,7	54,9
ГБ2	2 ОДК	14,1	25,7	36,76	38,4	51,3	115,2	36,7	50,1	31,9
K3	4 ОДК	33,8	54,8	140,76	105,9	195	283,5	31,9	28,1	49,7
Г3	4 ОДК	33,7	54,9	127,76	106,5	219,6	247,8	31,6	25	51,6
ГС3	4 ОДК	49,4	77,9	168,76	102	198,9	280,2	48,4	39,2	60,2
ГБ3	4 ОДК	37,3	52,5	95,96	109,5	196,5	266,4	34,1	26,7	36
K4	6 ОДК	52,9	95	202,76	149,7	351,6	385	34,1	26,7	36
Г4	6 ОДК	51,8	91,9	189,76	137,7	316,8	328,8	37,6	29	57,7
ГС4	6 ОДК	77,6	116,9	265,76	154,2	354,3	345,9	50,3	33	76,8
ГБ4	6 ОДК	54,8	87,3	170,76	152,4	372	343,2	36	23,5	49,8

Источник: составлено В.Ю. Берёзкиным.

Table 2. Percentage of mobile forms of copper, lead and zinc in the studied samples of sod-podzolic soil

No. samples	Model pollution of HM (approx. permissible concentrations)	Mobile forms			Total forms			Mobile forms / Total forms		
		Pb, mkg/g	Cu, mkg/g	Zn, mkg/g	Pb, mkg/g	Cu, mkg/g	Zn, mkg/g	Pb, %	Cu, %	Zn, %
K1	0	1.2	7	4.18	16.8	9.3	66	7.1	75.3	6.3
H1	0	1.4	5.9	6.56	9.3	8.7	84.9	15.1	67.8	7.7
HS1	0	1.9	4.6	6.86	17.4	8.1	58.5	10.9	56.8	11.7
MM1	0	1.3	8.9	4.06	13.5	9	46.8	9.6	98.9	8.7
K2	2	14	27.1	60.56	60	87.9	145	23.3	30.8	41.8
H2	2	11.5	21.7	50.76	64.2	90.9	148.8	17.9	23.9	34.1
HS2	2	20.3	31.4	85.76	57	87.9	156.3	35.6	35.7	54.9
MM2	2	14.1	25.7	36.76	38.4	51.3	115.2	36.7	50.1	31.9
K3	4	33.8	54.8	140.76	105.9	195	283.5	31.9	28.1	49.7
H3	4	33.7	54.9	127.76	106.5	219.6	247.8	31.6	25	51.6
HS3	4	49.4	77.9	168.76	102	198.9	280.2	48.4	39.2	60.2
MM3	4	37.3	52.5	95.96	109.5	196.5	266.4	34.1	26.7	36
K4	6	52.9	95	202.76	149.7	351.6	385	34.1	26.7	36
H4	6	51.8	91.9	189.76	137.7	316.8	328.8	37.6	29	57.7
HS4	6	77.6	116.9	265.76	154.2	354.3	345.9	50.3	33	76.8
MM4	6	54.8	87.3	170.76	152.4	372	343.2	36	23.5	49.8

Source: compiled by V.Yu. Berezkin.

Кроме того, в отличие от варианта с ГИПАНОм (Г) применение СГ привело не к снижению, а к увеличению подвижных форм исследуемых элементов. Возможно, это связано с присутствием минорного содержания подвижных форм металлов в самом комплексном сорбенте. Возможность увеличения подвижности тяжелых металлов, содержащихся в исследуемых пробах дерново-подзолистей почвы в присутствии СГ, требует дополнительной проверки. Тем не менее в эксперименте установлено, что начиная с дозы 2 ОДК и выше его применение способствует увеличению подвижных форм меди, свинца и цинка в почвах по сравнению с контрольными пробами (рис. 3, а, б, в).

Наиболее эффективные сорбенты из применявшихся в эксперименте – ГИПАН и мицелий. Применение последнего наиболее эффективно снижало подвижность цинка (элемента первого класса опасности, СанПиН 2.1.7.1287-03¹), особенно при наиболее высоких дозах загрязнения (см. рис. 2), и в меньшей степени – подвижность меди.

Вместе с тем нельзя не отметить, что применение мицелия приводило к незначительному (менее 3 %) повышению содержания подвижных форм свинца по сравнению с применением ГИПАНА. Столь незначительные колебания содержания подвижных форм свинца могут быть объяснены высокой гетерогенностью исследуемых почв, а не влиянием сорбента как такового.

Следует отметить, что тенденция к росту, заданная добавкой катионов, хорошо прослеживается для валовых форм (по мере роста дозы – 0 ОДК,

¹ СанПиН 2.1.7.1287-03. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы и грунтов. URL: <https://eng-eco.ru/upload/iblock/551/5514b8efc08243ca3bdb3501ab4e363d.pdf?ysclid=msaарозук0404570096> (дата обращения: 15.11.2024).

2 ОДК, 4 ОДК, 6 ОДК), но явно нарушена для подвижных форм тех же металлов. Более низкие тенденции к росту подвижных форм отражают процесс их поглощения сорбентами.

Влияние полимерных препаратов во всех трех вариантах проявилось в снижении доли подвижных форм меди. Наибольшее поглощение подвижных форм всех трех элементов можно отметить при применении мицелия, на втором месте находится ГИПАН и на третьем – комплекс ГИПАН + сахалинский гумат. Этот эффект наиболее четко проявляется при максимальном уровне загрязнения.

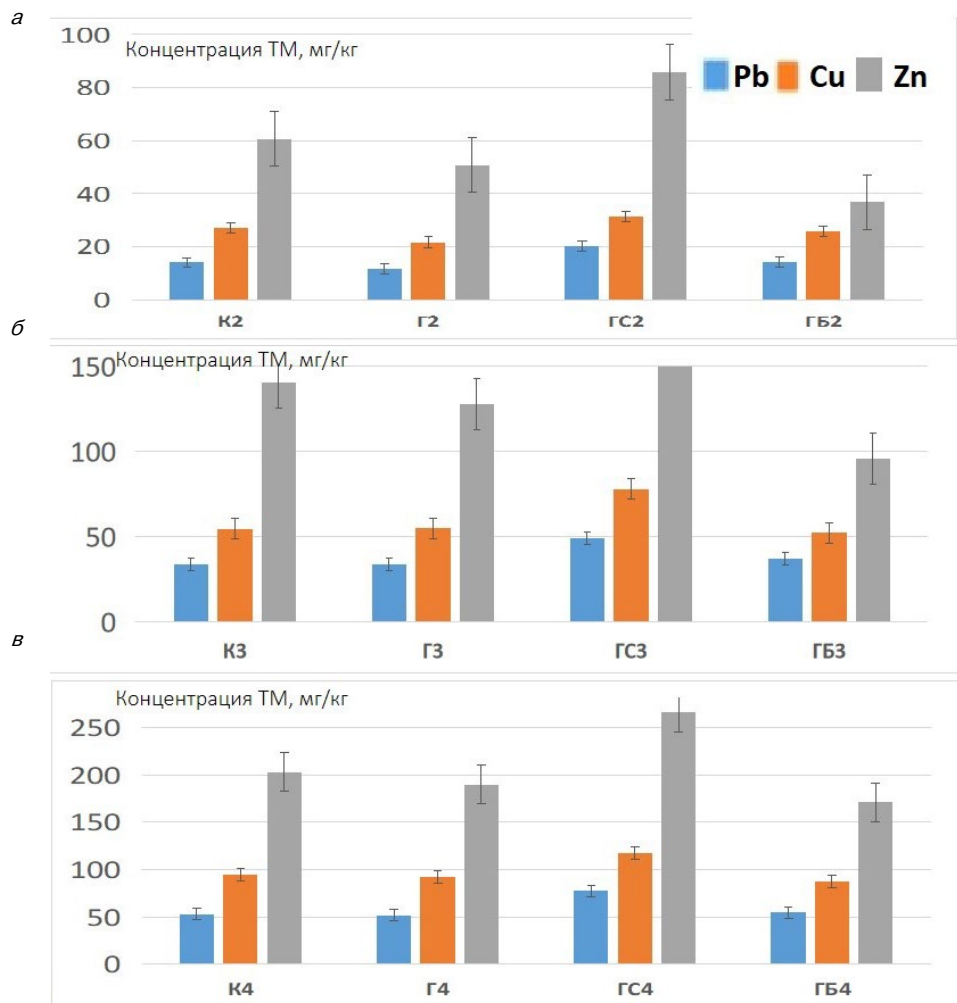


Рис. 3. Влияние полимерных препаратов на содержание подвижных форм меди, свинца и цинка (ось ординат – мг/г почвы) в дерново-подзолистой почве при разных дозах загрязнения ТМ: а – 2 ОДК; б – 4 ОДК; в – 6 ОДК; К2, К3, К4 – без внесения полимеров, Г2, Г3, Г4 – с ГИПАНОм, GS2, GS3, GS4 – с ГИПАНОм и сахалинским гуматом, GB2, GB3, GB4 – с мицелием.

Источник: составлено В.Ю. Берёзкиным.

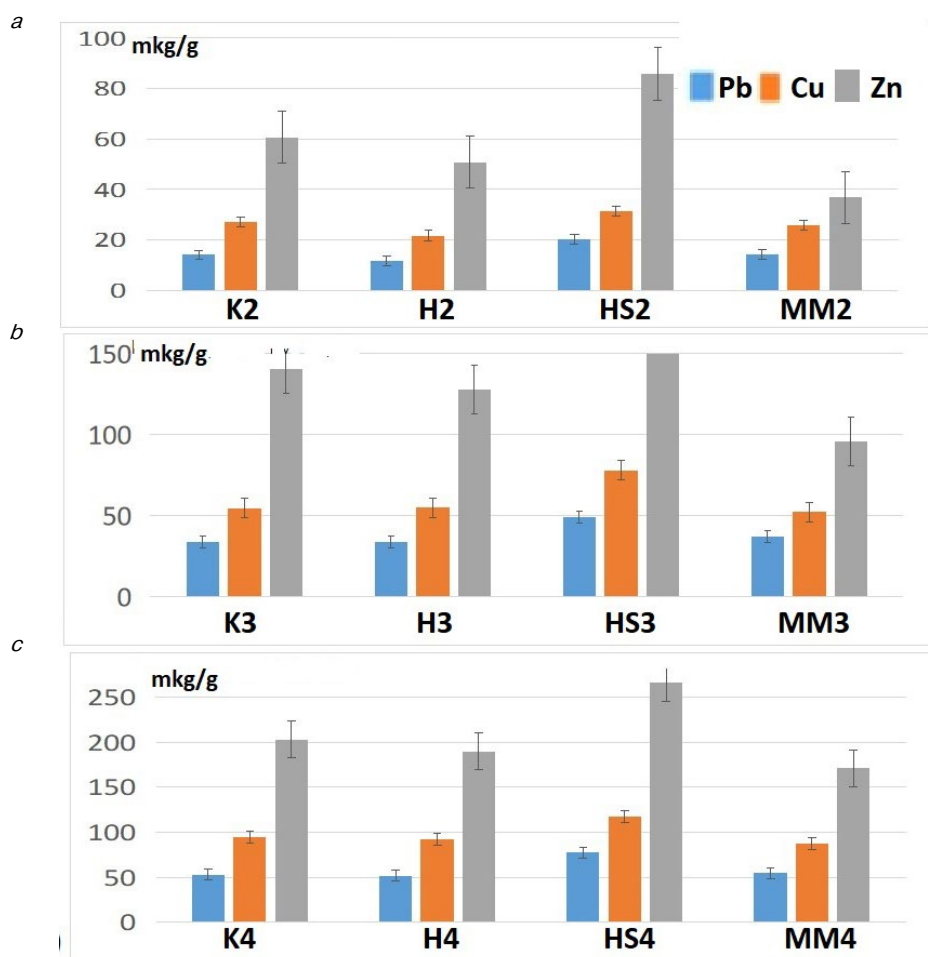


Figure 3. Effect of polymer preparations on the content of mobile forms of copper, lead and zinc (ordinate axis – $\mu\text{g/g}$ soil) in sod-podzolic soil at different doses of TM pollution:

a – 2 approx. permissible concentration; *b* – 4 approx. permissible concentration; *c* – 6 approx. permissible concentration; K2, K3, K4 – without polymer application, H2, H3, H4 – with HYPAN, HS2, HS3, HS4 – with HYPAN and Sakhalin humate, MM2, MM3, MM4 – with mushroom mycelium.

Source: compiled by V.Yu. Berezkin.

Закключение

Проведенные исследования подтвердили, что вносимые сорбенты могут снижать переход поступающих в почву химических загрязнителей в почвенный раствор, что в значительной степени определяет вовлеченность химических элементов в трофическую цепь.

Наибольший эффект воздействия применяемых полимерных сорбентов отмечен при максимально высоких дозах загрязнения почв исследуемыми тяжелыми металлами (6 ОДК).

Таким образом, различия в сорбционной способности полимерных составов могут быть связаны с их молекулярной структурой. Вариации в снижении

перехода поступающих в почву химических загрязнителей в почвенный раствор при применении исследованных сорбентов в определенной степени определялись их природой и составом. Очевидно, что исследуемые сорбенты могут воздействовать не на всю группу исследуемых загрязнителей, а связывать их катионы избирательно, в зависимости от химических свойств элемента или формы его нахождения.

Список литературы

- [1] Азнабаева Р.В. Содержание тяжёлых металлов (Pb, Co, Cu, Zn) в почвах сельскохозяйственного назначения Чекмагушевского района РБ // Экология и природопользование: прикладные аспекты : материалы IX Международной научно-практической конференции / Башкирский государственный педагогический университет. Том 1. Уфа : ООО Аэтерна, 2019. С. 16–19. EDN: ZBCMGL
- [2] Корочкина Е.А. Влияние микроэлементов цинка, кобальта, йода, селена, марганца, меди на здоровье и продуктивные качества животных // Генетика и разведение животных. 2016. № 3. С. 69–73. EDN: XRFTYV
- [3] Ковальский В.В. Геохимическая экология. Москва : Наука, 1974. 299 с.
- [4] Сергеева Ю.Д., Кирюшина А.П., Калеро В.К., Федорова О.А., Терехова В.А. Сравнение эффективности микро- и наночастиц нульвалентного железа при детоксикации техногенно-загрязненной почвы // Почвоведение. 2023. № 2. С. 273–282. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22600962> EDN: BIUQRA
- [5] Волкова В.Д., Федосеева Е.В., Терехова В.А. Сорбционная активность микромицетов *Alternaria alternata* (Fr.) Keissl. и *Fusarium oxysporum* Schltdl. по отношению к меди // Поволжский экологический журнал. 2024. № 1. С. 20–35. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-1-20-35> EDN: QYXVQF
- [6] Holatko J., Hammerschmidt T., Datta R., Baltazar T., Kintl A., Latal O., Pecina V., Sarec P., Novak P., Balakova L., Danish S., Zafar-ul-Hye M., Fahad Sh., Brtnicky M. Humic acid mitigates the negative effects of high rates of biochar application on microbial activity // Sustainability. 2020. Vol. 12, no. 22. <https://doi.org/10.3390/su12229524> EDN: CZWEVL
- [7] Bondareva L., Kudryasheva N. Direct and indirect detoxification effects of humic substances // Agronomy. 2021. Vol. 11, no. 2. Article no. 198. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020198> EDN: UIGEOY
- [8] Беляцкий В.Н. Основы методов атомно-абсорбционной и атомно-эмиссионной спектроскопии. Минск : БГМУ, 2015. 47 с.
- [9] Теория и практика химического анализа почв / под ред. Л.А. Воробьевой. Москва : ГЕОС, 2006. 400 с.

References

- [1] Aznabaeva RV. Content of heavy metals (Pb, Co, Cu, Zn) in soils of agricultural purpose of Chekmagushevsky district of RB. *Ecology and nature management: applied aspects: proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference. Bashkir State Pedagogical University. Volume 1*. Ufa: LLC Aeterna; 2019. p. 16–19. (In Russ.) EDN: ZBCMGL
- [2] Korochkina, EA. The influence of trace elements zinc, cobalt, iodine, selenium, manganese, copper on the health and productive ability of animals. *Genetics and animal breeding*. 2016;(3):69–73. (In Russ.) EDN: XRFTYV

- [3] Kovalsky VV. *Geochemical Ecology*. Moscow: Nauka; 1974. (In Russ.)
- [4] Sergeeva YuD, Kiryushina AP, Calero VK, Fedorova OA, Terekhova VA. Comparison of the efficiency of micro- and nanoparticles of zero-valent iron in the detoxification of technogenically polluted soil. *Eurasian Soil Science*. 2023, (2), 273–282. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0032180X22600962> EDN: BIUQRA
- [5] Volkova VD, Fedoseeva EV, Terekhova VA. *Copper ion sorption ability of Alternaria alternata (Fr.) Keissl. and Fusarium oxysporum Schltdl. micromycetes. Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2024;(1):20–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-1-20-35> EDN: QYXVQF
- [6] Holatko J, Hammerschmidt T, Datta R, Baltazar T, Kintl A, Latal O, Pecina V, Sarec P, Novak P, Balakova L, Danish S, Zafar-ul-Hye M, Fahad Sh, Brtnicky M. Humic acid mitigates the negative effects of high rates of biochar application on microbial activity. *Sustainability*. 2020;12(22). <https://doi.org/10.3390/su12229524> EDN: CZWEVL
- [7] Bondareva L, Kudryasheva N. Direct and indirect detoxification effects of humic substances. *Agronomy*. 2021;11(2):198 <https://doi.org/10.3390/agronomy11020198> EDN: UIGEOY
- [8] Belyatsky VN. *Fundamentals of methods of atomic absorption and atomic emission spectroscopy*. Minsk; BGMU; 2015. 47 p. (In Russ.)
- [9] Vorobyeva LA. *Theory and practice of chemical analysis of soils*. Moscow: GEOS publ.; 2006. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Березкин Виктор Юрьевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент департамента экологии человека и биоэлементологии, институт экологии, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 115093, г. Москва, ш. Подольское, д. 8/5; старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии окружающей среды ГЕОХИ РАН, Российская Федерация, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, 19. ORCID: 0000-0002-1025-638X; eLIBRARY SPIN-код: 7074-9478. E-mail: victor76@list.ru

Волкова Вероника Денисовна, аспирант кафедры земельных ресурсов и оценки почв, факультет почвоведения, МГУ имени М.В. Ломоносова, Российская Федерация, 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1–12. ORCID: 0000-0002-0193-840X; eLIBRARY SPIN-код: 4063-1831. E-mail: v_v_d_2000@mail.ru

Дегтярёв Александр Петрович, научный сотрудник лаборатории биогеохимии окружающей среды ГЕОХИ РАН, Российская Федерация, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, д. 19. ORCID: 0000-0002-2668-8427; eLIBRARY SPIN-код: 6058-7995. E-mail: degtyarev_a@mail.ru

Калеро Эррера Ванесса Катерине, аспирант департамента экологии человека и биоэлементологии, институт экологии, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 115093, г. Москва, ш. Подольское, д. 8/5. ORCID: 0000-0001-8636-7951; eLIBRARY SPIN-код: 1849-3877. E-mail: vkalero@bk.ru

Якименко Ольга Сергеевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, кафедры химии почв, факультет почвоведения, МГУ имени М.В. Ломоносова, Российская Федерация, г. Москва, Ленинские горы, д. 1–12. ORCID: 0000-0003-0499-5482; eLIBRARY SPIN-код: 7525-7090. E-mail: iakim@soil.msu.ru

Терехова Вера Александровна, доктор биологических наук, профессор кафедры земельных ресурсов и оценки почв, факультет почвоведения, МГУ имени М.В. Ломоносова, Российская Федерация, г. Москва, Ленинские горы, д. 1–12. ORCID: 0000-0001-9121-639X; eLIBRARY SPIN-код: 4488-9505. E-mail: vterekhova@gmail.com

Bio notes:

Victor Yu. Berezkin, Ph.D. of Geology, Associate Professor of the Department of Human Ecology and Bioelementology, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, 8/5 Podolskoe shosse, Moscow, 115093, Russian Federation; Senior Researcher Laboratory of Environmental Biogeochemistry GEOKHI RAS, 19 Kosygina St, Moscow, 119991, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-1025-638X; eLIBRARY SPIN-code: 7074-9478. E-mail: victor76@list.ru

Veronika D. Volkova, Postgraduate Student, Soil Science Department, Lomonosov Moscow State University, 1–12 Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-0193-840X; eLIBRARY SPIN-code: 4063-1831. E-mail: v_v_d_2000@mail.ru

Alexander P. Degtyarev, Researcher, Laboratory of Environmental Biogeochemistry, Vernadsky Institute, 19 Kosygina St, Moscow, 119991, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-2668-8427; eLIBRARY SPIN-code: 6058-7995. E-mail: degtyarev_a@mail.ru

Vanessa Katherine Calero Errera, Postgraduate Student of the Department of Human Ecology and Bioelementology, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, 8/5 Podolskoe shosse, Moscow, 115093, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-8636-7951; eLIBRARY SPIN-code: 1849-3877. E-mail: vkalero@bk.ru

Olga S. Yakimenko, Ph.D. in Biology, Leading Researcher, Department of Soil Chemistry, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, 1–12 Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-0499-5482; eLIBRARY SPIN-code: 7525-7090. E-mail: iakim@soil.msu.ru

Vera A. Terekhova, Dr. Biol. Sci., Professor, Soil Science Department, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, 1–12 Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-9121-639X; eLIBRARY SPIN-code: 4488-9505. E-mail: vterekhova@gmail.com