

УДК 581.557.24

DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2025-80-2-73-83



БИОДИАГНОСТИКА ЭФФЕКТОВ ПОЛИМЕРНЫХ МЕЛИОРАНТОВ НА АГРОДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТУЮ ПОЧВУ ПРИ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ ПО РЕАКЦИИ РАСТЕНИЙ И МИКРООРГАНИЗМОВ

В. А. Терехова^{1*}, О. С. Якименко¹, Ю. Д. Сергеева¹, И. Г. Панова², С. А. Кулачкова¹,
Е. Н. Деревенец¹, В. К. Калеро³, В. Д. Волкова¹, О. А. Новоскольцева²

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

² МГУ имени М.В. Ломоносова, химический факультет, 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 3

³ Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, 117198, Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

* E-mail: vtterekhova@gmail.com

Охарактеризовано влияние полимерных мелиорантов на изменение токсичности агродерново-подзолистой почвы, загрязненной комплексом тяжелых металлов (ТМ). В почву с модельным загрязнением солями меди, цинка, свинца и кадмия (2, 4 и 6 ОДК) вносили гидролизированный полиакрилонитрил (ГИПАН) и бинарную композицию в виде ГИПАН-гумат калия (ГИПАН+СГ, 1:10) в дозе 0,2% по сухому веществу. Контрольные варианты при всех уровнях загрязнения почвы представлены образцами без обработки мелиорантами. Действие полимерных рецептур на снижение токсичности ТМ проявлялось в разной степени в зависимости от уровня загрязнения почвы. Бактериальный биотест с использованием стандартной биолюминесцентной тест-культуры и фитотестирование на проростках высших растений *Sinapis alba* L. показали положительный эффект препарата ГИПАН+СГ при наивысшей дозе загрязнения – 6 ОДК ТМ. Биоиндикация функционального состояния почвенной микробиоты показала, что мелиоранты снижают микробный метаболический коэффициент до допустимого уровня $2 \text{ мкг С-СО}_2 \text{ мг}^{-1} \cdot \text{С}_{\text{мик}} \cdot \text{ч}^{-1}$, что является важным подтверждением их положительного эффекта на почвенное микробное сообщество. Лабораторное биотестирование незагрязненной почвы, как и при относительно невысоких уровнях загрязнения ТМ, выявило токсичность водной вытяжки образцов с мелиорантами: замедление роста корней и снижение биолюминесценции тест-бактерий. Подчеркивается необходимость дополнительных анализов при рекомендации мелиорантов к применению с целью детоксикации загрязненных почв с учетом полученных в работе результатов.

Ключевые слова: тяжелые металлы, биотестирование, экотоксичность, *Sinapis alba*, микробная индикация, ремедиация, гидролизированный полиакрилонитрил, гумат калия.

Введение

Синтетические водорастворимые (гидрофильные) полиэлектролиты в настоящее время рассматриваются как перспективные почвоулучшители и находят все большее применение в сельскохозяйственных технологиях (Delgado et al., 2024). В зависимости от состава ионизируемых макромолекул, которые несут положительные или отрицательные заряды, они способны смягчать проявления водной и ветровой эрозии почвы, депонировать и контролировать высвобождение питательных веществ для растений, а также связывать токсиканты (Urbano et al., 2020). В качестве одного из таких потенциальных почвенных кондиционеров рассматривают гидролизированный полиакрилонитрил (ГИПАН). Последний широко используется в нефтедобывающей промышленности для оптимизации свойств буровых растворов (Yu, 2015; Huang et al., 2024), а также

применяется для формирования пылеподавляющих покрытий (Гурин и др., 2012). Структурно ГИПАН представляет собой линейный сополимер акриловой кислоты и акриламида с незначительным содержанием звеньев акрилонитрила (рис. 1), и недавние исследования продемонстрировали его благоприятное воздействие на гидрофизические характеристики почвы и эффективность в стабилизации почв против водной и ветровой эрозии (Новоскольцева и др., 2021; Novoskoltseva et al., 2022). Преимущество ГИПАНа по сравнению с традиционным полимерным мелиорантом, полиакриламидом (ПАМ), заключается в том, что он не содержит мономер акриламида, который обладает некоторой токсичностью (Xiong et al., 2018; Tepe, Sebi, 2019), и, как было показано, нетоксичен в тестах с использованием чистых культур некоторых грамположительных и грамотрицательных бактерий и грибов (Novoskoltseva

et al., 2022). Однако влияние ГИПАНа на почвенный микробиом и экотоксикологические показатели почв остается практически не изученным.

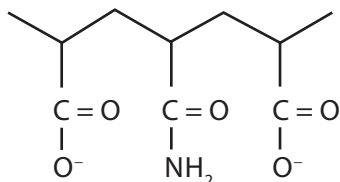


Рис. 1. Схематическое изображение структурной формулы ГИПАНа

Показано, что комбинированные полимерные составы имеют преимущество перед отдельными полиэлектролитами из-за более сложного оптимизирующего воздействия на свойства почв (Zhang et al., 2023; Izumrudov et al., 2019). В свете растущего интереса к разработке природоподобных технологий (Perminova, 2019) представляется целесообразным использовать синтетический полимер не в чистом виде, а в композициях с биополимерами на основе гуминовых веществ, которые будут оказывать прайминг-эффект и способствовать биодеградации полимера. Гуминовые вещества (ГВ) являются природными полиамфолитами, и их способность стимулировать рост и развитие растений, а также биологическую активность почвы широко известна (Jindo et al., 2020). Эти эффекты особенно выражены в условиях загрязнения почв (Tavares et al., 2021). За счет наличия кислых функциональных групп ГВ связывают катионы тяжелых металлов (ТМ), тем самым снижая их токсичность для живых организмов (Kulikova, Perminova, 2021). Потенциально такую способность может проявлять и полианион ГИПАН, но таких исследований ранее не проводилось. Кроме того, гуминовые препараты широко представлены на рынке и коммерчески доступны.

При взаимодействии бинарной полимерно-гуминовой композиции с почвенной матрицей ГИПАН проявляет себя прежде всего как структурообразователь. Макромолекулы ГИПАНа связываются с поверхностью почвенных частиц за счет водородных связей, ван-дер-ваальсовых взаимодействий и за счет электростатических связей между отрицательно заряженными сайтами частиц и полимера через поливалентные ионы металлов, что в целом способствует формированию устойчивых почвенных агрегатов. Гуминовые вещества также известны как структурообразователи, но гибкие цепи линейного ГИПАНа формируют более прочные контакты с органоминеральными частицами почвы, чем разветвленные и конформационно жесткие частицы гуматов. Гумат же главным образом выступает как стимулятор биологической активности почвы и смягчает токсические эффекты поллютантов. В литературе имеются данные о подобных взаимодействиях между ингредиентами сложных органических составов, когда гуминовый продукт

снижал негативные эффекты высоких доз токсикантов (Holatko et al., 2020; Bondareva, Kudryasheva, 2021). Мы предположили, что ГИПАН в сочетании с гуминовыми веществами могут обеспечить усиление положительных эффектов составляющих компонентов.

Однако влияние ГИПАНа практически не изучено в отношении его воздействия на живые системы. В отношении гуматов показано их бимодальное воздействие на живые организмы в зависимости от концентрации (стимулирующее в низких дозах и ингибирующее — в высоких), источника органического сырья и состава гуминового продукта (Rose et al., 2014). В связи с этим оценка экологической безопасности и ремедиационной эффективности полимерных почвоулучшителей на основе ГИПАНа и препаратов гуминовой природы является актуальной задачей.

С другой стороны, учитывая возможность связывания ТМ полианионами как гумата, так и ГИПАНа, целесообразно оценить и ремедиационный потенциал ГИПАНа по отношению к загрязнению почв ТМ как в чистом виде, так и в составе бинарной композиции с гуматом.

Цель исследования заключалась в изучении детоксикации загрязненной ТМ почвы с помощью ГИПАНа в отдельности и при сочетании с гуматом калия по показателям фито- и антибактериальной токсичности. Реакции тест-растений и микроорганизмов на внесение мелиорантов изучали при разном уровне полиметаллического загрязнения почвы.

Материалы и методы

Почва. Для исследования использовали образец из верхнего горизонта (0–20 см) агродерново-подзолистой почвы на территории УОПЭЦ «Чашниково» (Солнечногорский городской округ Московской области). Прикопка, из которой отбирали образец почвы, располагалась в нижней части водораздела, на поле, находящемся в севообороте, на участке, выделенном для проведения полевых экспериментов (56.039057N, 37.168832E). Содержание органического углерода $C_{орг}$ 1,11%, $pH_{водн}$ 6,92. Почву высушивали, растирали и просеивали через почвенное сито с диаметром отверстий 2 мм.

Полимерные рецептуры. В данном исследовании использовали следующие полиэлектролиты (ПЭ): гидролизированный полиакрилонитрил (ГИПАН) и промышленный гумат калия «Гумат Сахалинский».

ГИПАН — линейный полианион со средней молекулярной массой 300 кДа, продукт щелочного гидролиза полиакрилонитрила (рис. 1) (реагент ВПРГ, ООО «Бурхимснаб», Россия). Хорошо растворим в воде, содержит 34,3% углерода и 3,58% азота. Анализ коммерческого образца методом ИК-спектроскопии показал отсутствие нитрильных

групп в составе макромолекулы, в состав ГИПАНа входили только амидные и акрилатные мономеры в мольном соотношении 25/75 (Новоскольцева и др., 2021).

Гумат Сахалинский (СГ) производится методом щелочной экстракции из окисленного бурого угля (леонардита) группой компаний «Сахалинские гуматы»; представлен на рынке как органоминеральное удобрение и биостимулятор. Содержит 38,0% общего углерода, 1,25% общего азота; экстрагируемые гуминовые кислоты составляют 50% от органического вещества.

Дизайн эксперимента. Образцы почвы (массой 400 г) разделяли на четыре равные части, в три из которых вносили растворы, содержащие смесь тяжелых металлов в виде растворимых солей (нитратов) меди, цинка, свинца и кадмия. Условная доза внесения каждого элемента составляла 2, 4 и 6 ОДК валовых форм металлов для супесчаных почв. Массовые доли катионов в исследуемых вариантах представлены в табл. 1. Растворы ТМ вносили пипеткой из расчета 15 мл на 100 г почвы: в одну часть — раствор с концентрацией, соответствующей 2 ОДК катионов ТМ, в другую — 4 ОДК ТМ, в третью — 6 ОДК ТМ и тщательно перемешивали. Четвертую часть почвы (массой 100 г) увлажняли равным объемом дистиллированной воды (15 мл) (контроль к ТМ).

Таблица 1

Содержание металлов ($\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$) при моделировании загрязнения агродерново-подзолистой почвы

Катионы ТМ	ОДК	Варианты опыта		
		2 ОДК	4 ОДК	6 ОДК
Cu	33	66	132	198
Zn	55	110	220	330
Pb	32	64	128	192
Cd	0,5	1,0	2,0	3,0

Полученные образцы почв, влажность которых составляла около 60% от полной влагоемкости, оставляли на семь суток при комнатной температуре для равномерного распределения воды и солей ТМ. Затем почвенные образцы с добавками солей металлов или воды делили на три части (варианты опыта), одна из которых служила контролем для полимерных добавок, а две другие обрабатывали растворами полимеров (ГИПАН отдельно и ГИПАН с гуматом калия вместе) из расчета 20 мл на 100 г сухой почвы.

ГИПАН использовали в виде 1% водного раствора, поскольку именно такая концентрация показала наибольший эффект в предыдущих исследованиях (Novoskoltseva et al., 2021; 2022). Бинарную водную смесь ГИПАН+СГ готовили следующим образом: 1 г ГИПАНа и 0,1 г СГ растворяли в 90 мл

бидистиллированной воды при перемешивании; рН полученного раствора доводили до 7, затем общий объем доводили до 100 мл. Пониженная концентрация гумата выбрана с учетом того факта, что гуматы оказывают наибольшую стимулирующую активность в диапазоне концентраций 0,1–1000 $\text{мг} \cdot \text{л}^{-1}$, а в более высоких могут проявлять токсичность (Якименко, Терехова, 2011).

Таким образом, доза внесения ГИПАНа составила 0,2% по сухому веществу, что примерно соответствует содержанию ГИПАНА в верхнем 1-см слое почвы при поверхностной обработке 1%-ным раствором при норме расхода 2 $\text{л} \cdot \text{м}^{-2}$. Подготовленные таким образом почвенные образцы (12 вариантов) инкубировали еще семь суток при комнатной температуре. Из каждого варианта отбирали пробы для дальнейших анализов, по 3 аналитические повторности из каждого сосуда.

Для приготовления водных экстрактов к навеске исследуемых образцов массой 25 г добавляли 100 мл дистиллированной воды. Смеси взбалтывали на шейкере в течение двух часов, затем фильтровали через фильтр «белая лента».

Фитотестирование с помощью проростков высших растений. Тестирование образцов проводили элюатным способом на проростках семян горчицы белой *Sinapis alba* L. в пластиковых планшетах согласно (ФР.1.31.2020.3871) с модификациями. В нижнюю камеру пластикового двухкамерного планшета помещали 3 слоя фильтровальной бумаги, приливали 10 мл анализируемого экстракта и раскладывали семена растений. В каждый планшет помещали по 15 семян. Каждый вариант имел трехкратную повторность, всего 45 семян на вариант. Длительность экспозиции составляла 96 ч, при температуре $22 \pm 2^\circ \text{C}$. По окончании экспозиции измеряли длину корней.

Тестирование по биолюминесценции бактерий. Воздействие водных экстрактов почв и почвенно-полимерных смесей на тест-культуру бактерий анализировали с помощью генномодифицированного штамма бактерий *Escherichia coli* в составе препарата «Эколюм» согласно методике (ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.11–04). Изменения интенсивности биолюминесценции бактерий оценивали с помощью прибора «Биотокс-10». Уменьшение интенсивности свечения пропорционально токсическому эффекту. Критерием токсического действия является изменение величины интенсивности биолюминесценции тест-бактерий в исследуемой пробе по сравнению с контрольной пробой — дистиллированной водой. Результат анализа выражали в расчетных индексах биолюминесценции (ИБЛ).

Оценка реакции почвенных микроорганизмов. Содержание углерода микробной биомассы ($\text{C}_{\text{мик}}$) определяли методом субстрат-индуцированного дыхания (СИД), по дыхательному отклику почвен-

ных микроорганизмов на внесение в почву легкодоступного субстрата (глюкозы), который пропорционален содержанию микробной биомассы (Anderson, Domsch, 1978; Ананьева и др., 2009). Навеску почвы (3 г в пересчете на а. с. почву) помещали в стеклянный флакон (объем 15 мл), добавляли по каплям раствор глюкозы ($0,1 \text{ мл} \cdot \text{г}^{-1}$ а. с. п.) для получения ее результирующей концентрации $10 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ а. с. п., закрывали герметично и инкубировали не менее 3 ч при 22°C . Затем из воздушной фазы флакона отбирали шприцом пробу воздуха ($0,5 \text{ мл}$) и вводили ее в газовый хроматограф «КристалЛюкс 4000М» для измерения концентрации CO_2 . Время инкубации почвы с глюкозой строго фиксировали. Скорость СИД рассчитывали с учетом концентрации CO_2 , объема газовой фазы флакона, навески почвенного образца и времени его инкубации. Содержание $\text{C}_{\text{мик}}$ ($\text{мкг С} \cdot \text{г}^{-1}$ почвы) определяли по формуле: $\text{СИД} \times 40,04 + 0,37$ (Anderson, Domsch, 1978).

Базальное дыхание почвы (БД) измеряли аналогично определению СИД, только вместо раствора глюкозы в почву вносили дистиллированную воду и инкубировали 24 ч при 22°C , результат выражали в $\text{мкг С} - \text{CO}_2 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$. Рассчитывали микробный метаболический коэффициент ($q\text{CO}_2$) как отношение $\text{БД}/\text{C}_{\text{мик}}$, которое иллюстрирует удельное дыхание микробной биомассы и характеризует экологический статус микробного сообщества почвы (Благодатская, Ананьева, 1996).

Статистическая обработка. Результаты представлены в виде средних значений и их стандартных отклонений. Для оценки значимости различий между средними проводили двухфакторный дисперсионный анализ (фактор А — уровень нагрузки ТМ, фактор Б — тип субстрата) с расчетом F-критерия в пакете программ Statistica 10. В случае значимости F-критерия далее проводили разделение средних на гомогенные группы на основе наименьшей существенной разницы (НСР) по Фишеру. При обработке данных, выраженных в процентах к контролю (пробы без полимеров), статистическому анализу подвергали исходные абсолютные величины, а затем полученные величины представляли в процентах.

Результаты

Оценка фитотоксичности

Воздействие выбранных доз поллютантов на развитие проростков горчицы было невысоким: внесение в почву ТМ в дозах 2 и 4 ОДК катионов (меди, цинка, свинца и кадмия) не снижали, а даже несколько стимулировали рост корней горчицы белой, по всей вероятности, демонстрируя эффект гормезиса (рис. 2). Фитоэффект торможения наблюдался лишь при 6 ОДК, угнетение роста корней в этом варианте составило 22,33% к незагрязненному контролю, что превышало критическое значение для фитотеста 20%.

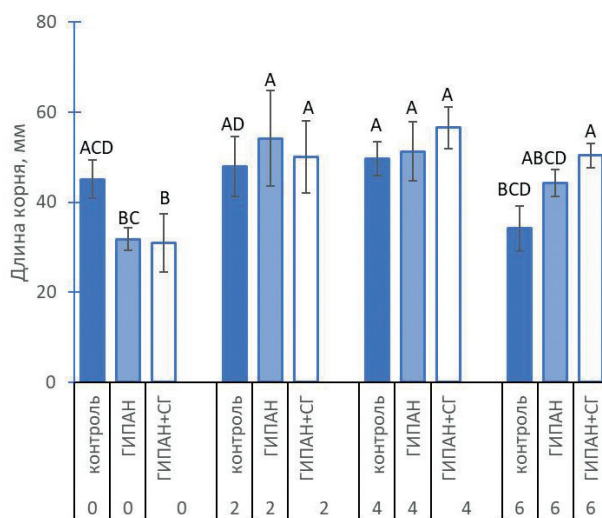


Рис. 2. Влияние полимеров на развитие корней *S. alba* при разных дозах загрязнения почвы ТМ (среднее значение длины корня, планки — стандартное отклонение). Цифры под осью абсцисс обозначают уровень нагрузки ТМ: 0, 2, 4 и 6 ОДК. Буквами указана принадлежность средних значений к гомогенной группе на основании величины НСР по Фишеру, уровень значимости $p \leq 0,05$

Добавка ГИПАНа в отдельности и в сочетании с СГ к почве с максимальной нагрузкой ТМ давала положительный эффект, статистически значимый в варианте ГИПАН+СГ. На фоне 6 ОДК в присутствии ГИПАНа длина корней проростков горчицы белой возрастала на 25%; в комбинации ГИПАНа с гуматом этот эффект усиливался и прибавка составила 44% по сравнению с соответствующим контролем (6 контроль) (табл. 2). При уровнях загрязнения 2 и 4 ОДК, на фоне гормезиса от ТМ, статистически значимый положительный эффект от добавок мелиорантов отсутствовал, хотя и проявилась тенденция к небольшой стимуляции роста корней проростков. Интересно, что в незагрязненной почве (0 контроль) добавка полимерных рецептур не оказала благоприятного воздействия на растения, а, напротив, вызывала заметное угнетение.

В этом эксперименте результаты двухфакторного дисперсионного анализа данных показали значимое влияние фактора А (уровень нагрузки ТМ): $F_{\text{ф}} = 7,72$; $F_{05} = 3,01$. Оценка фактора Б (присутствие полимеров), а также их взаимодействия АВ не показала существенного влияния (значения $F_{\text{ф}}$ ниже F_{05}).

Оценка токсичности по реакции биолюминесцентных бактерий. Токсическое воздействие ТМ по показателю бактериальной люминесценции выражено очень отчетливо, и индекс биолюминесценции (ИБЛ) снижался прямо пропорционально концентрации поллютантов от 423 до 63 отн. ед. (рис.3), что при 6 ОДК составляло лишь 15% от чистого контроля. По фону внесения 2 и 4 ОДК ТМ чистый ГИПАН еще более снижал биолюминесценцию (на 61–59% по сравнению с соответ-

ствующим вариантом без полимеров, табл. 2), в то время как в композиции с СГ этот эффект выражен значительно слабее и значение ИБЛ статистически не отличается от соответствующего контроля. При максимальной нагрузке ТМ — 6 ОДК — дополнительного снижения величин ИБЛ под действием полимеров не наблюдалось.

В незагрязненной ТМ почве оба полимерных состава приводили к снижению биOLUMиНесценции бактерий (рис. 3). Этот эффект особенно выражен при внесении ГИПАНа (угнетение тест-функции на 86%), тогда как добавка СГ к ГИПАНу смягчает этот эффект более чем в 2 раза.

По данным дисперсионного анализа в бактериальном биотесте показана существенность как обоих изучаемых факторов (нагрузка ТМ и наличие полимеров), так и их взаимодействия.

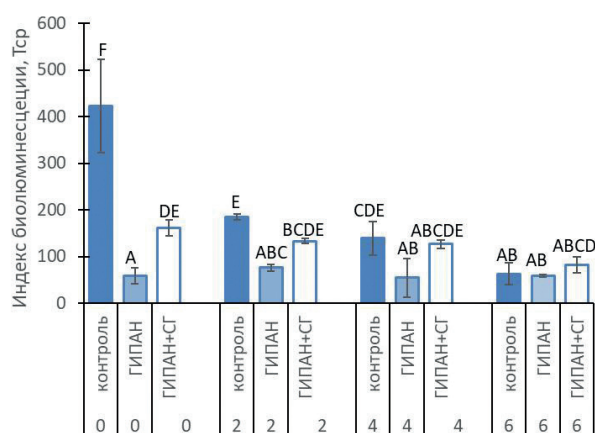


Рис. 3. Влияние полимеров на биолюминесценцию генно-модифицированного штамма *E. coli* при разном уровне полиметаллического загрязнения почвы (среднее значение ИБЛ, планки — стандартное отклонение). Цифры под осью абсцисс обозначают уровень нагрузки ТМ: 0, 2, 4 и 6 ОДК. Буквами указана принадлежность средних значений к гомогенной группе на основании величин НСР по Фишеру, уровень значимости $p \leq 0,05$

Оценка функциональной активности почвенных микроорганизмов. Изменение функциональной активности микроорганизмов оценивали на основании расчетов эмиссии диоксида углерода («почвенного дыхания»). Загрязнение почвы приводило к снижению накопления микробной биомассы. Токсическое действие ТМ по этому расчетному показателю проявилось при 4 и 6 ОДК в снижении содержания $C_{\text{мик}}$ на 26–27% (рис. 4А). ГИПАН при такой нагрузке дал положительный эффект, который проявился в тенденции (статистически незначимой) увеличения среднего значения $C_{\text{мик}}$ при 4 ОДК по сравнению с таковым показателем в незагрязненной почве (212 и 200 $\text{мкг} \cdot \text{г}^{-1}$). Бинарная композиция ГИПАН+СГ такого эффекта не показала: при 6 ОДК содержание $C_{\text{мик}}$ во всех вариантах было ниже изначального уровня незагрязненной контрольной почвы.

В незагрязненной почве оба полимерных состава приводили к увеличению содержания углерода микробной биомассы (рис. 4А). Добавление одного ГИПАНа приводило к двукратному приросту $C_{\text{мик}}$, а бинарного состава ГИПАН+СГ — в 1,7 раз (табл. 2).

Для этой группы тест-откликов также показана значимость влияния обоих изучаемых факторов (нагрузка ТМ и наличие полимеров) и их взаимодействия.

Интенсивность БД при внесении ТМ в почву без добавок полимеров статистически не значимо, но увеличилась, особенно при дозе 6 ОДК (на 36%, рис. 4Б). Так как это увеличение БД происходило без сопутствующего увеличения $C_{\text{мик}}$, оно свидетельствовало о стрессовом состоянии микроорганизмов при внесении поллютантов. Добавление мелиорантов в виде чистого ГИПАНа или его бинарной композиции ГИПАН+СГ способствовало снижению БД до уровня, близкого к уровню БД незагрязненной почвы — $0,30 \text{ мкг С-СО}_2 \cdot \text{г}^{-1}$ (вариант без ТМ и без полимеров, обозначенный как 0 контроль). В целом по этой выборке двухфакторный дисперсионный анализ свидетельствует об отсутствии достоверного влияния как ТМ, так и полимерных добавок.

Как известно, решающий вывод при оценке состояния и функционирования микробного сообщества при хроматографическом методе анализа «почвенного дыхания» основывается на таком показателе, как микробный метаболический коэффициент — $q\text{CO}_2$. Он отражает соотношение объема микробной биомассы в почве и ее активность по показателю эмиссии диоксида углерода. Высокие значения свидетельствуют о стрессовом состоянии микробиоты, тогда как понижение $q\text{CO}_2$ при мелиоративных воздействиях является показателем их эффективности.

Загрязнение почвы ТМ в нашей работе закономерно сопровождалось пропорциональным ростом $q\text{CO}_2$; и при 4, и 6 ОДК значение $q\text{CO}_2$ превышало критический уровень в $2 \text{ мкг С-СО}_2 \text{ мг}^{-1} \cdot \text{С}_{\text{мик}} \cdot \text{ч}^{-1}$ характеризую высокий токсический эффект поллютантов на микроорганизмы (рис. 4В). Внесение полимерных рецептур в загрязненные образцы почвы при всех уровнях нагрузки ТМ снижало микробный метаболический коэффициент. При 4 ОДК ТМ, когда значение $q\text{CO}_2$ достигало $2,4 \text{ мкг С-СО}_2 \text{ мг}^{-1} \cdot \text{С}_{\text{мик}} \cdot \text{ч}^{-1}$, оба мелиоранта достоверно снижали этот показатель до допустимых значений. При более высокой нагрузке — 6 ОДК ТМ — доля относительного снижения $q\text{CO}_2$ была сходной (табл. 2). Значение $q\text{CO}_2$ загрязненной почвы с ГИ-ПАНОм снизилось до $1,9 \text{ мкг С-СО}_2 \text{ мг}^{-1} \cdot \text{С}_{\text{мик}} \cdot \text{ч}^{-1}$, а при добавке композиции ГИПАН+СГ — до $2,1 \text{ мкг С-СО}_2 \text{ мг}^{-1} \cdot \text{С}_{\text{мик}} \cdot \text{ч}^{-1}$. Различия в положительных эффектах двух видов мелиорантов были незначимыми. Двухфакторный дисперсионный анализ подтверждает значимость воздействия на этот показатель и ТМ, и мелиорантов.

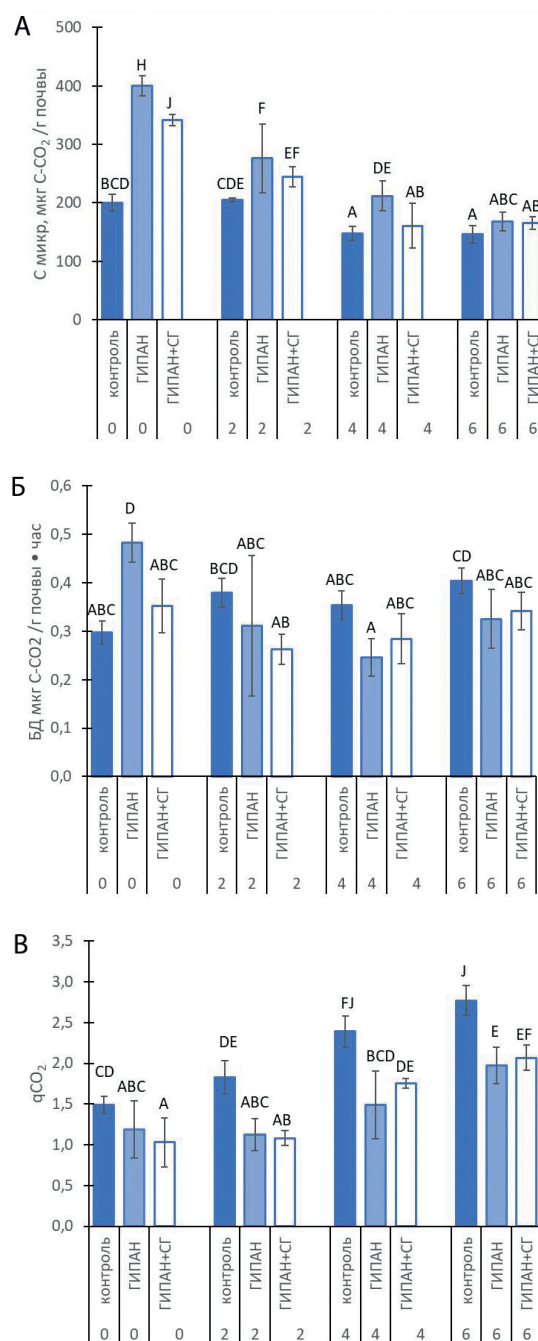


Рис. 4. Влияние ТМ и полимерных рецептов на содержание микробного углерода (А), базальное дыхание (Б), микробный метаболический коэффициент (В) (средние значения, планки — стандартное отклонение). Цифры под осью абсцисс обозначают уровень нагрузки ТМ: 0, 2, 4 и 6 ОДК. Буквами указана принадлежность средних значений к гомогенной группе на основании величины НСР по Фишеру, уровень значимости $p \leq 0,05$

Развитие растений и состояние микробиома — важнейшие характеристики здоровья почв (Терехова и др., 2023). Исходя из этого положения, мы применили два дополняющих друг друга подхода для биодиагностики экологического состояния почвы — стандартное биотестирование экотоксичности (на проростках семян *S. alba* и на тест-культуре биолуминесцентных бактерий)

и биоиндикацию по функциональной активности микробиома, выражающейся в дыхательной активности и накоплении микробной биомассы. В обобщенном виде результаты всех биотестов представлены в табл. 2.

Обсуждение

Лабораторные биотесты и биоиндикация микробных сообществ не дали однозначных результатов оценки эффектов мелиорантов. По откликам лабораторных тест-культур (проростки *S. alba* и биолуминесцентные бактерии) положительная тенденция от мелиорантов заметна в обоих биотестах лишь с максимальной нагрузкой ТМ при добавке ГИПАН+СГ, а увеличению роста корней при 6 ОДК ТМ способствует еще и ГИПАН в отдельности, в то время как результирующий показатель состояния микробного сообщества — микробный метаболический коэффициент — при всех уровнях загрязнения свидетельствует о благоприятном воздействии обоих мелиорантов.

В данной работе в условиях элюатного фитотестирования (анализ влияния водной вытяжки) по отношению к проросткам *S. alba* проявился негативный эффект мелиорантов в незагрязненной почве, тогда как в ранее проведенных исследованиях твердой массы почвы с добавками ГИПАНа в фитотестах на другом виде растений — редисе *Raphanus sativus* — показано, что полимер по отношению к редису нетоксичен (Novoskoltseva et al., 2024). Объяснить этот факт несовпадения можно как различиями в чувствительности разных видов растений, так и разным дизайном экспериментов. И то, и другое не раз отмечалось в литературе. В данном случае надо учитывать то неоднократно подтвержденное положение, что анализ почвы в целом дает более надежные результаты, чем анализ водной вытяжки в фитотестах (Prudnikova et al., 2020).

Аналогичное объяснение можно дать и негативной реакции на полимеры люминесцентной тест-культуры бактерий. Бактериальная тест-культура достаточно чувствительна к воздействию ТМ: поллютанты значительно снижали биолуминесценцию (ИБЛ) при всех уровнях нагрузок, что отражает угнетение ее развития в данных условиях. Введение ГИПАНа во всех вариантах опыта как по фону поллютантов, так и без них приводило к примерно одинаковому снижению ИБЛ до уровня 54–76. Ранее показано, что ГИПАН в концентрации до 0,33% не проявляет токсичности по отношению к чистым суспензияльным культурам бактерий *Pseudomonas fluorescens*, *Staphylococcus aureus* и дрожжей *Yarrowia lipolytica* (Новоскольцева и др., 2021). Очевидно, что это свидетельство различий в чувствительности видов, которое встречается нередко. В этой связи целесообразно обсуждать вопрос об универсальности ряда методик фитотестирования и рекомендуемых тест-культур, которые зачастую не дают

Таблица 2

**Биодиагностические показатели при разном уровне загрязнения почвы ТМ
без и с обработкой полимерными мелиорантами**
(в % к соответствующему контролю — варианты без полимеров)

Нагрузка ТМ	Вариант	Длина корня	Индекс биолюминесценции	$C_{\text{мик}}$	БД	$q\text{CO}_2$
0 ОДК	без полимеров	100	100	100	100	100
	ГИПАН	72	14	201	163	80
	ГИПАН+СГ	69	31	171	119	69
2 ОДК	без полимеров	100	100	100	100	100
	ГИПАН	95	41	135	82	61
	ГИПАН+СГ	87	65	119	69	59
4 ОДК	без полимеров	100	100	100	100	100
	ГИПАН	103	39	143	69	62
	ГИПАН+СГ	114	72	109	80	73
6 ОДК	без полимеров	100	100	100	100	100
	ГИПАН	125	94	115	81	71
	ГИПАН+СГ	144	131	113	85	75

объяснимой реакции на разные виды токсикантов. В современной экотоксикологии в этом плане наметена тенденция к созданию тест-систем, специфичных по чувствительности к определенным видам загрязнений.

В отношении биоиндикации состояния почвенного микробного сообщества наиболее информативным показателем, позволяющим оценивать стабильное функционирование микробиома, служит изменение микробного метаболического коэффициента $q\text{CO}_2$. Показано, что повышение величин $q\text{CO}_2$ происходит при увеличении затрат микроорганизмов на обеспечение своей жизнедеятельности, а значит, может быть индикатором нарушений функций микробного сообщества. В почвах устойчивых экосистем значение $q\text{CO}_2$ обычно меньше 2–4 мкг С– CO_2 $\text{мг}^{-1} \cdot \text{C}_{\text{мик}} \cdot \text{ч}^{-1}$ (Ивашенко, 2017). Параметры функциональной активности почвенной биоты, определенные в стандартизованных лабораторных условиях, можно использовать при подборе и оценке средств ремедиации почв. Загрязнение почв тяжелыми металлами, как правило, приводит к снижению содержания микробного углерода и повышению метаболического коэффициента $q\text{CO}_2$ (Ивашенко, 2017; Xu et al., 2019; Inobeme, 2021). Такую же закономерность мы наблюдали и в наших экспериментах. Добавление ГИПАНа и ГИПАНа+СГ оказало положительный эффект на формирование биомассы микроорганизмов в загрязненных ТМ почвах, при этом наибольшее снижение $q\text{CO}_2$, свидетельствующее о детоксицирующем эффекте, наблюдали у ГИПАНа при концентрациях ТМ 2 и 4 ОДК.

Тяжелые металлы могут разнонаправленно влиять на БД почв. В литературе есть сведения как о снижении БД, так и о его увеличении под действием ТМ. Так, в подзолах, подверженных долгосрочному загрязнению тяжелыми металлами промышленных точечных источников, наблюдалось снижение БД по мере увеличения концентрации меди (Soares et al., 2024). Обработка серой лесной почвы свинцом повышала скорость БД и уменьшала микробную биомассу при загрязнении выше 100 $\text{мгPb} \cdot \text{кг}^{-1}$ независимо от формы внесенного соединения (Благодатская и др., 2006). Внесение ТМ в конструкторы г. Москвы приводило к росту БД и $q\text{CO}_2$, максимально — сразу после загрязнения, при этом в большей степени БД увеличивалось под влиянием Cu, меньше — Pb и Cd (Васенев и др., 2013). В наших экспериментах внесение ГИПАНа поддерживало базальное дыхание на уровне без загрязнения ТМ. Но в целом в этом опыте добавка СГ не дала дополнительного преимущества ГИПАНу по показателям микробной биомассы, БД и $q\text{CO}_2$. Наиболее вероятная причина этого эффекта — биодоступность органического вещества ПЭ. Гуматы из угля содержат, как правило, значительное количество трудноразлагаемых гуминовых веществ, и, учитывая небольшое время экспозиции проб (7 суток), микроорганизмы не получили достаточного количества легкодоступных элементов питания, и эффективность использования этого субстрата была низкой.

Таким образом, в условиях загрязнения почвы ТМ полимерные мелиоранты дают положительный эффект по одним оценкам (в лабораторных био-

тестах) при высоких дозах загрязнения, а по индикационным показателям микробиоты значимое детоксицирующее воздействие отмечается во всех вариантах загрязнения почвы. Положительное действие ГИПАНа и СГ, вероятно, обусловлено наличием в составе обоих полианионных электролитов кислых функциональных групп, которые способны связывать поливалентные катионы ТМ через поликатионные мостики, тем самым снижая их биодоступность и токсическое воздействие поллютантов (Kulikova, Perminova, 2021; Wang et al., 2024). В дополнение к этому химическому механизму у гуминовых веществ ремедиационное действие регулируется еще и стимулирующим воздействием на живые организмы (Kulikova et al., 2005). В итоге при оценке действия мелиорантов при высоких дозах загрязнения ТМ по реакции растений и биолюминесцентных бактерий бинарная композиция ГИПАН+СГ показала более выраженный ремедиационный эффект по сравнению с чистым ГИПАНОм. Это согласуется с другими исследованиями, которые показали преимущества комбинированных составов полимер-гумат по сравнению с чистыми полимерами. Так, интерполиэлектролитные комплексы на основе катионного поли(диаллилдиметиламмоний хлорида) и гумата калия вызывали образование защитного слоя на верхнем слое почвы (Панова и др., 2019), оказывали структурообразующее действие на черноземную почву (Демидов, 2019), оптимизировали состав почвенных агрегатов (Якименко и др., 2021) и снижали токсичность меди для тест-культуры (Panova et al., 2019). В данном исследовании в бинарном составе ГИПАН+СГ суммарная способность ГИПАНа и гумата связывать ионы металлов и снижать их токсичные эффекты была усилена взаимодействием двух полианионов и проявилась в тестах на растениях и бактериальной культуре при высоких уровнях загрязнения.

Заключение

Результаты проведенных исследований показали, что эффект полимерных рецептур на почву зависит от уровня загрязнения токсикантами. ГИПАН и его композиция с гуматом (ГИПАН+СГ) оказывали стимулирующее действие на активность почвенных гетеротрофных аэробных микроорганизмов, выражавшееся в повышении значений микробной биомассы, усилении базального дыхания во всех исследованных вариантах как в незагрязненной почве, так и при разных уровнях загрязнения.

Добавление к почве ГИПАНа в сочетании с гуматом обеспечивало эффект, который проявлялся в снижении токсического действия в лабораторных биотестах лишь при больших дозах ТМ. Гашение люминесценции в водной вытяжке с бактериальной суспензией, что коррелирует с размножением тест-бактерий генномодифицированного штамма *E. coli* в биолюминесцентном бактериальном биотесте,

и снижение фитотоксичности полиметаллического загрязнения наблюдались при 6 ОДК ТМ.

В целом можно рекомендовать испытанные мелиоранты к применению для улучшения почвенных свойств в стрессовых условиях химического загрязнения. Однако, несомненно, при этом надо учитывать возможную негативную реакцию представителей разных групп биоты на воздействие полимеров. Весьма вероятно, что в условиях загрязнения, в частности, катионами металлов полимеры могут в первую очередь связываться с токсичными веществами, а при отсутствии таких токсикантов могут проявлять агрессивность в отношении живых организмов, что мы наблюдали в серии проведенных опытов.

Информация о финансировании работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы развития МГУ (проект № 23-Ш07-13).

Благодарность

Авторы признательны аспиранту С.К. Самбрано Гари и магистру И.А. Кирилловой за помощь в проведении экспериментов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ВКЛАД АВТОРОВ

В.А. Терехова — планирование эксперимента, подготовка рукописи, написание манускрипта; О.С. Якименко — общее руководство проектом, интерпретация результатов, написание манускрипта; Ю.Д. Сергеева, В.К. Калеро, В.Д. Волкова — проведение экспериментов, статистическая обработка; С.А. Кулачкова — интерпретация данных хроматографического анализа; Е.Н. Деревенец — редактирование текста, подготовка иллюстраций; И.Г. Панова и О.А. Новоскольцева — подготовка полимерных рецептур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Рыжова И.М. и др. Углерод микробной биомассы и микробное продуцирование двуокиси углерода дерново-подзолистыми почвами постагрогенных биогеоценозов и коренных ельников южной тайги (Костромская область) // Почвоведение. 2009. № 9.
2. Благодатская Е.В., Ананьева Н.Д. Оценка устойчивости микробных сообществ в процессе разложения поллютантов в почве // Почвоведение. 1996. № 11.

3. Благодатская Е.В., Пампура Т.В., Мякишина Т.Н. и др. Влияние свинца на дыхание и биомассу микроорганизмов серой лесной почвы в многолетнем полевом эксперименте // Почвоведение. 2006. № 5
4. Васенев В.И., Ананьева Н.Д., Иващенко К.В. Влияние поллютантов (тяжелые металлы, дизельное топливо) на дыхательную активность конструкторов // Экология. 2013. № 6.
5. Гурин А.А., Ляшенко В.И., Домничев Н.В. Снижение пыления действующих хвостохранилищ горно-обогатительных комбинатов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2012. № 5.
6. Демидов В.В., Панова И.Г., Шульга П.С. и др. Противозероизонные свойства чернозема, обработанного полиэлектролитными комплексами на основе гуматов калия // Key concepts of soil physics: development, current applications and future prospects. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. T. 368. № 1.
7. Иващенко К.В. Обилие и дыхательная активность микробного сообщества почвы при антропогенном преобразовании наземных экосистем: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Пушино, 2017.
8. ПНД Ф Т 14.1:2.3:4.11-04 — Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению интенсивности бактериальной биолюминесценции тест-системой Эколюм.
9. Новоскольцева О.А., Панова И.Г., Лойко Н.Г. и др. Полиэлектролиты и поликомплессы для стабилизации песчаных грунтов // Высокомолекулярные соединения. Сер. Б. 2021. Т. 63, № 5.
10. Панова И.Г., Хайдапова Д.Д., Ильясов Л.О. и др. Полиэлектролитные комплексы гуматов калия и поли(диаллилдиметиламмоний хлорида) для закрепления песчаного грунта // Высокомолекулярные соединения. Сер. Б. 2019. Т. 61, № 6.
11. Панова И.Г., Ильясов Л.О., Ярославов А.А. Поликомплесные рецептуры для защиты почв от деградации // Высокомолекулярные соединения. Сер. С. 2021. Т. 63, № 2.
12. Терехова В.А., Кулачкова С.А., Морачевская, Е.В. и др. Методология биодиагностики почв и особенности некоторых методов биоиндикации и биотестирования (обзор) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2023. № 2. <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-35-45>.
13. ФР.1.31.2020.38716 «Методика измерений биологической активности почв, субстратов растений, гуминовых веществ методом биотестирования».
14. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И. и др. Классификация и диагностика почв России. Смоленск, 2004.
15. Якименко О.С., Грузденко Д.А., Степанов А.А. и др. Полиэлектролиты для конструирования искусственных почв // Высокомолекулярные соединения. Сер. С. 2021. Т. 63, № 2.
16. Anderson T.H., Domsh K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soil // Soil Biol. Biochem. 1978. № 10.
17. Bondareva L., Kudryasheva N. Direct and indirect detoxification effects of humic substances // Agronomy. 2021. Vol. 11, № 2. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020198>
18. Delgado M.Z., Aranda F.L., Hernandez-Tenorio F. et al. Polyelectrolytes for Environmental, Agricultural, and Medical Applications // Polymers. 2024. Vol. 16. № 10. <https://doi.org/10.3390/polym16101434>
19. Holatko J., Hammerschmidt T., Datta R. et al. Humic acid mitigates the negative effects of high rates of biochar application on microbial activity // Sustainability. 2020. Vol. 12. № 22. <https://doi.org/10.3390/su12229524>
20. Inobeme A. Effect of Heavy Metals on Activities of Soil Microorganism // Adetunji, C.O., Panpatte, D.G., Jhala, Y.K. Microbial Rejuvenation of Polluted Environment. Microorganisms for Sustainability. Springer, Singapore. 2021. Vol. 27. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7459-7_6
21. Izumrudov V.A., Mussabayeva B.K., Kassymova Z.S. et al. Interpolyelectrolyte complexes: Advances and prospects of application // Russian Chemical Reviews. 2019. Vol. 88, № 10.
22. Jindo K., Olivares F.L., Malcher D.J.D.P. et al. From lab to field: role of humic substances under open-field and greenhouse conditions as biostimulant and biocontrol agent // Front Plant Sci. 2020. Vol. 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00426>
23. Kulikova N.A., Perminova I.V. Interactions between humic substances and microorganisms and their implications for nature-like bioremediation technologies // Molecules. 2021. Vol. 26. № 9.
24. Kulikova N.A., Stepanova E. V., Koroleva O. V. Mitigating activity of humic substances: direct influence on biota // Use of Humic Substances to Remediate Polluted Environments: From Theory to Practice: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Use of Humates to Remediate Polluted Environments: From Theory to Practice. Vol. 52. 2005. https://doi.org/10.1007/1-4020-3252-8_14
25. Novoskoltseva O.A., Loiko N.G., Nikolaev Y.A. et al. Interpolyelectrolyte complexes based on hydrolyzed polyacrylonitrile for anti-erosion stabilization of soils and ground // Polymer International. 2022. Vol. 71(6). <https://doi.org/10.1002/pi.6289>
26. Novoskoltseva O., Panova I., Titkina K. et al. Binary soil ameliorants composed of synthetic polyanion and natural humates // Polymer Science, Series B. 2024. Vol. 66(4). <https://doi.org/10.1134/S1560090424601353>
27. Panova I.G., Drobyazko A., Spiridonov V. et al. Humics-based interpolyelectrolyte complexes for antierosion protection of soil: Model investigation // Land Degradation and Development. 2019. Vol. 30(3). <https://doi.org/10.1002/ldr.3228>
28. Perelomov L.V., Sarkar B., Sizova O.I. et al. Zinc and lead detoxifying abilities of humic substances relevant to environmental bacterial species // Ecotoxicology and environmental safety. 2018. Vol. 151. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.01.018>
29. Perminova I.V. From green chemistry and nature-like technologies towards ecoadaptive chemistry and technology // Pure Appl. Chem. 2019. № 9.
30. Prudnikova E.V., Neaman A., Terekhova V.A. et al. Root elongation method for the quality assessment of metal-polluted soils: Whole soil or soil-water extract? // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2020. Vol. 20. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00295-x>
31. Rose M.T., Patti A.F., Little K.R. et al. A meta-analysis and review of plant-growth response to humic substances: practical implications for agriculture // Adv Agron. 2014. Vol. 124. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800138-7.00002-4>
32. Soares M., Rabow S., Rousk J. Can heavy metal pollution stress reduce microbial carbon-use efficiencies? //

Soil Biology and Biochemistry. 2024. Vol. 195. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109458>

33. *Tavares O.C., Ribeiro T.G., García-Mina J.M. et al.* Humic acids enrich the plant microbiota with bacterial candidates for the suppression of pathogens // *Applied Soil Ecology*. 2021. Vol. 168. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104146>

34. *Tepe Y., Çebi A.* Acrylamide in environmental water: a review on sources, exposure, and public health risks. *Exposure and Health* 2019. Vol. 11.

35. *Urbano B.F., Bustamante S.E., Palacio D.A. et al.* Polymer supports for the removal and degradation of hazardous organic pollutants: An overview // *Polym. Int.* 2020. Vol. 6. <https://doi.org/10.1002/pi.5961>

36. *Wang Y., Sakai T., Shibata N. et al.* Soil improvement by biomass polyions and compaction: Reinforcement, biodegradation resistance, and retention of heavy metal ions // *J. Environmental Chemical Engineering*. 2024. Vol. 12(1). [10.1016/j.jece.2023.111676](https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111676)

37. *Xiong B, Loss RD, Shields D, Pawlik T, Hochreiter R, Zydney AL, Kumar M.* Polyacrylamide degradation and its

implications in environmental systems. *NPJ Clean Water*. 2018. Vol.1. № 1.

38. *Xu Y, Seshadri B., Bolan N. et al.* Microbial functional diversity and carbon use feedback in soils as affected by heavy metals // *Environment International*. 2019. Vol. 125. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.071>

39. *Zhang H., Wang G., Du J., Pei X., Du P., Zhou L.* Effects of several polymeric materials on the improvement of the sandy soil under rainfall simulation // *J. Environ. Management*. 2023. Vol. 345

40. *Yu P.Z.* Modification of waste polyacrylonitrile fiber and its application as a filtrate reducer for drilling // *Petroleum Science*. 2015. Vol. 12.

41. *Huang C. et al.* Dynamic Effect of Drilling Fluid Filtrate Reducers on Hydrate Formation // *Energy & Fuels*. 2024. Vol. 38, № 2.

Поступила в редакцию 14.10.2024

После доработки 20.11.2024

Принята к публикации 01.03.2025

TEST RESPONSES OF PLANTS AND MICROORGANISMS TO POLYMER-BASED SOIL AMENDMENTS UNDER CONDITIONS OF MODEL MULTI-ELEMENT CONTAMINATION OF AGRO-SODD-PODZOLIC SOIL

**V. A. Terekhova, O. S. Yakimenko, Yu. D. Sergeeva, I. G. Panova, S. A. Kulachkova,
E. N. Derevenets, V. K. Kalero, V. D. Volkova, O. A. Novoskoltseva**

The effect of polymer soil amendments on changes in toxicity of agro-sod-podzolic soil spiked with a complex of heavy metals (HM) has been characterized. Hydrolyzed polyacrylonitrile (HYPAN) and a binary composition of HYPAN+potassium humate (HYPAN+PH, 1:10) were applied at a rate of 0.2% (on a dry matter basis) to soils with model contamination by Cu, Zn, Pb, and Cd at levels of 2, 4, and 6 approximate permissible concentrations (APC). Samples without ameliorant treatment served as a control for all soil pollution levels. The effect of polymer formulations on reducing the toxicity of heavy metals manifested to varying degrees depending on the level of soil contamination. The bacterial standard bioluminescent biotest and phytotesting on the seedlings of higher plants *Sinapis alba* L. showed a positive effect of the HYPAN+PH composition at the highest contamination level, 6 APC. Bioindication of the functional state of soil microbiota showed that ameliorants lowered the microbial metabolic coefficient (to an acceptable level of $2 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ mg}^{-1} \cdot \text{Cmic} \cdot \text{h}^{-1}$), which is important evidence of their positive effect on the soil microbial community. Laboratory biotesting of uncontaminated soil, as well as at relatively low levels of HM contamination, revealed the toxicity of the aqueous extract of samples with ameliorants (inhibiting root growth and quenching bioluminescence in bacterial bioassay). In light of the findings of this study, it is recommended that further analyses should be conducted before suggesting the use of tested ameliorants for the detoxification of polluted soils.

Keywords: biotesting, ecotoxicity, *Sinapis alba*, remediation, heavy metals, hydrolyzed polyacrylonitrile, potassium humate.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Терехова Вера Александровна, докт. биол. наук, профессор кафедры земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: vterekhova@gmail.com

Якименко Ольга Сергеевна, канд. биол. наук, вед. науч. сотр. кафедры химии почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: ola-yak@mail.ru

Сергеева Юлия Дмитриевна, магистрант 2 года обучения кафедры земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: sergeeva.yulia.dm@gmail.com

Панова Ирина Геннадиевна, канд. хим. наук, вед. науч. сотр. кафедры высокомолекулярных соединений химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: igpan@mail.ru

Кулачкова Светлана Александровна, канд. биол. наук, вед. науч. сотр. кафедры географии почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: kulachkova_sa@inbox.ru

Деревенец Елизавета Николаевна, аспирант кафедры географии почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: lizaderevenets@yandex.ru

Калеро Ванесса Катерине, аспирант Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы,
e-mail: vbiiika8@gmail.com

Волкова Вероника Денисовна, аспирант кафедры земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: v_v_d_2000@mail.ru

Новоскольцева Ольга Александровна, канд. хим. наук, ст. науч. сотр. кафедры высокомолекулярных соединений химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: nsn07@yandex.ru