



Влияние гуматов калия, ксантановой камеди и бинарных композиций на их основе на свойства дерново-подзолистой почвы в модельных экспериментах

© 2025 О. С. Якименко ¹, П. В. Нестеров¹, А. А. Степанов¹, И. Г. Панова², В. Е. Чернов², А. А. Ярославов ²

¹Факультет почвоведения ФГБОУ «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Ленинские горы, д. 1, стр. 12, Москва, Россия. E-mail: iakim@soil.msu.ru

²Химический факультет ФГБОУ «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Ленинские горы, д. 1, стр. 3, г. Москва, 119992, Россия. E-mail: yaroslav@belozersky.msu.ru

Цель исследования. Оценить влияние бинарных композиций на основе гетерофункционального полисахарида ксантановой камеди (КК) и трех видов гуминовых продуктов (ГП) на противозерозионные, водоудерживающие и детоксицирующие свойства дерново-среднеподзолистой почвы в серии модельных экспериментов, в том числе с загрязнением тяжелыми металлами (ТМ), и выявить их потенциал как почвенных мелиорантов в сравнении с индивидуальными полимерами.

Место и время проведения. Исследования проводили в условиях модельных экспериментов в 2024 г.; использовали пахотный горизонт дерново-среднеподзолистой супесчаной несмытой почвы на покровном суглинке (Московская область).

Методы. Использованы четыре биополимера: КК и три ГП: «Сахалинский гумат» из угля (СГ), «Торфогель» из торфа (ТГ) и «Лигногумат» из лигносульфоната (ЛГ), а также их комбинации. Исследования проводили при двух способах обработки почвы полимерными рецептурами: разбрызгиванием растворов на поверхность почвы и смешиванием сухих препаратов со всем объемом почвенной массы. В параллельной серии в почвенно-полимерные смеси вносили растворы солей Cu, Zn, Pb в дозах 150 мг/кг почвы. В почвенно-полимерных смесях определяли влагоемкость, pH, содержание Собиц и подвижных форм ТМ в ацетатно-аммонийном буфере. Фитотоксичность почвенно-полимерных смесей оценивали в элюатном биотесте с тест-культурой *Raphanus sativus*.

Основные результаты. Обработка поверхности почвы водными рецептурами, содержащими КК, приводит к формированию верхнего структурированного композитного слоя из частиц субстрата, связанных между собой полимерными мостиками. Введение в водный раствор КК и ГП в соотношении биополимер:гумат = 2,5:1 или 1:1 не оказывает влияния на прочностные характеристики композиционных покрытий. Монокомпонентные составы и бинарные композиции, при внесении в дозе 1г/100 г, оказали стимулирующее действие на тест-культуру *R. sativum*, причем ЛГ был наиболее эффективным составом. Композиции с КК не показали лучшего эффекта по сравнению с индивидуальными полимерами. В условиях модельного загрязнения, среди монокомпонентных составов наибольшее снижение содержания подвижных форм Cu, Pb и Zn выявлено для гумата из угля (на 34%, 21% и 20% по сравнению с контролем). Гуматы из ТГ и ЛГ по отдельности оказались менее эффективными, но в бинарной композиции с КК их эффективность в снижении подвижности тяжелых металлов увеличилась в среднем на 10%. По результатам фитотеста, при внесении поллютантов все тестируемые рецептуры проявляли протекторные свойства, снижая токсичность ТМ для растений. Водно-физические свойства почвенно-полимерных смесей определялись эффектами КК, а химические и биологические – гуматов.

Заключение. КК можно рассматривать как перспективный мелиорант, оказывающий выраженный противозерозионный эффект. В свою очередь, ГП проявляют биостимулирующий эффект, связывают ТМ и обеспечивают детоксицирующее воздействие разной степени выраженности в зависимости от состава, обусловленного источником органического вещества гуматов. В бинарных композициях указанные эффекты не обладают аддитивностью, но определяются доминирующим механизмом воздействия. Выбор оптимальной рецептуры в качестве почвоулучшителя деградированных почв будет определяться ведущим фактором деградации. Бинарные составы, вероятно, будут обладать комплексным воздействием, поэтому целесообразно проведение их дальнейших исследований в натурных условиях.

Ключевые слова: биополимеры; гуминовые вещества; композиционные покрытия; водостойкость; тяжелые металлы, загрязнение.

Цитирование: Якименко О.С., Нестеров П.В., Степанов А.А., Панова И. Г., Чернов В.Е., Ярославов А.А. Влияние гуматов калия, ксантановой камеди и бинарных композиций на их основе на свойства дерново-подзолистой почвы в модельных экспериментах // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 1. е302. DOI: [10.31251/pos.v8i1.302](https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.302)

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших проблем современности является эрозия и деградация земель. В связи с этим, активно развиваются приёмы и технологии для сохранения почв и поддержания их плодородия. Перспективным методом является использование синтетических и природных полиэлектролитов, то есть полимеров, содержащих в своем составе способные к ионизации функциональные группы (Панова и др., 2021; Delgado et al., 2024). В зависимости от химической природы и структуры макромолекул, показана их способность смягчать проявления водной и ветровой эрозии, депонировать элементы питания растений, связывать токсиканты, оптимизировать водоудерживающие свойства (Измурдов и др., 2019; Ayeldeen et al., 2018). В частности, в качестве почвенных ремедиантов и биостимуляторов в агротехнологиях довольно широко применяются гуминовые вещества (ГВ) – природные полиамфолиты – в виде промышленных препаратов (Безуглова, Полиенко, 2011; Якименко, 2016; Jindo et al., 2020; Bezuglova, Klimenko 2022).

В качестве почвенных мелиорантов также потенциально возможно использование других полимеров природного происхождения (биополимеров), способных задерживать влагу и оказывать благоприятное воздействие на почвенную структуру (Аржакова и др., 2022; Jang, 2020). Такие полимеры способны к биодеструкции и не вызывают опасений, связанных с накоплением ксенобиотиков в природной среде. В частности, к таким веществам относится ксантановая камедь (КК) – хорошо растворимый в воде гетерополисахарид с очень высокой молекулярной массой от 1 до 50×10^6 а.е.м (Garcia-Ochoa et al., 2000). Благодаря гель-образующим свойствам и отсутствию токсичности этот полимер широко применяется в пищевой промышленности, биомедицинской инженерии и геоинженерии (Katzbauer, 1998; Kumar et al., 2018; Berninger et al., 2021).

КК получают методом аэробной ферментации сахарозы или глюкозы бактериями семейства *Xanthomonas bacterium* (Palaniraj et al., 2011). Первичная структура макромолекулы КК (рис. 1) состоит из основной цепи линейной β -(1–4)-D-глюкозы, напоминающей цепь целлюлозы, и боковых цепей трисахарида, прикрепленных к каждой второй единице глюкозы (Faria et al., 2011). Боковые цепи включают два остатка маннозы и один остаток глюкуроновой кислоты, которые могут содержать карбоксильную и пироватную группы (Abbaszadeh et al., 2015), что придает ксантановой камеди свойства слабого анионного полиэлектролита. КК действует как полианион при $\text{pH} > 4,5$ и легко адсорбирует молекулы воды за счет водородных связей. Характерной чертой гребнеобразных и конформационно жестких макромолекул ксантановой камеди является способность к формированию межмолекулярных связей и физически сшитых полимерных сеток даже при небольших концентрациях. Поэтому КК проявляет водоудерживающие свойства в поровом пространстве почвенных субстратов.

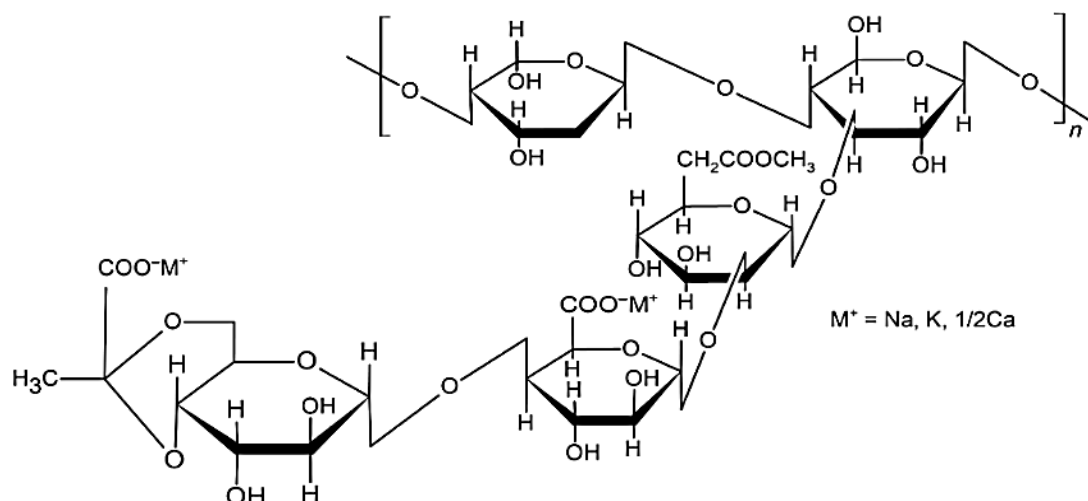


Рисунок 1. Схематическое изображение строения макромолекулы ксантановой камеди (составлена И.Г. Пановой).

В процессе биodeградации КК последовательно деструктирует до олигосахаридов, моносахаридов и, в конечном счете, воды и углекислого газа под действием ферментов, вырабатываемых микроорганизмами. Обнаружено, что за полную деполимеризацию отвечают пять ферментов: ксантанлиаза, β -D-глюканаза, β -D-глюкозидаза, ненасыщенная глюкуронилгидролаза и

α -D-маннозидаза (Nankai et al., 1999). Выработка ферментов, разлагающих КК, показана для *Bacillus* (Cadmus et al., 1982), *Paenibacillus* (Ashraf et al., 2018), *Enterobacter* (Chen et al., 2014) и *Cellulomonas* (Liu et al., 2005). Скорость деградации зависит от наличия микроорганизмов, продуцирующих соответствующие ферменты, и условий окружающей среды. Например, было показано, что ксантановая камедь разлагается бактериями активной илистой почвы в течение 7 суток (Muuchova et al., 2009), но ряд исследователей (Cadmus et al., 1982) обнаружили достаточно высокую устойчивость КК к микробной деградации (до нескольких месяцев).

В агротехнологиях КК была успешно протестирована как экологичное связующее для повышения стойкости почв к водной эрозии и дефляции (Chang et al., 2015; Seo et al., 2021). Как и другие водорастворимые полимеры, КК повышает устойчивость песчаных почв к ветру за счет формирования композиционного покрытия на поверхности субстратов (Ayeldeen et al., 2018). В лабораторных экспериментах с использованием гидравлического лотка для моделирования действия водного потока было показано, что добавление КК привело к 80% снижению гидравлической эрозии песчаной почвы за счет создания на ее поверхности защитного желеобразного слоя (Nsengiyumva, Alexandridis, 2022). Внесение КК в красно-желтую почву Кореи при норме 0,5–1,0% от массы почвы позволило практически на порядок повысить ее устойчивость к размывающему действию воды за счет усиления сцепления между частицами (Chang et al., 2015). В целом современные исследования отражают высокий потенциал КК в укреплении и стабилизации почв и грунтов (Cabalar et al., 2017; Mendonça et al., 2020). К тому же фитотестирование показало, что присутствие КК в субстрате стимулирует рост растений. Подобный эффект объяснялся способностью биополимера сорбировать и удерживать воду, предотвращая ее испарение (Zhang et al., 2023; Tran et al., 2019).

Что касается ГВ, то известна их способность к стимулированию роста и развития растений и биологической активности почв (Jindo et al., 2020). Эти эффекты особенно выражены в условиях загрязнения почв (Ли и др., 2016; Степанов и др., 2018; Kulikova et al., 2005). За счет наличия кислых функциональных групп ГВ связывают катионы тяжелых металлов (ТМ), тем самым снижая их токсичность для живых организмов (Bondareva, Kudryasheva 2021; Kulikova, Perminova, 2021). В то же время, промышленные гуминовые препараты, полученные из различного органического сырья (угля, торфа, органических отходов), отличаются как по составу и свойствам органического вещества, так и по степени проявления биостимулирующего и детоксицирующего эффекта (Muscolo et al., 2022; Yakimenko et al., 2018). В целом, препараты из угля, содержащие гуминовые кислоты (ГК) с высокой степенью полимеризации ароматического ядра и большим количеством функциональных групп, способствуют формированию почвенных агрегатов, увеличению емкости катионного обмена, доступности элементов питания и связыванию токсикантов (Сивакова и др., 2011; Степанов, Якименко 2023). В препаратах из торфа и органических отходов эти эффекты обычно выражены слабее, но за счет наличия биологически активных веществ в составе кислоторастворимой фракции они оказывают более выраженный стимулирующий эффект (Броварова, 2024).

В настоящее время активный интерес вызывают комбинированные двухкомпонентные рецептуры, которые имеют преимущество перед монокомпонентными составами из-за более выраженного оптимизирующего воздействия на свойства почв (Измурдов и др., 2019). Например, показано (Berninger et al., 2021), что совместное использование КК с казеином повысило прочностные характеристики почвы по сравнению с нативными биополимерами, а также улучшило ее водостойкость. Мы предположили, что бинарная композиция на основе КК и ГВ будет оказывать комплексное воздействие на свойства почвы, способствуя увеличению почвенной влагоемкости, формированию водопропрочных покрытий и проявлению биостимулирующего эффекта. Кроме того, учитывая возможность связывания катионов ТМ полианионами гумата и КК, было целесообразно оценить ремедиационный потенциал КК по отношению к загрязнению почв ТМ как в чистом виде, так и в составе бинарной композиции с гуматами.

Цель исследования – оценить влияние бинарных композиций на основе гетерофункционального полисахарида ксантановой камеди и трех видов гуминовых продуктов на противозерозионные, водоудерживающие и детоксицирующие свойства дерново-среднеподзолистой почвы в серии модельных экспериментов, в том числе с загрязнением тяжелыми металлами, и выявление их потенциала как почвенных мелиорантов в сравнении с индивидуальными полимерами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полимерные рецептуры. В данном исследовании использовали следующие природные полиэлектролиты: гетерополисахарид ксантановая камедь и коммерческие гуминовые препараты (ГП) – гуматы калия различных марок, отличающиеся источником органического сырья: гумат

«Сахалинский» из угля, Торфогель из торфа и Лигногумат из лигносульфоната, а также смеси КК и гуматов в соотношении 1:1 и 2,5:1.

Ксантановую камедь (КК) фирмы Zibohan F200 (Deosen Biochemical Ltd. (Ордос, Китай) использовали без дополнительной очистки. Полимер (формулу см. на рис. 1) представлен порошком светло-кремового цвета, растворим в холодной и горячей воде, содержит 39,2% углерода.

Гумат Сахалинский (СГ) производится методом щелочной экстракции из окисленного бурого угля (леонардита) группой компаний «Сахалинские гуматы»; представлен на рынке как органоминеральное удобрение и биостимулятор.

Лигногумат (ЛГ) представляет собой промышленный препарат гумата калия, полученный термической окислительно-гидролитической обработкой технических лигносульфонатов под высоким давлением компанией ООО «РЭТ» (Санкт-Петербург, Россия). Широко представлен на рынке в качестве стимулятора роста растений.

Торфогель (ТГ) – гуминовый препарат из торфа, разработанный и производимый компанией «Acoustic BioTechnologies LTD» по оригинальной кавитационной технологии. Представляет собой гелеобразную массу с влажностью 74–82% и высоким содержанием комплекса гуминовых веществ.

Общее содержание С в полимерах определяли методом бихроматного окисления по Тюрину. Содержание углерода гуминовых кислот в гуматах – по Тюрину в соответствующих экстрактах после разделения щелочной вытяжки (0,1 н. NaOH, 1:50) подкислением до pH = 1,5. Содержание кислых функциональных групп определяли баритовым методом по Драгуновой. Спектры поглощения растворов гуматов регистрировали в УФ-видимом диапазоне на спектрофотометре Shimadzu 1800 (Япония) в диапазоне длин волн 200–800 нм с шагом 0,5 нм.

Основные характеристики гуматов представлены в табл. 1. Хотя препараты сходны по содержанию общего углерода (30–37%), но состав органического вещества различен и представлен комплексом гуминовых веществ с преобладанием ГК в препаратах из торфа и угля (92 и 77% от $C_{\text{общ}}$ соответственно) и сочетанием ГК, фульвокислот и неспецифических органических соединений в Лигногумате (42% ГК). Наибольшее количество кислых функциональных групп содержит СГ – препарат из угля, при этом карбоксильная и фенольная кислотность представлены поровну. В препарате из торфа преобладает карбоксильная кислотность, но по сумме гидроксидов и карбоксидов гуматы ТГ и ЛГ содержат в два раза меньше кислых групп по сравнению с СГ. Различия в молекулярной структуре отражают и спектральные характеристики растворов гуматов: увеличение показателя $E_{465}^{0,001\%}$ в ряду СГ > ТГ > ЛГ свидетельствует об увеличении оптической плотности и степени сопряженности ароматического кольца.

Таблица 1

Химический состав и параметры спектров поглощения гуминовых препаратов

Показатель	Сахалинский	Лигногумат	Торфогель
Сухое вещество, %	98,1	97,9	26,2
Зольность, % к сухому веществу	30,8	29,5	37,1
$C_{\text{общ}}$, % к сухому веществу	38,0	34,7	36,9
$C_{\text{ГК}}/C_{\text{общ}}$, %	76,7	41,9	91,4
Активные кислые группы, мг-экв/г			
-COOH	2,08	1,20	2,36
-ОН фенольные	2,04	1,00	0,52
Сумма кислых групп	4,12	2,20	2,88
$E_{465}^{0,001\%}$	0,025	0,010	0,014
E_4/E_6	8,67	8,67	3,25

Модельные эксперименты. Исследования проводили в условиях модельных опытов при двух различных способах обработки почвы полимерными рецептурами. В серии противоэрозионных экспериментов тестируемые составы наносили разбрызгиванием растворов на поверхность почвы. В другой серии опытов по изучению влияния природных полимеров на почвенную влагоемкость, химические свойства, рост тест-культуры и связывание ТМ, составы вносили в виде сухих порошков, смешанных со всем объемом почвенной массы. В обеих сериях экспериментов использовали пахотный горизонт дерново-среднеподзолистой супесчаной несмытой почвы на покровном суглинке (Московская область, N 56°2'30,611" E 37°10'29,993") со следующими характеристиками: pH 6,8; $C_{\text{общ}}$ 3,0%; песок 52%, пыль 39% и ил 9%. Образцы почвы перед исследованиями растирали и просеивали через сито с размером ячеек 2 мм.

В лабораторных противозерозионных экспериментах поверхность воздушно-сухой почвы, помещенной в пластиковые контейнеры или чашки Петри, равномерно обрабатывали водными растворами монокомпонентных или бинарных рецептур при норме внесения 3 л/м² согласно ранее рекомендованным протоколам (Zezin et al., 2015; Novoskoltseva et al., 2022). Схема опыта включала варианты с использованием 11 полимерных составов с использованием дистиллированной воды в качестве растворителя. Монокомпонентные рецептуры готовили на основе нативных КК и гуматов, бинарные рецептуры на основе КК и ГП при соотношении полимера и гуматов по массе 1:1 (смешение равных объемов 0,2% растворов) и 2,5:1 (смешение равных объемов 0,5% раствора КК и 0,2% растворов гуматов). В контрольном эксперименте обработку почвы проводили дистиллированной водой. Образцы сушили до постоянного веса на воздухе при комнатной температуре. После высыхания на поверхности почвы формировались почвенно-полимерные покрытия (ППП): сплошные корочки, которые можно было отделить от нижнего не структурированного слоя. Для PPP определяли морфологию, механическую прочность и сопротивляемость водному потоку.

В модельных экспериментах по изучению влияния природных полимеров на влагоемкость и химические характеристики почвы, а также для оценки детоксикационных свойств однокомпонентных и бинарных рецептур, почвы инкубировали с полимерами для обеспечения протекания физических и химических процессов взаимодействия полимеров с почвенной матрицей. Образцы готовили следующим образом. Навески по 100 г воздушно-сухой почвы (< 2 мм) помещали в пластиковые контейнеры, добавляли полимеры в дозе 1% по сухому веществу и тщательно перемешивали. Схема опыта включала варианты с внесением КК, гуматов (СГ, ЛГ и ТГ), а также смесей КК с гуматами в соотношении 1:1 (КК+СГ, КК+ЛГ и КК+ТГ по 0,5 г). Смесей увлажняли дистиллированной водой до 50% от полной влагоемкости и инкубировали 28 суток при комнатной температуре, повторно увлажняя через 7 суток экспозиции.

В параллельной серии подготовленных вышеописанным способом почвенно-полимерных смесей в сосуды дополнительно добавляли раствор, содержащий смесь ТМ в виде нитратов меди, цинка и свинца в дозе 150 мг/кг каждого элемента. Раствор ТМ вносили пипеткой из расчета 15 мл на 100 г почвы и тщательно перемешивали; контрольный вариант увлажняли равным объемом дистиллированной воды. Смесей инкубировали 28 суток при комнатной температуре, также повторно увлажняя дистиллированной водой через каждые 7 суток экспозиции. По окончании инкубирования отбирали пробы для дальнейших анализов, по три аналитические повторности из каждого сосуда. Повторность опыта трехкратная.

Анализ. Морфологию почвенных частиц и сформированных покрытий изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии лаборатории электронной микроскопии биологического факультета МГУ с использованием микроскопа JEOL JSM-6380LA.

Механическую прочность сформировавшихся PPP определяли методом пластической деформации с использованием конического пластометра Ребиндера (Хайдапова, Пестонова, 2007). Прочность рассчитывали по формуле: $P_i = 4,4 \cdot h_m^2 \cdot m$, где h_m глубина проникновения конуса с углом раскрытия 30°, вызываемой предельной нагрузкой с весом m (кг), перед разрушением образца (появления трещины в покрытии).

Для исследования водостойкости образцов навески почвы помещали в чашки Петри, на поверхность разбрызгивали полимерные растворы (в контроле – дистиллированную воду) и сушили в течение 3 суток. Полученные образцы с сформировавшимся структурированным PPP располагали под углом 45° и обрабатывали водой из пульверизатора в импульсном режиме в течение 10 минут. Струи воды направляли горизонтально к поверхности, общий объем воды составлял 200 мл. После высыхания рассчитывали потерю почвы при смыве. Эксперименты проводили в пятикратной повторности.

Содержание общего углерода ($C_{\text{общ}}$) в КК, гуматах Сахалинский и Лигногумат определяли методом сухого озоления на CNH-анализаторе ECS 8020 (NC Technologies, Italy). Значения полной влагоемкости (ПВ) и наименьшей влагоемкости (НВ) почвенно-полимерных смесей определяли методом трубок (Вадюнина, Корчагина, 1986). Навески воздушно-сухих смесей помещали в стеклянные трубки с полупроницаемым дном. Трубки устанавливали в емкость с водой для капиллярного насыщения субстратов влагой. После полного насыщения учитывали количество поглощенной влаги и рассчитывали ПВ, а после стекания гравитационной влаги – НВ.

В почвенно-полимерных смесях определяли содержание общего углерода по Тюрину и pH в водной суспензии (1:4). В вариантах опыта с внесением ТМ в почвенно-полимерных смесях определяли содержание подвижных форм Cu, Zn и Pb в аммонийно-ацетатном буфере (pH 4,8;

соотношение почва:раствор 1:10) методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрометре Analytik Jena ContrAA 800F.

Фитотестирование образцов почвенно-полимерных смесей без внесения и с внесением ТМ проводили элюатным способом на проростках редиса *Raphanus sativum*. Семена (10 шт.) размещали в стерилизованные чашки Петри на 3 слоя фильтровальной бумаги и вносили по 7 мл водного экстракта почв вариантов опыта, в контрольные – 7 мл дистиллированной воды. Вытяжку готовили экстракцией дистиллированной водой (соотношение 1:4), встряхивали колбы в течение 2 ч и фильтровали через бумажный фильтр «белая лента». Образцы помещали в термостат (23°C) на 72 ч. По окончании экспозиции регистрировали длину корней и ростков. Опыт проводили в трех повторностях (всего 30 семян).

Во всех экспериментах достоверность различий оценивали с применением однофакторного дисперсионного анализа при уровне значимости 0,05; различия оценивали по критерию НСР₀₅.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Структурирующие свойства полимеров. При обработке почвы полимерными составами, а также просто водой и последующего высушивания, во всех случаях на поверхности сформировались структурированные ППП толщиной около 6–8 мм. Микрофотографии исходного субстрата и покрытия, полученного при разбрызгивании воды, показаны на рисунке 2. Почва представлена разными по размеру агрегатами, сформированными полидисперсными частицами (рис. 2 А, Б). Обработка водой приводила к распаду поверхностных формирований на более мелкие агрегаты, а также отдельные частицы, которые связываются между собой и образуют размытый сплошной слой из связанных между собой частиц (рис. 2 В, Г).

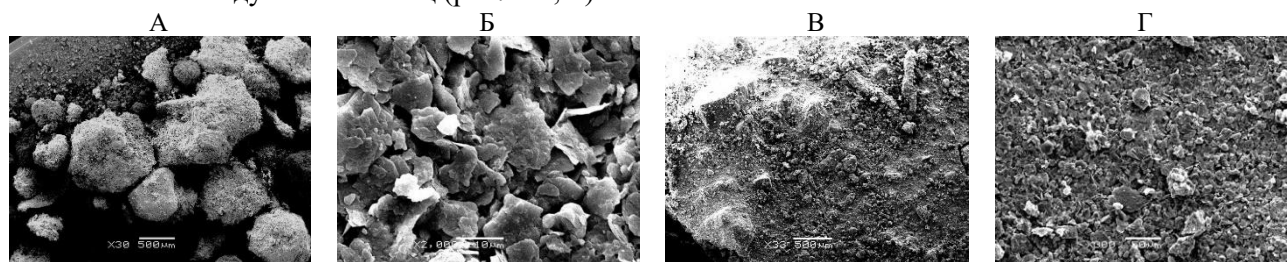


Рисунок 2. Микрофотографии дерново-среднеподзолистой почвы (А, Б) и почвенно-полимерного покрытия (ППП), полученного при разбрызгивании воды на поверхность почвы (В, Г) при различных увеличениях: А – $\times 30$, Б – $\times 2000$, В – $\times 33$, Г – $\times 300$.

Аналогичная картина наблюдалась при разбрызгивании монокомпонентных гуминовых препаратов. В отличие от этого, при использовании рецептов, содержащих КК, большая часть агрегатов на поверхности почвы сохранилась. Для примера на рисунке 3 показаны микрофотографии композиционного покрытия, полученного на основе 0,25 масс.% раствора полисахарида. На них четко визуализируются агрегированные частицы, по-видимому, склеенные между собой полимерными мостиками. Таким образом, формирующееся покрытие представляет собой единую матрицу, иерархично построенную из отдельных почвенных частиц и агрегатов на их основе (рис. 3 А–В). При этом сохраняется микропористость субстрата (рис. 3 Г).

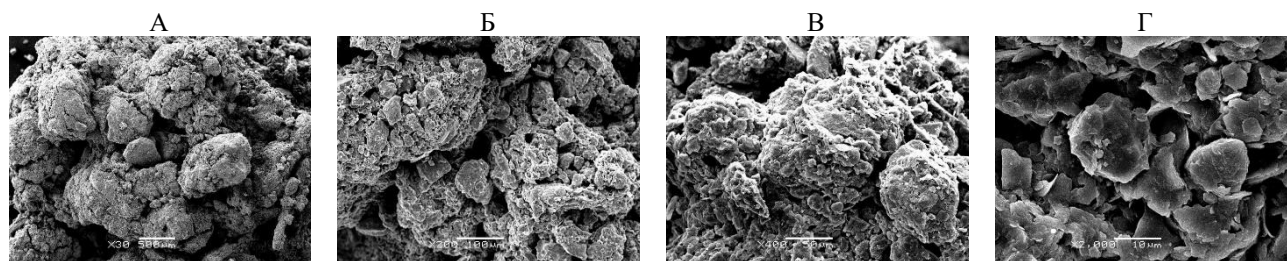


Рисунок 3. Микрофотографии композиционного покрытия, полученного при разбрызгивании 0,25 масс.% раствора ксантановой камеди на поверхность почвы при различных увеличениях: А – $\times 30$, Б – $\times 200$, В – $\times 400$, Г – $\times 2000$.

Механическая прочность сформировавшихся структурированных поверхностных слоев как функция использованных рецептов приведена на рисунке 4. Покрытие, сформировавшееся в контрольном эксперименте при обработке почвы водой, оказалось наименее прочным с показателем $P_l = 0,55 \text{ кг/см}^2$ (рис. 4 А). Обработка 0,1 масс.% раствором КК привела к повышению прочности покрытия и величина P_l достигла $2,9 \text{ кг/см}^2$; повышение концентрации полимера до 0,25 масс.% сопровождалось повышением прочности композиционного покрытия, для которого P_l составило $5,7 \text{ кг/см}^2$. Нанесение на поверхность почвы 0,1 масс.% растворов гуминовых препаратов привело лишь к незначительному упрочнению формирующихся покрытий по сравнению с обработкой водой. При этом статистически значимого различия в значениях P_l для трех типов гуматов не наблюдалось. Средний показатель пенетрационной прочности составил $0,68 \text{ кг/см}^2$.

При обработке почвы бинарными рецептурами (рис. 4 Б) как на основе 0,1 масс.% раствора КК и 0,1 масс.% растворов гуматов (рецептуры 6-8), так и на основе 0,25 масс.% раствора КК и 0,1 масс.% растворов гуматов (рецептуры 9-11) наблюдались две особенности: 1) прочность покрытий не зависела от природы гуматов; 2) значения P_l статистически значимо не отличались от соответствующих значений, измеренных для покрытий на основе нативного полисахарида.

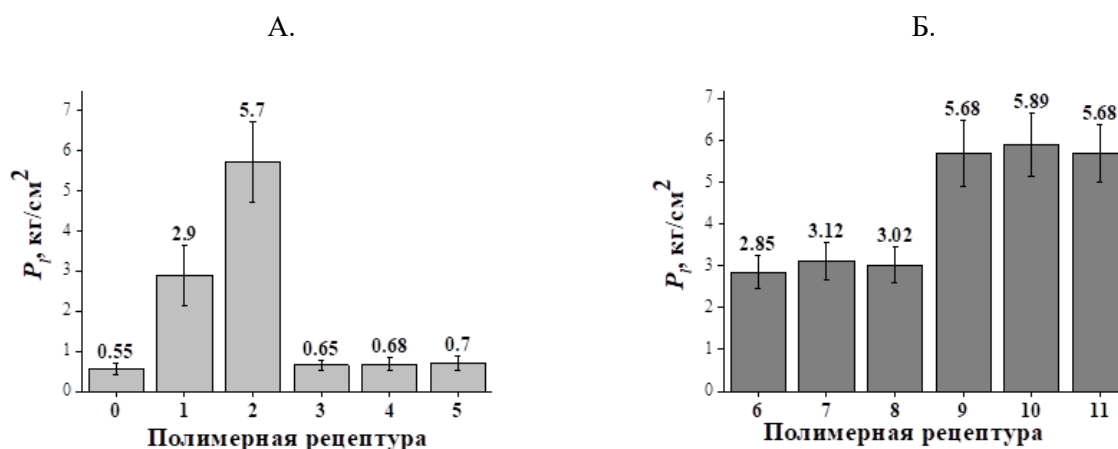


Рисунок 4. Механическая прочность покрытий, полученных после обработки почвы водой и однокомпонентными (А) и бинарными рецептурами (Б).

Обозначения: 0 – обработка водой (контроль); 1 – ксанатовая камедь (КК) 0,1%; 2 – КК 0,25%; 3 – Лигногумат (ЛГ) 0,1%; 4 – гумат Сахалинский (СГ) 0,1%; 5 – торфогель (ТГ) 0,1%; 6 – КК 0,1% + ЛГ 0,1%; 7 – КК 0,1% + СГ 0,1%; 8 – КК 0,1% + ТГ 0,1%; 9 – КК 0,25% + ЛГ 0,1%; 10 – КК 0,25% + СГ 0,1%; 11 – КК 0,25% + ТГ 0,1%.

Результаты теста по оценке водостойкости почвы после обработки растворами КК, гуматов и бинарных полимер-гуминовых составов представлены в таблицах 2 и 3. В контрольном варианте модельное дождевание сопровождалось вымыванием 75% почвы из чашки Петри (табл. 2). При предварительной обработке почвы 0,1% раствором КК количество смытой почвы снизилось более чем в два раза (до 32%), а при использовании 0,25% раствора КК сопротивляемость почвы к вымыванию повысилась очень существенно: потеря массы составила лишь 3% (табл. 2). Обработка гуминовыми препаратами привела к незначительному повышению влагостойкости по сравнению с контролем: потеря почвы уменьшилась до 55–59%.

Сходные результаты показали и покрытия на основе бинарных полимер-гуминовых составов (табл. 3). В составе комбинированных рецептов влияние гуматов на противозрозионную стабильность почвы статистически не отличалось от соответствующих вариантов с обработкой 0,1% и 0,25% растворами КК.

Об эффективности КК в концентрации 0,25% как противозрозионного мелиоранта свидетельствует также вид смывных вод (табл. 2 и 3). Если в остальных случаях смывные воды были достаточно мутными после осаждения основной массы смытой почвы, то в случае дождевания образцов с покрытиями на основе 0,25 масс.% растворов КК, как нативного раствора (табл. 2), так и бинарных рецептов (табл. 3), смывные воды были достаточно прозрачными. Это свидетельствовало о связывании наиболее мелких фракций почвы и взвешенного органического вещества в ее составе биополимером КК в конгломераты с более крупными фракциями.

Таблица 2

Последствия обработки водой образцов почвы, обработанных и не обработанных монокомпонентными полимерными рецептурами. Расход рецептуры 3 л/м²

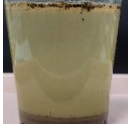
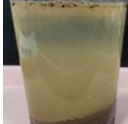
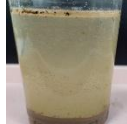
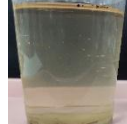
Рецептура	Контроль	0,1 % КК	0,25 % КК	0,1 % ЛГ	0,1 % СГ	0,1 % ТГ
Образец после обработки водой						
Вид смывных вод						
Количество смытой почвы, %	75±10	32±5	3±0,5	58,7±9	59±8	55±8

Примечание.

Обозначения (здесь и в табл. 3): КК – ксантовая камедь; ЛГ – Лигногумат; СГ – гумат Сахалинский; ТГ – Торфогель.

Таблица 3

Последствия обработки водой образцов почвы, обработанных и не обработанных бинарными полимерными рецептурами. Расход рецептуры 3 л/м².

Рецептура	0,1 масс.% КК/0,1 масс.% ЛГ	0,1 масс.% КК/0,1 масс.% СГ	0,1 масс.% КК/0,1 масс.% ТГ	0,25 масс.% КК/0,1 масс.% ЛГ	0,25 масс.% КК/0,1 масс.% СГ	0,25 масс.% КК/0,1 масс.% ТГ
Образец после обработки водой						
Вид смывных вод						
Количество смытой почвы, %	28±4	30±4	27±3	4±0,5	3,7±0,8	3,8±0,5

Влияние полимеров на влагоемкость, химические и детоксицирующие свойства почвы.

Дальнейшие исследования проводили в условиях модельного эксперимента с внесением КК, гуматов и бинарных полимер-гуминовых составов в виде сухих порошков в дозе 1% по сухому веществу, смешанных со всем объемом почвенной массы. Хотя в полученных таким образом почвенно-полимерных смесях количество полимеров превышало таковое при поверхностной обработке почв растворами полимеров, но позволило выявить закономерности их влияния на водно-физические, химические и экотоксикологические свойства почвы.

В этом модельном эксперименте внесение всех полимерных составов в объем почвы увеличивало показатели почвенной влагоемкости (табл. 4). Значения ПВ статистически значимо возрастали под воздействием КК и ее композиций с гуматами в 1,4–1,8 раз по сравнению с контролем; гуматы также увеличивали этот показатель, но различия с контролем не достоверны. Влияние на величину НВ было менее выраженным: КК увеличивало ее на 39%, а гуматы СГ и ТГ – на 25%, при этом композиции из КК и гуматов не оказывали значимого влияния на величину НВ.

Внесение всех составов повлияло на величину pH в почвенно-полимерных смесях. Исходная почва характеризовалась слабокислой реакцией среды (pH 6,8); внесение КК, ТГ и их смеси подкисляло ее до pH 6,6, тогда как составы на основе двух других гуматов (Лигногумата и Сахалинского) приводили к увеличению pH до 7–7,6 (табл. 5).

Содержание общего углерода в почвенно-полимерных смесях под воздействием полимерных составов в условиях данного эксперимента увеличилось на 0,5–0,9%, причем наименьший прирост

выявлен в варианте с чистой КК (табл. 5). Учитывая тот факт, что содержание Собщ сходно у КК и гуматов (35–39%, табл. 1), более низкие значения С в варианте с КК могут быть обусловлены неполным окислением органического вещества при проведении анализа методом мокрого озоления по Тюрину.

Таблица 4

Полная и наименьшая влагоемкость почвенно-полимерных смесей при внесении ксантановой камеди (КК) и гуминовых биостимуляторов в дозе 1 г/100 г почвы

Варианты опыта	ПВ, %		НВ, %		ПВ, % к контролю	НВ, % к контролю
	Средние	Ст. откл.	Средние	Ст. откл.		
Контроль	30,1	3,8	27,7	3,5	100	100
Лигногумат ЛГ	35,3	5,7	32,2	4,9	117	116
Сахалинский СГ	37,1	5,4	34,6	4,7	123	125*
Торфогель ТГ	34,8	2,1	34,3	1,7	116	124*
Ксантановая камедь КК	55,1	1,3	38,6	1,4	183*	139*
КК+СГ	51,7	0,9	31,0	1,3	172*	112
КК+ЛГ	43,8	2,7	27,5	2,4	145*	99
КК+ТГ	44,9	4,0	28,0	3,0	149*	101
НСР ₀₅	7,6		5,2			

Примечание.

*Результаты достоверно отличаются от контроля по критерию НСР₀₅.

В вариантах опыта с модельным полиэлементным загрязнением солями цинка, свинца и меди в дозах 150 мг/кг каждого элемента, внесение КК, гуматов и их композиций в большинстве вариантов привело к снижению содержания подвижных форм металлов (рис. 5). Степень выраженности этого эффекта зависела как от элемента, так и от состава полимерной рецептуры. Так, цинк наименее прочно связывался с твердой фазой почвы: в вытяжку перешло 65–83% от внесенного количества, что составило 98–124 мг/кг (рис. 5 А и табл. 7). При этом КК и два из трех гуматов (ЛГ и ТГ) не оказывали значимого влияния на содержание подвижных форм Zn, тогда как СГ и все композиции КК с гуматами снижали их количество от 123 мг/кг на контроле до 98–100 мг/кг.

Таблица 5

Содержание общего углерода и рН в почвенно-полимерных смесях при внесении ксантановой камеди (КК) и гуминовых биостимуляторов (среднее и стандартное отклонение, n=3)

Варианты опыта	рН	С %
Контроль	6,76±0,02с	3,01±0,15а
Ксантановая камедь КК	6,64±0,02а	3,49±0,11b
Лигногумат ЛГ	7,57±0,03j	3,86±0,15cd
Сахалинский СГ	7,32±0,01f	3,71±0,05с
Торфогель ТГ	6,64±0,01а	3,70±0,17с
КК+СГ	7,01±0,05d	3,82±0,17cd
КК+ЛГ	7,18±0,02е	3,82±0,13cd
КК+ТГ	6,69±0,04b	3,91±0,16d

Примечание.

Буквами указана принадлежность средних значений к гомогенной группе на основании величины НСР по Фишеру, уровень значимости $p \leq 0,05$.

Свинец более прочно закреплялся в почве, в вытяжке обнаружено 45–59% от внесенного количества (68–89 мг/кг, рис. 2 Б и табл. 7). В отличие от цинка, подвижность Pb снижал не только гумат из угля (СГ), но и чистая КК (от 87 мг/г на контроле до 69 мг/кг в КК и СГ), а также в несколько меньшей степени все композиции КК с гуматами (до 79–81 мг/кг).

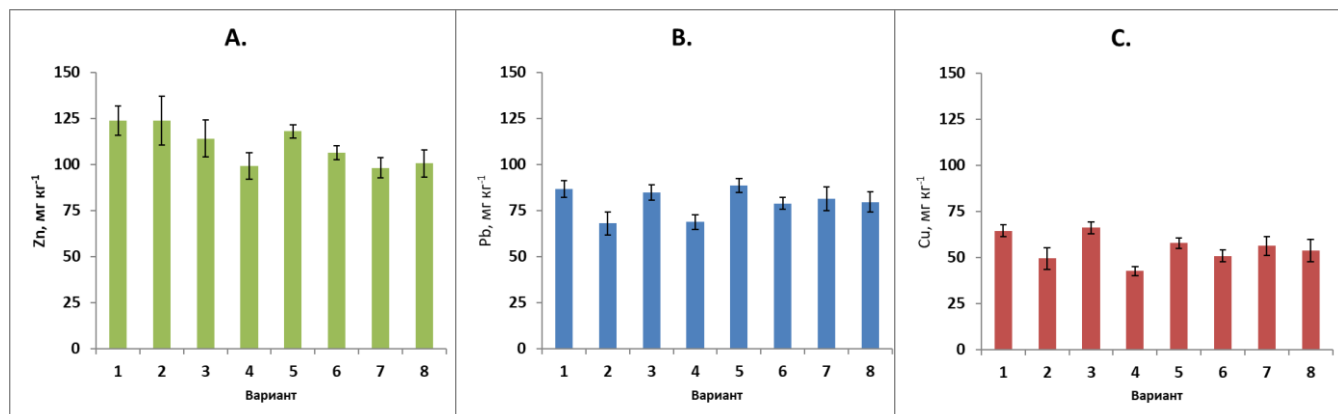


Рисунок 5. Содержание цинка (А), свинца (Б) и меди (В) в ацетатно-аммонийной вытяжке из почвенно-полимерных смесей с модельным загрязнением солями этих металлов в дозах 150 мг/кг (средние и стандартное отклонение, $n=6$). Обозначения: 1 – Контроль; 2 – Ксантановая камедь КК; 3 – Лигногумат ЛГ; 4 – гумат Сахалинский СГ; 5 – Торфогель ТГ; 6 – КК+СГ; 7 – КК+ЛГ; 8 – КК+ТГ.

Таблица 6

Влияние полимерных составов на развитие корней и проростков *R. sativum* в элюатном фитотесте без /с модельным загрязнением солями Cu, Zn и Pb (среднее и стандартное отклонение, $n=30$)

Варианты опыта	Длина, см		% к чистому контролю		% к контролю с ТМ	
	Корень	Проросток	Корень	Проросток	Корень	Проросток
Без внесения ТМ						
Контроль	2,40±0,14	0,75±0,13	100	100	н.о	н.о
Ксантановая камедь КК	2,65±0,31	1,25±0,04	111	167*	н.о	н.о
Лигногумат ЛГ	2,90±0,55	1,64±0,37	121*	218*	н.о	н.о
Сахалинский СГ	3,05±0,80	1,52±0,22	127*	203*	н.о	н.о
Торфогель ТГ	2,74±0,25	1,27±0,08	114	169*	н.о	н.о
КК+СГ	2,60±0,16	1,27±0,18	109	169*	н.о	н.о
КК+ЛГ	2,36±0,22	1,58±0,04	99	210*	н.о	н.о
КК+ТГ	2,59±0,20	0,99±0,20	108	132*	н.о	н.о
С внесением ТМ						
Контроль + ТМ	2,87±0,35	1,19±0,11	120	158	100	100
Ксантановая камедь КК	2,59±0,18	1,06±0,04	108	141	90	89
Лигногумат ЛГ	2,50±0,07	1,24±0,18	104	165	87	104
Сахалинский СГ	2,64±0,15	1,31±0,08	110	175	92	111
Торфогель ТГ	2,81±0,41±	1,21±0,08	117	161	98	102
КК+СГ	2,68±0,35	1,42±0,10	112	189*	93	119*
КК+ЛГ	2,34±0,10	1,63±0,18	98	217*	81	137*
КК+ТГ	2,17±0,29	1,17±0,14	91	156	76	99

Примечание.

*Результаты достоверно отличаются от контроля по критерию НСР₀₅. н.о – не определяли.

Наиболее сильное связывание катионов металлов исследуемыми составами выявлено для меди: в подвижную форму переходило только 33–44% от внесенного количества (43–66 мг/кг; рис. 2 В). В вариантах с внесением КК как в чистом виде, так и в составе композиций с гуматами содержание подвижной Cu снизилось от 64 мг/кг на контроле до 49 и 51–56 мг/кг, соответственно. Максимальное поглощение Cu обнаружено в варианте с внесением гумата из угля (СГ). Гумат из лигносульфоната (ЛГ) не оказал влияния на содержание подвижных форм Cu, как и для Zn и Pb. Внесение гумата из торфа (ТГ) способствовало некоторой иммобилизации ионов меди, в отличие от цинка и свинца.

Для оценки влияния изучаемых полимерных составов на рост растений в пробах почвенно-полимерных смесей почв проводили фитотестирование на культуре редиса *Raphanus sativum*. Результаты фитотестирования показали, что в отсутствии ТМ значимое положительное воздействие на длину корней оказывают только два из трех тестируемых гуматов – СГ из угля и ЛГ из лигносульфоната, обеспечивая прибавку на 21–27% к контролю; но все рецептуры стимулировали развитие надземной части проростков редиса (табл. 6).

По фону внесения ТМ не выявлено увеличения токсичности по отношению к проросткам *R. sativum* в сравнении с вариантами без модельного токсиканта, вероятно, в результате того, что вносимые дозы ТМ были невысокими (150 мг/кг). При сравнении вариантов обработанных полимерами с загрязненным контролем по величине длины проростков, детоксицирующий эффект показали композиции КК с гуматами СГ и ЛГ (табл. 6).

ОБСУЖДЕНИЕ

При классической поверхностной обработке дерново-подзолистой почвы водными рецептурами, содержащими природные полимеры, на ее поверхности происходит образование структурированного композитного слоя из частиц субстрата, связанных между собой полимерными мостиковыми связями. При этом сохраняется пористая структура верхнего почвенного слоя, что обеспечивает сохранение влаго- и воздухообмена в почве. Высокомолекулярный КК оказывает связующее действие, и, в отличие от гуматов, способствует выраженному упрочнению композиционных покрытий с участием мелкозернистых частиц. Гуматы при норме внесения 0,1 масс.% растворов в количестве 3 л/м² увеличили механическую прочность композиционного защитного слоя лишь в 1,2 раза, повысив значение P_l от 0,55 кг/см² до 0,68 кг/см². КК при той же норме внесения привела к повышению значения P_l до 2,9 кг/см², то есть практически в пять раз. При повышении концентрации КК в водном растворе от 0,1 масс.% до 0,25 масс.% происходит увеличение прочности покрытий до 5,7 кг/см². Такой эффект объясняется повышением доли биополимерного связующего, и, соответственно, скрепляющих межчастичных контактов в композиционной структуре. Введение в водный раствор полисахарида гуминовых препаратов в соотношении биополимер:гумат = 1:1 или 2,5:1 не оказывает влияния на прочностные характеристики формирующихся композиционных покрытий. В целом аналогичная тенденция наблюдается и в степени влияния монокомпонентных и бинарных рецептур на водостойкость верхнего слоя почвы. Обработка субстрата 0,1 масс.% растворами гуматов обеспечила снижение количества смытой почвы на 22%, в то время как нанесение 0,1 масс.% раствора КК снизила этот показатель на 57 %. Повышение водостойкости субстрата практически до 97% выросло при переходе к 0,25 масс.% КК рецептурам. При этом значительно улучшилось качество смывных вод, в которых практически отсутствовала окраска и мелкодисперсная взвесь. Таким образом, для противозерозионной обработки почв и снижения вымывания легких фракций и питательных элементов могут быть рекомендованы водные рецептуры с концентрацией КК 0,25 масс.%.

Потенциал применения КК в агротехнологиях обусловлен, главным образом, ее способностью улучшать водоудерживающие характеристики почв. В работе (Wang et al., 2023) показано, что содержание насыщенной влаги в образцах, обработанных 1% ксантановой камедью, увеличилось в 1,3 раза по сравнению с контролем. В нашем эксперименте получены сходные результаты: увеличение ПВ в вариантах с КК и композициями на её основе в 1,4–1,8 раз по сравнению с контролем. Макромолекулы КК 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. За счет водородных связей КК легко адсорбирует молекулы воды и действует как водоудерживающий гидрогель. Гуминовые вещества несколько повышают показатели влагоемкости, но гибкие цепи КК формируют более прочные контакты с органоминеральными частицами почвы, чем разветвленные и конформационно жесткие частицы гуматов.

По результатам элюатного фитотеста с лабораторной тест-культурой (проростки *R. sativum*), в вариантах опыта без внесения токсикантов положительная тенденция в развитии корней заметна лишь при добавлении гуматов (табл. 6). Это согласуется с многочисленными исследованиями, показывающими биостимулирующий эффект гуминовых веществ (Броварова, 2024; Bezuglova, Klimentko 2022; Muscolo et al., 2022). Что касается КК, то ее положительное воздействие на рост тест-культуры также показано в литературе (Tran et al., 2019; Wang et al., 2023), но оно, скорее всего, обусловлено оптимизирующим влиянием на водно-физические свойства почв, в частности, способностью удерживать влагу. В условиях элюатного тестирования этот эффект не проявился.

В данных экспериментальных условиях модельного загрязнения при нейтральной и слабокислой реакции среды, тестируемые полимеры по-разному воздействовали на подвижность ТМ. Наиболее сильное связывание выявлено для меди. Известно, что медь обладает высоким сродством к органическому веществу (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989), поэтому более прочно связывается с органоминеральной почвенной матрицей при внесении органических мелиорантов. Среди монокомпонентных составов, КК достоверно снижала содержание подвижной меди и свинца до 77-79% к контролю, но не влияла на подвижность цинка (табл. 7). Из гуматов максимальный эффект для всех элементов оказывал препарат из угля «Сахалинский», снижая содержание подвижных форм ТМ на 20-34% к контролю. Два остальных гумата – Лигногумат и Торфогель – не оказали существенного воздействия на содержание подвижных форм ТМ. Очевидно, эти особенности обусловлены различиями в молекулярной структуре гуматов (табл. 1).

При внесении бинарных составов сохраняются те же тенденции. Уровни связывания ТМ в большинстве вариантов КК+гумат сходны с таковыми для индивидуальных полимеров.

Таблица 7

Значения pH и содержание тяжелых металлов (ТМ) в ацетатно-аммонийной вытяжке из почвенно-полимерных смесей с модельным загрязнением солями меди, цинка и свинца, % к контролю и внесенному количеству элемента (150 мг/кг)

Вариант	pH	ТМ, % к контролю			ТМ, % к внесенному количеству		
		Cu	Pb	Zn	Cu	Pb	Zn
Контроль	6,0	100	100	100	43	58	83
Ксантановая камедь КК	6,0	77*	79*	100	33	45	83
Лигногумат ЛГ	7,0	103	98	92*	44	56	76
Сахалинский СГ	6,4	66*	79*	80*	28	46	66
Торфогель ТГ	6,0	90*	102	95	39	59	79
КК+СГ	6,2	79*	91*	86*	34	53	71
КК+ЛГ	6,5	87*	94	79*	37	54	65
КК+ТГ	6,0	84*	92*	81*	36	53	67

Примечание.

* Значения достоверно отличаются от контроля по НСР-тесту при $p < 0,05$.

Различия в сорбционной способности полимерных составов связаны с их молекулярной структурой. В целом, для ГВ характерно связывание металлов карбоксильными группами и поликатионными мостиками (Kulikova et al., 2005; Janos et al., 2010). Такой же механизм, предположительно, может проявляться и у полианиона КК. Дополнительно к этому механизму ГВ проявляют окислительно-восстановительную активность благодаря наличию высококонденсированных ароматических структур, богатых хиноновыми/гидрохиноновыми фрагментами (Kulilova, Perminova, 2021). В ряду исследованных гуматов наиболее конденсированной структурой и высоким содержанием кислых функциональных групп обладает гумат из угля «Сахалинский», что и обусловило его способность к связыванию ТМ. Гумат «Лигногумат», напротив, вовсе не снижает выход подвижных форм ТМ, несмотря на довольно высокое значение pH почвы в этом варианте опыта (7,0; табл. 7). По данным наших предыдущих исследований (Якименко и др., 2022; Yakimenko et al., 2021, 2024), этот препарат легко переходит в подвижные фракции почвенного органического вещества и содержит большое количество низкомолекулярных фенольных соединений, способных хелатировать металлы и таким образом переводить их в подвижную форму. Гумат из торфа «Торфогель» занимает промежуточное положение.

В то же время, препарат «Лигногумат» проявил наибольшую биостимулирующую активность в фитотестах (табл. 6). Причем в эксперименте без внесения токсикантов этот эффект более выражен для монокомпонентного состава, а при внесении ТМ – в составе бинарной композиции. Этот факт согласуется с другими исследованиями, подтверждающими эффективность этого гуминового препарата (Пукальчик и др., 2016; Поздняков и др., 2020).

ВЫВОДЫ

1. Обработка поверхности дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы водными рецептурами, содержащими ксантовую камедь (КК), и последующая сушка приводят к формированию верхнего структурированного композитного слоя из частиц субстрата, связанных между собой за счет формирования полимерных мостиков. Введение в водный раствор КК гуминовых препаратов в соотношении биополимер:гумат = 2,5:1 или 1:1 не оказывает влияния на прочностные характеристики формирующихся композиционных покрытий. Для противозерозионной обработки суглинистой почвы наиболее эффективным является использование 0,25 масс.% растворов КК как в виде однокомпонентной рецептуры, так и в виде бинарных рецептур биополимера в комбинации с гуматами.

2. При внесении всех видов исследуемых полимеров в дозе 1 г/100 г почвы, монокомпонентные составы и бинарные композиции оказали стимулирующее действие на тест-культуру *R. sativum*, увеличивая длину корней и проростков, причем Лигногумат был наиболее эффективным составом. Композиции с КК не показали лучшего эффекта на рост проростков по сравнению с индивидуальными полимерами.

3. В условиях модельного загрязнения среди монокомпонентных составов наибольшее снижение содержания подвижных форм Cu, Pb и Zn выявлено для гумата из угля (на 34, 21 и 20% по сравнению с контролем). Гуматы из торфа и лигносульфоната по отдельности оказались менее эффективными, но в бинарной композиции с КК их эффективность в снижении подвижности тяжелых металлов увеличилась в среднем на 10%. При внесении поллютантов все тестируемые рецептуры по результатам фитотеста проявляют протекторные свойства, снижая токсичность тяжелых металлов для растений.

4. Водно-физические свойства почвенно-полимерных смесей определяются эффектами КК, а химические и биологические – гуматов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показали, что КК можно рассматривать как перспективный мелиорант, оказывающий выраженный противозерозионный эффект благодаря формированию верхнего структурированного композитного слоя из почвенных частиц, связанных между собой за счет формирования полимерных мостиков. Кроме этого, полисахарид оказал некоторое стимулирующее действие на рост растений, а при загрязнении ТМ связывал катионы меди и свинца за счет содержания карбоксильных групп. В свою очередь, ГП проявляют биостимулирующий эффект, связывают ТМ и обеспечивают детоксицирующее воздействие разной степени выраженности в зависимости от состава, обусловленного источником органического вещества гуматов. В бинарных композициях указанные эффекты, как правило, не обладают аддитивностью, но определяются доминирующим механизмом воздействия (например, воздействие КК как связующего, СГ как сорбента ТМ и т.д.). Таким образом, выбор оптимальной рецептуры в качестве почвоулучшителя деградированных почв будет определяться ведущим фактором деградации (водная или ветровая эрозия для КК, загрязнение поллютантами – для гумата). Бинарные составы, вероятно, будут обладать комплексным воздействием, поэтому целесообразно проведение их дальнейших исследований в натурных условиях.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы развития МГУ (проект № 23-Ш07-13).

ЛИТЕРАТУРА

Аржакова О.В., Аржаков М.С., Бадамшина Э.Р., Брюзгина Е.Б., Брюзгин Е.В., Быстрова А.В., Ваганов Г.В., Василевская В.В., Вдовиченко А.Ю., Галлямов М.О., Гумеров Р.А., Диденко А.Л., Зефилов В.В., Карпов С.В., Комаров П.В., Куличихин В.Г., Курочкин С.А., Ларин С.В., Малкин А.Я., Миленин С.А., Музафаров А.М., Молчанов В.С., Навроцкий А.В., Новаков И.А., Панарин Е.Ф., Панова И.Г., Потемкин И.И., Светличный В.М., Седуш Н.Г., Серенко О.А., Успенский С.А., Филиппова О.Е., Хохлов А.Р., Чвалун С.Н., Шейко С.С., Шибяев

- А.В., Эльманович И.В., Юдин В.Е., Якиманский А.В., Ярославов А.А. Полимеры будущего // Успехи химии. 2022. Том 91. № 12. С. RCR5062. <https://doi.org/10.57634/RCR5062>
- Безуглова О.С., Полюенко Е.А. Применение гуминовых препаратов под картофель и озимую пшеницу // Проблемы агрохимии и экологии. 2011. № 4. С. 29–32.
- Броварова О.В. Биологическая активность гуминовых веществ торфа в качестве ростстимулирующих препаратов // Агрохимия. 2024. № 8. С. 50–56. <https://doi.org/10.31857/S0002188124080076>
- Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. Москва: Агропромиздат, 1986. 416 с.
- Измурдов В.А., Мусабеева Б.Х., Касымов, Ж.С., Кливленко А.Н., Оразжанова Л.К. Интерполиэлектrolитные комплексы: достижения и перспективы применения // Успехи химии. 2019. Том 88. № 10. С. 1046–1062. <https://doi.org/10.1070/rcr4877>
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. Перевод с англ. Москва: Мир, 1989. 439 с.
- Ли С.П., Худайбергенова Б.М., Пулатова З.М., Прохоренко В.А. Детоксирующие свойства гуминовых препаратов по отношению к Cd (II), Pb (II), Cu (II) // Теоретическая и прикладная экология. 2016. №. 1. С. 82–87.
- Панова И.Г., Ильясов Л.О., Ярославов А.А. Поликомплексные рецептуры для защиты почв от деградации // Высокомолекулярные соединения. Серия С. 2021. Том 63. № 2. С. 232–244. <https://doi.org/10.31857/S2308114721020060>
- Поздняков Л.А., Степанов А.Л., Гасанов М.Э., Семенов М.В., Якименко О.С., Суада А.К., Рай А.Н., Щеголькова Н.М. Влияние лигногумата на биологическую активность почвы о. Бали, Индонезия // Почвоведение. 2020. № 5. С. 601–609. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20050111>
- Пукальчик М.А., Терехова В.А., Якименко О.С., Акулова М.И. Сравнение ремедиационных эффектов Биочара и Лигногумата на почвы при полиметаллическом загрязнении // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 2. С. 79–85.
- Сивакова Л.Г., Лесникова Н.П., Ким Н.М., Ротова Г.М. Физико-химические свойства гуминовых веществ торфа и бурого угля // Химия твердого топлива. 2011. № 1. С. 3–8.
- Степанов А.А., Якименко О.С. Гуминовые почвomodификаторы из торфа и угля: влияние на химические и биологические свойства модельных почвосмесей // Агрохимия. 2023. № 5. С. 53–59. <https://doi.org/10.31857/S0002188123050095>
- Степанов А. А., Шульга П. С., Госс Д. Д., Смирнова М. Е. Применение природных гуматов для ремедиации загрязненных городских почв и стимулирования роста растений // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2018. № 2. С. 30–34.
- Хайдапова, Д.Д., Пестонова Е.А Прочность межчастичных связей в почвенных пастах и агрегатах // Почвоведение. 2007. № 11. С. 1330–1335.
- Якименко О.С. Применение гуминовых продуктов в РФ: результаты полевых опытов (обзор литературы) // Живые и биосферные системы. 2016. № 18. <http://www.jbks.ru/archive/issue-18/article-4>
- Якименко О. С., Зиганшина А. Р., Степанов А. А., Панова И. Г., Ярославов А. А. Влияние полиэлектролитов на органическое вещество некоторых почв в модельных экспериментах // Почвоведение. 2022. № 7. С. 929–939. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22070139>
- Ayeldeen M., Negm A., El Sawwaf M., Gädä T. Laboratory study of using biopolymer to reduce wind erosion // International Journal of Geotechnical Engineering. 2018. Vol. 12. No. 3. P. 228–240. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1264692>
- Abbaszadeh A., Lad M., Janin M., Morris G.A., MacNaughtan W, Sworn G., Foster T.J. A novel approach to the determination of the pyruvate and acetate distribution in xanthan // Food Hydrocolloids. 2015. Vol. 44. P. 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.08.014>
- Ashraf S., Soudi M., Amoozegar M.A., Moshtaghi Nikou M., Spröer C. Paenibacillus xanthanilyticus sp. nov., a xanthan-degrading bacterium isolated from soil // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2018. Vol. 68. No. 1. P. 76–80. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.002453>
- Berninger T., Dietz N., González López Ó. Water-soluble polymers in agriculture: xanthan gum as eco-friendly alternative to synthetics // Microbial Biotechnology. 2021. Vol. 14. No. 5. P. 1881–1896. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13867>

- Bezuglova O., Klimenko A. Application of humic substances in agricultural industry // *Agronomy*. 2022. Vol. 12. No. 3. P. 584. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030584>
- Bondareva L., Kudryasheva N. Direct and indirect detoxification effects of humic substances // *Agronomy*. 2021. Vol. 11. No. 2. P. 198. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020198>
- Cabalar A.F., Wiszniewski M., Skutnik Z. Effects of xanthan gum biopolymer on the permeability, odometer, unconfined compressive and triaxial shear behavior of a sand // *Soil mechanics and foundation engineering*. 2017. Vol. 54. P. 356–361. <https://doi.org/10.1007/s11204-017-9481-1>
- Cadmus M.C., Jackson L.K., Burton K.A., Plattner R.D., Slodki M.E. Biodegradation of xanthan gum by *Bacillus* sp. // *Applied and Environmental Microbiology*. 1982. Vol. 44. No. 1. P. 5–11. <https://doi.org/10.1128/aem.44.1.5-11.1982>
- Chang I., Prasadhi A.K., Im J., Shin H.D., Cho G.C. Soil treatment using microbial biopolymers for anti-desertification purposes // *Geoderma*. 2015. Vol. 253. P. 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.04.006>
- Chen X., Wang M., Yang F., Tang W., Li X. Isolation and characterization of xanthan-degrading *Enterobacter* sp. nov. LB37 for reducing the viscosity of xanthan in petroleum industry // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2014. Vol. 30. P. 1549–1557. <https://doi.org/10.1007/s11274-013-1578-8>
- Delgado M.Z., Aranda F.L., Hernandez-Tenorio F., Garrido-Miranda K.A., Meléndrez M.F., Palacio D.A. Polyelectrolytes for environmental, agricultural, and medical applications // *Polymers*. 2024. Vol. 16. No. 10. P. 1434. <https://doi.org/10.3390/polym16101434>
- Faria S., de Oliveira Petkowicz C.L., de Moraes S.A.L., Terrones M.G.H., De Resende M.M., de Franca F.P., Cardoso V.L. Characterization of xanthan gum produced from sugar cane broth // *Carbohydrate Polymers*. 2011. Vol. 86. No. 2. P. 469–476. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.063>
- Garcia-Ochoa F., Santos V.E., Casas J.A., Gomez E. Xanthan gum: production, recovery, and properties // *Biotechnology Advances*. 2000. Vol. 18. No. 7. P. 549–579. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(00\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(00)00050-1)
- Jang J. A review of the application of biopolymers on geotechnical engineering and the strengthening mechanisms between typical biopolymers and soils // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 2020. No. 1. P. 1465709. <https://doi.org/10.1155/2020/1465709>
- Janos P., Vavrova J., Herzogova L., Pilarova V. Effects of inorganic and organic amendments on the mobility (leachability) of heavy metals in contaminated soil: a sequential extraction study // *Geoderma*. 2010. Vol. 159. No. 3–4. P. 335–341. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.08.009>
- Jindo K.K., Olivares F.L., Malcher D.J.D.P., Sánchez- Monedero M.A., Kempenaar C., Canellas L.P. From lab to field: Role of humic substances under open-field and greenhouse conditions as biostimulant and biocontrol agent // *Frontiers in Plant Science*. 2020. Vol. 11. P. 426. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00426>
- Katzbauer B. Properties and applications of xanthan gum // *Polymer Degradation and Stability*. 1998. Vol. 59. No. 1–3. P. 81–84. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(97\)00180-8](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00180-8)
- Kulikova N.A., Perminova I.V. Interactions between humic substances and microorganisms and their implications for nature-like bioremediation technologies // *Molecules*. 2021. Vol. 26. No. 9. P. 2706. <https://doi.org/10.3390/molecules26092706>
- Kulikova N.A., Stepanova E.V., Koroleva O.V. Mitigating activity of humic substances: direct influence on biota. In: Use of humic substances to remediate polluted environments: from theory to practice / I.V. Perminova, K. Hatfield, N. Hertkorn (eds.). NATO Science Series, 2005. Vol. 52. P. 285–309. https://doi.org/10.1007/1-4020-3252-8_14
- Kumar A., Rao K.M., Han S.S. Application of xanthan gum as polysaccharide in tissue engineering: A review // *Carbohydrate Polymers*. 2018. Vol. 180. P. 128–144. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.10.009>
- Liu H., Huang C., Dong W., Du Y., Bai X., Li X. Biodegradation of xanthan by newly isolated *Cellulomonas* sp. LX, releasing elicitor-active xantho-oligosaccharides-induced phytoalexin synthesis in soybean cotyledons // *Process Biochemistry*. 2005. Vol. 40. No. 12. P. 3701–3706. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.05.006>
- Mendonça A., Moraes P.V., Pires A.C., Chung A.P., Oliveira P.V. A review on the importance of microbial biopolymers such as xanthan gum to improve soil properties // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 11. No. 1. P. 170. <https://doi.org/10.3390/app11010170>
- Muscolo A., Sidari M., Cozzolino V., Nuzzo A., Nardi S., Piccolo A. Molecular characteristics of humic substances from different origins and their effects on growth and metabolism of *Pinus laricio callus* // *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2022. Vol. 9. No. 1. P. 1–18. <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00334-y>
- Nankai H., Hashimoto W., Miki H., Kawai S., Murata K. Microbial system for polysaccharide depolymerization: enzymatic route for xanthan depolymerization by *Bacillus* sp. strain GL1 // *Applied and Environmental Microbiology*. 1999. Vol. 65. No. 6. P. 2520–2526. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.6.2520-2526.1999>

- Novoskoltseva O.A., Loiko N.G., Nikolaev Y.A., Lisin A.O., Panova I.G., Yaroslavov A.A. Interpolyelectrolyte complexes based on hydrolyzed polyacrylonitrile for anti-erosion stabilization of soils and ground // Polymer International. 2022. Vol. 71. No. 6. P. 697–705. <https://doi.org/10.1002/pi.6289>
- Nsengiyumva E.M., Alexandridis P. Xanthan gum in aqueous solutions: Fundamentals and applications // International Journal of Biological Macromolecules. 2022. Vol. 216. P. 583–604. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.06.189>
- Palaniraj A., Jayaraman V. Production, recovery and applications of xanthan gum by *Xanthomonas campestris* // Journal of food engineering. 2011. Vol. 106. No. 1. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.03.035>
- Seo S., Lee M., Im J., Kwon Y.M., Chung M.K., Cho G., Chang I. Site application of biopolymer-based soil treatment (BPST) for slope surface protection: in-situ wet-spraying method and strengthening effect verification // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 307. P. 124983. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124983>
- Tran A.T.P., Chang I., Cho G.C. Soil water retention and vegetation survivability improvement using microbial biopolymers in drylands // Geomechanics and Engineering. 2019. Vol. 17. No. 5. P. 475–483. <https://doi.org/https://doi.org/10.12989/gae.2019.17.5.475>
- Wang S., Zhao X., Zhang J., Jiang T., Wang S., Zhao J., Meng Z. Water retention characteristics and vegetation growth of biopolymer-treated silt soils // Soil and Tillage Research. 2023. Vol. 225. P. 105544. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105544>
- Yakimenko O., Khundzhua D., Izosimov A., Yuzhakov V., Patsaeva S. Source indicator of commercial humic products: UV-Vis and fluorescence proxies // Journal of Soils and Sediments. 2018. Vol. 18. No. 4. P. 1279–1291. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1528-9>
- Yakimenko O., Stepanov A., Patsaeva S., Khundzhua D., Osipova O., Gladkov O. Formation of humic-like substances during the technological process of Lignohumate® synthesis as a function of time // Separations. 2021. Vol. 8. No 7. P. 1–13. <https://doi.org/10.3390/separations8070096>
- Yakimenko O.S., Panova I.G., Novoskoltseva O., Gruzdenko D., Pozdnyakov L., Kadulin M., Stepanov A.A., Terekhova V., Yaroslavov A. Humic substances enhance the performance of polyelectrolyte-based formulations as soil conditioners // Humic substances and green technologies (HIT-2024): ninth International Conference of the CIS IHSS on humic innovative technologies (Sailing Club “Vodnik”, Moscow Region, Russia, 25–28 October, 2024). Book of Abstracts. 2024. P. 56. <http://www.humus.ru/hit-2024/abstractbook/HIT-2024-abstractbook.pdf>
- Zein A.B., Mikheikin S.V., Rogacheva V.B., Zansokhova M.F., Sybachin A.V., Yaroslavov A.A. Polymeric stabilizers for protection of soil and ground against wind and water erosion // Advances in Colloid and Interface Science. 2015. Vol. 226. P. 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.06.006>

Поступила в редакцию 03.03.2025

Принята 25.04.2025

Опубликована 03.05.2025

Сведения об авторах:

Якименко Ольга Сергеевна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник кафедры химии почв факультета почвоведения ФГБОУ «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва, Россия); iakim@soil.msu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0499-5482>

Нестеров Павел Владимирович – магистрант кафедры химии почв факультета почвоведения ФГБОУ «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва, Россия); pkontinium@yandex.ru

Степанов Андрей Анатольевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник кафедры химии почв факультета почвоведения ФГБОУ «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва, Россия); stepan.1963@mail.ru

Панова Ирина Геннадьевна – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник кафедры высокомолекулярных соединений химического факультета ФГБОУ «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва, Россия), igpan@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0519-3695>

Чернов Вячеслав Евгеньевич – инженер кафедры высокомолекулярных соединений химического факультета ФГБОУ «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва, Россия); slavachernov111@yandex.ru

Ярославов Александр Анатольевич – доктор химических наук, чл.-корр. РАН, заведующий кафедрой высокомолекулярных соединений химического факультета ФГБОУ «Московский



Effect of potassium humates, xanthan gum and their combinations on the properties of soddy-podzolic soil in model experiments

© 2025 O. S. Yakimenko ¹, P. V. Nesterov¹, A. A. Stepanov¹, I. G. Panova², V. E. Chernov², A. A. Yaroslavov ²

¹Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1-12, Moscow, Russia. E-mail: iakim@soil.msu.ru

²Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1-3, Moscow, Russia. E-mail: yaroslav@belozersky.msu.ru

The aim of the study was to evaluate the effect of binary compositions based on the heterofunctional polysaccharide xanthan gum (XG) and three kinds of humic products (HP) on the anti-erosion, water-retaining and detoxifying properties of sod-podzolic soil in a series of model experiments, including those spiked with heavy metals (HM), and to identify the potential of these combinations as soil ameliorants in comparison with the individual polymers.

Location and time of the study. The study was carried out in model experiments in 2024 using the arable horizon of sod-podzolic sandy loam soil (Moscow region).

Methods. Four biopolymers were used: XG and three potassium humates (from lignite, peat and lignosulfonate), as well as their binary compositions. For soil treatment with polymer formulations two methods were used: spraying solutions onto the soil surface and mixing dry preparations with the entire soil volume. In a parallel series, soils were spiked with Cu, Zn, and Pb salts (150 mg/kg of each element). In soil-polymer mixtures, moisture retaining capacity, pH, C total, mobile forms of HM in acetate-ammonium buffer were determined. Phytotoxicity of soil-polymer mixtures was assessed in a biotest with *Raphanus sativus*.

Results. Treatment of the soil surface with formulations containing XG resulted in the formation of a structured composite layer of substrate particles linked together by polymer bridges. The introduction of HP into an aqueous solution of XG in the ratio biopolymer:humate = 2.5:1 or 1:1 did not affect the strength of the composite coatings. When applied at a rate of 1 g/100 g, both monocomponent formulations and binary compositions provided a stimulating effect on the test culture *R. sativum*. Binary compositions with XG did not show a better effect compared to individual polymers. Under the conditions of model contamination, among monocomponent formulations, the greatest decrease in the content of mobile Cu, Pb and Zn was found for humate from lignite (by 34%, 21% and 20% as compared with the control). Humates from peat and lignosulfonate alone turned out to be less effective, but in a binary composition with XG, their effectiveness in reducing the HM mobility increased by an average of 10%. According to the results of the phytotest in HM-spiked treatments, all the tested formulations exhibited protective properties, mitigating the toxicity of HM for plants.

Conclusions. The hydro-physical properties of soil-polymer mixtures were found to be determined by the xanthan gum, whereas chemical and biological properties were determined by humates. Xanthan gum can be considered as a promising ameliorant with a pronounced anti-erosion effect. In turn, humic products exhibited a biostimulating effect, bound heavy metals and provided a detoxifying effect of varying degrees depending on the composition and the organic matter source. In binary compositions, these effects did not show additivity, but were determined by the dominant mechanism of action. The choice of the optimal formulation as a soil conditioner for degraded soils should be determined depending the leading factor of soil degradation. Binary compositions are likely to have a complex effect, so their further studies in natural conditions are expedient.

Keywords: biopolymers; humic substances; composite coatings; water resistance; heavy metals; contamination.

How to cite: Yakimenko O.S., Nesterov P.V., Stepanov A.A., Panova I.G., Chernov V.E., Yaroslavov A.A. Effect of potassium humates, xanthan gum and their combinations on the properties of sod-podzolic soil in model experiments. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. 8(1). e302. DOI: [10.31251/pos.v8i1.302](https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.302) (in Russian with English abstract).

FUNDING

The study was financially supported by Lomonosov Moscow University Program of Development (project No. 23-SCH07-13).

REFERENCES

- Arzhakova O.V., Arzhakov M.S., Badamshina E.R., Bryuzgina E.B.3 Bryuzgin E.V., Bystrova A.V., Vaganov G.V., Vasilevskaya V.V., Vdovichenko A.Yu., Gallyamov M.O., Gumerov R.A., Didenko A.L., Zefirov V.V., Karpov S.V., Komarov P.V., Kulichikhin V.G., Kurochkin S.A., Larin S.V., Malkin A.Ya., Milenin S.A., Muzafarov A.M., Molchanov V.S., Navrotsky A.V., Novakov I.A., Panarin E.F., Panova I.G., Potemkin I.I., Svetlichny V.M., Sedush N.G., Serenko O.A., Uspenskii S.A., Philippova O.E., Khokhlov A.R., Chvalun S.N., Sheiko S.S., Shibaev A.V., Elmanovich I.V., Yudin V.E., Yakimansky A.V., Yaroslavov A.A. Polymers for the future. *Uspekhi Khimii*. 2022. Vol. 91. No. 12. P. RCR5062. (in Russian). <https://doi.org/10.57634/RCR5062>
- Bezuglova O.S., Polienko E.A. Application of humic preparations for potato and winter wheat. *Agrochemistry and Ecology Problems*. 2011. No. 4. P. 29–32. (in Russian).
- Brovarova O.V. The study of the biological activity of humic substances of peat as growth-stimulating drugs. *Agrokhimia*. 2024. No. 8. P. 50–56. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002188124080076>
- Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. Methods of studying soil physical properties. Moscow: Agropromizdat, 1986. 416 p. (in Russian).
- Izumrudov V.A., Mussabayeva B.K., Kassymova Z.S., Klivenko A.N., Orazzhanova L.K. Interpolyelectrolyte complexes: advances and prospects of application. *Russian Chemical Reviews*. 2019. Vol. 88. No. 10. P. 1046–1062. <https://doi.org/10.1070/rcr4877>
- Kabata-Pendias A., Pendias H. Microelements in soils and plants. Translation from English. Moscow: Mir Publ., 1989. 439 p. (in Russian).
- Li S.P., Khudaybergenova B.M., Pulatova Z.M., Prokhorenko V.A. Detoxifying properties of humic preparations with respect to Cd (II), Pb (II) and Cu (II). *Theoretical and Applied Ecology*. 2016. No. 1. P. 82–87. (in Russian).
- Panova I.G., Ilyasov L.O., Yaroslavov A.A. Polycomplex formulations for the protection of soils against degradation. *Polymer Science. Series C*. 2021. Vol. 63. No. 2. P. 237–248. <https://doi.org/10.1134/S1811238221020065>
- Pozdnyakov L.A., Stepanov A.L., Gasanov M.E., Semenov M.V., Yakimenko O.S., Suada I.K., Rai I.N., Shchegolkova N.M. Effect of Lignohumate on soil biological activity on the Bali Island, Indonesia. *Eurasian Soil Science*. 2020. Vol. 53. No. 5. P. 653–660. <https://doi.org/10.1134/S1064229320050117>
- Pukalchik M.A., Terekhova V.A., Yakimenko O.S., Akulova M.I. Evaluation of biochar and lignogumate remediation effect in heavy metal-contaminated soil. *Theoretical and Applied Ecology*. 2016. No. 2. P. 79–85. (in Russian).
- Sivakova L.G., Lesnikova N.P., Kim N.M., Rotova G.M. Physicochemical properties of the humic substances of peat and brown coal. *Solid Fuel Chemistry*. 2011. Vol. 45. No. 1. P. 1–6. <https://doi.org/10.3103/S0361521911010125>
- Stepanov A.A., Yakimenko O.S. Humic-based soil modifiers from peat and coal: effect on chemical and biological properties of model soil mixtures. *Agrokhimia*. 2023. No. 5. P. 53–59. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002188123050095>
- Stepanov A.A., Shulga P.S., Gosse D.D., Smirnova M.E. Natural humates application for remediation of contaminated urban soils and stimulation of plant growth. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie (Lomonosov Soil Science Journal)*. 2018. No. 2. P. 30–34. (in Russian).
- Khaidapova, D. D. Pestonova E. A. Strength of interparticle bonds in soil pastes and aggregates. *Eurasian Soil Science*. 2007. Vol. 40. No. 11. P. 1187–1192. <https://doi.org/10.1134/S1064229307110063>
- Yakimenko O.S. Application of commercial humic products in Russian Federation: results of field trials (a review). *Live and Bio-Abiotic Systems*. 2016. No. 18. (in Russian). <http://www.jbks.ru/archive/issue-18/article-4>
- Yakimenko O.S., Ziganshina A.R., Stepanov A.A., Panova I.G., Yaroslavov A.A. Effect of polyelectrolytes on soil organic matter in model experiments. *Eurasian Soil Science*. 2022. Vol. 55. No. 7. P. 988–997. <https://doi.org/10.1134/S1064229322070134>
- Ayeldeen M., Negm A., El Sawwaf M., Gädda T. Laboratory study of using biopolymer to reduce wind erosion. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2018. Vol. 12. No. 3. P. 228–240. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1264692>
- Abbaszadeh A., Lad M., Janin M., Morris G.A., MacNaughtan W., Sworn G., Foster T.J. A novel approach to the determination of the pyruvate and acetate distribution in xanthan. *Food Hydrocolloids*. 2015. Vol. 44. P. 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.08.014>
- Ashraf S., Soudi M., Amoozegar M.A., Moshtaghi Nikou M., Spröer C. *Paenibacillus xanthanilyticus* sp. nov., a xanthan-degrading bacterium isolated from soil. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2018. Vol. 68. No. 1. P. 76–80. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.002453>

- Berninger T., Dietz N., González López Ó. Water-soluble polymers in agriculture: xanthan gum as eco-friendly alternative to synthetics. *Microbial Biotechnology*. 2021. Vol. 14. No. 5. P. 1881–1896. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13867>
- Bezuglova O., Klimenko A. Application of humic substances in agricultural industry. *Agronomy*. 2022. Vol. 12. No. 3. P. 584. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030584>
- Bondareva L., Kudryasheva N. Direct and indirect detoxification effects of humic substances. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. No. 2. P. 198. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020198>
- Cabalar A.F., Wiszniewski M., Skutnik Z. Effects of xanthan gum biopolymer on the permeability, odometer, unconfined compressive and triaxial shear behavior of a sand. *Soil mechanics and foundation engineering*. 2017. Vol. 54. P. 356–361. <https://doi.org/10.1007/s11204-017-9481-1>
- Cadmus M.C., Jackson L.K., Burton K.A., Plattner R.D., Slodki M.E. Biodegradation of xanthan gum by *Bacillus* sp. *Applied and Environmental Microbiology*. 1982. Vol. 44. No. 1. P. 5–11. <https://doi.org/10.1128/aem.44.1.5-11.1982>
- Chang I., Prasidhi A.K., Im J., Shin H.D., Cho G.C. Soil treatment using microbial biopolymers for anti-desertification purposes. *Geoderma*. 2015. Vol. 253. P. 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.04.006>
- Chen X., Wang M., Yang F., Tang W., Li X. Isolation and characterization of xanthan-degrading *Enterobacter* sp. nov. LB37 for reducing the viscosity of xanthan in petroleum industry. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2014. Vol. 30. P. 1549–1557. <https://doi.org/10.1007/s11274-013-1578-8>
- Delgado M.Z., Aranda F.L., Hernandez-Tenorio F., Garrido-Miranda K.A., Meléndrez M.F., Palacio D.A. Polyelectrolytes for environmental, agricultural, and medical applications. *Polymers*. 2024. Vol. 16. No. 10. P. 1434. <https://doi.org/10.3390/polym16101434>
- Faria S., de Oliveira Petkowicz C.L., de Moraes S.A.L., Terrones M.G.H., De Resende M.M., de Franca F.P., Cardoso V.L. Characterization of xanthan gum produced from sugar cane broth. *Carbohydrate Polymers*. 2011. Vol. 86. No. 2. P. 469–476. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.063>
- Garcia-Ochoa F., Santos V.E., Casas J.A., Gomez E. Xanthan gum: production, recovery, and properties. *Biotechnology Advances*. 2000. Vol. 18. No. 7. P. 549–579. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(00\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(00)00050-1)
- Jang J. A review of the application of biopolymers on geotechnical engineering and the strengthening mechanisms between typical biopolymers and soils. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 2020. No. 1. P. 1465709. <https://doi.org/10.1155/2020/1465709>
- Janos P., Vavrova J., Herzogova L., Pilarova V. Effects of inorganic and organic amendments on the mobility (leachability) of heavy metals in contaminated soil: a sequential extraction study. *Geoderma*. 2010. Vol. 159. No. 3–4. P. 335–341. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.08.009>
- Jindo K.K., Olivares F.L., Malcher D.J.D.P., Sánchez- Monedero M.A., Kempenaar C., Canellas L.P. From lab to field: Role of humic substances under open-field and greenhouse conditions as biostimulant and biocontrol agent. *Frontiers in Plant Science*. 2020. Vol. 11. P. 426. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00426>
- Katzbauer B. Properties and applications of xanthan gum. *Polymer Degradation and Stability*. 1998. Vol. 59. No. 1–3. P. 81–84. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(97\)00180-8](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00180-8)
- Kulikova N.A., Perminova I.V. Interactions between humic substances and microorganisms and their implications for nature-like bioremediation technologies. *Molecules*. 2021. Vol. 26. No. 9. P. 2706. <https://doi.org/10.3390/molecules26092706>
- Kulikova N.A., Stepanova E.V., Koroleva O.V. Mitigating activity of humic substances: direct influence on biota. In: *Use of humic substances to remediate polluted environments: from theory to practice* / I.V. Perminova, K. Hatfield, N. Hertkorn (eds.). NATO Science Series, 2005. Vol. 52. P. 285–309. https://doi.org/10.1007/1-4020-3252-8_14
- Kumar A., Rao K.M., Han S.S. Application of xanthan gum as polysaccharide in tissue engineering: A review. *Carbohydrate Polymers*. 2018. Vol. 180. P. 128–144. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.10.009>
- Liu H., Huang C., Dong W., Du Y., Bai X., Li X. Biodegradation of xanthan by newly isolated *Cellulomonas* sp. LX, releasing elicitor-active xantho-oligosaccharides-induced phytoalexin synthesis in soybean cotyledons. *Process Biochemistry*. 2005. Vol. 40. No. 12. P. 3701–3706. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.05.006>
- Mendonça A., Moraes P.V., Pires A.C., Chung A.P., Oliveira P.V. A review on the importance of microbial biopolymers such as xanthan gum to improve soil properties. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 11. No. 1. P. 170. <https://doi.org/10.3390/app11010170>
- Muscolo A., Sidari M., Cozzolino V., Nuzzo A., Nardi S., Piccolo A. Molecular characteristics of humic substances from different origins and their effects on growth and metabolism of *Pinus laricio callus*. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2022. Vol. 9. No. 1. P. 1–18. <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00334-y>

- Nankai H., Hashimoto W., Miki H., Kawai S., Murata K. Microbial system for polysaccharide depolymerization: enzymatic route for xanthan depolymerization by *Bacillus* sp. strain GL1. Applied and Environmental Microbiology. 1999. Vol. 65. No. 6. P. 2520–2526. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.6.2520-2526.1999>
- Novoskoltseva O.A., Loiko N.G., Nikolaev Y.A., Lisin A.O., Panova I.G., Yaroslavov A.A. Interpolyelectrolyte complexes based on hydrolyzed polyacrylonitrile for anti-erosion stabilization of soils and ground. Polymer International. 2022. Vol. 71. No. 6. P. 697–705. <https://doi.org/10.1002/pi.6289>
- Nsengiyumva E.M., Alexandridis P. Xanthan gum in aqueous solutions: Fundamentals and applications. International Journal of Biological Macromolecules. 2022. Vol. 216. P. 583–604. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.06.189>
- Palaniraj A., Jayaraman V. Production, recovery and applications of xanthan gum by *Xanthomonas campestris*. Journal of food engineering. 2011. Vol. 106. No. 1. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.03.035>
- Seo S., Lee M., Im J., Kwon Y.M., Chung M.K., Cho G., Chang I. Site application of biopolymer-based soil treatment (BPST) for slope surface protection: in-situ wet-spraying method and strengthening effect verification. Construction and Building Materials. 2021. Vol. 307. P. 124983. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124983>
- Tran A.T.P., Chang I., Cho G.C. Soil water retention and vegetation survivability improvement using microbial biopolymers in drylands. Geomechanics and Engineering. 2019. Vol. 17. No. 5. P. 475–483. <https://doi.org/https://doi.org/10.12989/gae.2019.17.5.475>
- Wang S., Zhao X., Zhang J., Jiang T., Wang S., Zhao J., Meng Z. Water retention characteristics and vegetation growth of biopolymer-treated silt soils. Soil and Tillage Research. 2023. Vol. 225. P. 105544. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105544>
- Yakimenko O., Khundzhua D., Izosimov A., Yuzhakov V., Patsaeva S. Source indicator of commercial humic products: UV-Vis and fluorescence proxies. Journal of Soils and Sediments. 2018. Vol. 18. No. 4. P. 1279–1291. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1528-9>
- Yakimenko O., Stepanov A., Patsaeva S., Khundzhua D., Osipova O., Gladkov O. Formation of humic-like substances during the technological process of Lignohumate® synthesis as a function of time. Separations. 2021. Vol. 8. No 7. P. 1–13. <https://doi.org/10.3390/separations8070096>
- Yakimenko O.S., Panova I.G., Novoskoltseva O., Gruzdenko D., Pozdnyakov L., Kadulin M., Stepanov A.A., Terekhova V., Yaroslavov A. Humic substances enhance the performance of polyelectrolyte-based formulations as soil conditioners. Humic substances and green technologies (HIT-2024): ninth International Conference of the CIS IHSS on humic innovative technologies (Sailing Club “Vodnik”, Moscow Region, Russia, 25–28 October, 2024). Book of Abstracts. 2024. P. 56. <http://www.humus.ru/hit-2024/abstractbook/HIT-2024-abstractbook.pdf>
- Zezin A.B., Mikheikin S.V., Rogacheva V.B., Zansokhova M.F., Sybachin A.V., Yaroslavov A.A. Polymeric stabilizers for protection of soil and ground against wind and water erosion. Advances in Colloid and Interface Science. 2015. Vol. 226. P. 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.06.006>

Received 03 March 2025

Accepted 25 April 2025

Published 03 May 2025

About the authors:

Olga S. Yakimenko – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher in the Department of Soil Chemistry, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); iakim@soil.msu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0499-5482>

Pavel V. Nesterov – MSc Student in the Department of Soil Chemistry, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); pkontinium@yandex.ru

Andrey A. Stepanov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Department of Soil Chemistry, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); Stepan.1963@mail.ru

Irina G. Panova – Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher in the Department of Polymer Sciences, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia), igpan@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0519-3695>

Vyacheslav E. Chernov – Engineer, Department of in the Department of Polymer Sciences, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); slavachernov111@yandex.ru

Alexander A. Yaroslavov – Doctor of Chemical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Polymer Sciences, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia), yaroslav@belozersky.msu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1627-1270>