

УДК 541(64+13)

## ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТЫ ДЛЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ПОЧВ

© 2021 г. О. С. Якименко<sup>а,\*</sup>, Д. А. Грузденко<sup>а</sup>, А. А. Степанов<sup>а</sup>,  
М. А. Бутылкина<sup>а</sup>, А. А. Киушов<sup>б</sup>, И. Г. Панова<sup>б</sup>

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Москва, Россия

<sup>а</sup> Факультет почвоведения и <sup>б</sup> Химический факультет

119991 Москва, Ленинские горы, Россия

\*e-mail: iakim@soil.msu.ru

Поступила в редакцию 13.04.2021 г.

После доработки 29.04.2021 г.

Принята к публикации 21.05.2021 г.

Исследовано влияние катионного полиэлектролита поли(диаллилдиметиламмоний хлорида), анионного полиэлектролита лигногумата калия и интерполиэлектролитного комплекса на их основе на агрегатный состав и фитотоксичность конструкторозема – искусственно сконструированного грунта. Исходный конструкторозем характеризуется широким набором структурных агрегатов с высокой долей крупных частиц. Добавление поликатиона к образцу конструкторозема полностью разрушает крупные агрегаты, а добавление полианиона практически не влияет на распределение частиц по размерам. Поликомплекс резко понижает долю крупных частиц и блокирует появление малых частиц, тем самым существенно увеличивая содержание агрономически ценных агрегатов в конструктороземе и одновременно стимулируя рост и развитие растений.

DOI: 10.31857/S2308114721020114

### ВВЕДЕНИЕ

Гетерофункциональные гидрофильные полиэлектролиты при внесении в почву способны оптимизировать ее водный режим, стабилизировать почвенную структуру, предотвратить вынос питательных элементов и препятствовать водной и ветровой эрозии [1–6]. В связи с этим использование полимерных структурообразователей на основе синтетических и природных полимеров является важным элементом современных сельскохозяйственных технологий [7–10]. Помимо индивидуальных полимеров (например, полиакриламида, альгината натрия и хитозана) [11–13] структурообразователями почв и грунтов могут служить интерполиэлектролитные комплексы (ИПЭК) – продукты взаимодействия противоположно заряженных полиэлектролитов [14–18]. Нанесение водного раствора ИПЭК на поверхность почвы приводит к формированию композиционных полимерно-почвенных покрытий с ярко выраженными противозерозионными свойствами [14]. Такое покрытие проницаемо для воздуха и влаги и не препятствует росту растительности [14, 15].

В недавних работах показано, что для получения ИПЭК могут быть использованы гуминовые вещества, представляющие собой естественные

компоненты почв [19–21]. Такой подход представляется весьма привлекательным как с позиций зеленой химии, так и с экономической точки зрения, поскольку гуминовые вещества разного происхождения, состава и цены широко представлены на рынке в качестве улучшителей почвы и стимуляторов роста растений [22, 23]. Способность ИПЭК с участием биополимеров улучшать структуру почвы, подавлять эрозионные процессы в почве и восстанавливать состояние деградированных почв описана ранее [16–19, 24–26]. Эффективность действия ИПЭК зависит от их состава (соотношения катионных и анионных групп). Эксперименты с почвами разного типа показали, что наилучшие структурирующие свойства демонстрируют поликомплексы с избытком катионного полимера. Такие “катионные” ИПЭК прочно связываются с частицами почвы за счет электростатических и гидрофобных взаимодействий; образованная полимерно-почвенная корка сохраняется при действии штормового ветра и “размывающих” потоков воды [24, 25].

Помимо нанесения на поверхность почвы/грунта разбрызгиванием водный раствор ИПЭК можно равномерно распределить по всей почвенной массе (смешать со всем объемом почвы). Последний способ перспективен для улучшения каче-

**Таблица 1.** Массовая доля полимера в модифицированных конструктоземах

Полимер	Концентрация полимера в растворе, мас. %	Содержание полимера в модифицированном конструктоземе, мас. %
Нет (контроль)	0	0
ИПЭК	1	0.1
ИПЭК	2	0.2
ИПЭК	5	0.5
ПДАДМАХ	5	0.5
ЛГ	5	0.5

ства искусственно сконструированных грунтов (конструктоземов), используемых при городском озеленении и для укрепления откосов [27–29]. В этом методе в почвенный субстрат поступает значительно большее количество полимера, чем при его поверхностном нанесении, что может сказаться на водно-физических свойствах почвы и росте растений.

В настоящей работе исследуется влияние катионного ИПЭК на важнейшие характеристики почвы: агрегатный состав, который отвечает за комплекс агрофизических свойств почвы, и фитотоксичность, регулирующую рост и развитие растений. Результаты для ИПЭК сравниваются с данными, полученными для исходных компонентов поликомплекса: катионного полиэлектролита поли(диаллилдиметиламмоний хлорида) (ПДАДМАХ) и анионного полиэлектролита лигногумата калия (ЛГ). Оба полимера производятся промышленно; ПДАДМАХ служит флокулянт и коагулянт в технологиях водоочистки [30] и проходит тестирование в качестве средства для закрепления почв различной текстуры [24, 25], ЛГ широко применяется в сельском хозяйстве как стимулятор роста растений и почвенный кондиционер [31–34].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Материалы

ПДАДМАХ с  $M_w = (20–35) \times 10^4$  (“Sigma-Aldrich”) и ЛГ с  $M_w = (65–75) \times 10^3$  (Научно-производственное объединение “РЭТ”, Россия) использовали без дополнительной очистки. ИПЭК получали сливанием водных растворов ПДАДМАХ и ЛГ, предварительно доведенных до pH 7 [25]. Концентрацию полимеров выражали в количестве молей катионных групп ПДАДМАХ и анионных групп ЛГ в литре раствора. В качестве почвенного субстрата был взят отвал строительного грунта (конструктозем) с долей физического песка (размер частиц больше 0.01 мм) 72 мас. %.

Полимеры смешивали с грунтом следующим образом. Готовили водные растворы/гели поли-

меров с концентрацией 1, 2 и 5 мас. %. К 15 кг конструктозема добавляли 1.5 л раствора/геля, смесь перемешивали до получения однородной массы при помощи строительного миксера. В контроле к 15 кг конструктозема добавляли 1.5 л дистиллированной воды. Состав смесей – модифицированных конструктоземов представлен в табл. 1.

### Методы

Гидродинамический диаметр и электрофоретическую подвижность полимеров и частиц ИПЭК измеряли методами динамического светорассеяния и лазерного микроэлектрофореза на спектрометре “Brookhaven ZetaPlus” (США). Оптическую плотность (мутность) полимерных растворов определяли на спектрофотометре “Shimadzu UV-1240 mini” (Япония). Значения pH растворов находили с помощью pH-метра Corning 340 (США).

Гранулометрический состав конструктозема определяли методом лазерной дифракции на лазерном анализаторе размера частиц “Mastersizer 3000E” (“Malvern”, Великобритания) [35]. Предварительное диспергирование почвы проводили на ультразвуковой установке “Digital Sonifier S-250D” (“Branson Ultrasonics”, США) с энергией диспергирования 450 Дж/мл.

На экспериментальном полигоне формировали делянки размером 0.5 м × 0.5 м, огороженные деревянными рамками. Модифицированные конструктоземы помещали в подготовленные делянки, образцы накрывали пленкой для предотвращения вымывания полиэлектролитов атмосферными осадками на начальном этапе формирования почвенно-полимерного композитов. Через месяц с делянок отбирали образцы для исследования физическо-химических свойств и оценки фитотоксичности.

Влияние полимеров на агрегатный состав модифицированных конструктоземов в экспериментальных делянках исследовали методами сухого и мокрого просеивания [36]. При сухом

просеивании навеску воздушно-сухого модифицированного конструктора (1.5 кг) ненарушенного строения рассеивали на ситах с диаметром отверстий 10, 7, 5, 3, 2, 1, 0.5 и 0.25 мм, соединенных в последовательный набор от большего диаметра к меньшему. Полученные фракции модифицированного конструктора определяли как отношение массы этой фракции к общей массе образца модифицированного конструктора. Измеряемые размеры агрегатов находились в диапазоне 0.25–10 мм. По результатам сухого просеивания рассчитывали долю агрономически ценных агрегатов, имеющих размеры 0.25–10 мм, и коэффициент структурности  $K_{стр}$  – отношение количества агрегатов с размером 0.25–10 мм к суммарному содержанию агрегатов с размером менее 0.25 мм (“пыль”) и более 10 мм (“глыбы”). Коэффициент структурности  $K_{стр}$  показывает, во сколько раз масса агрономически ценных агрегатов превышает массу почвы, представленной “глыбистыми” и “пылеватыми” частицами [36]. Агрегатное состояние модифицированных конструкторов характеризовали с помощью предложенных ранее критериев: отличное агрегатное состояние при  $K_{стр} > 1.5$ , хорошее при  $K_{стр} = 0.67–1.50$  и неудовлетворительное при  $K_{стр} < 0.67$  [36].

Мокрое просеивание использовали для оценки водоустойчивости агрегатов модифицированного конструктора [36]. Фракции агрегатов, полученные при сухом просеивании, смешивали пропорционально их содержанию в образце и погружали в цилиндр с водой. После оседания агрегатов на дно цилиндра его переворачивали и снова дожидались оседания агрегатов. Процедуру повторяли 10 раз, чтобы разрушить все непрочные агрегаты. Далее содержимое цилиндра переносили на верхнее сито из набора сит с диаметром отверстий 5, 3, 2, 1, 0.5 и 0.25 мм (сверху вниз), погруженного в сосуд с водой. Набор сит с модифицированным конструктором осторожно десятикратно погружали в воду, при этом самые мелкие разрушенные агрегаты проходили через сито с диаметром отверстий 0.25 мм и вымывались в сосуд с водой. Агрегаты, оставшиеся на ситах, смывали, переносили в алюминиевые бюксы, высушивали при 105°C и взвешивали. За меру водоустойчивости модифицированного конструктора принимали суммарную массовую долю фракций с размером 0.25–5 мм, полученных при мокром просеивании [36].

Оценку хронической фитотоксичности модифицированного конструктора проводили согласно [37]. Образец модифицированного конструктора растирали и просеивали через сито с диаметром отверстий 2 мм. 200 г просеянного модифицированного конструктора помещали в пластиковые сосуды, высевали 10 семян горчицы

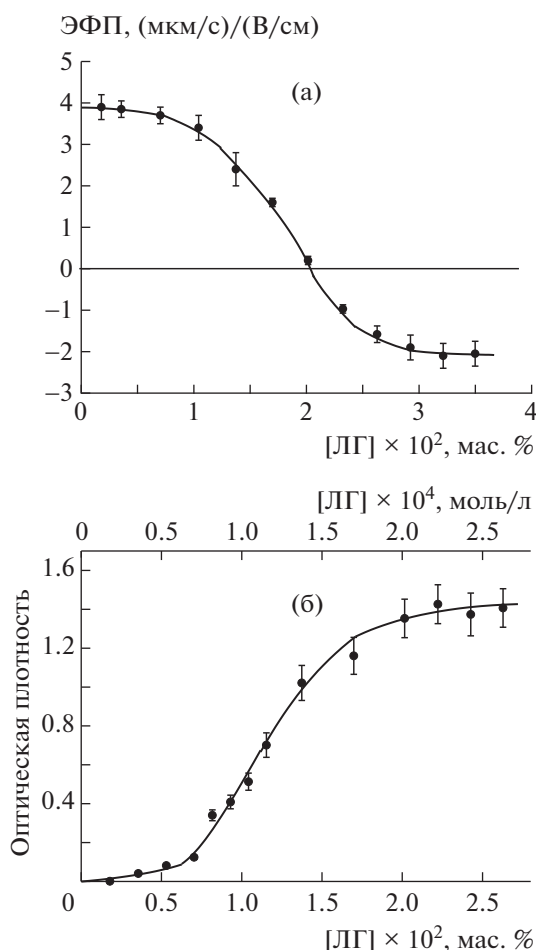
белой *Sinapis alba* и увлажняли 50 мл дистиллированной воды. Сосуды помещали в климатикамеру “Binder” (Германия) и экспонировали 28 суток при 23°C в режиме 16 ч день/8 ч ночь при периодическом поливе, после чего определяли длину надземной части проростков. Для каждого конструктора опыт проводили три раза, результаты обрабатывали с помощью однофакторного дисперсионного анализа в статистическом пакете Statistica 10. Достоверность различий оценивали по критерию *HCP* ( $P < 0.05$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### *Взаимодействие ПДАДМАХ и ЛГ*

Формирование ИПЭК с участием ПДАДМАХ и ЛГ изучали в  $5 \times 10^{-3}$  М фосфатном буферном растворе при pH 7. Добавление 0.3 мас. % водного раствора ЛГ к  $2 \times 10^{-4}$  М водному раствору ПДАДМАХ сопровождалось нейтрализацией заряда поликатиона, что отражалось в уменьшении абсолютного значения электрофоретической подвижности (ЭФП) образующихся частиц (рис. 1а). В работах [38, 39] показано, что взаимодействие двух противоположно заряженных макроионов развивается таким образом, что они количественно связываются в ИПЭК вплоть до формирования стехиометрического комплекса с эквивалентным соотношением обоих компонентов. Очевидно, что это соображение относится и к титрованию макроиона ПДАДМАХ макроионом ЛГ. В таком случае в точке ЭФП = 0 мольная концентрация анионных групп ЛГ равна мольной концентрации катионных групп исходного ПДАДМАХ:  $[ЛГ]_{ЭФП=0} = [ПДАДМАХ]_{ЭФП=0} = 2 \times 10^{-4}$  моль/л. При  $[ЛГ] < 2 \times 10^{-4}$  моль/л образуются нестехиометрические положительно заряженные ИПЭК с избыточным содержанием поликатиона ПДАДМАХ.

Заряд лиофильных коллоидных частиц во многом определяет их агрегативную устойчивость в водных растворах [15]. При уменьшении абсолютного значения заряда (или ЭФП) частиц утрачивается стабильность их дисперсии и последующей агрегации. Добавление раствора ЛГ к раствору ПДАДМАХ приводило к прогрессивному увеличению мутности системы (рис. 1б), что отражало формирование интерполимерного комплекса ПДАДМАХ–ЛГ. При равной концентрации ионных групп обоих полимеров мутность системы достигала своего максимального значения. В области  $[ЛГ] < 2 \times 10^{-4}$  моль/л в системе образовывались агрегативно устойчивые частицы с диаметром около 200 нм. Стабильность дисперсии таких частиц обусловлена их высоким положительным зарядом, создаваемым избытком ПДАДМАХ (ср. данные рис. 1а и 1б).



**Рис. 1.** Электрофоретическая подвижность частиц ИПЭК (а) и оптическая плотность растворов/суспензий ИПЭК при длине волны света 500 нм (б) для ИПЭК, полученных из ПДАДМАХ и ЛГ. Концентрация ПДАДМАХ  $2 \times 10^{-4}$  моль/л, растворитель –  $5 \times 10^{-3}$  М фосфатный буфер с рН 7. Цветные рисунки можно посмотреть в электронной версии.

*Структурообразующее действие  
полиэлектролитов по отношению  
к конструкторозему*

Для структурирования конструкторозема использовали положительно заряженный комплекс ПДАДМАХ–ЛГ с трехкратным избытком катионных групп ПДАДМАХ (ИПЭК+). Такой поликомплекс с гуматом калия показал хорошие стабилизирующие свойства по отношению к кварцевому песку и тяжелому суглинку [24, 25]. Учитывая высокую долю песка в конструктороземе, можно было ожидать, что связывание поликомплекса с конструктороземом также будет эффективным.

На рис. 2 представлены результаты определения агрегатного состава исходного конструкторозема и конструкторозема, модифицированного

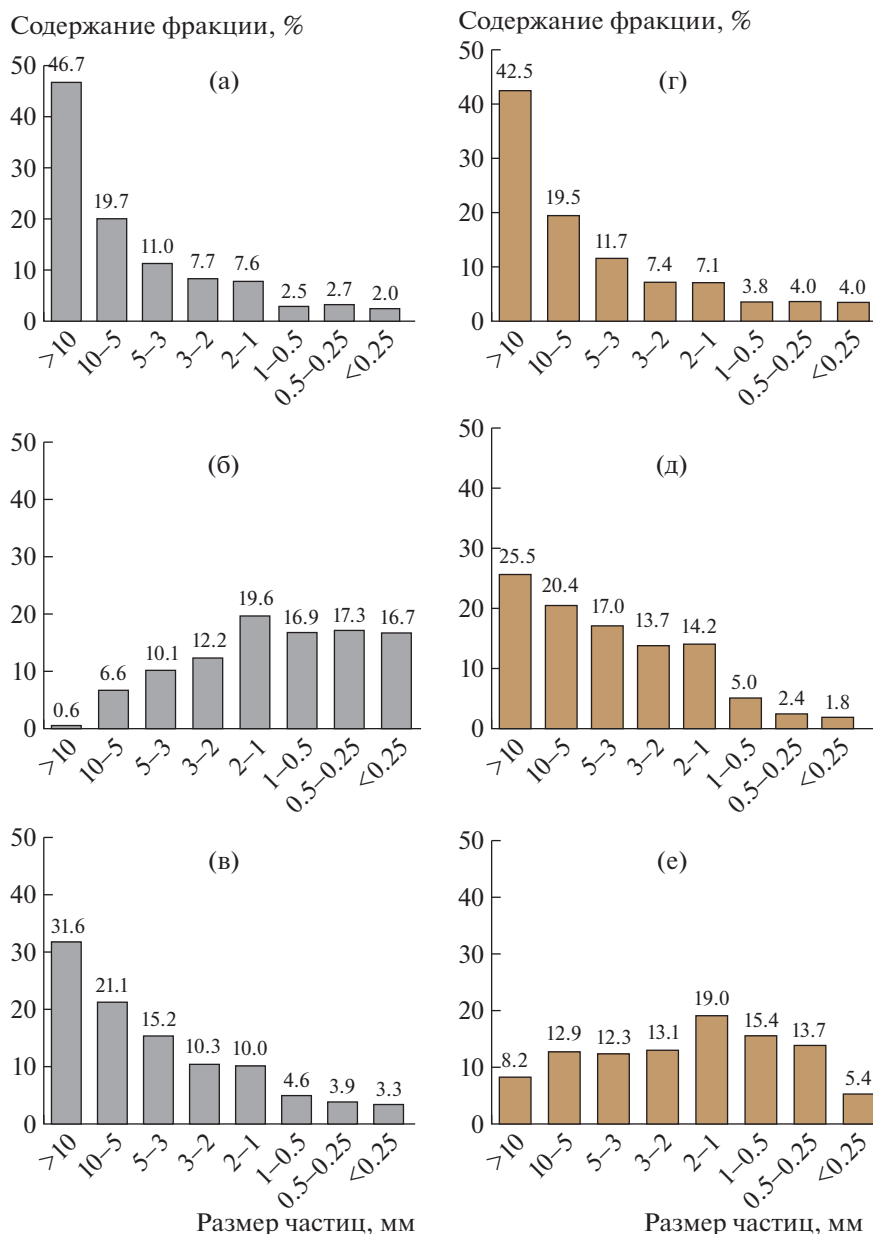
0.5 мас. % ПДАДМАХ (рис. 2а), 0.5 мас. % ЛГ (рис. 2б) и 0.1–0.5 мас. % ИПЭК+ (рис. 2в); в табл. 2 указано содержание в конструктороземах агрономически ценных агрегатов. Агрегатный состав исходного конструкторозема (рис. 2а) характеризовался высоким содержанием крупных “глыбистых” частиц размером более 10 мм и незначительным содержанием мелких “пылеватых” частиц размером менее 0.25 мм. Общее содержание агрономически ценных агрегатов, диаметр которых находился в интервале 0.25–10 мм, составляло 51% (табл. 2).

Добавление 0.5% ПДАДМАХ приводило к практически полному исчезновению “глыбистых” частиц и заметному снижению доли крупных частиц с размером 5–10 мм (рис. 2б), при этом существенно возрастала доля мелких (0.25–0.50 мм) и “пылеватых” частиц. Общее содержание агрономически ценных агрегатов повышалось до 82% (табл. 2).

Добавление к конструкторозему 0.5% ЛГ (рис. 2в) мало влияло на агрегатный состав: наибольшая доля сохранялась за “глыбистыми” частицами, наименьшая – за “пылеватыми” при равномерном увеличении вклада остальных фракций. Общее содержание агрономически ценных агрегатов повышалось до 65% (табл. 2), т.е. меньше, чем после добавления ПДАДМАХ.

Влияние поликомплекса возрастало с увеличением его содержания в модифицированном конструктороземе. При содержании ИПЭК 0.1 мас. % (рис. 2г) распределение структурных агрегатов практически не отличалось от контрольного, введение 0.2% ИПЭК (рис. 2д) заметно уменьшало долю “глыбистых” частиц и повышало содержание агрономически ценных агрегатов до 72%. Наконец, добавление 0.5% ИПЭК (рис. 2е) кардинально меняло профиль агрегатного состава, делая его похожим на профиль, создаваемый добавкой 0.5% ПДАДМАХ (рис. 2б), с общим содержанием агрономически ценных агрегатов, равным 85%. Однако доля пылеватой фракции (<0.25 мм) в этом случае была примерно в 3 раза ниже, чем при воздействии 0.5% ПДАДМАХ (табл. 2).

Приведенные выше данные позволили рассчитать коэффициент структурности  $K_{стр}$  (табл. 2). По сути, коэффициент структурности – это другая форма представления рассчитанного выше содержания агрономически ценных агрегатов. Напомним критерии оценки агрегатного состояния модифицированного конструкторозема: “отличное” при  $K_{стр} > 1.5$ , “хорошее” при  $K_{стр}$  в интервале 0.67–1.50 и “неудовлетворительное” при  $K_{стр} < 0.67$ . Согласно этим критериям, агрегатное состояние исходного конструкторозема было “хорошим”, и оно оставалось таким при добавлении 0.1 мас. % ИПЭК+. Во всех остальных случаях до-



**Рис. 2.** Распределение структурных агрегатов по размеру в исходном (а) и модифицированном (б–е) конструкторе. Модификатор ПДАДМАХ (б), ЛГ (в) и ИПЭК+ (г–е). Содержание модификатора 0.5 (б, в, е), 0.1 (г) и 0.2 мас. % (д).

бавление полимера переводило агрегатное состояние конструкторе в “отличное” с  $K_{стр}$ , превысившим 1.5. Наиболее высокое качество демонстрировала смесь с 0.5% ИПЭК+, для которой  $K_{стр}$  достигал 6.3.

Помимо размера структурных агрегатов важнейшее значение имеет их водостойчивость, т.е. способность не размываться под действием почвенных и поверхностных вод. Водостойчивость была рассчитана по результатам “мокрого” просеивания в виде суммарной доли агрегатов с размером 0.25–5 мм (табл. 2). Для исходного кон-

структоре эта величина была весьма высокой и составляла 78%. Добавление катионного ПДАДМАХ, анионного ЛГ и ИПЭК+ мало влияло на водостойкость образцов, которая не выходила за рамки интервала  $82 \pm 5\%$ .

Таким образом, исходный конструкторе характеризуется широким набором частиц (структурных агрегатов) с высокой долей крупных “глыбистых” частиц и коэффициентом структурности  $K_{стр} = 1.0$ . Агротомически ценные агрегаты в составе конструкторе отличаются высокой водостойкостью (78%). Добавление 0.5 мас. % катионного ПДАДМАХ к конструкторе практи-

**Таблица 2.** Содержание агрономически ценных агрегатов, коэффициент структурности  $K_{стр}$  и водоустойчивость почвенных агрегатов при внесении полиэлектролитов

Полимер	Содержание полимера в модифицированном конструкторе, мас. %	Содержание агрономически ценных агрегатов, %	$K_{стр}$	Водоустойчивость, %
Нет (контроль)	0	51	1.0	78.6
ПДАМАХ	0.5	82	4.8	76.6
ЛГ	0.5	65	1.9	87.0
ИПЭК+	0.1	53	1.1	82.6
ИПЭК+	0.2	72	2.7	82.6
ИПЭК+	0.5	85	6.3	81.0

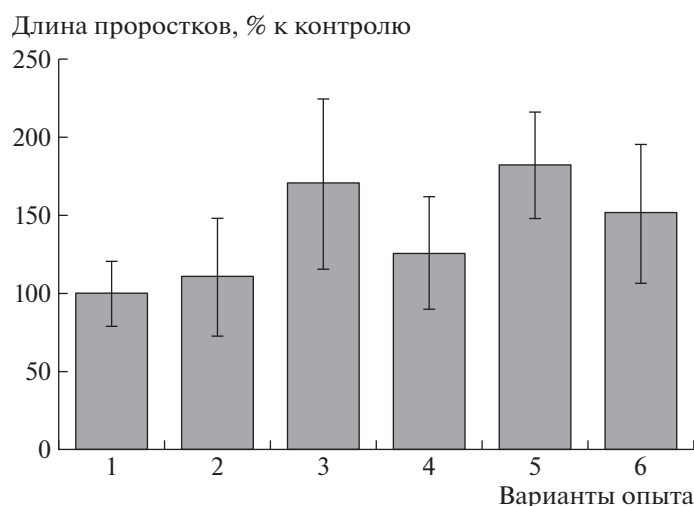
чески полностью разрушает “глыбистые” частицы и переводит их в категорию агрономически ценных агрегатов, при этом коэффициент структурности повышается до 4.8. Аналогичный эффект вызывает добавление 0.5 мас. % поликомплекса с трехкратным избытком поликатиона ИПЭК+; в данном случае коэффициент структурности  $K_{стр}$  увеличивается до 6.3. ИПЭК+ выступает в двойной роли: диспергатора “глыбистых” частиц и одновременно стабилизатора разрушенных фрагментов, что позволяет ему блокировать образование “пылеватых” частиц в гораздо большей степени, чем это делает индивидуальный ПДАДМАХ (ср. рис. 2е и 2б).

#### Фитотестирование

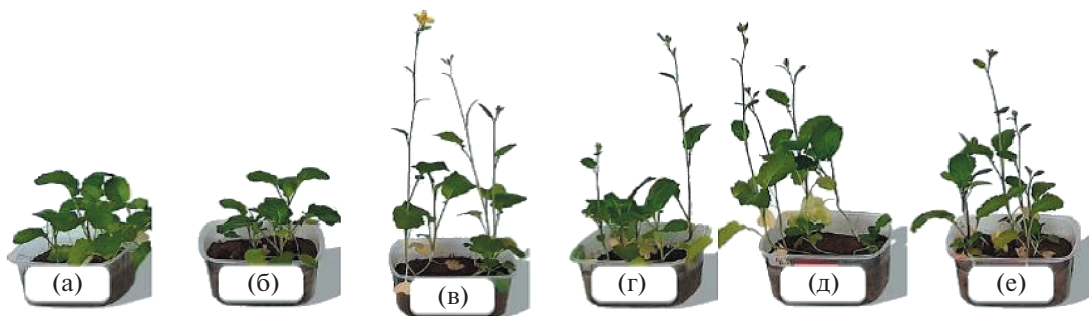
Развитие растений в модифицированном конструкторе оценивали, измеряя длину 28-дневных проростков горчицы в хроническом фитоте-

сте, результаты которого представлены на рис. 3. Примечательно, что подавление роста растений по сравнению с контролем не было зарегистрировано ни в одном из вариантов опыта. Введение ПДАДМАХ (2) не приводило к изменениям по сравнению с контролем (1). Анионный ЛГ (3), сертифицированный стимулятор роста растений, увеличивал длину проростков на 70%. Положительный эффект от ИПЭК+ усиливался с увеличением его доли в конструкторе и доходил до 50–70% в образцах с 0.2–0.5 мас. % ИПЭК+, что сопоставимо с действием ЛГ. Это означает, что биологически активные компоненты в составе ЛГ сохраняли свою активность в составе ИПЭК+.

Отсутствие токсического действия ИПЭК+ на рост растений подтверждают фотографии на рис. 4, на котором показаны одинаковые по плотности растительности проростки горчицы в исходном конструкторе (рис. 4а, контроль) и конструкторе с 0.5 мас. % ИПЭК+ (рис. 4б). Токси-



**Рис. 3.** Длина 28-дневных проростков горчицы в исходном (1) и модифицированном (2–6) конструкторе. Модификатор ПДАДМАХ (2), ЛГ (3) и ИПЭК+ (4–6). Содержание модификатора 0.5 (2, 3, 6), 0.1 (4) и 0.2 мас. % (5). Среднее  $\pm$  доверительный интервал.



**Рис. 4.** Развитие горчицы в исходном (а) и модифицированном (б–е) конструктоземе. Модификатор ПДАДМАХ (б), ЛГ (в) и ИПЭК+ (г–е). Содержание модификатора 0.5 (б, в, е), 0.1 (г) и 0.2 мас. % (д).

ческое действие катионных полимеров и “катионных” поликомплексов в растворах и в виде поверхностных пленок хорошо известно и многократно описано [40, 41]. Это действие реализуется благодаря высокой конформационной подвижности макромолекул, которая обеспечивает “подстройку” катионных групп полимеров под атакуемую клетку с последующим блокированием функциональных элементов на ее поверхности, перераспределением липидных молекул и формированием дефектов в клеточной мембране и т.д. [42, 43]. Однако связывание катионных полимеров и ИПЭК+ с частицами почвы (конструктозема) нейтрализует “катионный потенциал” полимеров и уменьшает их токсичность.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализирована возможность повышения качества искусственно сконструированного грунта (конструктозема) через его смешение с полиэлектролитами. Исследованы синтетический катионный полиэлектролит ПДАДМАХ, полусинтетический анионный полиэлектролит ЛГ и интерполиэлектролитный комплекс ПДАДМАХ–ЛГ с трехкратным избытком катионного полимера. Исходный конструктозем (отвал строительного грунта с содержанием физического песка, частиц с размером больше 0.01 мм, 72 мас. %) характеризуется широким набором структурных агрегатов с высокой долей крупных частиц. Добавление ПДАДМАХ к образцу конструктозема полностью разрушает крупные частицы с размером более 10 мм, но увеличивает долю мелких частиц размером менее 0.25 мм, что может приводить к их выносу и потере почвой питательных веществ. Добавление полианиона практически не влияет на распределение частиц в образце. Поликомплекс резко понижает долю крупных частиц и блокирует появление малых частиц, тем самым существенно увеличивая содержание агрономически ценных агрегатов, размер которых находится в интервале 0.25–10 мм. Обра-

ботка конструктозема поликомплексом стимулирует рост и развитие растений; эти эффекты сравнимы с таковыми для ЛГ, сертифицированного стимулятора роста растений. Данный результат означает, что ЛГ в составе поликомплеса сохраняет свои свойства как биостимулятор. Исходный конструктозем отличается высокой водостойкостью (78%), которая немного возрастает после его обработки ИПЭК+. Результаты работы могут быть использованы для создания стабильных и продуктивных искусственных грунтов.

Работа выполнена при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”. Почвенные анализы выполнены по Госзаданию № 121040800154-8.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mamedov A.I., Tsunekawa A., Haregeweyn N., Tsubo M., Fujimaki H., Kawai T., Levy G.J. // Sustainability. 2021. V. 13. № 3. P. 1407.
2. Pourakbar S., Huat B.K. // Int. J. Geotechn. Eng. 2017. V. 11. № 2. P. 206.
3. Tian X., Fan H., Wang J., Ippolito J., Li Y., Feng S., An M., Zhang F., Wang K. // Geoderma. 2019. V. 340. P. 94.
4. Behera S., Mahanwar P.A. // Polymer-Plastics Technol. Mater. 2020. V. 59. № 4. P. 341.
5. Rodriguez A.K., Ayyavu C., Iyengar S.R., Bazzi H.S., Masad E., Little D., Hanley H.J. // Int. J. Pavement Eng. 2018. V. 19. № 6. P. 467.
6. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Nikolaeva E.I. // Eurasian Soil Sci. 2014. V. 47. № 2. P. 78.
7. Curcio M., Picci N. // Am. J. Agric. Biol. Sci. 2008. V. 3. № 1. P. 299.
8. Хабиров И.К., Сайфуллин Р.Р. // Изв. Оренбургского гос. аграрного ун-та. 2018. Т. 6. С. 74.
9. Sojka R.E., Bjorneberg D.L., Entry J.A., Lentz R.D., Orts W.J. // Adv. Agronomy. 2007. V. 92. P. 75.

10. *Guilherme M.R., Aouada F.A., Fajardo A.R., Martins A.F., Paulino A.T., Davi M.F., Muniz E.C.* // Eur. Polym. J. 2015. V. 72. P. 365.
11. *Xiong B., Loss R.D., Shields D., Pawlik T., Hochreiter R., Zydney A.L., Kumar M.* // NPJ Clean. Water. 2018. V. 1. № 1. P. 1.
12. *Peng C., Zheng J., Huang S., Li S., Li D., Cheng M., Liu Y.* // J. Appl. Phycol. 2017. V. 29. № 3. P. 1421.
13. *Aguilar R., Nakamatsu J., Ramírez E., Elgegren M., Ayarza J., Kim S., Pando M.A., Ortega-San-Martin L.* // Constr. Build. Mater. 2016. V. 114. P. 625.
14. *Zejin A.B., Mikheikin S.V., Rogacheva V.B., Zansokhova M.F., Sybachin A.V., Yaroslavov A.A.* // Adv. Colloid Interface Sci. 2015. V. 226. P. 17.
15. *Измуродов В.А., Мусабеева Б.Х., Касымова Ж.С., Кливенко А.Н., Оразжанова Л.К.* // Успехи химии. 2019. Т. 88. № 10. С. 1046.
16. *Shulga G., Betkers T., Brovkina J., Neiberte B., Verovkins A., Belous O., Žukauskaite A.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2008. V. 486. № 1. P. 291.
17. *Orazzhanova L.K., Kassymova Z.S., Mussabayeva B.K., Klivenko A.N.* // Eurasian Soil Sci. 2020. V. 53. № 12. P. 1773.
18. *Klivenko A., Orazzhanova L., Mussabayeva B., Yelemessova G., Kassymov Z.* // Polym. Adv. Technol. 2020. T. 31. № 12. P. 3292.
19. *Panova I., Drobyazko A., Spiridonov V., Sybachin A., Kydraliev K., Jorobekova S., Yaroslavov A.* // Land Degrad. Development. 2019. V. 30. P. 337.
20. *Volikov A.B., Kholodov V.A., Kulikova N.A., Philippova O.I., Ponomarenko S.A., Lasareva E.V., Perminova I.V.* // Catena. 2016. V. 137. P. 229.
21. *Volikov A.B., Ponomarenko S.A., Gutsche A., Nirschl H., Hatfield K., Perminova I.V.* // RSC Adv. 2016. T. 6. № 53. P. 48222.
22. *Yakimenko O.S., Terekhova V.A.* // Eurasian Soil Sci. 2011. V. 44. P. 1222
23. *Olk D.C., Dinnes D.L., Scoresby J.R., Callaway C.R., Darlington J.W.* // J. Soils Sediments. 2018. V. 18. № 8. P. 2881.
24. *Panova I.G., Demidov V.V., Shulga P.S., Ilyasov L.O., Butilkina M.A., Yaroslavov A.A.* // Land Degrad. Development. 2021. V. 32. № 2. P. 1022.
25. *Panova I.G., Khaydarova D.D., Ilyasov L.O., Umarova A.B., Yaroslavov A.A.* // Colloids Surf. A. 2020. V. 590. P. 124504.
26. *Kassymova Z.S., Orazzhanova L.K., Klivenko A.N., Mussabayeva B.K., Aserzhanov D.K.* // Russ. J. Appl. Chem. 2019. V. 92. № 2. P. 208.
27. *Umarova A.B., Suslenkova M.M., Butylkina M.A., Salimgareeva O.A., Kokoreva A.A., Ezhelev Z.S., Gasina A.I.* // Eurasian Soil Sci. 2019. V. 52. № 11. P. 1369.
28. *Suslenkova M.M., Umarova A.B., Butylkina M.A.* // Eurasian Soil Sci. 2018. V. 51. № 10. P. 1220.
29. *Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Vasenev V.I., Smagina M.V.* // Materials. 2018. V. 11. № 10. P. 1889.
30. *Lee S.H., Shin M.C., Choi S.J., Shin J.H., Park L.S.* // Environment. Technol. 1998. V. 19. № 4. P. 431.
31. *Ertani A., Francioso O., Tugnoli V., Righi V., Nardi S.* // J. Agricultural Food Chem. 2011. V. 59. P. 11940.
32. *Pozdnyakov L.A., Stepanov A.L., Gasanov M.E., Semenov M.V., Yakimenko O.S., Suada I.K., Rai I.N., Shchegolkova N.M.* // Eurasian Soil Sci. 2020. № 53. P. 653.
33. *Suada K., Rai N., Budiasa W., Santosa G.N., Sunarta N., Adnyana G.M., Yakimenko O.* // Voda: Khim. Ekol. 2017. V. 5. P. 3.
34. *Пукальчик М.А., Терехова В.А., Якименко О.С., Акулова М.И.* // Теорет. и прикл. экология. 2016. № 2. P. 79.
35. *Yudina A.V., Fomin D.S., Kotelnikova A.D., Milanovskii E.Y.* // Eurasian Soil Sci. 2018. V. 51. № 11. P. 1326.
36. Теории и методы физики почв / Под ред. Е.В.Шейна, Л.О. Карпачевского. М.: Гриф и К, 2007. С. 616.
37. ГОСТ Р ИСО 22030-2009 Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений (ISO 22030-2005. Soil quality. Biological methods. Chronic phytotoxicity for higher plants).
38. *Кабанов В.А.* // Успехи химии. 2005. Т. 74. № 1. P. 5.
39. *Zejin A.B., Rogacheva V.B., Kabanov V.A.* // Macromolec. Symp. 1997. V. 126. P. 123.
40. *Samal S.K., Dash M., Vlierberghe S.V., Kaplan D.L., Chiellini E.* // Chem. Soc. Revs. 2012. V. 41. P. 7147.
41. *Cloutier M., Mantovani D., Rosei F.* // Trends Biotechnol. 2015. V. 33. № 11. P. 637.
42. *Xue Y., Xiao H.* // Int. J. Molec. Sci. 2015. V. 16. P. 3626.
43. *Shandil Y., Chauhan G.S., Hyeon J., Sharma R.K.* // Anti-Infective Agents. 2015. V. 13. P. 78.