

## ИНТЕРПОЛИМЕРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И ПРОБЛЕМА ЗАХОРОНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ (обзор)\*

© А. А. Ярославов<sup>1</sup>, И. Г. Панова<sup>1</sup>, М. С. Аржаков<sup>1,\*</sup>, А. Р. Хохлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Химический факультет, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 3

<sup>2</sup> Институт элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова РАН, 119334, г. Москва, ул. Вавилова, д. 28

\* E-mail: msa60@yandex.ru

Поступила в Редакцию 11 мая 2022 г.

После доработки 13 мая 2022 г.

Принята к публикации 18 мая 2022 г.

*Рассмотрены вопросы утилизации вышедшего из употребления пластика. Основное внимание уделено захоронению полимерного мусора на полигонах твердых коммунальных отходов. Отмечено, что жизненный цикл полигона завершается его рекультивацией, направленной на восстановление ландшафта нарушенных земель, в ходе которой на поверхности полигона формируется плодородный почвенный слой и высеваются растения. Для контроля ветровой и водной эрозии, приводящей к разрушению защитного слоя, предложены полимерные структурообразователи почвы, среди которых выделены интерполимерные комплексы — продукты взаимодействия противоположно заряженных ионогенных полимеров. Указано, что данная технология позволяет подстраивать пространственную структуру (морфологию) и гидрофильно-гидрофобный баланс поликомплексов под состав и свойства стабилизируемой почвы. Отмечено, что низкая токсичность поликомплексов по отношению к высшим растениям обуславливает перспективы их применения в качестве связующих почв и грунтов в противозерозионных технологиях при рекультивации полигонов твердых коммунальных отходов, а также для улучшения структуры искусственно сконструированных грунтов (конструктоземов).*

Ключевые слова: *пластики; утилизация; мусорные полигоны; рекультивация, интерполимерные комплексы*

DOI: 10.31857/S0044461822040028, EDN: DGMQYW

### Введение

В своей повседневной деятельности современное человечество широко использует обширный ассортимент полимерных материалов и изделий, полученных, в том числе, из синтетических термопластичных полимеров — термопластов, или пластиков [1, 2]. Данные полимерные материалы переходят в жидко-

подобное, текучее состояние при повышении температуры и принимают практически любую форму, которая фиксируется при последующем охлаждении. Это позволяет использовать пластики для получения широкого спектра разнообразных продуктов: от простейших вариантов упаковки до сложно организованных конструкций для нужд машиностроения, электроники, медицины и т. д. [3]. В настоящее время

\* Научное редактирование проведено научным редактором журнала «Нефтехимия» к.х.н. Н. В. Шелеминой.

термин «пластики» часто толкуется расширительно и применяется ко всем полимерным изделиям, сохраняющим форму в привычной для человека среде обитания [4].

Появление пластика позволило заметно расширить ассортимент выпускаемой продукции, удешевить производство многих товаров, уменьшить вес строительных конструкций с сохранением прочностных характеристик, предложить новые виды упаковочных материалов для пищевой промышленности. Во второй половине XX столетия пластик стал символом технического прогресса и доступности современных товаров большинству населения. Однако со временем начали накапливаться отрицательные последствия чрезмерного увлечения синтетическими полимерами. Главной проблемой стала долговечность полимерных материалов и изделий [3, 5].

Между тем полимеры, как и любой другой продукт, должны быть вовлечены в эволюционный круговорот, предполагающий естественное уничтожение произведенных материалов и изделий после того, как они отслужили свой век и были выведены из эксплуатации. Это требование выполняется применительно к традиционным материалам — от хлопчатобумажной ткани, бумаги и картона со средним временем жизни 0,2–1 год до шерсти и кожи (5–40 лет) [6, 7]. Для ликвидации полимерных материалов и изделий требуется значительно большее время — 100–200 лет для разложения полимерной пленки и до 1000 лет для разложения пластиковой бутылки [7, 8].

Неуклонный рост объемов полимерного мусора превратился в глобальную проблему современного общества, решение которой возможно в рамках комплексного подхода к рациональной утилизации вышедшего из употребления пластика.

Цель работы — анализ современных и перспективных методов утилизации и уничтожения отходов индустрии пластиков. Особое внимание уделено наиболее актуальному для РФ аспекту проблемы, связанному с захоронением полимерного мусора, и сопутствующим задачам рекультивации мусорных полигонов с использованием синтетических структурообразователей почвы на основе полиэлектролитных комплексов.

### Методы утилизации пластика

По своему происхождению полимерные отходы можно разделить на три категории (рис. 1).

Первая из них связана с технологическими отходами, которые неизбежно возникают при производстве полимерных материалов и их переработке [9]. К ним относят крошки, обрезки, обломки и пр., представляющие собой высококачественное вторичное сырье. Его переработка в изделия не требует специального оборудования и часто происходит на том же предприятии.

Ко второй категории относятся отходы производственного потребления, накапливающиеся в результате выхода из строя полимерных материалов и из-



Рис. 1. Получение, использование и утилизация полимерных материалов и изделий.

делий, изначально не рассчитанных на длительное использование, — тара и упаковка, сельскохозяйственная пленка, мешки из-под удобрений и т. п. Эти отходы практически однородны по своему составу, мало загрязнены и потому представляют очевидный интерес для повторной переработки.

Наибольшее беспокойство вызывает судьба «ненужных полимеров», входящих в категорию отходов общественного потребления [10]. Последние образуются в домохозяйствах, офисах, торговых и мелких промышленных предприятиях, школах, больницах, других муниципальных учреждениях. Для этих отходов часто используется собирательный термин «твердые коммунальные отходы» (ТКО). В 2016 г. во всех странах было накоплено 2.01 млрд т ТКО. В 2050 г. этот показатель будет равен 3.40 млрд т.

Каждый год количество пластиковых отходов увеличивается на 300 млн т, что составляет около 10% ежегодно производимых ТКО и 1% ежегодного валового поступления всех видов отходов (строительного, производственного, сельскохозяйственного, бытового, медицинского и проч.) [10].

В настоящее время рассматривают три основных способа утилизации полимерных отходов (рис. 1).

Первый из них включает «вторичную переработку» (рециклинг) вышедшего из употребления пластика [11]. В идеале этот путь позволяет многократно использовать полимерные продукты, получая из пластиковых отходов новые материалы и изделия с воспроизводимыми свойствами. Однако реальность выглядит не столь оптимистично. В каждом цикле переработки происходит частичная потеря потребительских свойств материала; предельное количество циклов переработки редко превышает 4–5 и зависит от многих факторов (типа полимера, дополнительных включений, загрязненности материала в ходе эксплуатации и проч.). Примерно треть производимого пластика получена из смесей различных полимеров, что делает его переработку экономически неэффективной [12].

Второй способ утилизации связан со сжиганием пластиковых отходов на мусоросжигательных заводах (МСЗ), снабженных эффективными системами дожигания и очистки газов [13]. Современные МСЗ позволяют не только уничтожать пластиковые отходы, но и использовать полученное тепло для получения электроэнергии и горячей воды.

Третий подход к решению проблемы основан на захоронении полимерных отходов на оборудованных городских свалках (мусорных полигонах) [14]. Этот опыт имеет почти столетнюю историю. Первая современная мусорная свалка с применением специальных

инженерных сооружений открылась в Калифорнии (США) в 1937 г. Захоронение — самый простой способ избавиться от полимерного мусора, но и одновременно наименее привлекательный с точки зрения отдаленных последствий. Дело в том, что перед захоронением на городской свалке полимерные отходы смешиваются с мусором другого происхождения и превращаются в смешанные отходы, переработка которых сильно затруднена из-за разнородности различных компонентов. Поэтому смешанные отходы чаще всего остаются на свалке, где происходит их постепенное разложение под воздействием естественных причин (температуры, кислорода, влаги, почвенных микроорганизмов и проч.). При разложении смешанных ТКО происходит образование так называемого свалочного газа (биогаза), главными компонентами которого являются метан и диоксид углерода.

Стоит отметить, что судьба смешанных отходов не описывается лишь их отправкой на мусорные полигоны. В различных странах освоены различные способы разделения смешанных ТКО на отдельные компоненты [15, 16], такие как черный металл (с помощью электромагнитной сепарации), цветной металл (в переменном «бегущем» магнитном поле), бумагу (путем пневматического разделения фракций по скорости витания в потоке воздуха), текстиль (при сепарации за счет сохранения прочности при смачивании и перетирации), синтетическую пленку (по скорости витания в потоке воздуха, при сепарации за счет сохранения прочности при смачивании и перетирации и электростатической сепарации), стекло (путем «мокрой» сепарации в циклонах), пластмассу и картон (через оптическое отделение бутылок и коробок). Разделение ТКО на отдельные компоненты позволяет не только выделить полезные компоненты из поступившего мусора, но и повысить качество материала, поступающего на полигоны.

Мировое сообщество дает неоднозначную оценку практике захоронения мусора на полигонах. С одной стороны, у захоронения есть существенные преимущества перед другими способами обращения с мусором. Этот подход технически проще и дешевле строительства перерабатывающего завода, не требует постоянного обслуживания, сокращает время на обращение с отходами, обеспечивает защиту отработанных материалов и препятствует распространению эпидемий. С другой — мусорные полигоны занимают слишком большую территорию, распространяют неприятные запахи. Выделяющийся метан усиливает парниковый эффект и способен к возгоранию. Грунтовые воды могут вымывать с полигонов токсичные вещества, загрязняя окружающую среду.

Эти же вещества вместе с патогенными микроорганизмами могут переноситься на большие расстояния птицами. Восстановление территории полигона после окончания его работы (рекультивация полигона) требует значительных финансовых и материальных затрат.

В Евросоюзе за десять лет (2004–2014 гг.) объемы ежегодно производимых ТКО остались практически без изменения и составляют 203–205 млн т [17]; при этом прогрессивно увеличивается доля перерабатываемого и сжигаемого мусора [18]. В России ежегодный прирост объемов производимого мусора составляет ~30% [19]. Выделяемые под захоронение мусора территории самое позднее через 20–25 лет потребуют рекультивации. При этом остаются старые полигоны (именуемые ранее санкционированными свалками), многие из которых были построены без ясного представления о технологии их создания и возможном экологическом вреде от таких сооружений. Эти полигоны будут выводиться из эксплуатации в ближайшие годы, и проблема их рекультивации требует незамедлительного решения.

С учетом того, что в России отсутствует развитая система переработки мусора, главным направлением работы с отходами остается их захоронение. Ежегодно в России образуется 60–70 млн т ТКО [20]. Из этого количества доля пластиковых отходов доходит до 25% [21]. В целом по России на полигонах захоранивают 90–92% городских ТКО. В городах с наиболее развитой системой управления, например в Москве, доля отходов, утилизируемых альтернативными методами, составляет не более 40% отходов [22]. Для сравнения во Франции и США этот показатель превышает 50%. По данным Счетной палаты РФ [23] в России в 2019 г. зарегистрировано 2832 санкционированных места размещения отходов. Кроме того, в России существуют и «стихийные» свалки; в 2019 г. было обнаружено более 30 тыс. таких объектов. Несанкционированные свалки являются источником токсичных веществ в значительно большей степени, чем специально оборудованные полигоны, по причине некачественной подготовки территории под такую свалку или вовсе отсутствия какой бы то ни было подготовки. Эти свалки не оборудованы гидроизолирующими экранами. Состав отходов на них практически не контролируется, а эксплуатируют их с нарушением санитарно-эпидемиологических правил, что ведет к долгосрочным экологическим проблемам. Удаление несанкционированных свалок и последующее проведение восстановительных работ требует значительных дополнительных затрат [24, 25].

### Жизненный цикл полигона твердых коммунальных отходов

В последние годы в развитых странах произошли серьезные изменения в оценке перспектив использования различных способов обращения с ТКО. Если в 2000 г. в большинстве стран Европы отходы в основном утилизировались путем захоронения на полигонах, то через 15 лет лидерами стали рециклинг и сжигание. В некоторых странах, например Швейцарии и Швеции, доля сожженного мусора превысила 55%, а доля поступившего на полигоны упала до нескольких процентов [10]. Однако тема захоронения отходов даже в этих странах окончательно не закрыта, поскольку функционируют старые полигоны, которые через непродолжительное время должны быть рекультивированы, и остаются материалы, для которых захоронение — пока единственный способ утилизации.

Жизненный цикл мусорного полигона можно описать следующим образом [26]. На первом этапе происходит заполнение площади полигона коммунальными отходами. Объем привезенного мусора постоянно возрастает, высота свалки увеличивается и к концу функционирования полигона может достигать до 50–60 м. На этом этапе полигон работает как «биореактор»; его активность приводит к образованию свалочного газа и сточных вод, в том числе высокотоксичного фильтрата — неоднородной по составу жидкости с высокой концентрацией тяжелых металлов, аммиака, аммонийных солей и органических соединений [27]. Свалочный газ содержит незначительные количества чрезвычайно токсичного сероводорода, который является источником неприятного запаха, распространяемого свалкой [28]. Для ускорения процессов разложения проводят увлажнение и аэрацию свалочного грунта, рециркуляцию фильтрата поверхностных сточных вод, в свалочный грунт добавляют ферменты, микроорганизмы, дополнительные питательные вещества. После соответствующей обработки свалочный газ, удаляемый из тела полигона с помощью дренажных труб, может быть использован для получения электроэнергии [29].

Средняя продолжительность первого этапа составляет 20–25 лет. После этого полигон закрывается и начинается второй этап, который продолжается до затухания биохимических процессов в объеме захороненного мусора (теле полигона), на что может потребоваться еще 20–30 лет. На этом этапе требуется рекультивация полигона, цель которой — ликвидация негативного воздействия полигона на окружающую среду, восстановление продуктивности и культур-

но-хозяйственной ценности деградированной территории, а также улучшение окружающей среды.

Рекультивация полигона коммунальных отходов представляет собой длительный и многоступенчатый процесс [30–32]. Сначала на закрытом для приема отходов полигоне выполняются подготовительные технические работы, включающие планировку, создание многослойного барьерного покрытия, отвечающего геотехническим возможностям и климату рекультивируемой территории, формирование откосов и проч. Завершающий — биологический — этап рекультивации включает комплекс агротехнических и фитомелиоративных мероприятий, направленных на восстановление ландшафта нарушенных земель. На подготовленной площадке формируется плодородный почвенный слой и высеваются растения, что позволяет возобновить природное развитие территории.

Нужно, однако, понимать, что полного восстановления продуктивности и хозяйственной ценности территории закрытого полигона добиться невозможно. Речь может идти лишь о частичном восстановлении почв, что и определяет будущие направления использования таких территорий (рис. 2). Для закрытых полигонов наиболее приемлемо сельскохозяйственное направление рекультивации, предполагающее создание на восстановленных землях пахотных, сенокосных и пастбищных угодий, лесохозяйственное — с выращиванием лесных культур мелиоративного, противоэрозионного, полезащитного, ландшафт-

но-озеленительного назначения и рекреационное, включающее строительство стадионов, спортивных площадок, лыжных горок и проч. Кроме того, предложено использовать восстановленные территории для организации парковых зон и гольф-полей, строительства автостоянок и легких складских комплексов, установки солнечных батарей.

Один из самых известных примеров рекультивации мусорной свалки в зеленую парковую зону — остров Статен-Айленд в Нью-Йорке. До 2001 г. здесь располагалась крупнейшая мировая свалка Фреш-киллс (Fresh Kills Landfill) площадью около 9 км<sup>2</sup> [33]. Территория до сих пор проходит процесс рекультивации, хотя с момента закрытия полигона прошло почти два десятка лет. Полное открытие парка планируется в 2030-х годах.

Принимая во внимание тот факт, что площадь одного мусорного полигона может превышать 100 га, которые надолго выйдут из хозяйственного оборота и требуют длительного периода восстановления, логичным выглядит предложение использовать рекультивированные территории закрытых полигонов для повторного складирования отходов, превращая их в постоянные места захоронения ТКО. Этот путь, возможно, позволит решить или смягчить проблему отведения новых территорий под полигоны ТКО.

В ходе проведения биологического этапа рекультивации верхний слой почвы (или искусственного почвогрунта) засевают многолетними травами (в том



Рис. 2. Варианты использования рекультивированного мусорного полигона.

числе травами-мелиорантами, способными извлекать из почвы тяжелые металлы) и (или) высаживают на нем кусты и деревья. Зеленые насаждения позволяют минимизировать риски развития ветровой и водной эрозии почвы [ее разрушения под действием ветра и (или) воды] и возникновения оползней почвы. Однако совсем исключить эти процессы невозможно. При значительной крутизне склонов рекультивированного полигона ( $45^\circ$  и более) возможны размывы почвы, оползни и обвалы, при этом происходит перемещение больших объемов грунта, образование крутых обрывов, раскрытие слоев отходов, разрушение инфраструктуры (подъездных дорог, зданий, заборов и др.). Обзор аварий на свалках показывает, что именно эрозия часто инициирует разрушение защитного экрана и выброс газов и токсичных инфильтратов в окружающую среду [34–38].

Корневая система растений в целом хорошо справляется с формированием защитного слоя на поверхности почвы, блокирующего развитие эрозионных процессов. В качестве растений «первой линии обороны» обычно рассматриваются быстрорастущие многолетние травы, корни которых равномерно пронизывают и скрепляют частицы верхнего слоя почвы и образуют упругое дерновое покрытие, стойкое к механическим повреждениям. Однако формирование корневого слоя требует времени, в течение которого дожди и ветер могут повредить рекультивационное покрытие и лишить его защитной противоэрозионной функции. Необходимо учитывать, что в период прорастания семян и формирования корневой системы растений барьерные характеристики покрытия будут определяться только его собственной противоэрозионной стойкостью [39–42]. Кроме того, эрозия не позволяет траве и кустарникам закрепиться на поверхности полигона и сформировать прочный дерновый слой.

Еще одной серьезной проблемой является дефицит почвенных ресурсов для создания оптимальных плодородных почвенных покрытий. Как правило, для формирования рекультивационного слоя полигонов используют местные почвы, при этом для рекультивации 1 га полигона требуется до 10 тыс. м<sup>3</sup> почвы, что соответствует нарушению 5 га природных плодородных земель [43]. С целью экономии природных ресурсов и ускорения биологических процессов при проведении рекультивационных работ почву заменяют искусственными почвогрунтами — конструкторскими [44] на основе недорогих почвообразующих минералов, песка и глины [45, 46], золошлаковых отложений [47–49], органогенных субстратов из отходов производства, ила, торфа, осадков сточных вод [50–53]. Однако деградация структурного состояния

конструкторских развивается еще интенсивнее, чем в почвах ненарушенного сложения [54–58]. Таким образом, сохранение верхнего почвенного экрана за счет повышения его противоэрозионной стойкости становится одной из главных задач, которую нужно решить в ходе рекультивации мусорного полигона.

### **Полимеры и поликомплексы для борьбы с эрозией почвы**

Разработка способов борьбы с эрозией представляет интерес не только для грамотной рекультивации мусорных полигонов. Эта проблема затрагивает более широкий круг вопросов, в первую очередь речь идет о создании эффективных методов борьбы с деградацией сельскохозяйственных земель [59, 60]. В последнее время роль эрозионных факторов в истощении почв и опустынивании заметно возросла вследствие изменения глобальных климатических условий и неосмотрительной хозяйственной деятельности человека: нарушения правил агротехники, избыточного выпаса скота, вырубki лесов и др. [61–63].

В геоэкологии и агрохозяйственном комплексе предложены самые различные способы стабилизации почвы, включающие искусственное лесонасаждение, защиту зеленых оазисов, покрытие почвы циновками, сетками и георешетками, устройство плотин и запруд в оврагах. Эти методы требуют длительного времени, большого объема земляных работ и затратны с экономической точки зрения. Достаточно быстро справиться с указанной проблемой можно, применяя химические стабилизаторы почвы (мелиоранты), среди которых наибольшее распространение получили полимеры.

Используются как синтетические, так и природные полимеры, которые выгодно отличаются от других стабилизаторов удачным набором технико-экономических показателей: доступностью, растворимостью в воде, химической устойчивостью и приемлемой ценой [64]. Первыми в качестве стабилизаторов почвы были использованы полисахариды — производные целлюлозы и соли альгиновой кислоты, которые смешивали с почвой и распределяли на глубину до 30 см [65, 66]. Стабилизирующий эффект достигался при норме расхода несколько тонн полимера на гектар; в дополнение к этому такие полимеры быстро деградировали при внесении в почву и переставали работать как стабилизаторы. Замена природных полимеров на синтетические, например гидролизированный полиакрилонитрил (ГИПАН), позволила снять вопрос с деструкцией полимеров, но не привела к уменьшению расхода полимера [67].

Следующим шагом было использование новой технологии стабилизации почвы, когда водный раствор полимера стали наносить поверх обрабатываемой площади [68, 69]. Это привело к резкому сокращению расхода полимерной рецептуры, которая теперь формировала на поверхности механически прочное противозрозионное полимерно-почвенное покрытие, представляющее собой продукт взаимодействия полимера с частицами почвы. В качестве полимерного компонента был использован полиакриламид (ПАМ) [70, 71]. Этот полимер быстро занял место самого распространенного стабилизатора почвы. Однако со временем появились данные о токсичности акриламида — мономера для получения ПАМ. Незаполимеризованный остаточный акриламид делал токсичными водные рецептуры на основе ПАМ, а их регулярное использование повышало содержание мономера в почве и сточных водах. Это заставило обратиться к поиску и тестированию новых полимеров для получения противозрозионных рецептур, отвечающих современным требованиям.

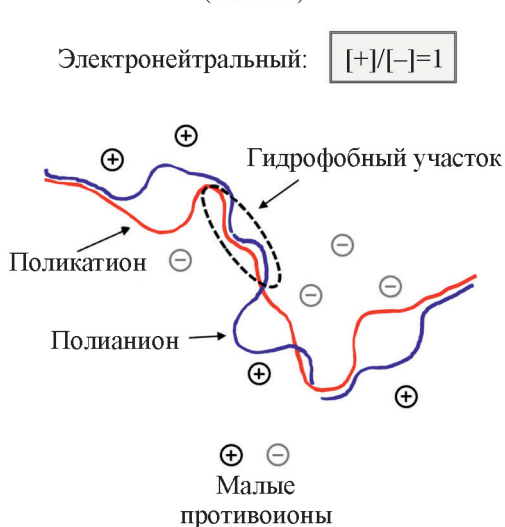
Улучшение физико-химических и операционных свойств полимеров обычно реализуется через их химическую модификацию. Другой путь — нековалентное связывание полимеров в комплексы, стабилизированные множественными электростатическими, водородными или координационными связями [72]. Такие комплексы могут быть получены взаимодействием линейных полимеров с комплементарными линейными полимерами, полимерными микрогелями

[73, 74], мицеллами поверхностно-активных веществ [75, 76], сферическими бислойнными везикулами [77, 78], металлическими и оксидными частицами [79], а также другими нано- и микроразмерными объектами. Наиболее широко исследованы интерполимерные комплексы (ИПК), образованные противоположно заряженными ионными полимерами (полиэлектролитами, ПЭ) линейного строения.

В зависимости от заряд-зарядового соотношения обоих ПЭ могут быть получены как нерастворимые в воде стехиометричные поликомплексы (СИПК), так и нестехиометричные поликомплексы (НИПК) с избыточным положительным либо отрицательным зарядом, которые растворимы в воде и водно-солевых растворах (рис. 3). Фактически поликомплексы представляют собой блок-сополимеры, содержащие протяженные гидрофильные и гидрофобные блоки. Первые представлены разобщенными участками противоположно заряженных полимерных цепей, вторые — двутяжевыми последовательностями, сформированными катионными и анионными звеньями обоих полимеров. Обычный способ получения ИПК состоит в дозированном смешивании водных растворов катионного и анионного полимеров, что позволяет направленно изменять суммарный заряд ИПК и, следовательно, их гидрофильно-гидрофобный баланс и растворимость в водных средах [80].

Амфифильная природа ИПК делает их эффективными связующими различных сыпучих тел, включая почвы и грунты [81–85]. На поверхности почвенных

#### СТЕХИОМЕТРИЧНЫЙ ПОЛИКОМПЛЕКС (СИПЭК)



#### НЕСТЕХИОМЕТРИЧНЫЙ ПОЛИКОМПЛЕКС (НИПЭК)

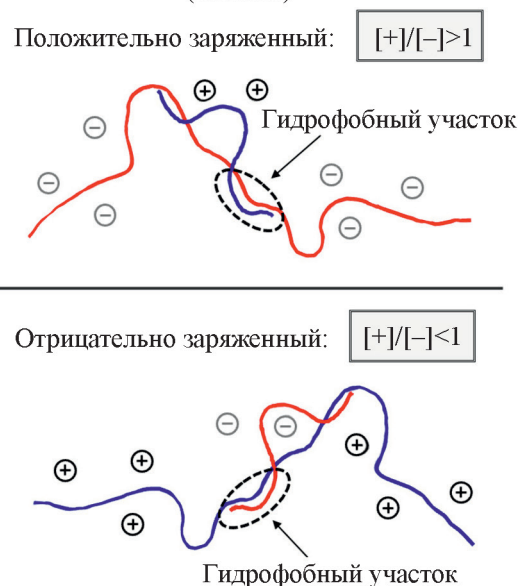


Рис. 3. Схематическое изображение строения стехиометричного и нестехиометричного поликомплексов.

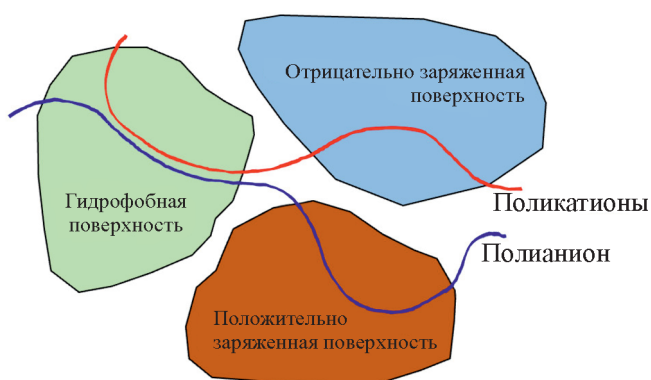


Рис. 4. Схематическое изображение связывания ИПК с частицами почвы.

частиц присутствуют области различной аффинности. Блоки ИПК, несущие нескомпенсированные заряды, связываются с противоположно заряженными областями на поверхности частиц и склеивают их; гидрофобные блоки вызывают тот же эффект, но только в отношении гидрофобных участков почвенных частиц (рис. 4). Варьирование состава ИПК дает возможность подстраивать его структуру под тип обрабатываемой почвы/грунта и контролировать механическую прочность и противоэрозионную стойкость получаемых защитных покрытий.

Стехиометричные ИПК нерастворимы в воде. Для их нанесения на поверхность почвы были разработаны два подхода. Согласно первому (рис. 5, а), на обрабатываемую поверхность последовательно наносят

водные растворы обоих полимеров в эквимольном соотношении катионных и анионных групп, причем порядок нанесения — вначале катионный полимер, потом анионный или наоборот — не имеет значения и не сказывается на конечном результате [81]. ИПК образуется при контакте второго раствора с почвой, пропитанной первым раствором. При втором способе нанесения (рис. 5, б) используют рецептуру, представляющую собой водно-солевой раствор обоих полимеров. В таком растворе взаимодействие полимеров полностью блокировано благодаря экранирующему действию малых ионов добавленной соли, образующихся при диссоциации низкомолекулярных электролитов. После нанесения полученного гомогенного раствора на почву и последующего вымывания соли атмосферными осадками и (или) в ходе искусственного орошения формируется сИПК.

Нестехиометричные ИПК получают смешиванием растворов катионного и анионного полимеров в мольном соотношении, которое обеспечивает растворимость полученного продукта. В зависимости от химической природы используемых полимеров мольная доля второго компонента обычно находится в пределах от 10 до 50% [84–86]. В некоторых случаях удастся повысить мольную долю второго компонента почти до 100%, при этом система сохраняет растворимость или формирует тонкую (агрегативно стабильную) дисперсию [87].

Каждый из типов ИПК имеет свои достоинства и недостатки. Нанесение сИПК требует двукратного

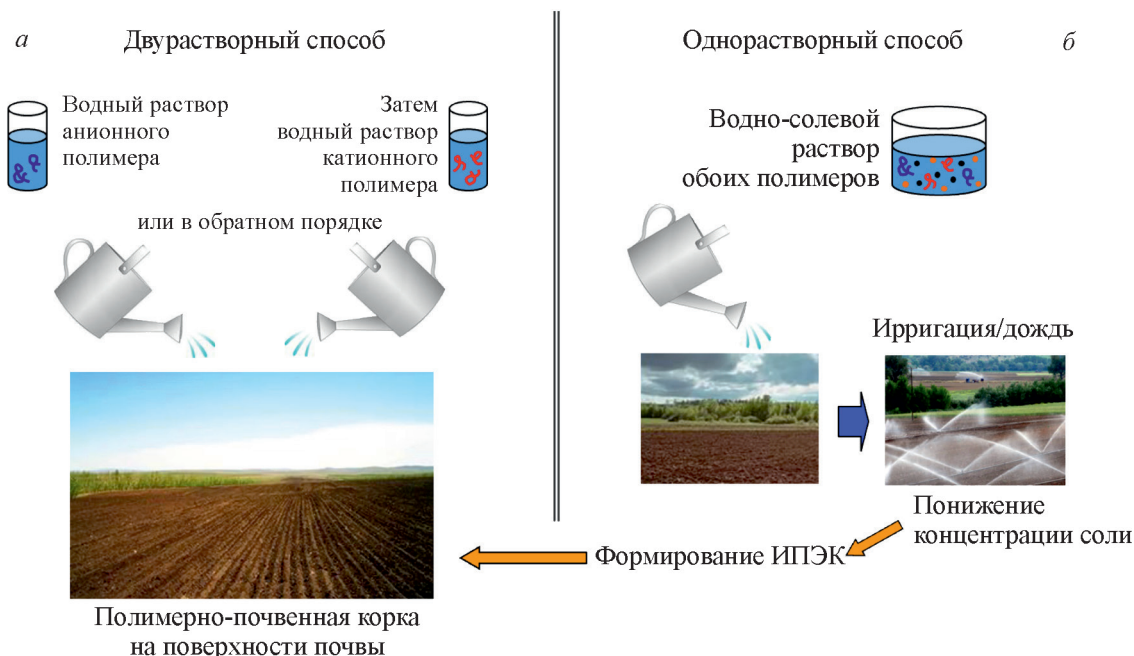


Рис. 5. Способы нанесения стехиометричного ИПК на поверхность почвы (схематическое изображение).



полива (при двуростворной технологии) или сопровождается заметным засолением почвы (при односторонней технологии). Однако эти способы нанесения технически самые простые и могут быть выполнены неквалифицированным обслуживающим персоналом. Для получения растворов из ИПК необходима предварительная подготовка персонала и периодический контроль за состоянием полученных рецептур. При этом использование ИПК позволяет ограничиться однократным поливом территории и не приводит к ее засолению. Главное достоинство ИПК технологии заключается в том, что она позволяет подстраивать пространственную структуру (морфологию) и гидрофильно-гидрофобный баланс поликомплексов под состав и свойства стабилизируемой почвы, что делает адресным использование ИПК в противоэрозионных технологиях.

Для получения поликомплексных рецептур можно использовать коммерчески доступные ПЭ, например анионные ГИПАН и карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ) и катионные полидиаллилдиметиламмоний хлорид (ПДАДМАХ) и хитозан (рис. 6). Одними из наиболее перспективных композиций являются поликомплексы, сформированные анионными гуминовыми препаратами (рис. 6) [88, 89]. Интерес к таким рецептурам связан с тем, что структура гуматов сходна с таковой у почвенного органического вещества. Кроме того, гуматы широко применяются в агрохимии в качестве удобрения для истощенных почв и конструкторземов [90].

Наиболее часто используемые рецептуры представляют собой 1–2 мас%-ные водные растворы полимеров или смесей двух полимеров с нормой расхода 1–2 л·м<sup>-2</sup> [81, 91], что суммарно составляет от 100 до 400 кг полимера на 1 га. Высыхание почвы, обработанной поликомплексными рецептурами, приводит к образованию защитных покрытий, состоящих из полимеров и почвенных частиц. Такие покрытия обладают достаточной механической прочностью. Они не разрушаются при действии ветра со скоростью 70 км·ч<sup>-1</sup> и водных потоков со скоростью 0.3 м·с<sup>-1</sup> [64].

Электронная микроскопия полученных почвенно-полимерных корок показала, что полимеры покрывают частицы почвы и связывают их в крупные агрегаты только в местах контактов частиц (рис. 7). Это приводит к получению прочных композиционных покрытий с хорошо развитым поровым пространством [64, 87]. Последнее обеспечивает хорошую влаго- и воздухопроницаемость покрытий, что имеет принципиальное значение для прорастания и развития сельскохозяйственных культур. В дополнение к этому поликомплексные рецептуры заметно улучшают качество земель сельскохозяйственного назначения, способствуя укрупнению почвенных частиц и увеличению доли агрономически ценных агрегатов размером более 0.25 мм [88].

Важный вопрос касается токсичности поликомплексных рецептур по отношению к растениям, ко-

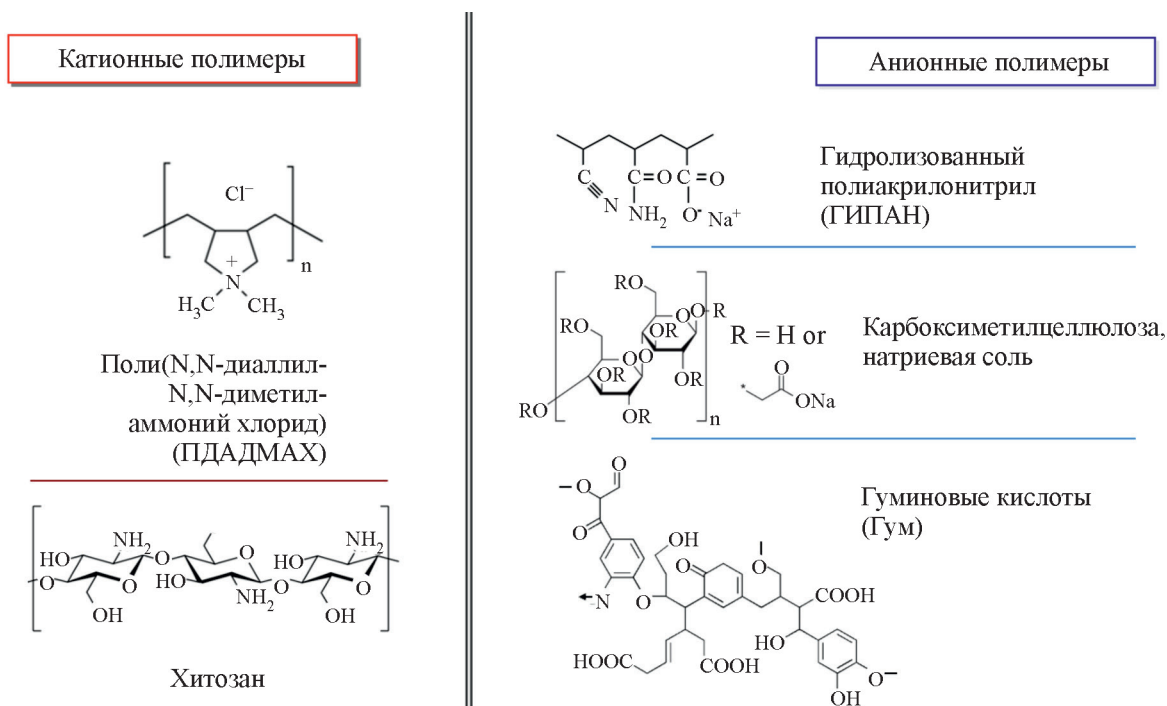


Рис. 6. Примеры полиэлектролитов для получения ИПК.

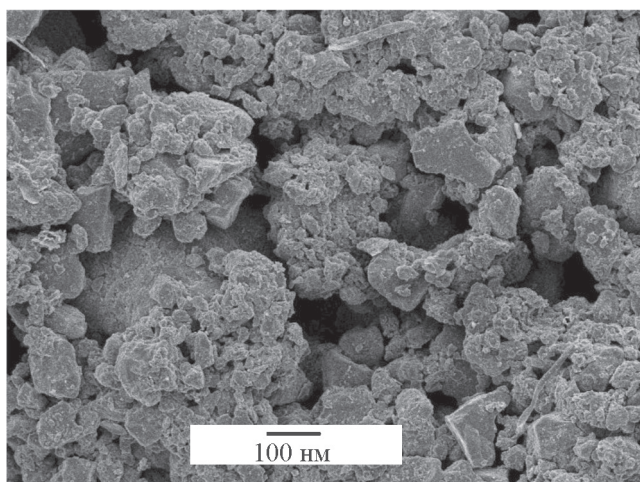


Рис. 7. Электронная микрофотография суглинистой почвы после обработки положительно заряженным НИПК ПДАДМАХ/Гум.

которые будут произрастать на обработанной поликомплексными почве. Работы последних лет показали, что поликомплексы не угнетают прорастание семян и развитие растений. Более того, культуры развиваются активнее на грунте, обработанном ИПК, давая увеличение длины корня и прирост зеленой массы [64, 92, 93]. Так, например, в присутствии ИПК средняя длина корней газонной травы возрастает в 2.5 раза, прирост биомассы увеличивается в 1.8 раза (рис. 8).

Наконец, описано использование ИПК для структурирования почвы в условиях опустынивания [94] и подавления распространения мелкодисперсного песка на территории высохшего Аральского моря [95].



Рис. 8. Влияние положительно заряженного НИПК ПДАДМАХ/Гум на прорастание, рост и развитие газонной травы.

Слева — контроль без НИПК, справа — после добавления НИПК.

Последний результат представляет особый интерес для рекультивации свалок, поскольку он показывает, что поликомплексные рецептуры способны создавать противозерозивное покрытие на поверхности низкокачественного грунта, который часто используется для формирования внешнего защитного слоя на закрытых полигонах.

Еще одно принципиальное использование ИПК рецептур связано с улучшением структуры и свойств искусственно сконструированных грунтов (конструктоземов). В работе [93] исходный отвал строительного грунта был смешан с НИПК, содержащим трехкратный избыток катионного полимера. Такая процедура привела к существенному увеличению доли агрономически ценных агрегатов, размер которых лежал в интервале 0.25–10 мм. Модифицированный конструктозем стимулировал рост и развитие растений и демонстрировал высокую влагостойкость (сопротивляемость размыву потоками воды). Таким образом, описанный подход может быть использован для проведения заключительного этапа рекультивации мусорных полигонов и создания стабильных и продуктивных грунтовых покрытий.

### Заключение

В настоящее время утилизация полимерных отходов включает три основных направления: «вторичную переработку» (рециклинг), сжигание на мусоросжигательных заводах и наиболее распространенное в России захоронение на мусорных полигонах. Анализ жизненного цикла полигона позволяет выделить приоритетную задачу, связанную с повышением эрозионной стойкости его поверхностного слоя: частично затормозить, а в некоторых случаях и полностью предотвратить развитие водной и ветровой эрозии почвенного слоя с помощью полимерных стабилизаторов почвы, среди которых особо выделяют интерполимерные комплексы — продукты взаимодействия противоположно заряженных ионогенных полимеров. Эта технология позволяет легко изменять состав поликомплекса и тем самым его пространственную структуру (морфологию), гидрофильно-гидрофобный баланс и суммарный заряд, что делает возможным получение поликомплексов, адресно «подстроенных» под состав и свойства стабилизируемой почвы. Компонентами поликомплексных рецептур служат коммерчески доступные синтетические и искусственные полимеры, а для нанесения рецептур (водных растворов полимеров) могут быть использованы существующие технические средства (поливальные машины, ранцевые распылители).

Высыхание почвы, обработанной поликомплексными рецептурами, приводит к образованию защитных полимерно-почвенных покрытий, обладающих высокой противозерозионной стойкостью. Кроме того, поликомплексные рецептуры отличаются низкой токсичностью по отношению к высшим растениям и могут быть использованы для улучшения структуры искусственно сконструированных грунтов (конструктоземов). Эти особенности делают поликомплексы перспективными связующими почв и грунтов в противозерозионных технологиях при рекультивации полигонов твердых коммунальных отходов.

### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 075-15-2020-794).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

### Информация о вкладе авторов

А. А. Ярославов — существенный вклад в концепцию работы, анализ и интерпретация данных; М. С. Аржаков — вклад в концепцию работы, критический пересмотр содержания рукописи, подготовка рукописи к публикации; И. Г. Панова — вклад в сбор и анализ литературных данных; А. Р. Хохлов — существенный вклад в формулирование общей идеи и концепции направления, утверждение окончательного варианта статьи для публикации.

### Информация об авторах

*Александр Анатольевич Ярославов*, д.х.н., проф., чл.-корр. РАН

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1627-1270>

*Максим Сергеевич Аржаков*, д.х.н., проф.

ИСТИНА: <https://istina.msu.ru/profile/ArzhakovMS/>

*Ирина Геннадьевна Панова*, к.х.н.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0519-3695>

*Алексей Ремович Хохлов*, д.ф.-м.н., проф., академик РАН

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0427-9611>

### Список литературы

- [1] *Van der Velde K., Kiekens P.* Thermoplastic polymers: Overview of several properties and their consequences in flax fiber reinforced composites // *Polym. Testing*. 2001. V. 20. N 8. P. 885–893. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(01\)00017-4](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(01)00017-4)
- [2] *Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L.* Production, use, and fate of all plastics ever made // *Science Advances*. 2017. V. 3. N 7. P. e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- [3] *Applied plastics engineering handbook: Processing and materials* / Ed. Kutz Myer. Amsterdam: William Andrew, 2011. 661 p.
- [4] *Вареничев А. А., Потапов И. И.* Пластик и охрана окружающей среды // *Экономика природопользования*. 2018. № 5. С. 33–36.
- [5] *Fazli A., Rodrigue D.* Waste rubber recycling: A review on the evolution and properties of thermoplastic elastomers // *Materials*. 2020. V. 13. N 3. P. 782. <https://doi.org/10.3390/ma13030782>
- [6] *Ioannidis I.* Biodegradable materials — some untold tales of fiction and consumer high expectations! // *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Materials and Systems*. 2010. Bucharest. Romania. P. 14–18.
- [7] *Berezyuk S., Tokarchuk D., Pryshliak N.* Economic and environmental benefits of using waste potential as a valuable secondary and energy resource // *J. Environ. Management and Tourism*. 2019. V. X. Spring. N 1(33). P. 149–160. [https://doi.org/10.14505/jemt.v10.1\(33\).1](https://doi.org/10.14505/jemt.v10.1(33).1)
- [8] *Khoonkari M., Haghighi A. H., Sefidbakht Y., Shekoohi K., Ghaderian A.* Chemical recycling of PET wastes with different catalysts // *Int. J. Polym. Sci.* V. 2015. ID 124524. <https://dx.doi.org/10.1155/2015/124524>
- [9] *Ивановский С. К., Бахаева А. Н., Ершова О. В., Чупрова Л. В.* Экологические аспекты проблемы утилизации отходов полимерной упаковки и техногенных минеральных ресурсов // *Успехи современного естествознания*. 2015. Вып. 1. Ч. 5. С. 813–817.
- [10] *Шилкина С.* Мировые тенденции управления отходами и анализ ситуации в России // *Отходы и ресурсы*. 2020. Т. 7. № 1. С. 5–8. <https://dx.doi.org/10.15862/05ECOR120>
- [11] *Thiounn T., Smith R. C.* Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste // *J. Polym. Sci.* 2020. V. 58. N 10. P. 1347–1364. <https://doi.org/10.1002/pol.20190261>
- [12] *Uekert T., Kuehnel M.F., Wakerley D.W., Reisner E.* Plastic waste as a feedstock for solar-driven H<sub>2</sub> generation // *Energy Environ. Sci.* 2018. V. 11. N 10. P. 2853–2857. <https://dx.doi.org/10.1039/c8ee01408f>
- [13] *Gradus R. H., Nillesen P. H., Dijkgraaf E., Van Koppen R. J.* A cost-effectiveness analysis for incineration or recycling of Dutch household plastic waste // *Ecological Economics*. 2017. V. 135. P. 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.12.021>

- [14] Zhao X., Korey M., Li K., Copenhaver K., Tekinalp H., Celik S., Ozcan S. Plastic waste upcycling toward a circular economy // *Chem. Eng. J.* 2022. V. 428. P. 131928. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131928>
- [15] Челноков А. А., Ющенко Л. Ф., Жмыхов И. Н., Юращик К. К. Обращение с отходами. Минск: Вышэйшая шк., 2018. 460 с.
- [16] Šooš L., Matiš M., Pokusová M., Čačko V., Bábics J. The recycling of waste laminated glass through decomposition technologies // *Recycling*. 2021. V. 6. P. 26–30. <https://doi.org/10.3390/recycling6020026>
- [17] Байнова М. С. Международный опыт продвижения раздельного сбора бытовых отходов // *Менеджмент*. 2021. Т. 9. № 2. С. 5–14. <https://doi.org/10.26425/2309-3633-2021-9-2-5-14>
- [18] Федотов А. В. Зарубежный опыт организации и стимулирования раздельного сбора и утилизации твердых бытовых отходов на региональном уровне // *Вопр. регион. экономики*. 2019. № 4 (41). С. 54–62.
- [19] Задорожня Л. Мировая и отечественная практика безотходного производства посредством перехода к циркулярной экономике // *Экон. вестн. ИПУ РАН*. 2020. Т. 1. № 1. С. 106–124. <https://doi.org/10.25728/econbull.2020.1.10-zadorozhnyaya>
- [20] Сухоруков А. И., Захарова Е. А. Анализ влияния источников образования твердых коммунальных отходов на экологию в России и за рубежом // *Современные проблемы управления проектами в инвестиционно-строительной сфере и природопользовании* / Под ред. В. И. Ресина. М: ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г. В. Плеханова», 2021. С. 237–243.
- [21] Потапова Е. В. Проблема утилизации пластиковых отходов // *Изв. Байкал. гос. ун-та*. 2018. Т. 28. № 4. С. 535–544. [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2018.28\(4\).535-544](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2018.28(4).535-544)
- [22] Зайнуллин Х. Н., Абдрахманов Р. Ф., Савичев Н. А. Утилизация промышленных и бытовых отходов. Уфа: Уфим. науч. центр РАН, 1997. 241 с.
- [23] Бюллетень Счетной палаты Российской Федерации. Мусорная реформа. 2020. № 9 (274). 159 с.
- [24] Sasao T. Econometric analysis of cleanup of illegal dumping sites in Japan: Removal or remedial actions? // *Environ. Economics and Policy Studies*. 2016. V. 18. N 4. P. 485–497. <https://doi.org/10.1007/s10018-015-0120-7>
- [25] Ishii K., Furuichi T., Nagao Y. A needs analysis method for land-use planning of illegal dumping sites: A case study in Aomori–Iwate, Japan // *Waste Management*. 2013. V. 33. N 2. P. 445–455. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.10.008>
- [26] Reinhart D. R., Townsend T. G. Landfill bioreactor design and operation. New York: Routledge, 2018. 208 p.
- [27] Manfredi S., Christensen T. H. Environmental assessment of solid waste landfilling technologies by means of LCA-modeling // *Waste Management*. 2009. V. 29. N 1. P. 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.021>
- [28] Hu L., Du Y., Long Y. Relationship between H<sub>2</sub>S emissions and the migration of sulfur-containing compounds in landfill sites // *Ecol. Eng.* 2017. V. 106. Part A. P. 17–23. [doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.05.026](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.05.026)
- [29] Karapidakis E. S., Tsave A. A., Soupios P. M., Katsigiannis Y. A. Energy efficiency and environmental impact of biogas utilization in landfills // *Int. J. Environ. Sci. & Technol.* 2010. V. 7. N 3. P. 599–608. <https://doi.org/10.1007/BF03326169>
- [30] Iqbal A., Liu X., Chen G.-H. Municipal solid waste: Review of best practices in application of life cycle assessment and sustainable management techniques // *Science of The Total Environment*. 2020. V. 729. P. 138622. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138622>
- [31] Малюхин Д. М. Экологические аспекты использования органогенных субстратов при рекультивации полигонов твердых коммунальных отходов: Автореф. канд. дис. СПб: ФГБОУ «Российский государственный гидрометеорологический университет», 2018. 20 с.
- [32] Nanda S., Berrut F. Municipal solid waste management and landfilling technologies: A review // *Environ. Chem. Lett.* 2021. V. 19. N 2. P. 1433–1456. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01100-y>
- [33] Melosi M. V. Fresh kills: The making and unmaking of a wastescape // *RCC Perspectives*. 2016. N 1. P. 59–66. <https://www.jstor.org/stable/26241345>
- [34] Eid H. T., Stark T. D., Evans W. D., Sherry P. E. Municipal solid waste slope failure. I: Waste and foundation soil properties // *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2000. V. 126. N 5. P. 397–407. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:5\(397\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:5(397))
- [35] Merry S., Kavazanjian E. Jr., Fritz W. U. Reconnaissance of the July 10, 2000, Payatas // *J. Perform. Construct. Facil.* 2005. May. P. 100–107. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2005\)19:2\(100\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2005)19:2(100))
- [36] Yin Y., Li B., Wang W., Zhan L., Xue Q., Gao Y., Zhang N., Chen H., Liu T., Li A. Mechanism of the December 2015 catastrophic landslide at the Shenzhen landfill and controlling geotechnical risks of urbanization // *Engineering*. 2016. V. 2. N 2. P. 230–249. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.02.005>
- [37] Peng R., Hou Y., Zhan L., Yao Y. Back-analysis of landfill instability induced by high ater level: Case study of Shenzhen landfill // *Int. J. Environ. Research and Public Health*. 2016. V. 13. N 1. P. 126. <https://doi.org/10.3390/ijerph13010126>
- [38] Sudheer K. Y., Sunil K., Sreedeeep S., Ravi R. R. Determination of soil erosion index for surface soils

- of landfill covers // *Environ. Geotechnics*. 2019. V. 6. N 6. P. 373–380.  
<https://doi.org/10.168/jenge.16.00018>
- [39] Kumar H., Bordoloi S., Yamsani S. K., Garg A., Sekharan S., Rakesh R. R. Erosion potential of compacted surface soils for multilayered cover system // *Advances in Civil Engineering Materials*. 2019. V. 8. N 1. P. 134–144.  
<https://doi.org/10.1520/ACEM20180088>
- [40] Eid H. T., Stark T. D., Evans W. D., Sherry P. E. Municipal solid waste slope failure. I: Waste and foundation soil properties // *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2000. V. 126. N 5. P. 397.  
[doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:5\(397\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:5(397))
- [41] Feng S. J., Chang J. Y., Shi H., Zheng Q. T., Guo X. Y., Zhang X. L. Failure of an unfilled landfill cell due to an adjacent steep slope and a high groundwater level: A case study // *Engineering Geology*. 2019. V. 262. P. 105320. [doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105320](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105320)
- [42] Schmidt K. M., Roering J. J., Stock J. D., Dietrich W. E., Montgomery D. R., Schaub T. The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range // *Canadian Geotechnical J.* 2001. V. 38. N 5. P. 995–1024.  
<https://doi.org/10.1139/t01-031>
- [43] Малюхин Д. М., Поздняков В. А., Бакина Л. Г., Нагиев Т. Б., Поздняков А. В., Лоскутов С. И., Пухальский Я. В. Экспериментальное задержание многолетними травами грунта техногенного из твердых бытовых/коммунальных отходов, используемого при рекультивации полигонов в качестве плодородного грунта // *Биосфера*. 2018. Т. 10. № 3. С. 40–44.  
<https://doi.org/10.24855/BIOSFERA.V10I3.451>
- [44] Жидков А., Коженков Л. Л. Рекультивация нарушенных земель // *Лесохозяйственная информация*. 2019. № 3. С. 134–145.  
<https://doi.org/10.24419/LNI.2304-3083.2019.3.11>
- [45] Экологические проблемы промышленных городов / Под ред. Е. И. Тихомировой. Саратов: СГТУ им. Ю. А. Гагарина, 2013. С. 138–141.
- [46] Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства / Под ред. И. С. Белюченко. Краснодар: Куб. гос. аграр. ун-т, 2015. С. 7–17.
- [47] Зеньков И. В., Мордвинов А. В., Волков А. В., Сибирякова О. В., Кирюшина Е. В., Вокин В. Н. Технология формирования почвенного слоя в рекультивации земельных участков под промышленными и твердыми бытовыми отходами // *Экология и пром-сть России*. 2015. № 3. С. 40–43.  
<https://doi.org/10.18412/1816-0395-2013-3-40-43>
- [48] Миронов А. В. Опытная биологическая рекультивация золошлакового материала Читинской ТЭЦ-1 // *Природообустройство*. 2019. № 4. С. 29–33.  
<https://doi.org/10.34677/1997-6011/2019-4-29-34>
- [49] Lu Y., Tian A., Zhang J., Tang Y., Shi P., Tang Q., Huang Y. Physical and chemical properties, pretreatment, and recycling of municipal solid waste incineration fly ash and bottom ash for highway engineering: A literature review // *Advances in Civil Engineering*. 2020. V. 2020. P. 8886134.  
<https://doi.org/10.1155/2020/8886134>
- [50] Пат. РФ 2509457 С1 (опубл. 2014). Способ рекультивации отвалов и полигонов промышленных отходов.
- [51] Солодкова А. Б., Собгайда Н. А., Шайхиев И. Г. Оценка содержания химических веществ в почве и в растениях при использовании органоминеральных удобрений из отработанного активного ила // *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2013. Т. 16. № 6. С. 128–130.
- [52] Рудакова Л. В., Белик Е. С. Обоснование возможности использования карбонизата избыточного активного ила в качестве биосорбента, применяемого в технологии биоремедиации нефтезагрязненных почв // *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2014. Т. 17. № 21. С. 330–332.
- [53] Нефедьева Е. Э., Белицкая М. Н., Шайхиев И. Возможности использования твердой фракции городских сточных вод в качестве органоминерального удобрения в городском и сельском хозяйстве // *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2013. Т. 16. № 19. С. 223–226.
- [54] Chen S., Ai X., Dong T., Li B., Luo R., Ai Y., Chen Z., Li C. The physico-chemical properties and structural characteristics of artificial soil for cut slope restoration in Southwestern China // *Scientific Reports*. 2016. N 6. P. 20565. <https://doi.org/10.1038/srep20565>
- [55] Chen Z., Luo R., Huang Z., Tu W., Chen J., Li W., Ai Y. Effects of different backfill soils on artificial soil quality for cut slope revegetation: Soil structure, soil erosion, moisture retention and soil C stock // *Ecological Engineering*. 2015. V. 83. P. 5–12.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.05.048>
- [56] Уткаева В. Ф., Скворцова Е. Б., Сапожников П. М., Щепотьев В. Н. Изменение агрофизических свойств почв пойм при различных антропогенных нагрузках // *Почвоведение*. 2009. № 2. С. 167–177.
- [57] Iturri L. A., AVECILLA F., HEVIA G. G., BUSCHIAZZO D. E. Comparing adjacent cultivated and «virgin» soils in wind erosion affected environments can lead to errors in measuring soil degradation // *Geoderma*. 2016. V. 264. P. 42–53.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.09.017>
- [58] Мусеев К. Г. Обобщение опытных данных сопоставления сдвига и уплотнения почв на основе теории подобия // *Устойчивость почв к естественным и антропогенным воздействиям*. М.: Почвенный институт им. В. В. Докучаева, 2002. С. 114–119.
- [59] Хитров Н. Б., Иванов А. Л., Завалин А. А., Кузнецов М. С. Проблемы деградации, охраны и пути

- восстановления продуктивности земель сельскохозяйственного назначения // Вестн. Орел ГАУ. 2007. № 6. С. 29–32.
- [60] *Карашаева А. С., Езиев М. И.* Система управления сельскохозяйственным землепользованием // Москов. эконом. журн. 2020. № 10. С. 48–58. <https://doi.org/10.24411/2413-046X-2020-10687>
- [61] *Иванов А. Л., Савин И. Ю., Столбовой В. С.* Качество почв России для сельскохозяйственного использования // Докл. РАСХН. 2013. № 6. С. 41–45.
- [62] *Абдусаламова Р. Р., Баламирзоева З. М.* Почвенные ресурсы России // Вестн. соц.-пед. ин-та. 2020. № 1(33). С. 7–13.
- [63] *Panagos P., Borrelli P., Poesen J., Ballabio C., Lugato E., Meusburger K., Alewell C.* The new assessment of soil loss by water erosion in Europe // *Environmental Science & Policy*. 2015. V. 54. P. 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
- [64] *Панова И. Г., Ильясов Л. О., Ярославов А. А.* Поликомплексные рецептуры для защиты почв от деградации // *Высокомолекуляр. соединения. Сер. С*. 2021. Т. 63. № 2. С. 232–244. <https://doi.org/10.31857/S2308114721020060> [*Panova I. G., Ilyasov L. O., Yaroslavov A. A.* Polycomplex formulations for the protection of soils against degradation // *Polym. Sci. Ser. C*. 2021. V. 63. N 2. P. 237–248. <https://doi.org/10.1134/S1811238221020065>].
- [65] *Quastel J. H., Webley D. M.* The effects of the addition to soil of alginic acid and of other forms of organic matter on soil aeration // *J. Agricultural Sci.* 1947. V. 37. P. 257–265.
- [66] *Quastel J. H.* «Krilium» and synthetic soil conditioners // *Nature*. 1953. V. 171. P. 7–10.
- [67] *Кульман А.* Искусственные структурообразователи почвы. 1982. М.: Колос, 158 с.
- [68] *Lentz R. D., Shainberg I., Sojka R. E., Carter D. L.* Preventing irrigation furrow erosion with small applications of polymers // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1992. V. 56. P. 1926–1932.
- [69] *Ben-Hur M., Faris J., Malik M., Letey J.* Polymers as soil conditioners under consecutive irrigations and rainfall // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1989. V. 53. N 4. P. 1173–1177. <https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300040030x>
- [70] *Sojka R. E., Bjorneberg D. L., Entry J. A., Lentz R. D., Orts W. J.* Polyacrylamide in agriculture and environmental land management // *Advances in Agronomy*. 2007. V. 92. P. 7–162. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(04\)92002-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(04)92002-0)
- [71] *McLaughlin R. A., Brown T. T.* Evaluation of erosion control products with and without added polyacrylamide // *J. Am. Water Resources Association*. 2006. V. 42. N 3. P. 675–684. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb04484.x>
- [72] *Кабанов В. А., Зезин А. Б., Касаикин В. А., Ярославов А. А., Топчиев Д. А.* Полиэлектролиты в решении экологических проблем // *Успехи химии*. 1991. Т. 60. № 3. С. 595–601. <https://mi.mathnet.ru/rus/rcr/v60/i3/p595>
- [73] *Panova I. G., Khaydapova D. D., Ilyasov L. O., Umarova A. B., Yaroslavov A. A.* Polyelectrolyte complexes based on natural macromolecules for chemical sand/soil stabilization // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 2020. V. 590. P. 124504. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124504>
- [74] *Ogawa K.* Effects of salt on intermolecular polyelectrolyte complexes formation between cationic microgel and polyanion // *Advances Colloid Interface Sci.* 2015. V. 226. P. 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.09.005>
- [75] *Хандурина Ю. В., Дембо А. Т., Рогачева В. Б., Зезин А. Б., Кабанов В. А.* Структура поликомплексных, образованных сетчатым полиакрилатом натрия и катионными мицеллообразующими поверхностно-активными веществами // *Высокомолекуляр. соединения. Сер. А*. 1994. Т. 36. № 2. С. 235–240.
- [76] *Лысенко Е. А., Билан Р. С., Челушкин П. С.* Блоксополимерные мицеллы с интерполиэлектролитной короной // *Высокомолекуляр. соединения. Сер. С*. 2017. Т. 59. № 1. С. 40–54. <https://doi.org/10.7868/S230811471701006X> [*Lysenko E. A., Bilan R. S., Chelushkin P. S.* Block copolymer micelles with a interpolyelectrolyte crown // *Polym. Sci. Ser. C*. 2017. V. 59. N 1. P. 35–48. <https://doi.org/10.7868/S230811471701006X>].
- [77] *Sybachin A. V., Efimova A. A., Litmanovich E. A., Menger F. M., Yaroslavov A. A.* Complexation of polycations to anionic liposomes: Composition and structure of the interfacial complexes // *Langmuir*. 2007. V. 23. N 20. P. 10034–10039. <https://doi.org/10.1021/la701411y>
- [78] *Ivashkov O. V., Sybachin A. V., Efimova A. A., Pergushov D. V., Orlov V. N., Schmalz H., Yaroslavov A. A.* The influence of the chain length of polycations on their complexation with anionic liposomes // *ChemPhysChem*. 2015. V. 16. N 13. P. 2849–2853. <https://doi.org/10.1002/cphc.201500474>
- [79] *Зезин А.* Синтез металлополимерных комплексов и функциональных наноструктур в пленках и покрытиях интерполиэлектролитных комплексов // *Высокомолекуляр. соединения. Сер. А*. 2019. Т. 61. № 6. С. 503–514. <https://doi.org/10.1134/S2308112019060154> [*Zezin A.A.* Synthesis of metal-polymer complexes and functional nanostructures in films and coatings of interpolyelectrolyte complexes // *Polym. Sci. Ser. A*. 2019. V. 61. N 6. P. 754–764. <https://doi.org/10.1134/S0965545X19060154>].

- [80] Зезин А. Б., Кабанов В. А. Новый класс комплексных водорастворимых полиэлектролитов // Успехи химии. 1982. Т. 51. № 9. С. 1447–1483. [https://www.uspkhim.ru/.../paper\\_rus.phtml?journal\\_id=rc&paper\\_id=2921](https://www.uspkhim.ru/.../paper_rus.phtml?journal_id=rc&paper_id=2921)
- [81] 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 Colloid Interface Sci.* 2015. V. 226. P. 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.06.006>
- [82] Михайкин С. В., Смирнов А. Ю., Алексеев А. Н., Пронина Л. В., Зезин А. Б., Ануфриева С. И. Интерполиэлектролитные комплексы для закрепления поверхности и предотвращения пылепереноса, ветровой и водной эрозии хвостохранилищ, золоотвалов и других дисперсных систем // *Горн. информ.-аналит. бюлл. (науч.-техн. журн.)*. 2004. № 3. С. 45–51.
- [83] Naganawa H., Kumazawa N., Saitoh H., Yanase N., Mitamura H., Nagano T., Kashima K., Fukuda T., Yoshida Z., Tanaka S. Removal of radioactive cesium from surface soils solidified using polyion complex rapid communication for decontamination test at Iitate-mura in Fukushima Prefecture // *Transactions of the Atomic Energy Society of Japan*. 2011. V. 10. N 4. P. 227–234. <https://doi.org/10.3327/taesj.J11.017>
- [84] Панова И. Г., Ильясов Л. О., Хайдапова Д. Д., Ярославов А. А. Полиэлектролитные гели для стабилизации песчаной почвы против ветровой эрозии // *Высокомолекуляр. соединения. Сер. Б*, 2020. Т. 62. № 5. С. 364. <https://doi.org/10.31857/S2308113920050101>  
[Panova I. G., Ilyasov L. O., Khaidapova D. D., Yaroslavov A. A. Polyelectrolytic gels for stabilizing sand soil against wind erosion // *Polym. Sci. Ser. B*. 2020. V. 62. N 5. P. 491–498. <https://doi.org/10.1134/S1560090420050103>
- [85] Panova I. G., Sybachin A. V., Spiridonov V. V., Kydraliev K., Jorobekova S., Zezin A. B., Yaroslavov A. A. Non-stoichiometric interpolyelectrolyte complexes: Promising candidates for protection of soils // *Geoderma*. 2017. V. 307. P. 91–97. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.001>
- [86] Новоскольцева О. А., Панова И. Г., Лойко Н. Г., Николаев Ю. А., Литманович Е. А., Ярославов А. А. Полиэлектролиты и поликомплексы для стабилизации песчаных грунтов // *Высокомолекуляр. соединения. Сер. Б*. 2021. Т. 63. № 5. С. 317–325. <https://doi.org/10.31857/S2308113921050090>  
[Novoskoltseva O. A., Panova I. G., Loiko N. G., Nikolaev Yu. A., Litmanovich E. A., Yaroslavov A. A. Polyelectrolytes and polycomplexes for stabilizing sandy grounds // *Polym. Sci. Ser. B*. 2021. V. 63. N 5 P. 488–495. <https://doi.org/10.1134/S1560090421050092>].
- [87] Panova I. G., Khaidapova D. D., Ilyasov L. O., Umarova A. B., Yaroslavov A. A. Polyelectrolyte complexes based on natural macromolecules for chemical sand/soil stabilization // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 2020. V. 590. P. 124504. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124504>
- [88] Panova I., Drobyazko A., Spiridonov V., Sybachin A., Kydraliev K., Jorobekova S., Yaroslavov A. Humics-based interpolyelectrolyte complexes for antierosion protection of soil: Model investigation // *Land Degradation & Development*, 2019. V. 30. N 3. P. 337–347. <https://doi.org/10.1002/ldr.3228>
- [89] Panova I., Demidov V. V., Shulga P. S., Ilyasov L. O., Butilkina M. A., Yaroslavov A. A. Interpolyelectrolyte complexes as effective structure-forming agents for Chernozem soil // *Land Degradation & Development*. 2021. V. 32. N 2. P. 1022–1033. <https://doi.org/10.1002/ldr.3743>
- [90] Gerke J. Concepts and misconceptions of humic substances as the stable part of soil organic matter: A review // *Agronomy*. 2018. V. 8. N 5. P. 76. <https://doi.org/10.3390/agronomy8050076>
- [91] Изумрудов В. А., Мусабеева Б. Х., Касымова Ж. С., Кливенко А. Н., Оразжанова Л. К. Интерполиэлектролитные комплексы: достижения и перспективы применения // *Успехи химии*. 2019. Т. 88. № 10. С. 1046–1062. <https://doi.org/10.1070/RCR4877>
- [92] Якименко О. С., Терехова В. А., Зиганишина А. Р., Панова И. Г. Биотестирование полиэлектролитных комплексов в водной и почвенной среде // *Экологический мониторинг: методы и подходы*. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2021. С. 245–247.
- [93] Якименко О. С., Грузденко Д. А., Степанов А. А., Бутылкина М. А., Киушов А. А., Панова И. Г. Полиэлектролиты для конструирования искусственных почв // *Высокомолекуляр. соединения. Сер. С*. 2021. Т. 63. № 2. С. 245–252. <https://doi.org/10.31857/S2308114721020114>  
[Yakimenko O. S., Gruzdenko D. A., Stepanov A. A., Butylkina M. A., Kiushov A. A., Panova I. G. Polyelectrolytes for the construction of artificial soils // *Polym. Sci. Ser. C*. 2021. V. 63. N 2. P. 249–255. <https://doi.org/10.1134/S1811238221020119>].
- [94] Shulga G., Betkers T., Vitolina S., Neiberte B., Verovkins A., Anne O., Žukauskaitė A. Wood processing by-products treated with the lignin-based conditioner as mulch for soil protection // *J. Environ. Eng. Landscape Management*. 2015. V. 23. N 4. P. 279–287. <https://doi.org/10.3846/16486897.2015.1018267>]
- [95] Мухамедов Г. И. Интерполимерные комплексы на основе аминокислотных мочевиноформальдегидных олигомеров и полимеров и их применение: Автореф. докт. дис. М.: МГУ, 1991. 48 с.