

Искусственные почвы: применение и функционирование

В.Н. Башкин*

В статье рассмотрены применение и функционирование искусственных почв, создание которых основано как на исследованиях по моделированию влаго- и солепереноса в почвах, так и на разработках биогеохимических природоподобных технологий для воссоздания природной биогеохимической цикличности. Показаны два основных технологических приёма для конструирования искусственных почв: моделирование почвенных процессов и применение результатов моделирования к технологиям создания функциональных горизонтов искусственных почв. Отмечено, что искусственные почвы являются, по сути, биофизическими моделями, рассмотрение которых позволяет конструировать такие почвы для самых различных вариантов их функционального использования.

Ключевые слова: искусственные почвы, техногрунты, строительные материалы для искусственных почв, биогеохимические технологии.

Ссылка для цитирования: Башкин В.Н. Искусственные почвы: применимость и функционирование // Жизнь Земли. 2026. Т. 48, № 1. С. 33–45 DOI: 10.29003/m5045.0514-7468.2026_48_1/33-45.

Поступила 05.02.2026 / Принята к публикации 11.03.2026

Artificial Soils: Applicability and Functioning

V.N. Bashkin, Dr. Sci (Biol.)

Institute of Physico-Chemical and Biological Problems of Soil Science RAS (IPKHiBPP RAS)

The article examines the applicability and functioning of artificial soils, whose creation is based both on research into modeling moisture and salt transfer in soils and on the development of nature-like biogeochemical technologies for recreating natural biogeochemical cyclicality. Two main technological approaches for constructing artificial soils are demonstrated, namely: modeling soil processes and applying the modeling results to technologies for creating functional horizons of artificial soils. It is noted that artificial soils are essentially biophysical models, our consideration of which allows for the design of such soils for a wide variety of functional uses.

Keywords: artificial soils, techno-soils, building materials for artificial soils, biogeochemical technologies.

For citation: Bashkin, V.N., "Artificial Soils: Applicability and Functioning", *Zhizn Zemli [Life of the Earth]* 48, no 1, 33–45 (2026) (in Engl., abstr. in Russ.). DOI: 10.29003/m5045.0514-7468.2026_48_1/33-45.

Введение. Обычно восстановление заброшенных, нарушенных и загрязнённых территорий производится методами рекультивации. Эти методы, будучи эффективными, как правило, очень дороги, поскольку удаление загрязнённой почвы сопровождается её заменой чистыми почвенными материалами. Чтобы избежать использования почвы, извлечённой с незагрязнённых или ненарушенных участков, создаются соответствующие

* Башкин Владимир Николаевич – д.б.н., проф., г.н.с. Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН ФГБУН ФИЦ ПНЦБИ РАН, vladimirbashkin@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-5656-3011.

специально разработанные искусственные почвы. Эти искусственные почвы предназначены для того, чтобы стать плодородными субстратами для роста растений, даже если их состав иногда далёк от идеального.

Такие технологии структурной мелиорации отличаются от традиционных способов окультуривания почв в земледелии применением оригинальных технических средств, позволяющих производить значительные объёмы земляных работ, а также кратковременностью коренной обработки исходных материалов с целью конструирования необходимых в данных условиях функциональных горизонтов-слоёв. Сходные принципы заложены в технологиях создания почвенных конструкций для целей озеленения, благоустройства и реализации биологического этапа рекультивации земель.

Прокофьева и др. [4] определяют искусственные почвы («конструктозёмы») как почвенные тела со сложной стратификацией толщиной более 40–50 см, которые создаются для специальных целей рекультивации и ремедиации.

Формирование искусственных почв может проводиться из различных материалов, включая отходы. Ввиду необходимости экологического перехода, искусственные почвы представляются привлекательным и современным решением для удовлетворения острой потребности в зелёных зонах в городской среде с целью получения подходящего субстрата для роста растений.

Образование отходов является негативным антропогенным фактором, особенно в городских районах, где, по оценкам, к 2025 г. уже могло образоваться до 2,2 млрд т твёрдых отходов в год, утилизация которых потребует более 375 млрд долларов США. Всё чаще предпринимаются попытки минимизировать захоронение твёрдых отходов на полигонах и стимулировать их переработку. Искусственные техногрунты – эффективное решение для утилизации отходов [1, 8].

Обращает на себя внимание возросшая заинтересованность стран в более эффективном использовании этих отходов для обеспечения рентабельности использования таких компонентов в различных областях применения. Из проанализированных работ следует, что исследования, касающиеся использования отходов, проводились почти в 40 странах, в основном в Китае, Индии, США, Испании, Японии, Австралии, Великобритании, России, Канаде и Южной Африке. Многие из этих стран производят большое количество твёрдых отходов, но параллельно они занимаются вопросом переработки отходов.

В большой степени также востребованы различные возобновляемые препараты, такие как гумины. Гуминовые вещества могут, наряду с другими материалами, использоваться в качестве сорбентов при конструировании различных почвенных слоёв для формирования искусственных почв.

Необходимость применения этих продуктов связана с тем, что хозяйственная деятельность человека сопровождается разрушением почвы. Площадь почвенного покрова неуклонно уменьшается за счёт строительства новых предприятий и городов, прокладки дорог и линий высоковольтных электропередач, затопления сельскохозяйственных угодий при строительстве гидроэлектростанций, развития горнодобывающей промышленности. Вопросы восстановления почв в настоящее время очень актуальны. Одним из вариантов решения такого рода проблемы является именно создание искусственной почвы. Следовательно, целью данной статьи является оценка применимости и функциональной значимости искусственных почв для различных вариантов их использования.

Концептуальные, методические и технологические аспекты формирования искусственных почв. Почвоподобные образования можно разделить на две подгруппы:

1) конструкторозёмы, 2) технозёмы. *Конструкторозёмы* представляют собой искусственно созданный покров территории, профиль которого схож с профилем естественного почвенного покрова на основе азонального грунта. Конструкторозёмы обладают оптимизированными функциональными свойствами, которые требуются для выполнения поставленных задач. Для оптимального функционирования почвенные процессы в конструкторозёмах поддерживаются и контролируются человеческой деятельностью [5, 7]. *Технозём* (техногенное почвоподобное образование) представляет собой антропогенно созданный в ходе технической деятельности покров земной поверхности, у которого отсутствует естественный профиль и могут значительно отличаться химико-физические показатели от показателей почв естественного происхождения. Технозёмы могут состоять из материалов природного и антропогенно-техногенного происхождения (отходы промышленно-производственных предприятий, шлакохранилищ, токсичные отходы города и т. д.).

В агро- и урболандшафтах можно целенаправленно создавать аналогичные органогенные слои (горизонты) с использованием биополимеров-почвомодификаторов природного и синтетического генезиса. Очевидно, что при проектировании почвенных конструкций важно оценить также потенциальный срок службы органических почвомодификаторов и возможность его пролонгирования при заглублении рабочего слоя конструкции на основе подобных материалов. С этой целью можно использовать экспоненциальную модель биодеструкции органических веществ в почве, а также распрделённые модели органопрофиля и функции биодеструкции (дыхания) почв [5].

При этом выбор растительности может быть обусловлен эстетическими (зелень), защитными (от ветровой эрозии и ливневых стоков) или продукционными (сельское хозяйство) целями. Искусственные почвы можно использовать в различных проектах зелёной инфраструктуры, включая скверы и парки, озеленение общественных зданий (улицы с деревьями, клумбы, обочины, карманы и зелёные крыши), озеленение транспортных магистралей (дорог и железнодорожных путей), управление ливневыми стоками, городское фермерство, приусадебные участки и рекультивацию заброшенных земель.

Для полноценной работы «зелёной» инфраструктуры требуются функциональные грунты или адаптированные субстраты. При создании техногрунтов следует учитывать следующие характеристики [10]:

- требуются адаптированные минеральные удобрения, подходящие для конкретной растительности с определёнными характеристиками (например, для деревьев, газонов, лугов и клумб);
- требуется достаточная глубина почвы для укоренения растительности, например, для деревьев с глубокими корнями и высокой плотностью корневой системы;
- допустимые концентрации загрязняющих веществ, связанные с фактическим использованием общественных пространств с точки зрения рисков для здоровья (например, при запылении или проглатывании почвенных комочков детьми) и землепользования (например, в городском сельском хозяйстве);
- необходима соответствующая несущая способность для вытаптывания, парковки или движения транспортных средств;
- для инфильтрации воды и предотвращения наводнений необходимы проницаемые почвы;
- необходима достаточная влагоёмкость для поддержания зелёных газонов и декоративных растений при ограниченном поливе;

- для определённых субстратов, используемых на зданиях (например, зелёных крышах), требуется низкая насыпная плотность и неглубокое залегание корневой системы;
- не требуется долгосрочный уход, например, внесение органических веществ и частый полив;
- для таких видов землепользования, как озеленение крыш и системы управления ливневыми стоками, требуется высокая водопроницаемость;
- желательно поддерживать умеренное соотношение минеральных и органических веществ, как правило, не добавляя более 30 % органических веществ, чтобы избежать чрезмерной их потери в результате окисления или вымывания, которые приводят к изменению объёма почвы.

Эти характеристики варьируют в зависимости от предполагаемого использования и функций рассматриваемой зелёной инфраструктуры. Например, (i) улицы, обсаженные деревьями, должны выполнять более важные функции физической поддержки, чем зелёные крыши, (ii) для производства продуктов питания в общественных садах требуются исходные материалы с очень низким уровнем загрязнения, а (iii) для биопрудов (зелёной инфраструктуры для управления ливневыми стоками) важны разложение органических загрязнителей и инфильтрация воды.

Для создания техногрунтов можно использовать различные материалы, но они должны обладать достаточной способностью поддерживать рост растений, как правило, в дополнение к другим компонентам. В последние годы были рассмотрены различные материалы на предмет их соответствия с точки зрения стоимости и эксплуатационных характеристик, от природных субстратов – извлечённые грунты, сапропели, донные отложения, торфы, осадки сточных вод, кокосовая стружка и кофейная гуща, до искусственных переработанных материалов – кирпич и бетон. Хотя, к сожалению, зачастую энергетические затраты и воздействие на окружающую среду при производстве этих материалов делают их использование малопривлекательным. Но использование альтернативных материалов, таких как переработанные отходы, может снизить воздействие на окружающую среду. Крайне важно правильно выбрать компоненты, уделяя особое внимание назначению создаваемого техногрунта: для парка в центре города потребуется почва высокого качества, тогда как при восстановлении заброшенного горнодобывающего района может быть приемлема почва более низкого качества. То же самое относится и к растениям, которые, как ожидается, будут там расти: пионерные, неприхотливые растения могут быть использованы, если качество почвы низкое по сравнению с доступностью материалов.

Способность субстрата выполнять функции почвы зависит от местных условий, таких как климат, окружающая поверхность и использование почвы, поэтому необходимо стремиться к правильному проектированию техногрунтов. Например, для зоны с высокой интенсивностью осадков требуется почва с песчаной текстурой для обеспечения адекватного дренажа воды и предотвращения застоя, подтопления и вымывания. С другой стороны, если почва имеет очень низкую доступную влагоёмкость, её можно улучшить, добавив пористые добавки, способные повысить гидравлическую проводимость, например, крупнопористые геогенные материалы (КПГМ). КПГМ широко используются в качестве минеральных компонентов для создаваемых субстратов. Они образуются в результате естественных геологических процессов и в большинстве случаев требуют простого измельчения перед использованием; высокая доступность и низкий уровень загрязнения делают их хорошим выбором при проектировании искус-

ственных почв. Некоторые коммерчески доступные КППМ представляют собой цеолит, бентонит, перлит, туф, пемзу, керамзит, перлит и вспученный сланец, смешанные в соответствующем соотношении с песком или илом. Эти материалы обладают хорошей пористостью, влагоёмкостью, лёгкостью, умеренными значениями рН и крупным размером зёрен. Благодаря комбинациям этих свойств и их структурной стабильности, такие материалы можно добавлять в чистый кварцевый песок или в песчаные грунты для повышения их водоудерживающей способности.

Другие категории изучаемых материалов для использования в искусственных почвах – это добавки на основе силикатов. Исследования по ним немногочисленны, но они уже широко используются для улучшения водоудерживающей способности полей для гольфа и огородов в засушливых регионах. Гидрогели также интенсивно исследуются на предмет их применения в сельском хозяйстве, садоводстве и лесоводстве в засушливых регионах [6]. Биоуголь и гидроуголь также используются для улучшения водоудерживающей способности песчаных почв. Наиболее важным преимуществом органических компонентов является поступление легкоразлагаемого или стабильного органического вещества, что обеспечивает немедленный или долгосрочный эффект. Органическое вещество улучшает физические, химические и биологические свойства почвы, способствуя развитию микробной биомассы и последующему круговороту элементов. Органические материалы, используемые в качестве почвенных добавок, включают навоз, компост, древесные и сельскохозяйственные отходы, шлам целлюлозно-бумажных комбинатов и отходы пищевой промышленности. Внесение большого количества этих органических добавок может способствовать первоначальной рекультивации почвы в зелёной зоне и созданию самоподдерживающейся экосистемы. Кроме того, они могут адсорбировать или способствовать разложению (благодаря развитию микробной биомассы) некоторых загрязняющих веществ, способствуя восстановлению почвы и снижению её экологической опасности.

Данные из имеющейся литературы указывают на необходимость учёта ряда факторов при проектировании соответствующей искусственной почвы. Учитывая эффект масштабирования, состояние территорий и доступность материалов, требуется итеративный процесс тестирования различных решений для оптимального восстановления деградированной территории. Нельзя исключать, что конечный результат будет отличаться от ожидаемого после надлежащего учёта всех факторов (табл.).

При планировании использования техногрунтов для развития «зелёной» инфраструктуры необходимо учитывать ряд ограничений. Некоторые отходы чрезвычайно неоднородны, поэтому их сложно охарактеризовать, чтобы обеспечить безопасность окружающей среды и здоровья населения. Кроме того, различные материалы обладают широким спектром физико-химических свойств. Например, несмотря на то, что кирпич и органические вещества продемонстрировали оптимальные химические характеристики для роста растений [10], эти материалы показали низкий потенциал для агрегации по сравнению с извлечённым из глубокого горизонта материалом в сочетании с органическими веществами. Смешанным отходам требуется определённое время для формирования стабильной структуры. Таким образом, на ранних стадиях почвообразования существует риск эрозии, стока и уплотнения. Создание растений с плотной корневой системой или возведение барьеров для защиты от эрозии вокруг техногрунтов может снизить эти риски. Продуманный выбор, например, использование зрелого компоста или добавление хорошо дренируемого минерального материала (например, песка), может помочь избежать бескислородных условий. Даже при таком

Таблица. Характеристики искусственных почв, рассматриваемых для оценки почвенных функций при различных видах землепользования в рамках зелёной инфраструктуры

Table. Characteristics of some artificial soils considered for assessing soil functions for various land use types within green infrastructure

Вид землепользования	Почвенные функции	Почвенные характеристики
Парки и скверы	Контроль эрозии	Макро- и микропористость, структурная устойчивость, инфильтрация, водоудерживающая способность, гидроструктурные характеристики, кривые водоудерживающей способности и усадки, гранулометрический состав и текстура
	Структура почвы и удержание воды	Гидравлическая проводимость, макро- и микропористость, содержание органических веществ и доступной воды, агрегация, содержание углерода и/или азота
	Биомасса	Биомасса корней и надземной части
	Биоразнообразии	Дождевые черви, муравьи, микрофауна, микробы, углерод микробной биомассы
Улицы	Организация почвенной структуры	Пористость и плотность
	Круговорот биофилов	Доступный фосфор и калий, соотношение углерода и азота, макро- и микроэлементы, рН и ёмкость катионного обмена
	Продукция биомассы	Рост деревьев, биомасса побегов, листьев и корней
	Водоудерживающая способность	Содержание доступной влаги и инфильтрация
	Зелёные буферы	Разнообразие и активность микроорганизмов. Состав микробных сообществ, содержание углерода и азота в микробной биомассе, потенциальная чистая минерализация азота и нитрификация, микробное дыхание и потенциал денитрификации, рН и соли
	Иммобилизация поллютантов	Углеводороды, ТМ, ПАУ
	Удержание органического С	Отношение С : N
Городское фермерство	Производство с/х продукции	Качество продукции
	Регулирование стока и качества воды	Водоудержание, объёмная плотность, плотность размера частиц, текстура, концентрация NH_4 , NO_3 в воде и концентрация тяжёлых металлов в почве и воде
	Биоразнообразии	Дождевые черви
	Круговорот питательных веществ	рН, доступный фосфор, общий калий, извлекаемый марганец и железо, а также общая проводимость
		Микробиологическая активность, связанная с азотным циклом; активность макрофауны, связанная с круговоротом питательных веществ

подходе добавление органического материала должно соответствовать предполагаемому использованию участка, поскольку регулярное внесение органических веществ может со временем привести к накоплению тяжёлых металлов. Чтобы смягчить это ограничение, следует со временем отказаться от дополнительного внесения органических веществ, чтобы улучшить качество техногрунтов и сохранить целостность сформировавшихся почв. Если необходимо добавить органические отходы, то органическое вещество, содержащее тяжёлые металлы и загрязняющие вещества, можно смешать с другими нетоксичными компонентами отходов в рассчитанных пропорциях, чтобы снизить общую концентрацию до приемлемого уровня. Эти уровни будут различаться в зависимости от вида землепользования и местных нормативных актов.

Микропластик – ещё один источник загрязнения, который следует учитывать при создании техногрунтов. Несмотря на то, что количество текущих исследований ещё ограничено, загрязнение пластиком может негативно влиять на рост растений, почвенные организмы и здоровье человека, попадая в пищевую цепочку. Использование компоста из осадка сточных вод в качестве удобрения приводит к увеличению содержания микропластика в почве. Чтобы предотвратить загрязнение микропластиком, следует избегать использования компоста из осадка сточных вод в больших количествах, использовать его только в небольших количествах и проверять на наличие микропластика перед применением.

Почвообразование. Процесс почвообразования (формирования почвы), который в значительной степени контролируется местными условиями окружающей среды, указывает на то, что возраст искусственных почв является ключевым фактором, определяющим их свойства. Такие почвы подвергаются педогенным процессам, сходным с естественными почвами (например, химическому выветриванию, изменению структуры почвы). Показано, что после одного цикла увлажнения (1 неделя в лабораторных условиях) созданные техногрунты смогли развить гидроструктурные свойства, аналогичные природным почвам. Через 5 месяцев те же самые техногрунты продемонстрировали высокую способность к агрегации и, в некоторых случаях, к повышению содержания углерода в определённой фракции частиц определённого размера [10]. Высокая минерализация органического вещества может происходить на ранних стадиях почвообразования в искусственных техногрунтах, особенно при использовании большого количества органического вещества. Поскольку потеря органического вещества зависит от условий окружающей среды, решением проблемы может стать изменение конструкции искусственной почвы. Например, в засушливом климате, где риск гидроморфизма невелик, можно увеличить концентрацию органических веществ в глубоких слоях почвы по сравнению с поверхностными, чтобы защитить органические вещества от окисления и повысить доступность воды для корневой системы. Также важно создать активное растительное сообщество, которое будет служить внутренним источником органических веществ и стимулировать многочисленные биотические и абиотические взаимодействия. Учитывая особые требования к росту различных видов растений, к их выбору нужно подходить с особой тщательностью.

Создание искусственных почв для конкретных видов землепользования в рамках зелёной инфраструктуры. В большинстве исследований, посвящённых созданию парков и скверов, предпринимаются попытки имитировать естественные почвы путём создания искусственных почв (техногрунтов) с одним или двумя чётко выраженными горизонтами. Горизонт А (растительный горизонт) обычно предназначен для прорастания и начального роста трав; поэтому в качестве основных компонентов часто

используется большое количество органических отходов. Горизонт В (технический горизонт) обычно проектируется таким образом, чтобы обеспечить высокую способность удерживать ливневые воды и предотвратить вымывание органического углерода и нитратов.

Yilmaz et al. [11] изучили четыре искусственные почвы, созданные для разбивки парков, скверов, газонов и посадки деревьев, в лизиметрах *in situ*. На искусственных почвах были высажены деревья (*Acer platanoides*) или райграс пастбищный (*Lolium perenne* L.). Изучены такие функции, как формирование структуры почвы и поддержание водного баланса. Они были проанализированы с точки зрения гидравлической проводимости, макро- и микропористости, содержания органических веществ и доступности воды. Результаты показали, что по сравнению с естественными почвами созданные техногрунты обладают высокой пористостью, способны накапливать большое количество воды для использования растениями и обеспечивают высокую урожайность деревьев и райграса благодаря высокому содержанию органических веществ и оптимальному рН техногрунтов. В ходе исследования был сделан вывод о том, что созданные техногрунты способны поддерживать рост растительности для озеленения городов. Рекомендовано использовать почвенную смесь с содержанием компоста от 20 % до 30 % для парков и газонов, чтобы избежать минерализации и вымывания питательных веществ. Кроме того, поскольку макрофауна и макрофлора положительно влияют на структурную стабильность, пористость и накопление углерода, рекомендуется как можно раньше внедрять биоту, например, дождевых червей, при планировании строительства парков с искусственными почвами. Существует несколько способов внедрения биоты. В тех редких случаях, когда макрофауна уже присутствует в материалах, её следует сохранять. В случае отсутствия вида можно способствовать интродукции различных видов, планируя экологические коридоры или интродуцируя почвенные блоки или популяции, выращенные *ex situ*.

Городские уличные деревья часто погибают из-за множества факторов, в т. ч. из-за недостатка питательных веществ, загрязнения, плохих физических свойств почвы, недостаточного освещения и нехватки места для корней, в частности, из-за мешающего действия городской инфраструктуры (тротуары, водопроводные и канализационные трубы, электрические кабели и т. д.). Чтобы избежать влияния этих мешающих факторов, были разработаны рекомендации по выбору подходящих пород деревьев, их пространственному распределению, а также по обеспечению достаточной площади поверхности для корневых систем. При этом искусственные почвы могут снизить разрушительное воздействие корней деревьев на инфраструктуру. Основная идея этих рекомендаций заключается в том, чтобы ограничить уплотнение почвы и максимально увеличить её водоудерживающую способность, а также избегать видов деревьев с коротким жизненным циклом, которые наносят ущерб окружающей инфраструктуре. Например, можно использовать горизонты из различных смесей природных и искусственных материалов, в т. ч. слой толщиной 100–150 см, состоящий на 65 % из щебня и на 35 % из почвенной смеси, поверх которого был уложен слой органического материала толщиной 30–50 см. Смесь щебня и песка обеспечила прочную основу для растений с низким риском уплотнения, создав устойчивую структуру почвы с высокой инфильтрационной способностью и без препятствий для роста корней. Разработана и протестирована модельная почва для уличных деревьев, которая включает в себя скелетный горизонт базового слоя, состоящий из смеси крупнозернистых минеральных материалов (например, балласта из бетонных отходов и строительного

мусора) с низким содержанием органических веществ, покрытой слоем гумусового горизонта с высоким содержанием органических веществ для роста корней. При использовании аналогичного порядка горизонтов со слоем песка (0,15 м) для обеспечения надлежащего дренажа и скелетного горизонта (1,85 м) выбраны три разные смеси. В одной из них содержались мелкозернистые минеральные материалы, отходы сноса зданий и зелёные отходы; во второй – мелкозернистый балласт из минеральных материалов и осадок сточных вод; в третьей – халцедон и опавшие листья. Они были покрыты слоем (0,8 м), состоящим на 60 % из измельчённых кирпичных отходов и на 40 % из осадка сточных вод и зелёных отходов [11].

Почвы в системах управления ливневыми стоками подвергаются такому же, если не большему, антропогенному воздействию, как и другие городские почвы. Системы управления ливневыми стоками предназначены для фильтрации ливневых стоков, содержащих загрязняющие вещества. При этом небольшие участки принимают стоки с гораздо больших площадей непроницаемых поверхностей, что создаёт физический, химический и биологический стресс для почв и растений. Основная цель систем управления ливневыми стоками – поглощать сточные воды и предотвращать наводнения за счёт улучшения проникновения воды в почвенный профиль и увеличения её водоудерживающей способности для последующего использования растительностью. Ряд биогеохимических процессов влияет на выбросы парниковых газов, накопление органического углерода и биологическую фильтрацию тяжёлых металлов и органических загрязнителей в этих системах [1]. Учитывая высокую нагрузку на системы управления ливневыми стоками, существует большой потенциал для использования искусственных техногрунтов для оптимизации поглощения и инфильтрации воды за счёт обеспечения высокой пористости, проницаемости поверхностей и поддержки микробной активности путём посадки растений с корневой системой, устойчивой к физико-химическому воздействию.

Существует множество работ, посвящённых изучению возможностей и проблем городского фермерства, но в большинстве исследований на эту тему не уделяется должного внимания почве, которая буквально является основой для таких начинаний. Чаще всего городские сельскохозяйственные почвы исследуют на наличие неорганических и органических загрязнителей.

При этом следует подчеркнуть важность продуманной конструкции техногрунта (например, порядка расположения слоёв субстрата в зависимости от конкретных биологических процессов) для зелёных крыш. Возможно применение различных городских отходов (компост из зелёных отходов, измельчённая древесина, измельчённая черепица и кирпич, использованная кофейная гуща и компост из биологических отходов). Различные техногрунты нужно оценивать с точки зрения производства продуктов питания, плодородия и водоудерживающей способности.

Основное внимание в программах по обеспечению устойчивости городов уделяется заброшенным территориям и другим видам деградировавших земель. По определению, заброшенный участок – это загрязнённый или деградировавший участок земли, который ранее использовался в качестве промышленного или коммерческого объекта, но больше не используется и не эксплуатируется. Реконструкция заброшенных участков, которые обычно расположены в районах с низким уровнем дохода, может не только украсить эти районы, но и создать экономические возможности, связанные с развитием коммерческой, промышленной или жилой недвижимости на месте заброшенных участков. Помимо экономических возможностей, заброшенные территории

можно превратить в зелёные зоны или «зелёную» инфраструктуру, которая потенциально может принести множество социальных, экологических и медицинских преимуществ. Несмотря на то, что озеленение заброшенных территорий потенциально может принести множество преимуществ, его реализация сопряжена с рядом трудностей. Почва играет ключевую роль в реконструкции заброшенных территорий, и существует большой потенциал для использования искусственных техногрунтов в таких проектах. Важно формирование функциональной почвы для восстановления заброшенных земель с учётом трёх основных её функций: буферной и трансформационной, производства биомассы и циклов микроэлементов. Существуют и дополнительные функции, связанные с биогеохимическим круговоротом, такие как микробная активность, круговорот питательных веществ, прежде всего биофильных элементов (азот, фосфор, калий и др.), улучшение структуры почвы и активность макро-, мезо- и микрофауны.

Многочисленные современные технологии ферментирования и компостирования органических отходов позволяют готовить высококачественную продукцию в сжатые сроки порядка нескольких недель даже в неблагоприятных биоклиматических условиях. При этом вместо традиционных способов размещения материалов для компостирования на открытом воздухе в виде буртов, компостных куч или ям, используются специальные агрегаты (ферментационные аппараты) с механическим перемешиванием, подачей воды и воздуха (аэрацией), внедрением специальных штаммов микроорганизмов и т. д.

Особый интерес в этой связи представляют технологии вермикомпостирования с использованием сепарационной техники и специальных культур червей, адаптированных к тем или иным видам органических отходов. Копролиты дождевых червей не только обогащаются биофильными элементами, но и в значительной мере (в 1,5–2 раза и более) повышают водоудерживающую способность вмещающего материала почвогрунтов благодаря смешиванию и оструктуриванию минеральных и органических компонентов. Устойчивые к углеводородному загрязнению популяции дождевых червей при определённых гидротермических условиях способны к эффективной ремедиации почв, что положено в основу оригинальной биотехнологии вермикомпостирования нефтезагрязнённых почвенных субстратов с органическими добавками.

Ещё более ценными почвомодификаторами по сравнению с торфонавозными и обогащёнными торфяными компостами являются разнообразные гуминовые удобрения (почвомодификаторы) и препараты, получаемые на основе механической, химической и биохимической обработки каустобиолитного сырья.

Сильнонабухающие полимерные гидрогели достаточно давно и успешно применяются в земледелии и растениеводстве с целью оптимизации неблагоприятных свойств почв. Дальнейшее развитие направления по искусственному оструктурированию и оптимизации физических свойств почв шло по пути селекции наиболее эффективных препаратов из разряда крилиумов и совершенствования технологий их промышленного получения. В результате возник новый класс комбинированных веществ – сильнонабухающие полимерные гидрогели (СПГ) или суперабсорбенты, получаемые на основе синтетических (полиакриламида, полиакриловой кислоты и её солей, гидролизованного полиакрилонитрила и т. д.) и сшитых природных (крахмала, декстрина, целлюлозы, хитозана, альгинатов и др.) соединений. Их отличает в первую очередь чрезвычайно высокая влагоёмкость. Степень свободного набухания гидрогелей может достигать 500–1000 г воды на каждый грамм сухого вещества. Это качество определило перспективность их использования в грубодисперсных почвах и грунтах,

где оптимизация водоудерживающей способности является первоочередной задачей. Особую перспективу представляет применение гидрогелей в аридных климатических условиях [6].

Рассматривая технологические процессы формирования искусственных почв при рекультивации, следует отметить, что традиционно под рекультивацией понимается восстановление плодородия почв до уровня, пригодного для сельского и лесного хозяйства. В последнее время понятие рекультивации несколько изменилось, главным образом за счёт расширения её целей и задач. Современная рекультивация – это формирование устойчивого неоландшафта, соответствующего требованиям почвенно-экологического состояния и имеющего функции почвы, определённые на стадии проектирования. Такое определение предполагает, что результатом рекультивации является создание устойчивого почвенного покрова, способствующего воспроизводству ключевых компонентов экосистемы с определённым уровнем плодородия. В практическом плане результаты почвообразования в техногенных ландшафтах следует рассматривать через почвенно-экологическую эффективность рекультивации, под которой понимается способность почвоподобных тел или образований техногенных ландшафтов выполнять функции, присущие естественным ненарушенным (зональным) почвам на той же территории.

Наиболее перспективным методом очистки почв от нефти является биоремедиация, основанная на способности почвенных микроорганизмов разлагать и утилизировать углеводороды нефти. До сих пор большинство работ, посвящённых биоремедиации нефтезагрязнённых почв, было направлено на получение новых биопрепаратов на основе выделенных штаммов микроорганизмов-деструкторов углеводородов нефти. Однако применение этого метода обычно рекомендуется только для почв с уровнем содержания углеводородов не выше 5 %, а, следовательно, биоремедиация оказывается малоэффективной при решении проблем ликвидации аварийных ситуаций в нефтедобывающих регионах, где концентрации углеводородов нефти в почве значительно превышают указанный уровень.

В этом случае необходимы технологии восстановления природных почв. Нужны другие технологические решения. В частности, применение сорбентов для рекультивации нефтезагрязнённых территорий и воссоздания почв с начальным формированием почвоподобных тел, а затем, по сути, искусственных почвенных конструкций. Даны некоторые примеры рекультивации нефтезагрязнённых территорий и формирования таких почв, проведённые в ИФХиБПП РАН [3].

В целом можно отметить, что искусственные почвы являются, по сути, биофизическими моделями, рассмотрение которых позволяет конструировать такие почвы для самых различных вариантов их функционального использования [2].

Заключение. Таким образом, на базе созданной обобщающей концепции формирования искусственных почв, которая основана на пионерных исследованиях по моделированию влаго- и солепереноса в почвах, проведённых в Институте агрохимии и почвоведения АН СССР (ныне Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН) в 1970-ые гг., и разработках биогеохимических природоподобных технологий для воссоздания природной биогеохимической цикличности [9], возможно сформулировать два основных технологических приёма для конструирования искусственных почв: моделирование почвенных процессов и применение результатов моделирования к технологиям создания функциональных горизонтов искусственных почв. Применимость таких почв достаточно широка, так же, как и варианты их функционального использования.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках договора с НИЦ Курчатовский институт № ЕП-109-3-25-223-2076 от 6 октября 2025 г. на выполнение научно-исследовательских работ по теме «Технология производства искусственных почв» в 2025–2027 гг. в рамках реализации мероприятий программы развития центра «Высокотехнологичная биоэкономика» (соглашение с Минобрнауки России от 27.06.2025 № 075-15-2025-578).

Литература

1. Башкин В.Н. Инновационные биогеохимические технологии: рекультивация и ремедиация импактных экосистем // *Иноватика и экспертиза*. 2025. Вып. 1 (39). С. 193–204.
2. Башкин В.Н., Алексеев А.О. Технологии биогеохимического инжиниринга для создания искусственных почв // *Биофизика*. 2025. № 6. С. 1132–1142. DOI: 10.7868/S3034527825060104
3. Васильева Г.К., Михедова Е.Е., Стрижакова Е.Р., Ахметов Л.И. Разработка метода сорбционной биоремедиации нефтезагрязнённых минеральных почв Северо-Западной Сибири на примере подзола иллювиально-железистого // *Biologia et Biotechnologia*. 2024. № 1 (3) (<https://doi.org/10.61847/pbcras.bbt.2024.1.3>).
4. Прокофьева Т.В., Герасимова М.И., Безуглова О.С., Бахматова К.А., Гольева А.А., Горбов С.Н., Жарикова Е.А., Матинян Н.Н., Наквасина Е.Н., Сивцева Н.Е. Введение почв и почвоподобных образований в классификацию // *Почвоведение*, 2014. № 10. С. 1155–1164. DOI: 10.7868/S0032180X14100104.
5. Смагин А.В. Теория и практика конструирования почв. М.: Изд-во Московского ун-та, 2012. 544 с.
6. Смагин А.В. Синтетические гелевые структуры в грунтах и грунтовых конструкциях. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, Ин-т лесного хозяйства РАН, 2020. 556 с.
7. Умарова А.Б., Бутылкина М.А., Гасина А.И., Лютикова А.И., Шнырев Н.А. Трансформация водоудерживающей и транспортной функций искусственных почв в условиях г. Москвы // *Вестник Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение*. 2024. Т. 79, № 4. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-4-14-25.
8. Araujo F.S.M.; Taborda-Llano I.; Nunes E.B.; Santos R.M. Recycling and Reuse of Mine Tailings: A Review of Advancements and Their Implications // *Geosciences*. 2022. 12, 319 (<https://doi.org/10.3390/geosciences12090319>).
9. Bashkin V. (ed.). Biogeochemical technologies for managing pollution in polar ecosystems. *Environmental Pollution*. V. 26. Switzerland: Springer, 2016. 219 pp.
10. Deeb M., Groffman P.M., Blouin M., Egendorf S.P., Vergnes A., Vasenev V., Cao D.L., Walsh D., Morin T., and Séré G. Using constructed soils for green infrastructure – challenges and limitations // *Soil*. 2020. 6. P. 413–434 (<https://doi.org/10.5194/soil-6-413-2020>).
11. Yilmaz D., Cannavo P., Séré G., Vidal-Beaudet L., Legret M., Damas O., Peyneau P.E. Physical properties of structural soils containing waste materials to achieve urban greening // *J. Soils Sediments*, 2018. 18. P. 442–455.

References

1. Bashkin, V.N., “Innovative biogeochemical technologies: reclamation and remediation of impact ecosystems”, *Innovation and expertise* **1** (39), 193–204 (2025) (in Russian).
2. Bashkin, V.N., Alekseyev, A.O., “Technologies of biogeochemical engineering for the creation of artificial soils”, *Biophysics* **6**, 1132–1142 (2025). DOI: 10.7868/S3034527825060104 (in Russian).
3. Vasilyeva, G.K., Mikhedova, E.E., Strizhakova, E.R., Akhmetov, L.I., “Development of an Adsorptive Bioremediation Method for Oil-Contaminated Mineral Soils of North-West Siberia by Example of Illuvial-Ferruginous Podzol”, *Biologia et Biotechnologia* **1** (3) (2024) (<https://doi.org/10.61847/pbcras.bbt.2024.1.3>).
4. Prokofieva, T.V., Gerasimova, M.I., Bezuglova, O.S., et al., “Introduction of soils and soil-like formations into the classification”, *Soil Science* **10**, 1155–1164 (2014). DOI: 10.7868/S0032180X14100104 (in Russian).

5. Smagin, A.V., *Theory and Practice of Soil Engineering* (Moscow: Moscow University Press, 2012) (in Russian).
6. Smagin, A.V., *Synthetic Gel Structures in Soils and Soil Structures* (Lomonosov Moscow State University, Institute of Forestry, Russian Academy of Sciences, 2020) (in Russian).
7. Umarova, A.B., Butylkina, M.A., Gasina, et al., “Transformation of the Water-Retention and Transport Functions of Artificial Soils in Moscow Conditions”, *Bull. of Moscow University. Series 17. Soil Science* **79** (4) (2024). DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-4-14-25 (in Russian).
8. Araujo, F.S.M., Taborda-Llano, I., Nunes, E.B., et al., “Recycling and Reuse of Mine Tailings: A Review of Advancements and Their Implications”, *Geosciences* **12**, 319 (2022) (<https://doi.org/10.3390/geosciences12090319>).
9. Bashkin, V. (ed.), “Biogeochemical technologies for managing pollution in polar ecosystems”, *Environmental Pollution* **26** (Springer: Switzerland, 2016).
10. Deeb, M., Groffman, P.M., Blouin, M., et al. “Using constructed soils for green infrastructure – challenges and limitations”, *Soil* **6**, 413–434 (2020) (<https://doi.org/10.5194/soil-6-413-2020>).
11. Yilmaz, D., Cannavo, P., Séré, G., et al., “Physical properties of structural soils containing waste materials to achieve urban greening”, *J. Soils Sediments* **18**, 442–455 (2018).