

## **Концепция биологической рекультивации с использованием техногенного грунта из коммунальных отходов**



**В статье приводится описание основных подходов, применяемых в рекультивации полигонов твердых коммунальных отходов на территории России. Приводится принципиальная методологическая ошибка нормативных требований к защитным сооружениям полигонов ТК и ПО.**

**В условиях полевого опыта на полигоне твердых бытовых отходов изучена пригодность техногенного грунта, полученного аэробным компостированием отсевов грохочения твердых коммунальных отходов при их сортировке, для использования при рекультивации полигона в качестве плодородного грунта. Изучены агрохимические показатели техногенного грунта и его температурный режим в пределах корнеобитаемого слоя. Проведены исследования по подбору ассортимента трав, наиболее эффективных для задержания исследуемого субстрата. Выявлены существенные различия по эксплуатационным характеристикам у однолетних и многолетних злаковых трав. Особенно перспективны овсяница красная сорт Шилис и овсяница луговая сорт Шведская, которые сформировали плотный травостой, выделяющийся красивой зеленой окраской вплоть до наступления зимних холодов. Установлено, что в травах, выросших на техногенном грунте, содержание тяжелых металлов и нитратов не превышает нормативы для кормовых трав.**

**Малюхин Дмитрий Михайлович**  
Главный эколог ООО «Новый Свет-ЭКО»

**Бакина Людмила Георгиевна**

Заведующая лабораторией методов реабилитации техногенных ландшафтов НИЦЭБ РАН - СПб ФИЦ РАН, д.б.н.

**Лоскутов Святослав Игоревич**

Генеральный директор ООО НПО «БиоЭкоТех»

**Пухальский Ян Викторович**

Инженер-микробиолог ФГБНУ ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии, инженер ООО НПО «Био-ЭкоТех»

**Милютин Наталья Олеговна**

Аспирантка СПбГУ, Институт наук о Земле, каф. Экологической геологии

**Подлипский Иван Иванович**

Доцент РГПУ им А.И. Герцена, доцент СПбГУ каф. Прикладной экологии, к.г.-м.н.  
[primass@inbox.ru](mailto:primass@inbox.ru)

**Нагиев Талех Балага оглы**

Инженер Ленинградского НИИСХ «Белогорка»

**Поздняков Виктор Алексеевич**

Руководитель отдела селекции и первичного семеноводства многолетних трав Ленинградского НИИСХ «Белогорка», д с.-х н.

**Поздняков Алексей Викторович**

Старший научный сотрудник отдела селекции и первичного семеноводства многолетних трав Ленинградского НИИСХ «Белогорка»

Обращение с отходами является одной из основных экологических проблем, которая ни в одной стране мира не решена окончательно [10]. В последние годы в России, как и во всем мире, наблюдается неуклонный рост образования твердых коммунальных (бытовых) отходов (ТКО). Ежегодно в России образуется порядка 35-40 млн тонн ТКО, и, согласно данным Росприроднадзора, только 4-5% из них вовлекаются в переработку, а остальное размещается на полигонах ТКО и несанкционированных свалках [9, 12], несмотря на то, что такой вид обращения с отходами является наименее предпочтительным согласно принятой иерархии методов [10]. Поэтому полигоны будут оставаться основным способом обращения с ТКО в ближайшие 15-20 лет [9, 10] и активное накопление отходов в природной среде продолжится.

Все вышеизложенное в полной мере относится и к городу Санкт-Петербург, на территории которого, по сведениям Росприроднадзора, производится порядка 2 млн тонн ТКО в год, а в Ленинградской области – 900 000 тонн. При этом, для приема этих отходов в Ленинградской области официально существуют около 15 полигонов [10].

Анализ практики складирования ТКО свидетельствует о том, что полигоны ТКО являются источниками длительного негативного воздействия на окружающую среду. Известно, что не только несанкционированные свалки, но и полигоны – комплексы сооружений природоохранного назначения, предназначенные для размещения, изоляции и

обезвреживания отходов – могут создавать опасность загрязнения окружающей среды [10, 12].

В соответствии с действующей на территории Российской Федерации нормативной базой (Постановление Правительства РФ №800, от 10.07.2018), завершающим этапом эксплуатации полигонов, направленным на обеспечение санитарных и экологических требований, является рекультивация, которая представляет собой «мероприятия по предотвращению деградации земель и (или) восстановлению их плодородия посредством приведения земель в состояние, пригодное для их использования в соответствии с целевым назначением и разрешенным использованием, в том числе путем устранения последствий загрязнения почвы, восстановления плодородного слоя почвы и создания защитных лесных насаждений».

### **Методология концепции рекультивация полигонов ТКО как эколого-геологических систем**

Полигоны – это специальные сооружения, предназначенные для изоляции и обезвреживания ТКО. Они должны гарантировать санитарно-эпидемиологическую безопасность населения. На полигонах обеспечиваются статическая устойчивость ТКО с учетом динамики уплотнения, минерализации, газовыделения, максимальной нагрузки на единицу площади, а также возможности последующего рационального использования участка после закрытия полигонов, в зависимости от направления рекультивации.

Основной задачей по устройству и возведению полигона является создание необходимых условий для обеспечения защиты окружающей среды, заключающихся в применении инженерных и технических решений, гарантирующих экологическую безопасность района проектирования полигона. Таким образом, основное назначение полигонов – это максимально возможная изоляция их содержимого (отходов) от окружающей среды на неограниченное (фактически бесконечное) время.

Если рассматривать полигон как термодинамическую систему, то по первому закону термодинамики – математическому выражению количественной стороны закона сохранения и превращения энергии – внутренняя энергия системы является однозначной функцией ее состояния и изменяется только под влиянием внешних воздействий: полигон на стадии окончательной рекультивации представляет собой концентрат (аккумулятор) огромного количества энергии химических связей сложных органических и минеральных веществ. Согласно второму закону термодинамики, устойчивыми являются только системы с низкой энтропией, т.е. основным способом достижения которой является постоянное и эффективное рассеивание легко используемой энергии (энергии окисления органических и минеральных веществ массы отходов). Отсюда следует, что абсолютно изолированная термодинамическая система с большим запасом потенциальной энергии, стабильно существовать продолжительное время не может. В этом заключается принципиальная методологическая ошибка нормативных требований к защитным сооружениям полигонов ТК и ПО, возведение которых рекомендуется рядом нормативных документов.

Логично будет предположить, что устойчивость полигонов ТК и ПО можно значительно повысить, если в комплексе защитных инженерных сооружений предусмотреть внедрение системы контролируемого забора энергии в виде веществ (газ, фильтрат) и (или) тепловой энергии.

Основным продуктом энергетического обмена полигона ТБО с окружающей средой является жидкая фаза отходов (фильтрат), которая образуется за счет инфильтрации атмосферных осадков и перехода в подвижную форму растворимой части бытового мусора.



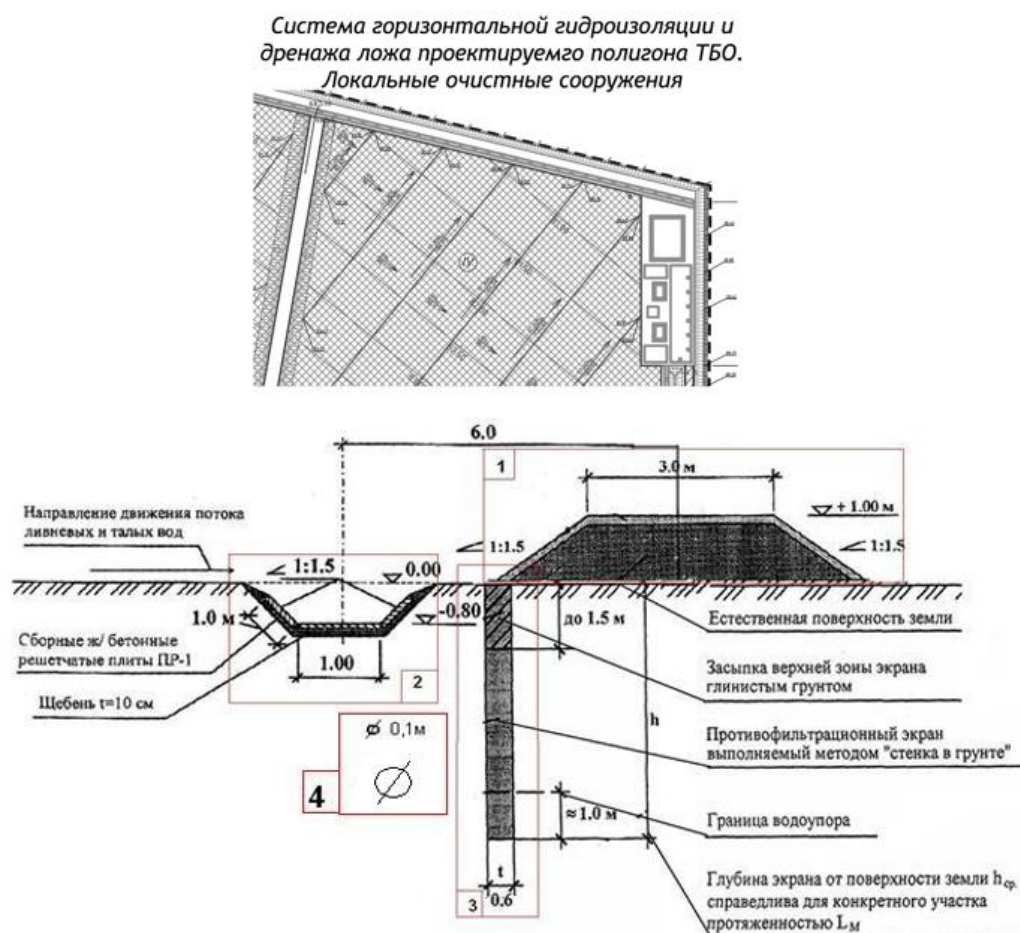
Химический состав отжимной жидкости сильно изменяется в зависимости от возраста полигона и от сезона года [10].

Система сбора фильтрата рассчитывается и устанавливается до начала приема отходов, на поверхность защитного экрана ложа полигона и состоит из (рис. 1):

- сети перфорированных труб;
- магистрального трубопровода, который должен открываться в заранее установленную (на этапе сооружения защитного экрана) на ложе полигона емкость, из которой, по мере её заполнения, фильтрат откачивается на поверхность.

Дальнейший его путь может быть следующим: либо рециркуляция, либо очистка на локальных очистных сооружениях. Для приведения в соответствие второго способа утилизации фильтрата всем природоохранным нормам необходимы большие капиталовложения и сложные инженерные сооружения, поэтому чаще применяют рециркуляцию фильтрата – поливают (орошают) им массу ТКО на полигоне, предварительно стабилизировав кислотно-щелочной баланс буферными системами.

Такой способ утилизации отжимной жидкости бытовых отходов приводит к снижению токсичности, уменьшению объема (за счет испарения при орошении массы отходов) и ускорению биохимического разложения (за счет увеличения влажности отходов, стабилизации рН растворов внутри полигона, возвращения в зону реакции питательных биофильных элементов (N, P, K, Na) и т.д.), но не решает проблему полностью.



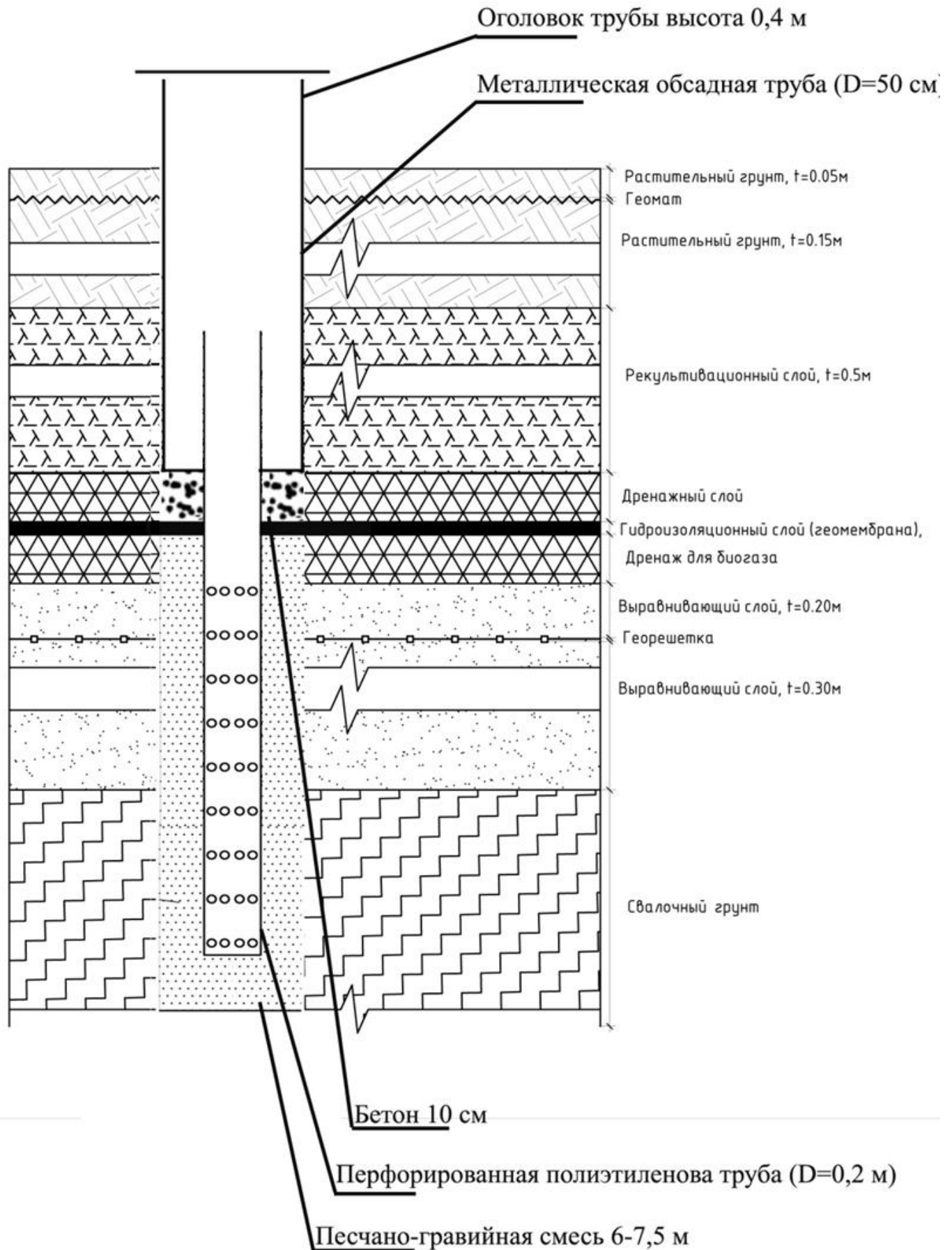
**Рис. 1.** Пример конструкции дренажной системы полигона ТКО и кольцевых защитных сооружений зоны складирования [10]: 1 – дамба обвалования; 2 – система сбора ливневых и талых вод; 3 – противофильтрационный экран («стенка в грунте»); 4 – дренаж

Структура комплекса активной дегазации ТКО разработана и опробована в странах Западной Европы и США и состоит она из перфорированных горизонтальных и вертикальных труб (коллекторов), устанавливаемых в тело полигона в момент заключительного перекрытия отходов (и/или в процессе послойного заполнения), а также насосной станции и комплекса очистки газа от примесей (состав биогаза может насчитывать около 50 примесей, в основном  $H_2O$ ,  $CO_2$  и  $NO_2$ ). Газ в дальнейшем можно использовать в качестве источника тепловой энергии и электричества. Потенциальная газопродуктивность тонны смешанных ТКО – 120-200 м<sup>3</sup> [10], причем время стабильной газогенерации составляет около 10-50 лет.

Пассивные методы дегазации основываются на природных процессах конвекции и диффузии и устанавливаются в местах низкого газообразования и отсутствия перемещения газа. Не применяются для полигонов с внутренними изолирующими слоями и емкостью более 40 000 т, для старых хранилищ ТКО с невысоким уровнем выделения биогаза или для полигонов с высоким уровнем фильтрата.

Скважины для пассивной дегазации монтируются после закрытия полигона (рис. 2), путем устройства буровых колодцев диаметром 50 см до отметки 6-7,5 м от поверхности рекультивированного полигона, в которые помещается перфорированная полиэтиленовая (или поливинилхлорида, полипропилена высокой плотности, стеклопластика) труба, диаметром 20 см. Пространство между трубой и стенками скважины послойно заполняется песчано-гравийной смесью с послойным уплотнением, с крупностью скелетной фракции 20-40 мм и с минимальным количеством пылевых частиц (не более 10%), с содержанием карбонатов менее 10%, до отметки – 0,75 м, бетоном до отметки – 0,65 м. Перфорация выполняется сверлом 18 мм по окружности через каждые 600 мм, отверстия расположены в шахматном порядке на расстоянии 50-100 мм друг от друга.

В массиве рекультивируемого слоя выше горизонтальной гидроизоляции устанавливается металлическая (или тонкостенная железобетонная) труба диаметром 50 см. На поверхности монтируется оголовок с антивандальной системой и крышкой с пассивной вытяжной вентиляцией, препятствующей попаданию дождевой воды в колодец. Площадь вокруг скважины на расстоянии 1,5-2 м изолируется глинистыми грунтами мощностью около 0,3-0,4 м для обеспечения крепления скважины и предотвращения проникновения внутрь скважины поверхностных вод.



**Рис. 2.** Пример конструкции газоотводящей скважины пассивной дегазации свалочных грунтов [10]

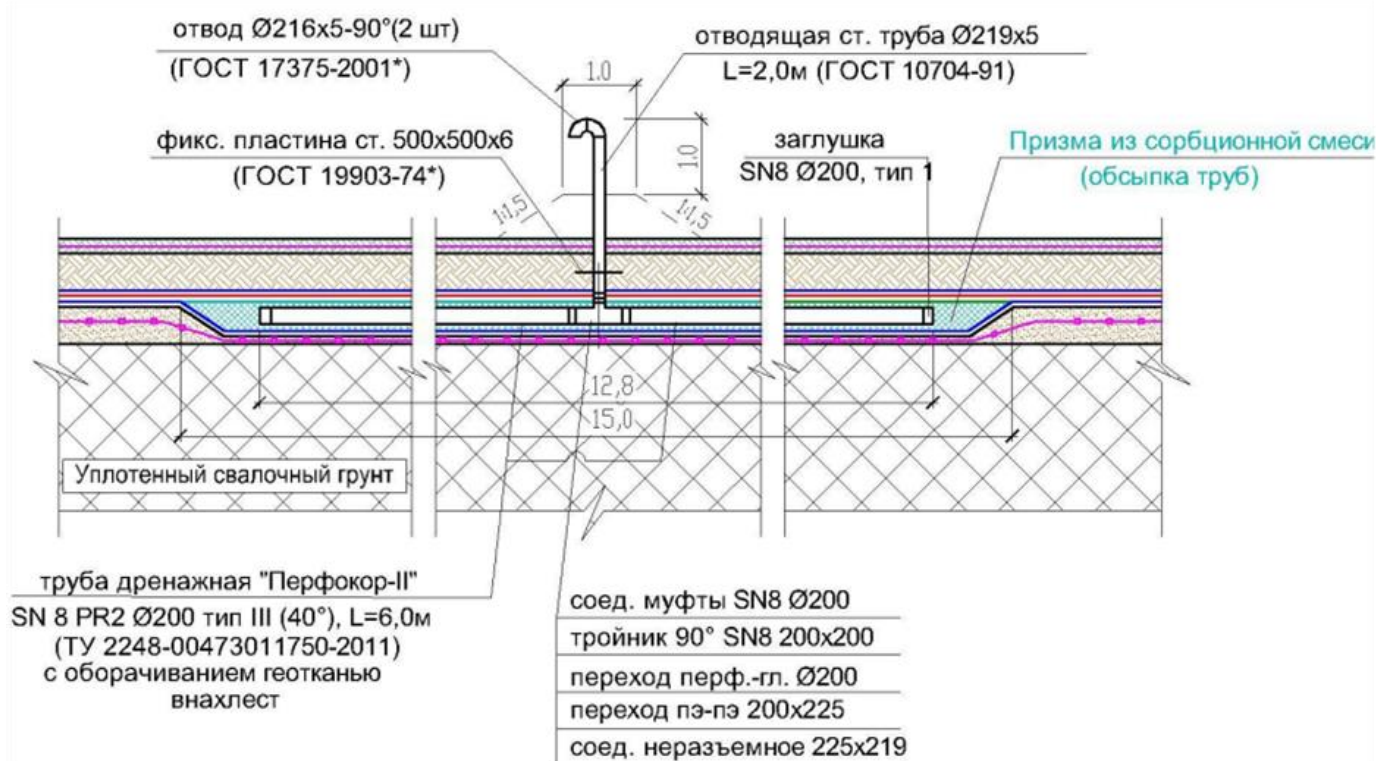


Глубина газодренирующей скважины обоснована возможным капиллярным поднятием фильтрата выше максимального уровня залегания и попадания в ствол, что может привести к интенсификации микробиологических процессов и кольматажу отверстий в стволе, что понижает газоприток и в конечном итоге выводит скважину из строя.

Расчетное количество скважин должно согласовываться с данными «Методики по расчету образования биогаза и выбору систем дегазации на полигонах захоронений твердых бытовых отходов» (М., 2003) и ТСН 30-308-2002, согласно которым количество дегазационных скважин (газовыпусков) назначается из расчета 1 скважина на 7500 м<sup>3</sup> отходов, а общее необходимое количество – не более 2-х на гектар свалочного тела.

С целью исключения возможности латеральной миграции газообразной фазы из свалочного тела через неизолированное ложе полигона необходимо предусмотреть дегазацию с помощью метаноокисляющих изолирующих покрытий (биофильтров). Работа биофильтра основана на способности метанотрофных микроорганизмов использовать метан в качестве источника энергии и углерода, и полностью разлагать метан на оксид углерода и воду. В качестве окислительных биофильтров могут использоваться торф, опил, компост или соответствующим образом подготовленный техногенный грунт из компоста ТКО.

Биофильтр представляет собой трапециевидную призму из сорбционного материала под слоем поверхностного изоляционного слоя с размерами: ширина по низу – 1,8 м, ширина по верху – 0,6 м, высота – 0,4 м с уложенной дренажной трубой диаметром 200 мм, обернутой в геоткань и имеющей вертикальный отводящий трубный выпуск сквозь изоляционное покрытие. Примерный внешний вид конструкции биофильтра представлен на рисунке 3.



**Рис. 3.** Схема конструкции метаноокисляющего биофильтра

Согласно современным нормативным документам, в частности постановлению правительства РФ №800, рекультивация включает в себя два этапа: технический и биологический. Технический этап рекультивации включает формирование откосов с нормативными углами наклонов, строительство дренажных систем, дегазацию, планировку поверхности с созданием рекультивационного многофункционального покрытия и другие

операции. Завершается технический этап рекультивации нанесением, формированием и планированием плодородного слоя, и здесь сразу же появляется одна из основных экологических и экономических проблем при рекультивации – дефицит почвогрунтовых ресурсов для создания рекультивационных покрытий. Известно, что для рекультивации 1 га полигона требуется до 10 тыс. м<sup>3</sup> почвенно-растительного грунта, что соответствует нарушению 5 га природных земель, то есть до 5 раз может быть превышена площадь рекультивируемого объекта [4]. С целью экономии природных ресурсов и ускорения биологических процессов при проведении рекультивационных работ почва может быть заменена органомными субстратами из отходов производства и потребления. Общеизвестным является факт высокого биологического потенциала органической фракции ТКО, а технология переработки отходов методом компостирования позволяет получать компост, близкий по своим свойствам к традиционным органическим удобрениям. С точки зрения авторов, наиболее рациональным и доступным является получение из органической части ТКО техногенного грунта и последующее использование его в качестве плодородного грунта при эксплуатации и рекультивации полигонов и других нарушенных земель.

В настоящее время авторами разработана технология использования техногенного грунта из органической части ТКО в качестве перекрывающего/изолирующего/плодородного материала в технологических циклах эксплуатации и рекультивации полигонов [8]. Несмотря на эффективность и перспективность подобного направления утилизации органической части ТКО, подобные работы практически не проводятся на других полигонах. Небольшое количество данных, подтверждающих эффективность и экологическую безопасность применения подобных субстратов (компостов/грунтов техногенных) при эксплуатации и рекультивации полигонов и других нарушенных земель, ограничивало до настоящего времени широкое внедрение подобных технологий, что, на взгляд авторов, требуется изменить в кратчайшие сроки.

Биологический этап рекультивации предусмотрен всеми действующими в настоящее время нормативными документами, и в большинстве случаев применение биологического этапа совершенно необходимо, так как процессы самозарастания могут растянуться на несколько десятков лет. Так, Л.С. Застенским [5] для условий Белоруссии выявлено, что при формировании рекультивационного слоя из минеральных суглинистых грунтов процессы гумусообразования происходят очень медленно, и за 15 лет образуется лишь 1,5-2 см сплошного гумусового горизонта. В экстремальных условиях северных регионов эти процессы еще более затруднены, и без специальных мероприятий биологического этапа рекультивации восстановление нарушенных ландшафтов практически не происходит [1].

Одной из наиболее важных операций последующего биологического этапа является подбор ассортимента многолетних трав, который наряду с другими мероприятиями (подготовка и обработка почвы, посев трав и уход за посевами), обеспечивает наиболее активное зарастание рекультивируемой поверхности и формирование экологически безопасных экосистем на территории бывшего полигона ТБО.

В связи с этим основной целью данной работы явилось изучение эффективности применения техногенных грунтов из органической части ТКО в качестве плодородного грунта на заключительной стадии технического этапа и подбор ассортимента травянистых и древесных растений для этого субстрата на биологическом этапе рекультивации полигона ТКО.

## **Объекты и методы**



Полевой эксперимент, результаты которого излагаются в данной работе, был проведен на опытной площадке полигона «Новый Свет-ЭКО» в Гатчинском районе Ленинградской области. Техногенный грунт, использованный в эксперименте в качестве плодородного слоя, являлся продуктом утилизации отсева грохочения ТК0 при аэробном полевом компостировании в буртах на специально оборудованной площадке на полигоне. Он применялся при достижении состояния зрелости после 6 месяцев компостирования. Основные агрохимические показатели грунтов техногенных определяли дважды – перед закладкой опыта и в конце вегетационного сезона, после учета биомассы. При лабораторных исследованиях пользовались общепринятыми методами [13]. Содержание органического углерода определяли методом Тюрина, подвижные формы фосфора и калия определяли в вытяжке Кирсанова, фосфор – колориметрически по Дениже, калий – на пламенном анализаторе ПАЖ-2. Подвижные формы азота определяли фотоколориметрическим методом, нитратный азот – с дисульфифеноловой кислотой, аммонийный – с реактивом Несслера. Содержанию тяжелых металлов определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой.

Температуру субстратов измеряли в течение вегетационного сезона с апреля по октябрь почвенным термометром на глубине корнеобитаемого слоя (15-20 см) в пределах каждой опытной площадки в 6-8 точках в дневное время (с 12 до 15 час). Измерения проводили один раз в неделю.

Закладку опытов по подбору травянистых и древесных растений, проведение биометрических учетов и наблюдений осуществляли согласно методическим указаниям, разработанным во Всероссийском институте кормов им. В.Р. Вильямса. Площадь опытных делянок 6 м<sup>2</sup>. В опытах на полигоне были использованы следующие виды растений: овсяница луговая сорт Шведская; овсяница красная сорт Шилис; райграсс однолетний Изорский; райграсс пастбищный Ленинградский 809; клевер луговой Волосовский. Из семян этих видов были составлены смеси, состав которых был следующим:

Смесь 1 – овсяница красная 50% + клевер луговой 50%;

Смесь 2 – райграсс пастбищный 50% + клевер луговой 50%;

Смесь 3 – овсяница красная 30% + клевер луговой 70%;

Смесь 4 – райграсс пастбищный 50% + клевер луговой 25% + овсяница красная 25%;

Смесь 5 – райграсс пастбищный 50% + овсяница красная 50%;

Смесь 6 – овсяница красная 50% + клевер луговой 25% + райграсс однолетний 25%;

Смесь 7 – райграсс пастбищный 50% + райграсс однолетний 50%.

Норма высева 2,5 г/м<sup>2</sup>.

На опытных делянках с посевом травяных смесей проводили два укоса – в середине лета (20 июля) и в конце (17 августа). При этом были проведены следующие биометрические замеры: определена надземная биомасса растений (сырая), измерена средняя высота и оценена плотность посевов, общее проективное покрытие, высота растений и их мощность в баллах. Оценку мощности травостоя проводили глазомерно по 5-балльной шкале. Так же при общей оценке учитывали облиственность, кустистость, выравненность и густоту стояния посевов. Кроме травяных смесей были проведены монопосевы следующих видов растений: овсяница красная, овсяница луговая, клевер луговой. А также в дополнение к основному опыту были заложены монопосевы следующих видов растений: фацелия рязанская, синяк обыкновенный, козлятник восточный, овес и горчица белая для оценки их всхожести и декоративности.

В качестве контроля были оставлены делянки под самозарастание.

Наряду с травами были испытаны два вида древесных растений – сосна *Pinus sylvestris* и тополь (гибридные формы) *Populus sp.* Их высаживали в количестве 81 шт. на делянку.

Состояние саженцев оценивали в конце вегетационного сезона по выживаемости и внешнему виду.

Статистическую обработку экспериментальных данных осуществляли с помощью программ анализа данных AtteStat (версия 12.5). Для визуализации исходных данных и результатов их статистического описания использована программа PAST (версия 3.21). Сравнение вариационных рядов двух независимых групп выполняли с применением критерия Манна-Уитни. Аналитическая повторность – четырехкратная. Различия считали значимыми при  $p < 0,05$ .

### Результаты и обсуждение

Известно, что пригодность субстратов в качестве плодородного грунта для продуктивного роста растений определяется прежде всего их агрохимическими свойствами. В этой связи были проведены исследования грунтов техногенных, используемых в эксперименте в качестве плодородного слоя, которые позволили дать его агрохимическую характеристику (табл.1).

**Табл. 1.** Агрохимические свойства грунтов техногенных в начале и конце опыта в сравнении с фоновой дерново-подзолистой почвой

Субстрат	Срок отбора	рН	C <sub>орг</sub> , %	N <sub>общ</sub> , %	C:N	Содержание подвижных питательных элементов, мг/100 г			
						P	K	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>
Грунт техногенный	Май	6,9	11,5	0,52	20,4	340±15*	390±35	24±2	32±6
	Сентябрь	7,1	11,0	0,56	19,6	350±20*	275±32	17±4	31±6
Почва	Май	5,5	2,5	0,17	14,7	25±5	20±5	25±3	30±5
	Сентябрь	5,6	2,5	0,16	15,6	22±3	19±4	21±2*	31±4

Примечание: \* $p < 0,05$  для различий между грунтом и почвой на таком же сроке

Установлено, что техногенный грунт является весьма благоприятным в агрохимическом отношении субстратом для произрастания растений, а по содержанию питательных веществ существенно превосходит фоновую дерново-подзолистую почву. Так, максимальное содержание органического углерода (11% и более) наблюдается в техногенных грунтах, в дерново-подзолистой почве содержание органического углерода достигает 2,5%. Техногенный грунт характеризуется нейтральной реакцией среды (рН=7,0±1,0) в отличие от слабокислой почвы с рН 5,5±1,0; высоким содержанием органического углерода, а также основных питательных элементов – азота, фосфора и калия. По содержанию фосфора и калия техногенный грунт превышал аналогичные показатели в почве на порядок; азот аммонийный и азот нитратный содержались в сопоставимых с почвой количествах, однако содержание общего азота, а, следовательно, и его запасы, были в исследуемом субстрате более чем в 3 раза выше, чем в почве. Сравнение агрохимических показателей в начале эксперимента и в конце (осенью, после учета биомассы) с комплексными нормативами (ПДК) позволило сделать вывод о том, что в течение вегетационного сезона эти показатели практически не изменились.

При проведении визуальных оценок травостоев на опытных делянках были зафиксированы изменения развития у многолетних бобовых и злаковых по сравнению с тем, что свойственно региону проведения эксперимента: снижение темпов развития в первой

половине вегетации и ускорение развития во второй половине. В какой-то степени эти изменения аналогичны особенностям развития травянистых растений на засоленных (солонцеватых) почвах южных районов страны, и, вероятно, могут быть связаны с повышенной степенью минерализации грунтовых растворов в техногенных грунтах. Этим же, по-видимому, можно объяснить и выявленное в эксперименте более активное образование биомассы злаковых (райграсов и овсяниц) по сравнению с бобовыми: известно, что солеустойчивость у злаковых выше, чем у бобовых [15].

Неоднократно высказывалась мысль, что солеустойчивость сортов и видов растений связана с экологическими (в частности, почвенно-климатическими) условиями места их происхождения и основного ареала возделывания. Более высокая солеустойчивость злаковых по сравнению с бобовыми может объясняться в значительной степени тем, что центрами происхождения и формирования многих из них являются аридные районы Северной Африки и Юго-Восточной Азии, отличающиеся значительным распространением засоленных земель.

Выявленные особенности развития изучаемых травянистых растений привели к тому, что во время первого учета зеленой массы (выход в трубку-колошение злаковых трав) только посевы двух видов райграса достигли укосной спелости (табл.2).

**Табл. 2.** Хозяйственно ценные признаки травостоев и древесных растений, вегетационный сезон 2017 г.

Варианты	Виды растений в смеси	1-й укос, 20.07.2017				2-й укос, 17.08.2017			
		Масса, (кг/м <sup>2</sup> )	Высота (см)	Плотность (%)	М**	Масса (кг/м <sup>2</sup> )	Высота (см)	Плотность (%)	М*
Смесь 1	Овсяница красная	0,26±0,04	16,4±3,1	95,6	3	0,45±0,07	28,0±5,3	95,0	4
	Клевер луговой	0,13±0,02	8,2±2,2	50,0	1	0,23±0,04	14,4±3,9	48,0	2
Смесь 2	Райграс пастбищный	0,90±0,10*	43,0±7,7	88,0	5	1,12±0,12*	70,2±12,6	90,0	5
	Клевер луговой	0,13±0,04	8,2±2,1	50,0	1	0,20±0,06	12,2±3,1	47,0	2
Смесь 3	Овсяница красная	0,21±0,07	13,1±3,7	96,0	2	0,32±0,11	20,0±5,6	80,0	4
	Клевер луговой	0,13±0,04	8,2±3,8	96,0	1	0,19±0,06	11,8±5,5	45,0	2
Смесь 4	Райграс пастбищный	0,25±0,05*	15,4±3,7	92,0	5	0,89±0,18*	55,8±13,4	95,0	4
	Клевер луговой	0,13±0,05	8,2±2,2	15,4	1	0,23±0,09	14,6±3,9	49	3
	Овсяница красная	0,26±0,06	16,4±4,4	96,0	2	0,35±0,08	21,8±5,8	80,0	2



Смесь 5	Райграс пастбищный	0,43±0,07	26,8±5,8	96,0	5	1,34±0,22	83,8±18,1	90,0	4
	Овсяница красная	0,28±0,06	17,4±2,1	90,0	2	0,43±0,09	26,8±3,2	46,0	1
Смесь 6	Овсяница красная	0,13±0,04	8,2±1,1	92,0	2	0,31±0,10	19,4±2,6	55,0	3
	Клевер луговой	0,13±0,04	8,2±2,1	50,0	1	0,26±0,08	16,0±4,1	45,0	1
	Райграс однолетний	1,10±0,21	111,2±25,7*	90,0	5	1,12±0,21	69,8±16,1*	80,0	4
Смесь 7	Райграс однолетний	1,24±0,30*	104,2±20,8	91,0	5	1,22±0,30*	76,0±15,2	85,0	5
	Райграс пастбищный	1,21±0,28*	104,2±23,4	93,0	5	1,23±0,28	75,0±16,8	85,0	5
Клевер луговой		0,19±0,04	11,8±0,4	40,0	3	0,19±0,04	11,8±0,4	80,0	3
Овсяница красная		0,25±0,05*	15,8±0,8	86,0	4	0,52±0,10*	32,4±1,6	90,0	5
Овсяница луговая		0,45±0,05	28,4±4,4	86,0	5	0,45±0,05	28,4±4,4	95,0	5
Контроль (самозаращение)		1,81±0,211	87,1±16,9	40,0	3	1,28±0,15	125,2±24,3	55,0	4
НСР 0,5		1,1	10,3	8,1	-	1,1	9,6	7,9	-
Х ср.		0,45	29,8	76,7	-	0,59	39,7	71,6	-

Примечания. \* $p < 0,05$  сравнение по укосам \*\* М = мощность (баллы)

Райграс однолетний и райграс пастбищный обеспечили наивысший урожай зеленой массы – 1,24 и 1,21 кг/м<sup>2</sup>, при высоте 104,2 см., соответственно. В двойной смеси с клевером луговым и в тройной – плюс овсяница красная урожай ниже (0,9-1,1 кг/м<sup>2</sup>) при высоте стеблестоя в 43,0-111,2 см. К первому укосу сформировался плотный травостой (88-93%). При втором укосе через месяц по высоте подтянулся клевер луговой, кусты в фазе розетки достигали 11,8-16,0 см высоты. Активный рост овсяницы красной продолжался до выпадения снега в ноябре месяце. Подобные положительные характеристики отмечены и для травостоя овсяницы луговой сорта Шведская. Ко времени первого укоса злаковых трав травостой клевера лугового, как в чистом виде, так и в смесях 1, 3, 4 был развит слабо, что не позволило провести учет зеленой массы растений. Подобное наблюдалось и в травосмеси 5. В конце июня в начальных стадиях роста и развития также была овсяница луговая.

Декоративность и способность формировать крепкий газон на техногенном грунте видами овсяниц – одна из находок данного исследования. Овсяница красная и овсяница луговая – еще слабо окультуренные виды, не затронутые активной селекцией, они оказались вполне эффективными для рекультивации полигона ТКО и для выполнения черновой работы – нивелирования антропогенной нагрузки на среду [11].

Медоносы (фацелия, синяк, горчица) обладали слабой холодостойкостью, при первом слабом морозе (0-2°C) растения пожухли и прекратили рост, проявив, таким образом, малую пригодность для использования их при рекультивации полигона ТБО.

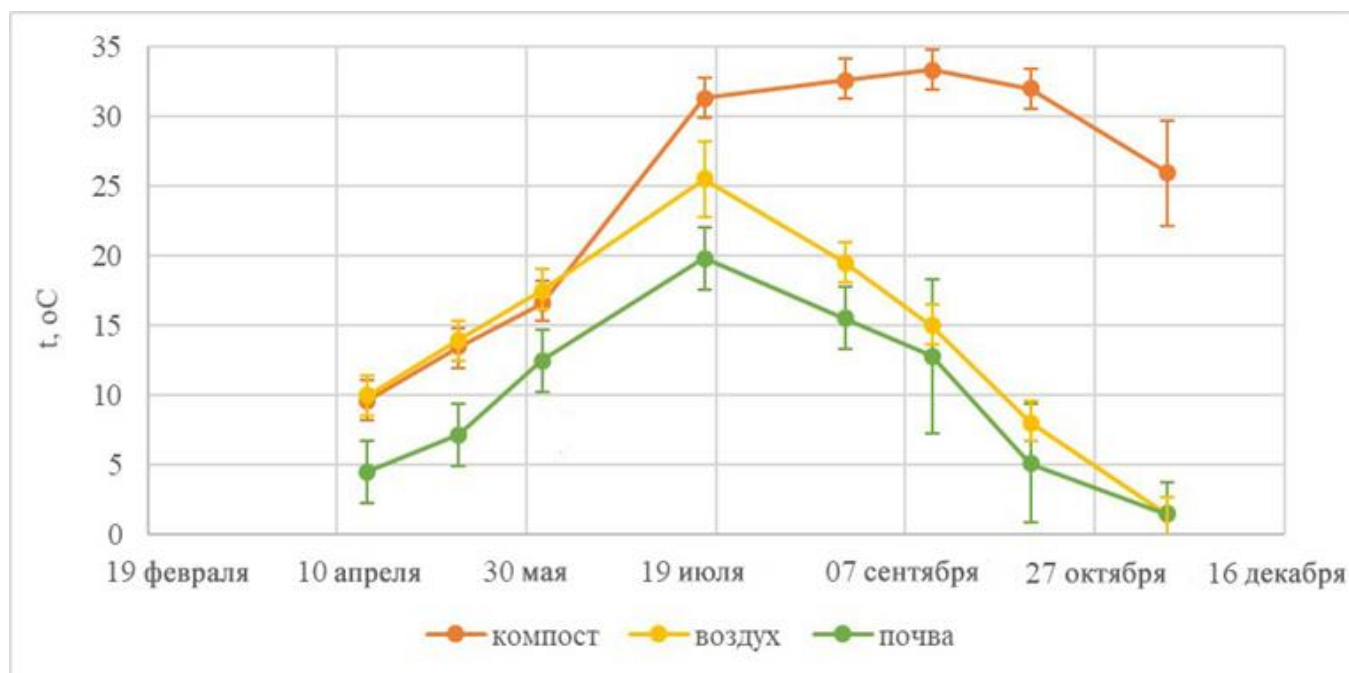
Помимо травянистых растений, были высажены селекционные образцы сосны (*Pinus sylvestris*) и однолетние саженцы и гибридные формы тополя (*Populus* sp.) – 3-е скрещивание Санкт-Петербургской лесотехнической академии. Молодые саженцы прижились у сосны на

29,4% и у тополя на 36,4%. Отмечено засыхание верхушки у отдельных особей молодых саженцев тополя. По этим предварительным результатам использование сосны и тополя в качестве посадочного материала при рекультивации полигонов ТКО путем нанесения грунтов техногенных с посадкой в них вышеприведенных видов малоперспективно и нуждается в дальнейших исследованиях.

Необходимо подчеркнуть, что визуальные наблюдения, проводимые и после 2-го укоса, выявили, что на большинстве опытных площадок активная вегетация продолжалась гораздо дольше обычного, вплоть до ноября. Эта особенность, по нашему мнению, связана со специфическим температурным режимом на полигоне при использовании грунта техногенного в качестве поверхностного слоя, а именно, со значительно более высокими температурами корнеобитаемого слоя по сравнению с фоновыми почвами.

Известно, что органоматричные субстраты (органические удобрения – навоз, помет, бытовые и пищевые отходы, торфокомпосты) при компостировании могут значительно нагреваться вследствие экзотермических реакций. Так, навоз при компостировании в буртах может разогреваться до температуры 60-70°C, на чем основано его обеззараживание от семян сорной растительности и патогенной микрофлоры [14]. Для полигонов ТКО значительное разогревание масс внутри массива отходов и образование биогазов – одна из серьезных экологических проблем. Однако, с другой стороны, в практике овощеводства широко распространены методы выращивания таких культур, как тыквы и кабачки, на компостных «подушках», что обеспечивает для этих теплолюбивых растений оптимальный температурный режим. В этой связи был изучен температурный режим корнеобитаемого слоя грунта техногенного в течение вегетационного сезона, поскольку он является одним из важнейших экологических факторов для роста растений. Сравнения проводили с температурой фоновой почвы, расположенной в непосредственной близости от полигона. Полученные результаты обобщены на рисунке 4.

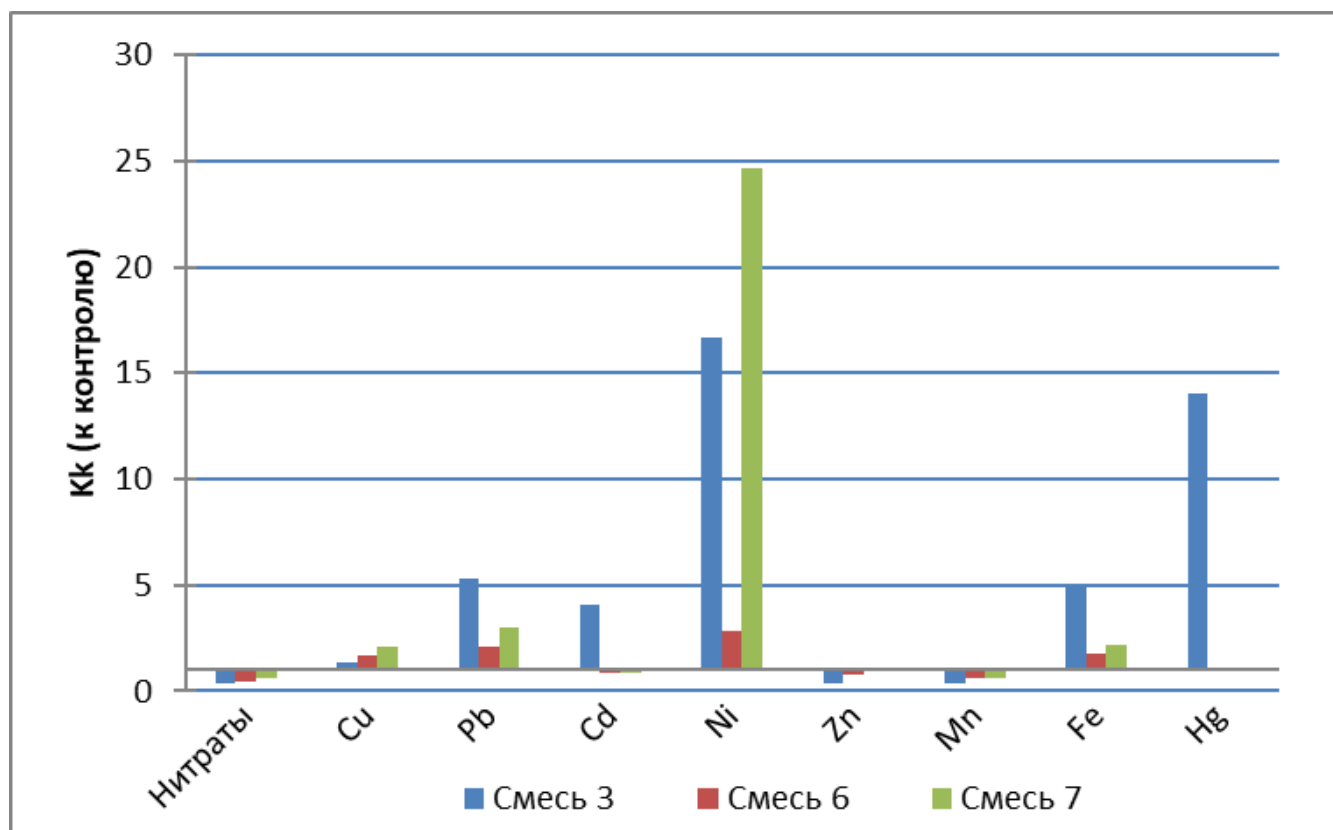
Установлено, что для техногрунта из компоста ТКО свойственен специфический температурный режим, связанный с активным протеканием экзотермических процессов биохимического разложения органического вещества, вследствие чего наблюдалось увеличение температуры корнеобитаемого слоя с середины лета до конца осени, и в октябре она составляла 27-32°C, превышая дневную температуру воздуха на 20-24°C. Такой своеобразный температурный режим позволил продлить вегетационный период злаковых многолетних трав до декабря 2017 г.



**Рис. 4.** Изменение температуры корнеобитаемого слоя техногрунта (компоста из ТБО), воздуха и почвы в течение вегетационного сезона (Примечания. «усы» - минимальное и максимальное отклонения результатов измерения от среднего значения)

Известно, что основным неблагоприятным фактором, препятствующим широкому применению компостов/грунтов техногенных из ТКО в качестве удобрений или плодородного грунта при озеленении, является повышенное содержание тяжелых металлов. Поэтому при использовании этих органических отходов в качестве удобрений или плодородных грунтов при рекультивации или в озеленении санитарно-химические исследования являются обязательными. Проведенными ранее исследованиями [7] было установлено, что все изученные пробы компоста соответствовали нормативам для компостов из ТБО/ТКО. По двум элементам – свинцу (три пробы) и меди (одна проба) отмечено незначительное превышение нормативов для компостов из ТКО – в 1,1-1,3 раза. Тем не менее, в данном эксперименте было сочтено целесообразным оценить экологическую безопасность выросших на исследуемом грунте техногенном трав и определить в них содержание нормируемых санитарными нормами показателей – тяжелых металлов и нитратов, поскольку на объектах с высоким уровнем содержания токсичных элементов необходимо контролировать химический состав естественно произрастающего или искусственно созданного травостоя. Так как использованные в эксперименте культуры потенциально могут рассматриваться как кормовые для сельскохозяйственных животных, сравнение полученных результатов проводили по существующей в РФ системе оценки кормов для сельскохозяйственных животных, а именно: содержание токсичных элементов - по ВМДУ 123-4/281-8-87, а содержание нитратов согласно нормам предельно допустимой концентрации (ПДК нитратов и нитритов в кормах для сельскохозяйственных животных и основных видах сырья для комбикормов, утв. Главным государственным ветеринарным инспектором СССР 18 февраля 1989 г.). В качестве контроля была использована проба трав, отобранная с откоса, отсыпанного грунтом, образовавшимся в результате земляных работ. Полученные результаты представлены на рисунке 5.





**Рис. 5.** Коэффициенты концентрации содержаний тяжелых металлов и  $\text{NO}_3^-$  в биомассе укосов травосмесей 3, 6 и 7 по отношению к контрольной пробе

По результатам анализа диаграммы, данных ВМДУ 123-4/281-8-87 и ПДК нитратов в продуктах питания можно сделать ряд заключений:

- превышений допустимого нормативного уровня содержания определяемых параметров в растительной биомассе укосов с экспериментальных площадок не обнаружено;
- установлено незначительное превышение ПДК нитратов в контрольной пробе (в 1,1 раза), что может быть связано с техногенным происхождением грунта и его загрязнением лабильными группами органических веществ;
- при исследовании не обнаружено кобальта, поэтому выводов по распределению данного тяжелого металла в работе нет. Часть определяемых тяжелых металлов находится ниже пределов обнаружения в контрольных пробах (никель и ртуть), пробах биоматериалов укосов (содержание хрома выше предела только в контроле, а ртути только в смеси №3);
- содержание нитратов, цинка и марганца во всех пробах не превышает контрольное, коэффициент концентрации меньше единицы;
- наиболее загрязненной, относительно контроля, является проба травосмеси №3, ряд металлов по степени превышения контроля в порядке уменьшения –  $\text{Ni}_{16.7} > \text{Hg}_{14.0} > \text{Pb}_{5.3} > \text{Fe}_{4.9} > \text{Cd}_{4.1}$ ;
- все исследуемые образцы характеризуются повышенным содержанием Ni, Pb и Fe.

## Выводы

1. Техногенный грунт /компост из ТКО, использованный в качестве плодородного поверхностного слоя при рекультивации полигона, характеризуется благоприятными агрохимическими свойствами, слабо загрязнен тяжелыми металлами и пригоден для роста и развития травянистых растений.

2. Опыты, проведенные по подбору ассортимента трав для рекультивации полигона ТБО/ТКО, выявили высокую эффективность злаковых растений (райграса пастбищного, райграса однолетнего, овсяницы луговой и овсяницы красной). Особенно перспективными являются овсяницы, особенно сорт Шведская селекции ЛенНИИСХ «Белогорка».
3. Травы, выросшие на техногенном грунте, не превышают допустимых значений по содержанию тяжелых металлов и нитратов и являются экологически безопасными даже при использовании их в сельском хозяйстве.
4. Требуется масштабирование подобного рода исследований, особенно для условий с небогатыми почвами и тяжелыми климатическими условиями, где применение техногенных грунтов позволит нивелировать неблагоприятные условия местопроизрастания окружающей среды.

### **Список литературы**

1. Арчегова И.Б., Панюков А.Н., Кузнецова Е.Г., Ковалева В.А. Роль биологического фактора в процессе формирования почвы в таежной зоне. Вестн. СПбГУ Сер. 3 Биология. 2016; 2:127-39.
2. Бехтин Н.С. Методические указания ВИК по селекции многолетних трав. М.; 1985.
3. Dubrova S.V., Podlipskiy I.I., Kurilenko V.V., Siabato W. Functional city zoning. Environmental assessment of eco-geological substance migration flows. Environmental Pollution. 2015; 197:165-172.
4. Жилинская Я.А. Рекультивация полигонов захоронения твердых бытовых отходов продуктами механо-биологической переработки отходов. Автореф дисс. Канд. Техн. наук. Пермь; 2010.
5. Застенский Л.С. Эколого-агротехнические основы облесения рекультивируемых карьеров. Автореф. дисс. д-ра с.-х. наук Л.; 1983.
6. 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 промышленность России. 2013; 3:40-3.
7. Малюхин Д.М., Бакина Л.Г., Орлова Е.В., Орлова Е.Е. Агроэкологическая оценка органогенных субстратов, используемых при рекультивации полигона ТБО. Агрохимия. 2016; 10:80-8.
8. Малюхин Д.М., Колычев Н.А., Бакина Л.Г., Теплякова Т.Е. Техногенный грунт из органической фракции ТКО. Твердые бытовые отходы. 2018;5(143):40-4.
9. Подлипский И.И. Аккумулятивная биоиндикация в инженерно-экологических изысканиях. Инженерные изыскания. 2014; 1:44-52.
10. Подлипский И.И. Полигоны бытовых отходов как объекты геологического исследования. Вестн. СПбГУ Сер 7 Геол. Геогр. 2010;1:15-31.
11. Поздняков В.А., Бекушева Т.Н., Поздняков А.В. Гармонизация биогеохимических анкетных данных и мест репродукции новых сортов многолетних трав. Труды Кубанского ГАУ. 2016;5(62):101-4.
12. Пронько Н.А., Крашенинников Д.А., Афонин В.В. О восстановлении нарушенных свалками и полигонами земель Саратовской области. Аграрный научный журн. 2017;2:20-3.
13. Соколов А.В., ред. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука; 1975.
14. Тюрин В.Г., Мысова Г.А., Бирюков К.Н., Аббасов Т.Г. Режимы обеззараживания навоза при ускоренном его компостировании. Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. 2012;2(8):58-60.
15. Удовенко Г.В. Солеустойчивость культурных растений. Л.: Колос; 1977.

**Заглавное фото:** TheUjulala с сайта Pixabay