

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*



Милютина Наталья Олеговна

**УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСНЫМ ПОТЕНЦИАЛОМ ТВЕРДЫХ  
КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ  
ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЛИГОНОВ**

25.00.36 - Геоэкология (строительство и ЖКХ)

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор геолого-минералогических наук, профессор

Куриленко Виталий Владимирович

кандидат геолого-минералогических наук, доцент  
Зеленковский Павел Сергеевич

Санкт-Петербург – 2021

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЛИГОНОВ ТКО .....	10
1.1. История обращения с отходами .....	10
1.2. Влияние полигонов ТКО на компоненты геосреды.....	14
1.2.1. Образование и характеристика фильтрата .....	18
1.2.2. Методы очистки фильтрата.....	25
1.3. Механико-биологическая обработка отходов .....	37
1.4. Выводы .....	43
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	45
2.1. Объекты исследования .....	45
2.2. Методы исследования.....	49
2.2.1. Рентгенофлуоресцентный анализ.....	49
2.2.2. Рентгенофазовый анализ.....	50
2.2.3. Сканирующая электронная микроскопия .....	51
2.2.4. Инфракрасная спектроскопия.....	51
2.2.5. Оптическая эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой .....	52
2.2.6. Метод капиллярного электрофореза.....	52
2.2.7. Фотометрический метод анализа .....	53
2.2.8. Титриметрический метод анализа.....	53
2.2.9. Гравиметрический метод анализа .....	53
2.2.10. Потенциометрический метод анализа .....	54
2.2.11. Расчет эффективности сорбционной очистки .....	54
2.2.12. Метод одноосного сжатия.....	54
2.2.13. Токсикологические исследования.....	55
2.3. Выводы.....	55
ГЛАВА 3. МОНИТОРИНГ ПОЛИГОНА ТКО ООО «КОМЭК».....	56
3.1. Анализ состояния почв и растений на прилегающей территории полигона ТКО ООО «КомЭК» .....	56
3.2. Анализ фильтрата, образуемого на полигоне ТКО ООО «КомЭК».....	66

3.3. Выводы .....	68
ГЛАВА 4. ПРОИЗВОДСТВО ТЕХНОГЕННОГО ГРУНТА .....	69
4.1. Ресурсный потенциал мелкой фракции ТКО .....	69
4.2. Компостирование подготовленной мелкой фракции ТКО .....	76
4.3. Выводы .....	78
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ФИЛЬТРАТА МЕТОДОМ ЛИТИФИКАЦИИ .....	79
5.1. Характеристика фильтрата .....	79
5.2. Характеристика сланцевой золы .....	83
5.3. Разработка рецептуры утилизации фильтрата методом литификации ....	86
5.3.1. Рецепт литификата с серной кислотой и сланцевой золой (рецептура № 1) .....	88
5.3.2. Рецепт литификата с сульфатом алюминия и сланцевой золой (рецептура № 2) .....	91
5.4. Исследование характеристик литификата .....	95
5.5. Выводы .....	102
ГЛАВА 6. ЗАМКНУТАЯ СХЕМА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОЛИГОНОВ ТКО .....	103
6.1. Исследование свойств техногенного грунта .....	103
6.2. Сорбционные свойства литификата .....	106
6.3. Технологическая схема производства литификата .....	107
6.4. Экономические показатели производства литификата .....	109
6.5. Закрытая схема управления ресурсным потенциалом ТКО .....	111
6.6. Выводы .....	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	116
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ Д .....	143

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В России в сфере обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) захоронение на полигонах и несанкционированных свалках является преобладающим методом. Объекты захоронения ТКО оказывают длительное воздействие на геосферные оболочки за счет образования и выделения биогаза и фильтрата в результате биогеохимических процессов деструкции депонированных отходов. В результате полигоны ТКО, являясь техногенными объектами, развиваются во времени и пространстве как единое целое в совокупности с компонентами прилегающей геосреды, представляя таким образом природно-техногенные системы (Тупицына О.В., Завизион Ю.В.). В настоящее время в России осуществляется переход на новую систему обращения с отходами, в которой приоритетными направлениями становятся вторичное использование ТКО и внедрение инновационных, ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий обработки, обезвреживания и утилизации отходов. Развитие мусороперерабатывающей отрасли в соответствии с принципами экономики замкнутого цикла направлено на уменьшение количества захораниваемых отходов и преобразование их в стабильные формы, что приводит к снижению геоэкологического воздействия полигонов ТКО. Решение данной задачи требует комплексного подхода, поскольку существующие полигоны продолжают эксплуатироваться, а после достижения своей мощности должны быть рекультивированы, что требует природных ресурсов в виде грунта для изоляции отходов и устройства откосов полигонов. Кроме того, в ходе эксплуатации полигонов образуются отходы деструкции ТКО (фильтрат, биогаз), проблема утилизации которых до конца не решена. В связи с этим актуальным является управление ресурсным потенциалом ТКО путем использования отходов в качестве сырья для производства материалов, необходимых для нужд полигонов, что отвечает принципам циркулярной экономики и снижает техногенную нагрузку полигонов на компоненты геосреды.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблемами геоэкологического воздействия полигонов ТКО, изучением биогеохимических процессов деструкции отходов, очисткой фильтрата и утилизацией биогаза занимаются многие ученые. Большой вклад по данной тематике внесли следующие исследователи: Вайсман Я.И., Федоров М.П., Коротаев В.Н., Гринин А.С., Гонопольский А.М., Рудакова Л.В., Слюсарь Н.Н., Глушанкова И.С. Масликов В.И., Шаимова А.М., Грибанова Л.П., Мирный А.Н., Семин Е.Г., Разнощик, В.В., Серeda Т.Г., Жилинская Я.Т., Галицкая И.В., Подлипский И.И., Негуляева Е.Ю., Систер В.Г., Brunner P., Barlaz M., Christensen T., Cossu R., Stegmann R., Wiszniowski J., Weber J.V., Robinson H.D., Scharff H., Watson-Craik I.A., Senior E., Lee G.F., Bicheno J.R., Hjelmar O. Несмотря на значительное количество, проведенных научных исследований в России и за рубежом, дискуссионным вопросом является комплексное использование ресурсного потенциала ТКО для нужд полигона с целью создания схемы возврата отходов и продуктов их деструкции в виде материалов, необходимых для эксплуатации полигонов. В настоящее время получение техногенного грунта из органической фракции сопряжено с захоронением полезных компонентов, что приводит к потере ресурсов. А существующие технологии утилизации фильтрата приводят к образованию 30-50 % вторичных отходов и не позволяют получать материалы, необходимые для эксплуатации и рекультивации полигонов ТКО.

**Цель работы** – разработка схемы управления ресурсным потенциалом ТКО для снижения геоэкологического воздействия полигонов путем производства из отходов продуктов, используемых при эксплуатации и рекультивации полигонов ТКО.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Оценить влияние полигона ТКО на почвы и растения прилегающей территории по содержанию тяжелых металлов (ТМ).

2. Модернизировать технологию обработки мелкой фракции ТКО (0-80 мм) с целью дополнительного извлечения вторичных материальных ресурсов (ВМР): стеклобой, материал для альтернативного топлива, металлолом.

3. Разработать технологию утилизации фильтрата полигонов ТКО методом литификации с получением твердого продукта – литификата.

4. Оценить безопасность получаемого литификата и возможность его использования для нужд полигона по физико-химическим, механическим и токсикологическим свойствам.

5. Разработать схему управления ресурсным потенциалом ТКО путем применения продуктов, полученных при утилизации отходов и фильтрата: техногенного грунта и литификата, в качестве материалов, необходимых при эксплуатации и рекультивации полигонов ТКО.

#### **Научная новизна работы:**

1. Доказана возможность дополнительного извлечения ВМР (стекло, металлолом, материал для производства альтернативного топлива) в количестве 27 % при утилизации мелкой фракции ТКО (0-80 мм) с получением техногенного грунта, что позволяет снизить потребление первичных природных ресурсов.

2. Впервые установлены закономерности изменения механической стабильности литификата, полученного при различном соотношении компонентов с использованием в качестве вяжущего промышленного отхода – золы от сжигания горючих сланцев. Определено оптимальное соотношение компонентов литификации фильтрата: фильтрат : сульфат алюминия : сланцевая зола – 1 л : 30 г : 1,2 кг. Получение литификата позволяет совместно утилизировать жидкий отход (полигонный фильтрат) с промышленным отходом (сланцевой золой), что снижает техногенную нагрузку на компоненты геосреды.

3. Доказана экологическая безопасность литификата методами биотестирования и токсикологической оценки на лабораторных животных. Установлено, что содержание подвижных форм тяжелых металлов в литификате не превышает ПДК для почв населенных пунктов.

4. Впервые разработана схема управления ресурсным потенциалом ТКО с производством материалов из отходов и продуктов их деструкции (мелкая фракция ТКО, фильтрат) с целью их применения при эксплуатации и рекультивации полигонов ТКО для снижения их геоэкологического воздействия.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Модернизирована технология утилизации мелкой фракции ТКО, позволяющая дополнительно извлекать ВМР за счет оптимизации технологических параметров путем использования воздушного, оптического и магнитного сепараторов, с последующим производством техногенного грунта.

2. Разработана технология утилизации фильтрата полигонов ТКО путем изменения его агрегатного состояния из жидкого в твердое – литификат. Создана промышленная установка и внедрена на полигоне ООО «Новый Свет-ЭКО» в Гатчинском районе Ленинградской области.

3. Предложена ресурсосберегающая схема эксплуатации и рекультивации полигонов ТКО с использованием материалов, полученных на основе мелкой фракции отходов (техногенный грунт) и фильтрата (литификат), апробированная на полигоне ТКО ООО «Новый Свет-ЭКО», расположенном в Ленинградской области (Гатчинский район).

4. Результаты работы внедрены в учебный процесс Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

#### **Методология и методы исследования.**

При выполнении исследования применялись лабораторные методы анализа для проведения экспериментальной части и методы анализа и обобщения информации, системного анализа, экспертных оценок, математической статистики для обработки полученных данных. Исследования проводились в таких лабораториях, как Научный парк СПбГУ (ресурсные центры: «Методы анализа состава вещества», «Образовательный ресурсный центр по направлению химия», «Рентгенодифракционные методы исследования»), НИЛ «Промышленная экология», ООО «ГеоЛаб», ЦКП ФТИ им. А.Ф. Иоффе (Материаловедение и диагностика в передовых технологиях),

ЦКП СПГУ (Лаборатория моделирования экологической обстановки), ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в городе Санкт-Петербург» с применением стандартных методов определения химических свойств сточных вод, физико-химических и агрохимических свойств почв, физико-химических свойств кристаллических веществ, токсикологических параметров твердых продуктов.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Технические решения по изменению технологической схемы процесса производства техногенного грунта с возможностью дополнительного извлечения вторичных ресурсов, позволяющие снизить потребление первичных природных ресурсов.

2. Выявленные закономерности трансформации фильтрата в твердый продукт – литификат при использовании сульфата алюминия и сланцевой золы и результаты исследований химических, токсикологических и физических свойств полученного литификата.

3. Схема управления ресурсным потенциалом ТКО путем производства продукции и дальнейшего ее применения для нужд полигонов с целью снижения их геоэкологического воздействия.

**Степень достоверности результатов** подтверждается применением современных методов исследования, утвержденных в нормативных документах методик, высокоточного оборудования, а также значительным объемом исследований и применением статистических методов обработки данных. Основные положения коррелируют с известными закономерностями в области исследования.

**Апробация работы.** Основные положения и научные результаты проведенного исследования докладывались и обсуждались на Всероссийских и Международных научно-практических конференциях молодых ученых и аспирантов: IX Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск, 2018), Молодежная научно-практическая конференция «Современные исследования в геологии» (Санкт-Петербург, 2018), Восемнадцатая международная научная конференция «Экологические проблемы



недропользования. Наука и образование» (Санкт-Петербург, 2018), XVIII международный семинар «Геология. Геоэкология. Эволюционная география» (Санкт-Петербург, 2019), Неделя науки СПбПУ (Санкт-Петербург, 2019), 12-я Российско-Германская сырьевая конференция (Санкт-Петербург, 2019), Всероссийский научно-практический Форум «Экологический форсайт» (Саратов, 2019).

**Публикация результатов.** По теме диссертации опубликовано 13 работ, из которых 1 статья в журнале, включенном в перечень ведущих рецензируемых научных изданий и 2 статьи в журналах, индексируемых в международных реферативных базах: GeoRef, Scopus.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, который содержит 117 источников, и приложений. Работа изложена на 143 страницах, содержит 26 таблиц и 29 рисунков.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность и глубокую признательность научному руководителю д.г.-м.н., профессору, заслуженному экологу РФ Куриленко В.В. за помощь на начальных этапах выполнения работы, которые являются основой данной диссертации. Автор благодарен научному руководителю к.г.-м.н., доценту Зеленковскому П.С. за консультации и помощь на заключительных этапах подготовки диссертации. Автор выражает искреннюю признательность д.т.н., профессору Политаевой Н.А. (Санкт-Петербургский политехнический университет) за ценные советы, помощь при выполнении диссертации и всестороннюю поддержку. Автор благодарен сотрудникам АО «Автопарк № 1 «Спецтранс», в особенности к.т.н., главному технологу Аверьяновой Н.А. и директору по развитию Колычеву И.Н. за консультации, веру и поддержку.

## **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЛИГОНОВ ТКО**

### **1.1. История обращения с отходами**

История проблемы твердых коммунальных (бытовых) отходов берет свое начало с появлением первых цивилизаций и циклически следует за развитием производственных сил. В период Средневековья, с урбанизацией и процветанием ремесла и торговли, проблема утилизации отходов стала особенно острой для городских жителей, для которых было нормой выбрасывать мусор в окно [1]. Только в XIV веке в странах Европы были выделены специальные территории за городом для складирования отходов. Постепенно образование свалок приобрело стихийный характер и продолжалось до XIX века, после чего обращение с отходами приняло законодательный характер. Началась разработка санитарных норм и правил по обезвреживанию отходов, стали внедрять новые методы обращения с отходами: сжигание и сортировку. Первый мусоросжигательный завод был построен в Лондоне в 1874 году [2]. Первый мусоросортировочный завод был введен в действие в 1932 году в Голландии, хотя частичное использование твердых отходов началось в конце XVIII века, когда была введена ручная сортировка перед захоронением отходов на свалке в г. Эдинбурге. В СССР была налажена система раздельного сбора мусора и каждый вид собранных отходов имел свое производство [1]. Первые полигоны ТКО с применением специальных инженерных сооружений, выполняющих функции защиты объектов окружающей среды от депонирования отходов, появились в США в 1937 году [3].

Согласно ФЗ № 89, посвященному отходам производства и потребления, твердые коммунальные отходы – это отходы, которые образуются в процессе жизнедеятельности физических лиц в жилых зданиях, а также товары, потерявшие свои потребительские качества в результате их применения в личных и бытовых нуждах физическими лицами в жилых зданиях. Отходы, которые образуются в результате офисной деятельности юридическими лицами, и схожие по качественному составу отходам, образующимся в результате

потребления физическими лицами, также относятся к ТКО [4]. За 2016 год средняя норма накопления ТКО по миру составила 0,74 кг/чел.-день. Вариация данного показателя составляет от 0,11 кг/чел.-день (Африка) до 4,54 кг/чел.-день (Северная Америка), что определяется главным образом экономическими факторами страны. Среднее значение нормы накопления отходов в Европе и Центральной Азии составляет 1,8 кг/чел.-день [5]. При этом во всем мире наблюдается тенденция увеличения образования отходов (в среднем на 3,5 % в год) [6]. Объем образованных ТКО на территории городских поселений России в 2018 году составил 275,4 млн м<sup>3</sup> (53,9 млн т), что на 0,4 % выше уровня 2017 года [7].

К основным методам обращения с ТКО относятся: сортировка, термическая и механико-биологическая обработка и захоронение на полигонах. В 1 тонне твердых отходов в среднем содержится около 17 % свалочного газа, являющегося энергетическим ресурсом, 41 % компостной массы, 5 % первого этапа отсева грубых фракций и металлолома, 25 % второго этапа отсева (стеклобой, текстиль, дерево, полимеры) [8]. Несмотря на всемирное осознание ценности отходов и возможности их использования в качестве вторичных ресурсов, в России подавляющее большинство ТКО (87 % по данным на 2018 года) отправляется на объекты захоронения. При этом на мусороперерабатывающие заводы поступает 10 % от суммарного объема ТКО, а на обезвреживание – 2,2 %, включая мусоросжигательные заводы [7]. Низкий процент использования ТКО связан с недостаточным развитием данной отрасли: в текущей ситуации по всей России функционирует 243 объекта переработки ТКО, 53 мусоросортировочных комплекса и около 40 мусоросжигательных заводов [9]. Для стран Европейского союза (ЕС) характерна высокая степень использования ТКО. Например, в Бельгии по состоянию на 2009 г. на захоронение приходилось менее 5 %, почти 40 % отправлялось на переработку во вторичные материалы, 23% – на компостирование и 32 % – на сжигание. В Германии на полигоны поступает 1 % ТКО, основная часть отправляется на переработку (48 %) и сжигание (35 %), компостированию подвергается 16 %. В

Австрии 32 % ТКО компостируются, 26 % – перерабатывается во вторичное сырье, 38 % – подвергается термической обработке и только 4 % отправляется на захоронение. Выделяются среди стран ЕС Румыния и Болгария, где основным методом управления твердыми отходами остается полигонное захоронение – более 75 % ТКО [10].

В 2015 году в ФЗ № 89, посвященный отходам производства и потребления, вступили в силу изменения, которые запрещают полигонное складирование твердых отходов, содержащих материалы, пригодные для вторичного использования. Данный запрет создает стимул для развития сортировки ТКО и извлечения полезных материалов для вторичного использования. Комплексная стратегия обращения с ТКО в Российской Федерации направлена на формирование и обеспечение безопасного с экологической точки зрения и эффективного по экономическим показателям управления ТКО [9].

Реализация Комплексной стратегии должна обеспечить: снижение образования ТКО; прирост объемов отходов, вовлекаемых в дальнейшее использование в качестве дополнительных материальных и энергетических ресурсов; уменьшение захораниваемых объемов ТКО; уменьшение отрицательного влияния отходов на компоненты геосреды и здоровье населения [9].

Приоритеты в области обращения с ТКО, декларируемые в России, соответствуют директиве ЕС по обращению с отходами: первостепенным методом обработки является использование ТКО в качестве вторичного сырья, затем следует переработка в электроэнергию и тепло, наименее предпочтительным является захоронение.

Сортировка ТКО может производиться «у источника», что означает введение селективного сбора для жителей региона, или на специализированных предприятиях ручным способом или с помощью автоматизированного оборудования. В случае введения раздельного сбора отходов и применения наилучших европейских практик возможно отобрать до 50 % вторичных

материальных ресурсов для дальнейшего использования и до 15 % органических отходов для компостирования [11]. В ситуации, когда отдельный сбор не введен или введен только частично, максимально возможный отбор вторичного сырья резко сокращается. Это является следствием того, что при смешивании отходов, особенно с органической составляющей, ВМР насыщаются влагой и загрязняются, что приводит к частичной потере свойств, позволяющих использовать их вторично. В таком случае выделение отдельных компонентов из смешанных ТКО становится нерентабельным. При отсутствии селективного сбора органическая часть отходов подвержена наполнению большим количеством сторонних включений (до 30 %), что ограничивает использование полученного из нее компоста в сельскохозяйственной деятельности. При сортировке смешанного потока отходов вручную отбор вторичных фракций не превышает 8-10 %. Применение механизированной сортировки позволяет повысить отбор вторичного сырья до 30 % с возможностью выделения фракций, пригодных для производства твердого топлива из отходов RDF (Refuse Derived Fuel). Однако капитальные затраты на создание автоматизированного сортировочного комплекса значительно превышают капитальные затраты на создание линии с ручной сортировкой. В результате при отсутствии отдельного сбора 70-85 % отходов не может быть переработано во вторичное сырье или компост и направляется на захоронение [12]. Среди полезных компонентов, выделяемых в процессе сортировки, основными рентабельными для переработки ВМР являются стекло, цветные и черные металлы, бумага, различные полимерные материалы. Вторично используемое стекло применяется в качестве сырья на существующих предприятиях по производству стеклянных изделий и может замещать до 75 % от объема используемого сырья для нового продукта. Применение вторичного стекла позволяет снижать энергетические и материальные затраты на производственный процесс. Необходимым условием повторного использования стекла является сортировка по цвету, что осуществляется с помощью оптических сепараторов [13]. Полимерные материалы сортируют по типу на ПЭТ (полиэтилентерефталат), ПНД

(полиэтилен низкого давления), ПВД (полиэтилен высокого давления), ПС (полистирол), ПВХ (поливинилхлорид) и ПП (полипропилен). ПЭТ – это пластиковые бутылки, которые обычно перерабатывают во флексу или гранулы для дальнейшего производства новых товаров или использования в качестве наполнителей или утеплителей. Другие типы полимеров, такие как мягкие и твердые полиолефины (ПВД, ПНД, ПП) также перерабатываются в гранулу с дальнейшим производством новых материалов. Однако в силу невозможности достижения полной чистоты данного вида ВМР, изделия из вторичных пластиков теряют ряд свойств по сравнению с изделиями из первичного сырья, в связи с чем имеют ограниченное применение [14]. Отсортированный черный металлолом используется, как металлическая шихта, в доменных печах в процессе выплавки стали и чугуна, а также при производстве отливок из стали и чугуна и ферросплавов [15]. Бумага может быть вторично использована на целлюлозно-бумажных предприятиях, но при условии ее отдельного сбора и ограниченное количество раз (максимум 5-7 циклов вторичной переработки, согласно данным Агентства охраны окружающей среды США) [16]. Органические отходы могут быть переработаны в компост. Компост, полученный из отходов, не подвергшихся отдельному сбору, не может быть направлен на нужды сельского хозяйства в связи с повышенным уровнем загрязнений.

## **1.2. Влияние полигонов ТКО на компоненты геосреды**

Для России утилизация отходов методом полигонного захоронения является преобладающим направлением в связи с относительно низкой стоимостью земли для складирования отходов в сравнении с другими методами обращения ТКО, а также отсутствием отдельного сбора ТКО и, как следствие, нерентабельностью переработки части мусорных фракций при их смешении с другими отходами, в первую очередь – органическими (пищевыми). К основным недостаткам полигонного захоронения отходов относятся: использование земельных ресурсов, выводимых из хозяйственного оборота на

продолжительный период времени, и потеря ценных компонентов отходов при отсутствии предварительной сортировки отходов с извлечением ВМР; риск загрязнения окружающей среды путем миграции продуктов деструкции отходов, содержащих загрязняющие компоненты, что может привести к деградации природных комплексов [17].

Полигон твердых коммунальных отходов представляет собой совокупность сооружений, охраняющих природу и направленных на предотвращение загрязнения атмосферного воздуха, почвенного покрытия, водных объектов и грунтовых вод и сокращение распространения животных, насекомых и болезнетворных микроорганизмов, при депонировании и обезвреживании ТКО [18].

Ключевые требования к проектированию современных полигонов заключаются в обосновании выбора площадки, исходя из геологических и гидрогеологических условий территории. Фундамент и стенки основания полигона ТКО должны состоять из водонепроницаемого материала, при этом расчетный горизонт грунтовых вод должен находиться на 2 м ниже ложа полигона. Также необходимо устройство системы сбора образующихся инфильтрационных вод – фильтрата – и создание водоотводных канав вокруг тела полигона. Требования к эксплуатации полигонов ТКО включают в себя соблюдение правил приема отхода, их складирования, пересыпки грунтом, создание откосов с углом 1:4, покрытие откосов изолирующим материалом, сбор и очистку или вывоз фильтрата. Немаловажным при эксплуатации полигонов является мониторинг воздействия полигонов на прилегающие территории путем анализа проб воздуха, почвы, подземных и поверхностных вод, позволяющий оценить качество исполнения защитных мероприятий. На этапе рекультивации полигонов необходимо выполнить выравнивание поверхности с последующим устройством дренажного слоя для сбора и удаления биогаза (в случае отсутствия системы дегазации на полигоне), гидроизоляционного слоя для предотвращения попадания атмосферных осадков в тело полигона и плодородного слоя для устройства биологической ремедиации территории [18, 19].

Однако в России многие полигоны, функционирующие более 20 лет, не удовлетворяют санитарным нормам. Более того, в нашей стране распространены несанкционированные свалки, не отвечающие требованиям к устройству и эксплуатации. Анализ качества и состояния существующих объектов захоронения ТКО свидетельствует о том, что полигоны и несанкционированные свалки являются источниками значительного геоэкологического воздействия во всем мире [20-26].

В толще отходов под действием факторов живой и неживой природы осуществляется преобразование компонентов захороненных отходов, которое выражается в процессах физической и химической природы, а также микробиальной жизнедеятельности, функционирующей в толще депонированных отходов. Среди биологических параметров, воздействующих на отходы, наибольшее воздействие оказывают микробиальное сообщество, а также простейшие, насекомые и растения. Среди абиотических факторов основными являются кислород, водород, азот, температура и влажность [27]. В результате биогеохимических преобразований в теле полигона образуются новые твердые вещества, фильтрат, биогаз, происходит выделение тепла.

Основные виды негативного воздействия полигонов ТКО на окружающую среду и человека можно разделить на несколько типов: 1) химическое за счет выделения и миграции вредных компонентов путем распространения фильтрата, выделения биогаза и эолового разноса отдельных фракций отходов; 2) термическое за счет повышения температуры окружающей среды; 3) санитарно-эпидемиологическое за счет создания условий развития болезнетворных микроорганизмов и простейших и привлечения птиц и животных; 4) социальное за счет создания дискомфортной для проживания и работы среды вблизи полигонов.

Главными агентами, выражающими отрицательное влияние полигонов на объекты геосреды, являются фильтрат, мигрирующий в почвы, поверхностные и подземные воды, и биогаз, загрязняющий приземную атмосферу.



В составе свалочного газа, выделяющегося атмосферу, содержатся, как макрокомпоненты, такие как метан ( $\text{CH}_4$ ), диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ), азот ( $\text{N}_2$ ) и водород ( $\text{H}_2$ ), так и микрокомпоненты, которые оказывают суммирующее негативное воздействие: аммиак, оксид углерода, бензол, этилен, сероводород, циклогексан, гексан, пропилен и бутилен [28]. Запах полигонов обусловлен наличием таких примесей, как сероводород, меркаптаны, различные эфиры, алкилбензолы. Эти вещества чувствительны для человека даже в малых количествах, создавая существенный дискомфорт. В больших количествах данные соединения наносят значительный вред самочувствию и здоровью населения, которое проживает на территории влияния полигонов. Качественные и количественные характеристики эмиссий биогаза имеют значительные вариации и зависят в первую очередь от морфологического состава депонированных отходов, географического положения места захоронения (особенно влажностного режима территории) и возраста объекта [28]. Кроме загрязнения атмосферы биогаз зачастую приводит к самовозгоранию отходов в связи с недостатком оттока тепла из толщи отходов. Горение может быть как открытое, т.е. на поверхности полигона, так и скрытое, т.е. непосредственно в теле полигона. Горение компонентов отходов на полигонах сопровождается эмиссией токсичных соединений полихлорированных дибензодиоксинов (ПХДД) и полихлорированных дибензофуранов (ПХДФ), концентрации которых могут превышать ПДК в несколько десятков раз (в зависимости от площади пожара) [29]. Для снижения негативного воздействия биогаза необходимо устройство дегазации полигона, позволяющей собирать и утилизировать свалочный газ с получением энергии, что является экономически выгодным и широко распространено за рубежом [30].

Миграция фильтрата на значительные площади может образовывать аномалии вокруг полигонов, с геохимической точки зрения [31]. Характеристика фильтрата зависит от фактического состава и состояния отходов, условий их складирования, стадии разложения, объема поступления поверхностных вод, климата и инженерной инфраструктуры объекта [27, 30, 32]. Состав фильтрата

характеризуется обширным списком загрязнителей, среди которых можно выделить основные группы: растворенные органические вещества, неорганические макрокомпоненты, тяжелые металлы и ксенобиотики, болезнетворная микрофлора [30, 32, 33]. Главным фактором объема образуемого фильтрата является количество атмосферных осадков. Объем фильтрата может составлять 10-28 % от объема выпадающих осадков, но в среднем достигает 50 % [34]. Усредненные данные расчета образования фильтрата на полигонах Пермского края показали, что при количестве осадков  $0,60 \text{ м/год} \cdot \text{м}^2$  формируется слой фильтрата, равный  $0,22 \text{ м/год} \cdot \text{м}^2$  [35]. Несмотря на наличие защитных экранов, часто фиксируется распространение загрязняющих компонентов с полигонов на значительные территории. Для снижения действия токсичного фильтрата на геосреду необходимыми являются его сбор с последующей очисткой или утилизацией.

Таким образом, основными мероприятиями по минимизации негативного воздействия полигонов ТКО на окружающую среду и население являются: правильный выбор места для размещения полигонов, исходя из геологических, гидрогеологических и социальных параметров; устройство технических средств для предотвращения распространения загрязняющих веществ путем миграции фильтрата и биогаза; экологический мониторинг прилегающей к полигонам территории для оценки работы защитных мероприятий и своевременного решения проблем в случае утечки загрязняющих веществ.

### **1.2.1. Образование и характеристика фильтрата**

Основой формирования фильтрата полигонов ТКО является фильтрация выпадающих атмосферных осадков сквозь толщу депонированных отходов. Дополнительный вклад в образование фильтрата вносят естественная исходная влажность отходов и вода, являющаяся продуктом биохимических реакций разложения отходов. Основой снижения количества образуемого фильтрата является то, что часть осадков испаряется с поверхности полигона, что связано непосредственно с климатом; часть поступающей влаги расходуется на

транспирацию растениями, произрастающими на откосах полигона, что связано с материалом отсыпки откосов; часть осадков стекается с откосов в виде поверхностного стока, что связано с геометрической формой полигона и рельефом местности; часть поступивших в тело полигона осадков расходуется на влагонасыщение отходов, что связано с морфологией и исходной влажностью захороненных ТКО; и часть образованной в ходе биогеохимических реакций воды удаляется из тела полигона с выходом биогаза. Соотношение факторов прироста и снижения объема фильтрата определяет общее количество генерации жидкого отхода. Ключевым аспектом соотношения перечисленных факторов является климат, т.е. географическое положение объекта захоронения ТКО.

Компонентный состав фильтрата зависит от многих факторов, ключевые из которых представляют морфологический состав захороненных отходов [36], условия их складирования, определенная стадия разложения отходов, т.е. этап жизненного цикла объекта захоронения [30, 32, 33, 37]. При этом состав фильтрата меняется в течение жизни полигона, поэтому важно понимать, какие процессы деструкции отходов протекают в теле полигона и как они влияют на свойства образуемого фильтрата.

Этапы биогеохимического разложения депонированных отходов разделяются на аэробный и анаэробный режимы в зависимости от наличия кислорода. В аэробной среде происходит гидролиз и окисление органической фракции отходов, в которой содержатся белки, жиры и протеины, в результате ферментации аэробными бактериями. Фосфор в пищевых компонентах окисляется до фосфатов, сера – до сульфатов. Азотсодержащие органические соединения разлагаются до аммиака, углекислого газа и воды. Аммиак трансформируется в соли азотистой и азотной кислот в результате нитрификации. В аэробной среде осуществляется понижение значения водородного показателя в жидкой среде с 7,5-7 до 5-4 за счет кислот, которые образуются при деструкции органических соединений, что в итоге приводит к выщелачиванию металлов и их переходу в состав фильтрата [30, 37, 38]. Новые компоненты, образованные в условиях доступа кислорода, мигрируют под

действием гравитационных сил далее в глубину тела полигона. В нисходящем потоке содержатся образованные водорастворимые соединения, такие как карбонаты, сульфаты, фосфаты и нитраты кальция, калия и тяжелых металлов [27]. Окончание аэробного окисления связано с образованием и накоплением высоких концентраций жирных кислот, что останавливает процесс аэробного разложения [39]. Длительность аэробного этапа зависит от наличия предварительной обработки отходов, качества уплотнения ТКО при захоронении и степени доступности кислорода.

В результате уплотнения отходов, которое формируется естественным путем и за счет нормативной практики захоронения ТКО, формируется переходная по доступности кислорода зона. В данной зоне снижается количество аэробных бактерий, которые отвечают за гумификацию органических компонентов и денитрификацию оксидов азота. В итоге в жидкую фазу переходят растворенные кремниевая кислота и ее комплексы с ионами металлов, а также ионы калия, кальция, фосфатов [27].

В среде недоступности кислорода в толще отходов формируются анаэробные условия, где ключевым результатом биогеохимических реакций является брожение. Процессы в анаэробных условиях продолжаются десятки и сотни лет. В данной среде в результате активности анаэробных микроорганизмов формируется ульминовая кислота, являющаяся токсичной для микроорганизмов, которые ее вырабатывают. В итоге в толще отходов формируются условия для аккумуляции ульминовой кислоты, которая отрицательно воздействует на развитие анаэробных бактерий, в результате чего уменьшается скорость процесса деструкции органических соединений, что является основой для объяснения длительности разложения ТКО в анаэробной среде [27]. Стадии анаэробного разложения отходов делятся на фазу гидролиза, ацетогенеза, активного метаногенеза, стабильного метаногенеза и полной ассимиляции [30, 38].

В фазе гидролиза, длящейся недели или месяцы, под действием ферментативной активности бактерий протекает разложение легкоразлагаемых

фракций ТКО, в результате чего образуются жирные кислоты, полисахара, аминокислоты, глицерин, аммиак и протекает гидролиз бумаги, садово-парковых отходов и древесины, т.е. целлюлозосодержащих отходов [30].

На стадии ацетогенеза, длящейся от 3 до 7 лет в зависимости от влажностного режима, протекает дальнейшее разложение массы отходов, результатом которого является образование углекислого газа, воды и кислот, таких как уксусная и пропионовая. Ацетогенез характеризуется снижением водородного показателя (4,5-6,5) и увеличением скорости процессов гидролиза целлюлозосодержащих компонентов и некоторых видов полимерных фракций, в том числе синтетических волокон. Ионы металлов в кислых условиях способны переходить в состав фильтрата или формировать комплексы с гуминовыми кислотами и соли, тяжело растворимые в воде, такие как карбонаты и фосфаты, в зависимости от их химических свойств [30, 37, 38]. На данной стадии железо и цинк проявляют себя как подвижные металлы и их концентрации в составе фильтрата могут достигать 70 мг/л. Фильтрат ацетогенеза обладает высокими показателями ХПК и БПК<sub>5</sub>, которые достигают 60 000 мгО<sub>2</sub>/л и 40 000 мгО<sub>2</sub>/л соответственно [33, 39, 40]. Среди органических примесей следует выделить летучие органические кислоты жирного ряда [37].

Дальнейшая деструкция отходов протекает на метаногенной стадии в результате работы метаногенных бактерий. В процессе активного метаногенеза, который длится 10-30 лет, происходит выделение газообразной составляющей, в состав которой входят такие соединения, как метан, меркаптаны, углекислый газ, и аммиак, а также повышение водородного показателя (7,2-8,6) в результате деструкции органических кислот под действием ферментативной активности [30, 38]. Для фазы активного метаногенеза характерно разложение 50-70 % целлюлозы и гемицеллюлозы, полное разложение жиров и протеинов. Возможно образование поверхностно-активных соединений (ПАВ) за счет гуминовых, стеариновых, пальмитиновых и другие кислот в присутствии аммиака. Также на данной фазе осуществляется образование сульфид-ионов за счет восстановления сульфат-ионов и протекает разрушение части комплексов с формированием

труднорастворимых сульфидов. Ионы металлов связываются путем формирования гидроксидов металлов и карбонатов, за счет чего уменьшается их содержание в фильтрате [30].

Для фильтрата, образуемого на этапе активного метаногенеза, характерно также содержание ацетальдегидов, соединений свинца и цинка с органическими компонентами и фрагментов терефталевой кислоты, которые образуются в процессе медленной деструкции полимерного материала в результате химического воздействия и деполимеризации. Ингибитором метаногенеза выступают соединения, содержащие хлор, которые формируются при деструкции фракции отходов. На данном этапе жизненного цикла полигона в фильтрате снижается концентрация органического углерода и ХПК уменьшается до 500-4500 мгО<sup>2</sup>/л, БПК<sub>5</sub> – до 20-550 мгО<sup>2</sup>/л [33, 39].

Стабильный метаногенез протекает далее до полного возможного разложения отходов и длится до 500 лет. Водородный показатель смещается в щелочную среду и осуществляется гидролиз лигнина, разрушение целлюлозосодержащих фракций отходов под действием ферментативной активности метаногенных бактерий, а также химическое разрушение наиболее устойчивых полимеров. Наблюдается формирование ароматических и жирных кислот. Содержание органического углерода в фильтрате продолжает уменьшаться, но при этом повышаются концентрации таких соединений, как крезол, фенол, полифенол и акилбензол, являющимися биорезистентными. Фильтрат стабильного метаногенеза насыщен соединениями, содержащими хлор: ароматические соединения с хлором, тетрахлорметан, трихлорметан [30, 33, 37].

Интенсивность процессов анаэробного разложения отходов определяется влажностным и температурным режимами, т.е. в первую очередь зависит от географического положения объекта захоронения. Температура 25-40 °С и влажность отходов более 20 % являются оптимальными для полной анаэробной деструкции.

В результате вышеописанных процессов разложения отходов в образуемый фильтрат переходит ряд загрязняющих компонентов в высоких концентрациях. В фильтрате содержится широкий перечень органических соединений, в том числе галогенорганические соединения (ГОС), которые являются высокоустойчивыми к биологическому окислению. Минерализация фильтрата может подниматься до 10000 мг/л за счет высоких концентраций хлоридов и сульфатов. Содержание хлоридов в фильтрате варьирует в диапазоне 200-5000 мг/л. Содержание сульфатов уменьшается от 900 до 100 мг/л при повышении возраста полигона. Аммоний аккумулируется в фильтрате в течение всей жизни объекта захоронения, и его содержание изменяется от 300 до 3000 мг/л, в зависимости от исходного количества азотсодержащих соединений. Переход ионов металлов из массы отходов в фильтрат зависит от водородного показателя и редокс-потенциала, которые варьируют в широких пределах. В результате при определенных стадиях биогеохимических реакций деструкции ТКО создаются условия для окисления в том числе свинца, меди и ртути, которые являются малоактивными металлами [30, 33, 39, 40].

В зависимости от стадии жизни полигона и протекающих биогеохимических реакций фильтрат имеет различный химический состав и условно делится на «молодой» и «старый». «Молодой» фильтрат формируется от начала складирования отходов и до окончания стадии ацетогенеза. «Старый» фильтрат образуется на этапах метаногенных процессов внутри полигона. В течение жизни полигона протекает изменение качественного и количественного содержания органических компонентов в фильтрате. Соотношение БПК<sub>5</sub>/ХПК и ХПК/ООУ является индикаторным для понимания этапа формирования фильтрата. В «молодом» фильтрате отношение БПК<sub>5</sub>/ХПК равно 0,6 и оно постепенно снижается до 0,06 в «старом» фильтрате, а отношение ХПК/ООУ – сокращается от 3,3 до 1,6 [30, 33]. При преобразовании фильтрата из «молодого» в «старый» наблюдается изменение качественного состава органических соединений и протекает сокращение определенных классов: короткоцепочечные жирные кислоты → альдегиды с низкой молекулярной массой →

аминокарбоновые кислоты → глициды, короткоцепочечные белки → гуминовые кислоты → гидроксibenзолы и полифенолы → фульвовые кислоты. «Молодой» и «старый» фильтрат также отличаются по содержанию ионов железа и цинка. В условиях доступа кислорода и ацетогенеза содержание железа поднимается до 1800 мг/л, содержание цинка – до 120 мг/л. На этапах метаногенных процессов протекает связывание железа и цинка при формировании гидроксидов и сульфидов, что приводит к значительному сокращению содержания ионов железа и цинка в фильтрате: до 1-5 мг/л [33, 37].

Химический состав фильтрата по показателям, которые зависят от стадии деструкции отходов, и по показателям, у которых не было обнаружено влияния стадии разложения отходов, по данным ряда авторов [30, 32-33, 39], представлен в таблице 1.1.

Морфология захороненных отходов имеет принципиальное значение, что видно по широким диапазонам возможных концентраций основных загрязняющих компонентов в таблице 1.1. Небольшое содержание тяжелых металлов в фильтрате связано, как правило, не с низким процентом захоронения материалов, являющихся их источником, а с воздействием водородного показателя и высокой способностью ТМ образовывать комплексы с гуминовыми веществами, а также труднорастворимые гидроксиды и сульфиды. Уменьшение концентрации аммония в фильтрате с течением времени является признаком, что фильтрат мигрирует за пределы полигона. Предварительная сортировка ТКО с целью извлечения ценных компонентов, и особенно пластиков, может способствовать ощутимому уменьшению концентраций определенных показателей в фильтрате, в том числе биорезистентных органических соединений [41].



Таблица 1.1 – Компонентный состав фильтрата полигонов ТКО

Показатель	«Молодой» фильтрат - ацетогенная фаза		«Старый» фильтрат – метаногенная фаза		Среднее значение
	Среднее значение	Диапазон значений	Среднее значение	Диапазон значений	
рН	6,1	4,5-7,5	8,0	7,5-9,0	-
БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /л	18 000	4 000 – 40 000	200	20-550	-
ХПК, мгО <sub>2</sub> /л	26 000	6 000 – 60 000	2500	500-4500	-
БПК <sub>5</sub> /ХПК	0,58	-	0,06	-	-
ГОС, мг/л	3150	260-6200	1600	195-3200	-
Сульфаты, мг/л	900	70-1750	100	10-420	-
Кальций, мг/л	1200	50-2500	100	20-600	-
Магний, мг/л	470	50-1150	180	40-350	-
Железо общее, мг/л	380	20-1800	20	3-250	-
Марганец, мг/л	25	0,3-65	0,7	0,03-45	-
Цинк, мг/л	10	0,1-120	0,6	0,03-4	-
Хлориды, мг/л	-	-	-	-	2100
Аммоний, мг/л	-	-	-	-	750
Калий	-	-	-	-	1085
Натрий	-	-	-	-	1340
Фосфор	-	-	-	-	6
Кадмий	-	-	-	-	0,005
Хром	-	-	-	-	0,28
Кобальт	-	-	-	-	0,06
Медь	-	-	-	-	0,065
Свинец	-	-	-	-	0,09
Никель	-	-	-	-	0,17

### 1.2.2. Методы очистки фильтрата

В состав фильтрата входит широкий перечень загрязнителей в высоких концентрациях, которые варьируют в зависимости от протекающих биогеохимических реакций, а также климатических условий и времени года. В связи с вышеперечисленным создание универсальной технологии очистки фильтрата представляет собой комплексную, сложную задачу. Высокая

минерализация, ПАВ и биорезистентные соединения не позволяют использовать известные существующие технологии и схемы очистки сточных вод.

Известна практика подачи фильтрата в городскую канализацию для очистки вместе с бытовыми стоками. Ограничением данного способа является концентрация сбрасываемого фильтрата. При превышении количества фильтрата в суммарном объеме сточной воды пяти процентов, очистные сооружения бытовых сточных вод не выполняют свою функцию, а также наблюдается аккумуляция ТМ в активном иле, что ограничивает последующее его использование, как удобрение или рекультивационный материал [42].

Повсеместно используемая рециркуляция фильтрата путем его распыскивания по поверхности тела полигона позволяет снизить количество образуемого фильтрата за счет дополнительного испарения, но не является полным решением проблемы образования фильтрата. Однако, кроме испарения с откосов полигона, рециркуляция фильтрата приводит к повышению влаги в отходах, что позитивно сказывается на активности биогеохимических реакций внутри тела полигона, а также способствует уменьшению риска самовозгорания отходов на полигоне [43].

Традиционными методами очистки сточных вод являются механические, физико-химические и биологические. В той или иной мере данные типы пригодны для удаления загрязнений из фильтрата. Определенный тип обработки сточных вод позволяет решать проблему конкретного класса загрязняющих компонентов. Например, биологические способы очистки, основанные на жизнедеятельности микроорганизмов, направлены на снижение органических компонентов. Удаление ионов тяжелых металлов, анионов и катионов возможно при применении физико-химических способов, а именно ионообменных, осадительных, адсорбционных или мембранных типов очистки. Антисептирование сточных вод проводится с помощью озонирования, хлорирования или УФ облучения.

### *Механические методы*

Механические методы позволяют удалить механические примеси в сточной воде и подготовить ее для последующих этапов удаления химических и биологических компонентов. Основными типами механической очистки являются фильтрация и естественное отстаивание.

### *Биологические методы*

В основе биологических способов очистки воды лежат различные микроорганизмы, которые готовы использовать растворенные органические и часть неорганических соединений с целью их применения в качестве питательных элементов для своей жизнедеятельности. В зависимости от доступности кислорода осуществляется развитие либо аэробных (в присутствии кислорода), либо анаэробных (в отсутствии кислорода) бактерий, что и определяет тип биологической очистки. Биологическая очистка направлена на удаление органических соединений и позволяет снижать в фильтрате концентрации ХПК и БПК.

При доступе кислорода и развитии аэробных микроорганизмов протекает образование углекислого газа и воды из органических компонентов. При этом осуществляется возврат твердых продуктов биологической природы в фильтрат. Для применения очистки с помощью аэробных бактерий используют аэротенки, которые могут быть как открытого, так и закрытого типа. Аэротенки открытого типа – это открытые резервуары со сточной водой и активной биомассой. Такие сооружения дополнительно могут снабжаться мешалками для аэрации и приведения биомассы во взвешенное состояние, что способствует улучшению очистки вод. Закрытые аэротенки имеют более сложные системы аэрации, что увеличивает их стоимость. Однако в таком случае предотвращается распространение неприятного запаха, а также поддерживаются необходимые условия (освещение, фиксированная температура, рН среды, количество кислорода и питательных веществ) для микроорганизмов, что повышает эффективность очистки.

При выдерживании оптимальных условий для жизни аэробных микроорганизмов, их работа позволяет сократить количество БПК на 90 % и ХПК на 80 %. Следует отметить, что при высоких концентрациях загрязняющих компонентов в фильтрате, с целью достижения качественной очистки и поддержания активности биохимических процессов необходимо поддерживать оптимальное соотношение  $\text{БПК}_5:\text{N}:\text{P} = 100:3,2:1,1$  и подавать значительное количество кислорода, что связано с расходами на биогенные реагенты, электроэнергию и перманентным контролем параметров системы [44].

Кроме аэротенков к аэробным способам очистки сточных вод относится применение аэробных прудов, которые являются более простыми в использовании. В случае аэробных прудов основой очистки сточных вод является работа гидробионтов и высшей и низшей растительности, а именно их способность удалять из воды путем поглощения и накопления в себе ряда минеральных элементов. Среди наиболее эффективных фиторемедиантов с точки зрения очищения сточных вод необходимо выделить *Phragmites australis* L. (тростник обыкновенный), *Schoenoplectus lacustris* L. (схеноплектус озерный), *Typha angustifolia* L. (рогоз узколистный). Кроме того, растительность в воде насыщает ее кислородом, что позволяет активировать работу аэробных микроорганизмов для дополнительной очистки. Использование аэробных прудов распространено в Скандинавии и Канаде и позволяет сокращать содержание аммония, а также ХПК и БПК вплоть до 70 %. Однако, столь высокую степень очистки можно наблюдать только при обработке «старого» фильтрата, где содержание ХПК уже снизилось за счет естественных процессов. Недостатком применения биопрудов является ограничение по температурному режиму (более 10 °C). [45].

Также с участием аэробных микроорганизмов осуществляется очистка с помощью биофильтров. Загрузка фильтра проводится инертными компонентами типа гранитного щебня или полимеров, на поверхности которых создается биопленка с биоценозом, аналогичным как для аэротенков. Подача воды на поверхность фильтра осуществляется с помощью сплинкера за счет чего

создаются условия для проникновения кислорода в тело биофильтра с целью протекания окислительных реакций. В ходе работы биофильтров наблюдается осаждение и аккумуляция на инертном наполнителе карбонатов и фосфатов металлов, которые образуются при разложении органических компонентов. Данный аспект осложняет дальнейшую работу окисления с помощью микроорганизмов, что является недостатком данного метода [46].

При отсутствии кислорода и развитии анаэробных микроорганизмов протекает образование биогаза и ила (твердой фазы) при деструкции органических соединений. Для применения очистки с помощью анаэробных бактерий используют метантенки, которые представляют собой герметичные резервуары. С экономической точки зрения анаэробное сбраживание наиболее эффективно для «молодого» фильтрата, обладающего высокими значениями ХПК (выше 6000 мгО<sub>2</sub>/л), с целью последующего использованием полученного биогаза в качестве источника энергии. Степень непосредственно очистки фильтрата в метантенках невысокая: значения ХПК снижаются на 40-50 %, что не позволяет использовать анаэробную очистки в качестве самостоятельного метода. Для поддержания активности работы анаэробных микроорганизмов необходим определенный температурный режим (более 30 °С) и конкретный диапазон водородного показателя (7,2-8,5). Следует отметить, что негативным воздействием на жизнедеятельность анаэробных микроорганизмов, является наличие солей тяжелых металлов, таких как медь и хром, что также представляет собой ограничивающий фактор данного метода [47].

Для достижения высокой степени очистки и получения экономической выгоды за счет выработки биогаза существует практика использования анаэробной и аэробной обработки фильтрата в комплексе. Денитрификация приводит к образованию элементарного азота из нитратов. Нитрификация способствует образованию нитратов из аммония и газообразного азота из нитратов.

Для активизации процессов деструкции органических компонентов, являющихся трудноокисляемыми, применяют ферменты класса оксигеназ.

Данный новый метод очистки фильтрата справляется с удалением смол, абразива, полимерной стружки, мазута, а также способствует ощутимому уменьшению концентраций цинка, меди и хрома [48].

Также в последнее время активно исследуется возможность использования фильтрата в качестве среды культивирования микроводорослей *Chlorella* для последующего извлечения липидов и производства биотоплива. Однако, в данном случае используются разбавленные растворы фильтрата в зависимости от их первоначальной концентрации. При содержании фильтрата в количестве 10 % микроводоросли способны использовать 90 % аммиачного азота из фильтрата. Максимальная скорость удаления ХПК достигла 60 % в течение 13 дней после начала культивирования инкубации [49]. Использование фильтрата в качестве питательной среды для микроводорослей выполняет 2 задачи: утилизацию фильтрата и экономию на реагентах для культивирования микроводорослей.

#### ***Физико-химические методы***

Перечень физико-химических методов обработки сточных вод достаточно широк. Наиболее распространенными на практике являются следующие типы: флотация, сорбция, коагуляция, флокуляция, ионный обмен, озонирование, ультрафиолетовая обработка, микро- и ультрафильтрация, обратный осмос.

Наиболее известными и распространенными коагулянтами для выделения загрязняющих компонентов являются сульфаты алюминия и сульфаты железа с глиноземом и известью. В процессе коагуляции достигается частичное осветление сточной воды при связывании взвешенных частиц, уменьшение содержания ТМ на 50-70 % и образуется значительное количество твердой фазы. При этом сокращение значения ХПК не превышает 40 % ввиду невозможности удаления низших жирных кислот, имеющих низкий молекулярный вес [50]. Эффективность применения коагуляции повышается в случае обработки «старого» фильтрата, либо при использовании данного метода после биологической очистки. Среди флокулянтов можно выделить полиакриламид, как наиболее распространенный для ускорения процесса осаждения. Также

известны биофлокулянты (например, на основе бактерии *Rhizomonas sp.*), которые предлагается использовать вместо сульфатов железа и алюминия, т.к. они показывают сходную степень очистки [51].

Для снижения количества осадков, образуемых при коагуляции, возможно использование химического окисления для полного разрушения окислителей. Окислителями обычно выступают хлор, гипохлорит кальция, перманганат калия, перекись водорода или озон, которые позволяют снижать ХПК до 48 % [47, 52]. Применение озона более эффективно для снижения хлорсодержащих компонентов, чем ХПК.

При очистке фильтрата методом электрокоагуляции используется диафрагменный электролизер. В данном случае фильтрат подвергается обработке смесью материалов, способных проводить ток, один из которых способен являться коагулянтом. За счет возникновения гальванопар происходят интенсивное окисление и растворение металла, изменение водородного показателя, электролиз водной компоненты. Ионы алюминия и железа, образованные в результате данного процесса, трансформируются в различные оксигидратные и гидроксидные формы, что приводит к коагуляции с последующим осаждением и сорбции загрязнителей из фильтрата. Эффективность очистки по ХПК достигает 60 %, по цветности – 80 % [53].

Адсорбция загрязняющих веществ с применением активированного угля позволяет снижать ХПК на 50 %. При этом, в случае предварительной обработки известью, можно добиться снижения до 80 % [54]. Недостатком использования активированного угля является его высокая стоимость. Общим недостатком использования метода адсорбции является необходимость частой замены сорбента. Обычно метод адсорбции используется в качестве последней ступени очистки, т.е. доочистки фильтрата.

В ряде стран, таких как Финляндия, Литва, Германия и Чехия применяется технология очистки фильтрата с помощью электроплазмы, что позволяет дополнительно осуществлять и обеззараживание сточной воды. В основе данной технологии электрофизические явления: фильтрат подвергается воздействию

импульсных электромагнитных полей, импульсных электрических разрядов, которые представляют собой плазму и знакопеременных электрических полей. Необходимая степень очистки достигается управлением основными характеристиками поля. При использовании электроплазменной технологии для очистки фильтрата возможно уменьшение значений БПК, ХПК, а также снижение концентраций фосфатов, хлоридов, азота и поверхностно-активных веществ [48].

Метод выпаривания предназначен для высушивания высококонцентрированных объектов, однако его использование для утилизации фильтрата связано с высокими эксплуатационными затратами. При этом образуемый конденсат не всегда отвечает ПДК для сброса в окружающую среду (в зависимости от исходных концентраций загрязнителей в фильтрате), а образуемый сухой остаток необходимо утилизировать [44].

Широкое применение для очистки фильтрата за рубежом и в России нашли мембранные технологии, в частности – обратный осмос. Применение данного метода позволяет удалять широкий перечень загрязняющих соединений, в том числе органической природы. Определяющими факторами для процесса обратного осмоса являются водородный показатель, давление и тип мембраны [55]. Однако, данный метод нецелесообразно использовать без предварительной подготовки фильтрата, т.к. диффузия жидкой фазы будет затруднена вследствие высокого содержания и наличия большого количества коллоидных веществ. Основная проблема использования обратного осмоса – это формирование вторичного отхода, так называемого концентрата, в количестве до 50 %, который, относится к 3-му классу опасности, но все равно преимущественно направляется на захоронение обратно в тело полигона.

Еще одним физико-химическим методом утилизации фильтрата является его цементирование с помощью вяжущих, то есть изменение агрегатного состояния из жидкого в твердое, что снижает миграционную активность жидкой фазы. В зарубежных странах, где применяется данный метод, главным вяжущим является цемент и цементная пыль [56]. Для снижения стоимости производства



используют разбавление цемента летучей золой, известью и другими материалами, способными проявить вяжущие свойства. Данную технологию связывания жидкости цементом, а также стеклования жидким стеклом и золой, применяют и непосредственно к концентрату, образуемому в ходе использования обратного осмоса [57, 58]. Полученные продукты чаще всего захоранивают на полигонах. Аналогом данного метода является обезвреживание полигонного фильтрата путем смешивания совместно с золой от сжигания ТКО, разработанное в России [59]. Рецептuru данного способа следующая: фильтрат объединяется с золой от сжигания ТКО, цементом и песком и перемешивается в соотношении 1:1,5:1:0,3. Достоинством такого способа обработки фильтрата является совмещенная утилизация золы от сжигания ТКО и жидкого отхода. Полученный продукт предлагается применять, как материал изоляции отходов или как строительный материал (в случае добавления гуминовой кислоты для предотвращения вымывания ТМ). Однако, применение значительного количества цемента приводит к экономической нецелесообразности использования данного метода как для производства строительных материалов, так и для пересыпки отходов.

### ***Комплексные технологии очистки фильтрата ТКО***

Ввиду наличия в фильтрате широкого перечня загрязняющих компонентов различной природы, для их удаления необходим комплексный подход, включающий в себя комбинации существующих традиционных способов очистки сточных вод.

Компанией «WEHRLE» (Германия) разработана технология биореактора с мембранами, которая является комплексом биологической очистки (совокупность нитрификации и денитрификации) и мембранной фильтрации. Мембранные модули увеличивают содержание активного ила в биореакторе, что способствует повышению окисляющей способности технологии в целом [60]. Подобные очистные сооружения используются в Германии с конца 20-го века.

При применении очистки фильтрата биофильтрами к загрузочным компонентам примешивают природные сорбенты. Данный метод позволяет

объединить достоинства адсорбционных процессов и биологического окисления органических соединений. В качестве естественных сорбентов добавляют: диатомит, опил, хвойную кору, недожог – отход сжигания окорки древесины, скоп – отход, образующийся при производстве целлюлозы, твердые отходы производства активированных углей (АУ) и шлак, полученный от сжигания угля. Шлак, отходы АУ, недожог обладают высокой сорбционной активностью и способствуют осветлению. Диатомит в силу узких пор, является не эффективным для извлечения крупных молекул гуматов, которые характерны для «старого» фильтрата.

Вайсман Я.И., Зайцева Т.А. и др. разработали устройство для очистки фильтрата на основе биофильтра, который заполнен производственными отходами: хвойной корой 5-летнего возраста (елово-осиновой), шлаком, скопом, недожогом (сорбент Н) и гравием фракции 50-100 мм. Кора является источником активной микрофлоры, необходимой для окисления органических примесей; шлак создает область с повышенной величиной рН за счет содержания оксидов кальция и кремния, что необходимо для активизации аэробных микроорганизмов и извлечения взвешенных, коллоидных и высокомолекулярных органических соединений; скоп очищает фильтрат от высокомолекулярных соединений и снижает общую минерализацию; сорбент Н за счет развитой поверхности и мезопористой структуры служит для извлечения нефтепродуктов, СПАВ и трудноокисляемых органических соединений. Последний слой – гравий – выполняет роль дренажного слоя. Для работы биофильтра, согласно назначению каждого слоя, соотношение высот слоев должно составлять 1:5:3:5:1. Несмотря на то, что испытания описанного биофильтра не подтвердили высокой эффективности очистки полигонного фильтрата, данная схема биофильтра может использоваться в качестве одной из единиц комплексной технологии [61].

В Австрии на полигонах используют комплекс по очистке фильтрата, который представляет собой несколько блоков: 1 – биологическая обработка (комплекс денитрификатора и нитрификатора), 2 – озоновая обработка в реакторе, 3 – обработка ультрафиолетовым излучением для антисептирования

обрабатываемой воды. В данной технологии дополнительно используются биореакторы с прикрепленной микрофлорой [45].

Бронникова О.И. и др. разработали технологию для очистки фильтрата на основе электрохемосорбции. Данная технология содержит в себе несколько этапов: механическая фильтрация, флотационное сепарирование, электроокисление и абсорбция. Преимущество данной технологии заключается во взаимном повышении окисления и сорбции. Эффективность очистки от взвешенных веществ достигает 99,9 %, от органических и неорганических загрязнителей – 96,5 %. Удаление микроорганизмов обеспечивается применением высокой плотности тока и высокоактивных сорбентов. В процессе очистки фильтрата формируется осадок и шлам, которые содержат органические кислоты, магниевые и кальциевые соли и окислы железа в связанной форме. Бронникова О.И. и др. предлагают применять для утилизации твердого отхода тот же способ, что и применяется для очистки фильтрата, но с изменением температурного режима от 40 до 120 °С для обеспечения процесса концентрирования, окисления отходов и антисептирования. В процессе окисления органические компоненты трансформируются с образованием углекислого газа и воды. После применения данной обработки отходы переходят в ранг сырья для получения строительных материалов, материалов химической промышленности или удобрений. Шламы предлагается перерабатывать на горючий газ: метан, окись углерода, водород [62].

На полигонах Германии и Японии распространена комплексная очистка фильтрата, состоящая из биологического этапа (анаэробно-аэробная совокупность) и физико-химических этапов: флокуляции и адсорбции на фильтре. Получаемый в результате очистки шлам отправляется на захоронение на полигон [47].

В последнее время разрабатывается все больше технологий с использованием обратного осмоса. Однако, вариативность подготовки фильтрата перед подачей на мембранный блок широка.

В Венском техническом университете разработана технология очистки фильтрата, которая состоит из этапа биологической обработки (денитрификация и две стадии нитрификации) и этапа мембранной очистки, где обрабатываемая жидкость последовательно проходит ультрафильтрацию и обратный осмос [30].

В институте коллоидной химии и химии воды им. А.В. Думанского разработана технология, где перед подачей фильтрата на установку обратного осмоса сточная вода проходит этап биологической обработки, затем подвергается коагуляции, антисептированию натриевой солью хлорноватистой кислоты, механической фильтрации, после чего осуществляется финальная очистка в Na-катионитовых фильтрах и электродиализное обессоливание [45].

В г. Новокузнецк на полигоне используется технология очистки фильтрата на установке обратно осмоса с диск-трубчатыми модулями, разработанными компанией «ROTRREAT» (Австрия). За счет использования нестандартных модулей мембран для подачи фильтрата на обратный осмос необходима только корректировка водородного показателя путем добавления серной кислоты и механическая фильтрация на песочном фильтре. Данная технология также реализована в некоторых странах Европы (Эстония, Литва).

Поворов А.А. и др. предлагают метод, который заключается в следующем: 1 – фильтрат подвергается электрохимической обработке для трансформации неокисляемых биологическим способом азотсодержащих компонентов аммонийной формы в нитросоединения; 2 – фильтрат проходит две ступени песчаной фильтрации; 3 – фильтрат отправляется на две ступени обратного осмоса; 4 – очищенная вода подвергается сорбции для удаления органики с низким молекулярным весом. Использование электрохимической обработки направлено на достижение концентраций азота в различных формах до требований нормативных документов после мембранной очистки. При этом электрохимическая обработка позволяет дополнительно провести антисептирование воды за счет активного хлора [63]. На основе данной технологии в ООО «БМТ» разработана и запатентована установка очистки фильтрата полигонов ТКО производительностью 10 м<sup>3</sup>/ч [64]. На сегодняшний

день в ряде российских городов используется данный метод обработки фильтрата.

Технологии обезвреживания фильтрата, имеющие высокую эффективность очистки, являются совокупностью механических, физико-химических и биологических способов обработки сточных вод. Недостатком биологической обработки является необходимость перманентного контроля условий протекания процесса для жизнедеятельности микроорганизмов (что связано в том числе с расходом химических реагентов). Кроме того, для использования биологических технологий очистки фильтрата необходимы значительные площади, что приводит к изменению природных ландшафтов. Использование физико-химических технологий напрямую связано с значительным количеством расходных материалов на процессы коагуляции, флотации и химического окисления, часть из которых могут представлять опасность для жизни, что приводит к увеличению затрат на обеспечение защиты труда. Основным недостатком данных методов является образование значительного количества вторичных отходов, которые обычно не могут быть вовлечены в производство и отправляются на захоронение. Безотходным способом утилизации фильтрата является изменение его агрегатного состояния из жидкого в твердое с помощью применения вяжущих веществ [65].

### **1.3. Механико-биологическая обработка отходов**

Механико-биологическая обработка (МБО) твердых коммунальных отходов представляет собой совокупность механических и биологических способов обработки твердых отходов, независимо от последовательности применяемых процессов. В результате механической обработки осуществляются разделение потока смешанных отходов и извлечение полезных фракций. В целях использования ресурсного потенциала отходов возможен отбор отдельных компонентов, представляющих собой вторичное сырье (черный металлолом, цветные металлы, стекло в виде бутылок и стеклобой, бумага, картон,

полимерные материалы, такие как ПЭТ бутылки, ПНД флаконы и канистры, ПП ящики, ПВД пленки), и отбор фракций отходов, пригодных для производства альтернативного топлива, за счет их высокой калорийности [66]. В результате применения биологической технологии деструкции органических отходов в зависимости от используемого метода, добиваются производства нового продукта из органической части отходов, либо уменьшения объема биологически реакционноспособных веществ. Органический углерод поступает на полигон в виде депонированных отходов и в результате биогеохимических процессов их деструкции превращается в газообразную компоненту и растворяется в жидкой фазе, выходя в итоге из системы в виде биогаза или в составе фильтрата. Зная, что основой для образования свалочного газа выступают легкоразлагаемые и среднеразлагаемые органические фракции отходов, сокращение их содержания в составе депонированных отходов способствует уменьшению удельных значений эмиссий парниковых газов [30].

Таким образом, МБО отходов является эффективным способом снижения геоэкологического воздействия полигонов за счет сокращения количества захораниваемых отходов и изменения их морфологического состава, что позволяет значительно снизить количество образуемого биогаза и степень загрязнения фильтрата. В результате возникает геоэкологический резерв, позволяющий сохранять природные первичные ресурсы, энергию, сокращать газовые эмиссии в окружающую среду, предотвращать разрушение компонентов геосреды [67].

Основными отличиями методов обработки отходов, основанных на данной технологии, являются последовательность стадий процесса и назначение биологического этапа. В роли биологической обработки отходов выступают компостирование (открытое, туннельное, мембранное), анаэробное сбраживание или совокупность отдельных компонентов обоих способов. В общем биологические методы обработки ТКО, как и биологические способы очистки фильтрата, основаны на активности микроорганизмов и их ферментативной способности к деструкции различных органических соединений и разрушению

природных и синтетических полимерных материалов. Результатом работы микроорганизмов являются новые полезные компоненты и переработка твердых отходов [68].

Анаэробное сбраживание органической части отходов используется для производства биогаза, а остатки брожения, как правило, смешиваются с необработанной мелкой фракцией ТКО и поступают на аэробное компостирование в биобарабанах. Производство биогаза данным способом не является рентабельным в России, однако за рубежом широко распространены заводы механико-биологической обработки ТКО, использующие энергетические ресурсы биогаза для нужд завода, создавая таким образом замкнутую схему использования ресурсов отходов для их стабилизации и, следовательно, снижения экологического воздействия на окружающую среду.

Биологическая переработка отходов с помощью биотермического компостирования позволяет получать органические удобрения для сельского хозяйства и зеленого строительства. Производство компоста из ТКО обусловлено высоким биологическим потенциалом органической фракции отходов, которая заключается в содержании химических компонентов, присутствие которых необходимо в среде для развития растительности (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Усредненные данные по агрохимическим показателям фракций ТКО [69]

Фракции ТКО	Ед.изм.	N <sub>общ</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO
Пищевые отходы	% на сухое в-во	2,3-2,6	0,58-0,62	2,0-2,3	3,0-4,0
Бумага, картон		0,3-0,4	0,25-0,28	0,15-0,2	0,7-0,9
Древесина, садовые отходы		0,2	0,1-0,15	0,2-0,25	0,8
Кости		4,0	15,0	0,5	40,0
Текстиль		1,0	0,2	0,1	0,2
Фракция менее 16 мм		0,7-1,4	0,6-0,7	0,3-0,45	6,5-8,0

Процессы, протекающие при компостировании отходов, можно разделить на 3 стадии. На первой стадии протекает быстрый рост мезофильных

микроорганизмов, оптимальный режим температуры для которых находится в диапазоне 20-35 °С. Источником питательных веществ для мезофилов являются быстрорастворимые органические компоненты пищевой фракции отходов (глицериды, протеины, органические кислоты). Жизнедеятельность микроорганизмов приводит к образованию и выделению тепла, в результате чего происходит подогрев компостируемого материала до 50 °С. Повышение температуры свидетельствует о переходе на вторую стадию, где осуществляется активный рост термофильных микроорганизмов. Жизнедеятельность термофилов увеличивает образование и выделение тепла, в результате чего происходит разогрев компостируемого материала до 55-60 °С. Данная температура способствует увеличению перечня компонентов, подвергаемых переработке, и дополнительно увеличивает скорость процессов деструкции органических соединений. Кроме того, высокая температура приводит к гибели патогенных микроорганизмов за счет чего происходит обеззараживание компостного материала. Когда заканчивается количество быстрорастворимых органических веществ, наблюдается медленное понижение температуры, что говорит о переходе на третью стадию. Термофилы частично погибают и частично переходят в состояние спор, а у мезофилов вновь наблюдается активный рост за счет оптимального температурного режима, а также ферментативной способности к деструкции среднерастворимых органических компонентов, таких как лигнин и клетчатка. Третья стадия характеризуется образованием гуминовых соединений, то есть кроме разрушения органических компонентов осуществляется и их синтез, что способствует повышению качества производимого продукта [70, 71].

Компостирование отходов может осуществляться в герметичных системах (контейнер, биобарабан) или открытым методом (полевое компостирование в буртах). Герметичные системы обычно оснащены контролем над физическими параметрами внутри системы для создания оптимальных условий разложения органики и возможности их корректировки. При полевом компостировании управление производственным процессом затруднено, соответственно, качество



полученного продукта более вариабельно по сравнению с компостированием в биобарабанах. Однако данный способ позволяет стабилизировать органические отходы при низких капиталовложениях.

Ключевые параметры, оказывающие воздействие компостирование, это температурный режим, содержание влаги, водородный показатель среды и наличие кислорода.

Температура – один из главных факторов, за счет которого повышается эффективность процесса компостирования. Известно, что микроорганизмы термофильной стадии приводят к деструкции 70 % лигнина, являющегося среднеразлагаемым, в результате компостирования. Соответственно искусственное повышение температуры в целях поддержания подходящих условий для роста термофильных микроорганизмов может сокращать время компостирования отходов [72]. Создание условий искусственного повышения температуры возможно только в закрытых системах.

Содержание кислорода необходимо для развития процессов микробиального разложения органических веществ, поэтому аэрация компостируемой массы является необходимым условием. При полевом компостировании существует два вида аэрации: аэрация, осуществляемая перебуртованием материала с помощью ворошильной машины, и аэрация, создаваемая подачей воздуха через трубы с перфорацией, установленные в основании площадки компостирования.

Влажность компостируемого материала оказывает ощутимое влияние на эффективность компостирования. Для достижения высокой степени эффективности процесса содержание влаги в материале не должно быть ниже 50 %. При этом сама возможность компостирования и развития микроорганизмов наблюдается в диапазоне влажности материала от 35 до 65 % [70].

Водородный показатель компостируемой массы поднимается от 4,5 до 8,1 в процессе компостирования за счет формирования ионов аммония. В случае значительной доли кислореагирующих компонентов в исходной массе, таких как

кора, древесные обрезки, хвоя и опилки, необходима корректировка рН в щелочную среду (например, с помощью извести) с целью балансирования обмена веществ и предотвращения гниения [73].

Также для ускорения процесса компостирования распространено использование внесения специальных бактериальных препаратов с оптимальным комплексом бактериальных культур.

В настоящее время на заводах, направленных на производство компоста из смешанных ТКО, биологической переработке подвергается отсев сортировки с размером частиц до 80 мм, который отбирается на первом этапе механической сортировки поступающих смешанных отходов в результате работы барабанного грохота или дискового сита. Компостирование полученного отсева производится в биобарабанах, после чего осуществляется механическое очищение произведенного материала от балластных примесей [74, 75]. Однако установленные данные об изменении морфологического состава отходов с течением времени свидетельствуют о повышении доли техногенных компонентов, которые не подвергаются механической сортировке и попадают в материал для компостирования, в результате чего происходит загрязнение получаемого компоста ионами тяжелых металлов и стеклобоем, что ограничивает его применение в качестве органического удобрения [76]. В случае отсутствия возможности сбыта полученной продукции происходит ее депонирование на полигонах ТКО, но в данном случае органическая масса отходов обладает низкой биологической активностью, в связи с чем можно сделать вывод о безусловном снижении экологической нагрузки.

Ключевыми недостатками данного способа являются отсутствие возможности производства экологически чистого компоста без применения качественной сортировки материала, поступающего на биологическое разложение; широкая вариативность характеристик компоста в связи с нестабильностью образуемых смешанных отходов; необходимость контроля качества каждой партии в случае использования продукта вне полигонов ТКО.

## 1.4. Выводы

1. Несмотря на развитие государственной политики, направленной на применение современных методов утилизации ТКО и выполнение принципов циркулярной экономики, в России захоронение отходов на полигонах и несанкционированных свалках является преобладающим методом обращения с ТКО, что влечет за собой ряд экологических проблем.

2. В течение жизни полигона депонированные отходы под действием физических, химических и микробиальных процессов подвергаются деструкции с образованием новых продуктов: фильтрата и биогаза, определяющих загрязняющее воздействие полигонов на компоненты геосреды.

3. Фильтрат полигонов ТКО содержит широкий перечень загрязняющих веществ, и его распространение за границы полигона приводит к интоксикации почв, подземных и поверхностных вод, в связи с чем необходимо организовывать его сбор и утилизацию. В текущий момент времени в России широко используемым способом уменьшения количества фильтрата является его рециркуляция в целях увлажнения массы отходов. За рубежом чаще используют превентивные меры, заключающиеся в обработке захораниваемых отходов, а также метод обратного осмоса.

4. Способы очистки фильтрата, имеющие значительную эффективность, являются комбинацией механических, биологических и физико-химических процессов, направленных на очищение от определенных компонентов. Широкому внедрению данных методов препятствуют высокие капитальные вложения многоступенчатых установок очистки и образование вторичных отходов, подлежащих утилизации. Перспективным методом утилизации фильтрата является его отверждение, как безотходная технология с малым количеством оперативных этапов производства.

5. Механико-биологическая обработка ТКО позволяет использовать ресурсный потенциал отходов, а также стабилизировать биологическую

активность органической фракции отходов, что приводит к снижению эмиссий биогаза и уменьшению токсичности фильтрата.

## ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1. Объекты исследования

Объектами данного исследования являются:

1. Полигон ТКО ООО «КомЭк».
2. Фильтрат полигона ТКО ООО «КомЭк».
3. Почвы и растения прилегающей территории полигона ТКО ООО «КомЭк».
4. Полигон ТКО ООО «Новый Свет-ЭКО».
5. Мелкая фракция ТКО (0-80 мм) полигона ТКО ООО «Новый Свет-ЭКО».
6. Техногенный грунт, полученный из мелкой фракции ТКО на полигоне ООО «Новый Свет-ЭКО».
7. Фильтрат полигона ТКО ООО «Новый Свет-ЭКО».
8. Литификат, полученный при утилизации фильтрата полигона ТКО ООО «Новый Свет-ЭКО».

Далее представлено подробное описание полигонов, являющихся объектами исследования № 1 и № 4, их условий и времени эксплуатации. Описание конкретных составляющих полигонов (почвы, растения, фильтрат, отходы) представлены в соответствующих главах.

#### *Полигон ТКО ООО «КомЭк»*

Полигон ТКО ООО «КомЭк» входит в комплекс по сортировке и утилизации ТКО в Тамбовской области. Данный комплекс расположен между северной частью кольцевой дороги и дорогой на Лысые горы (рисунок 2.1). Ближайшими населенными пунктами являются п. Первомайский – 1 км на юго-запад, г. Тамбов – 5 км на юго-запад, п. Мирный – 2,8 км на север. С южной стороны комплекса находится закрытая и рекультивированная городская свалка ТКО (рисунок 2.2).

Комплекс состоит из мусоросортировочного цеха и участка захоронения ТКО. Поступающие отходы отправляются на участок отбора крупногабарита (мебель, покрышки, матрасы, холодильники и пр.) с их последующим разбором

и вовлечением в производственный процесс при наличии такой возможности. Далее отходы поступают в основной сортировочный цех, где осуществляются отделение мелкой фракции (в основном пищевые отходы), сортировка по конкретным фракциям с выделением полезных компонентов, которые в последующем отправляются на вторичную переработку. Отсев сортировки и мелкая фракция отправляются на захоронение.

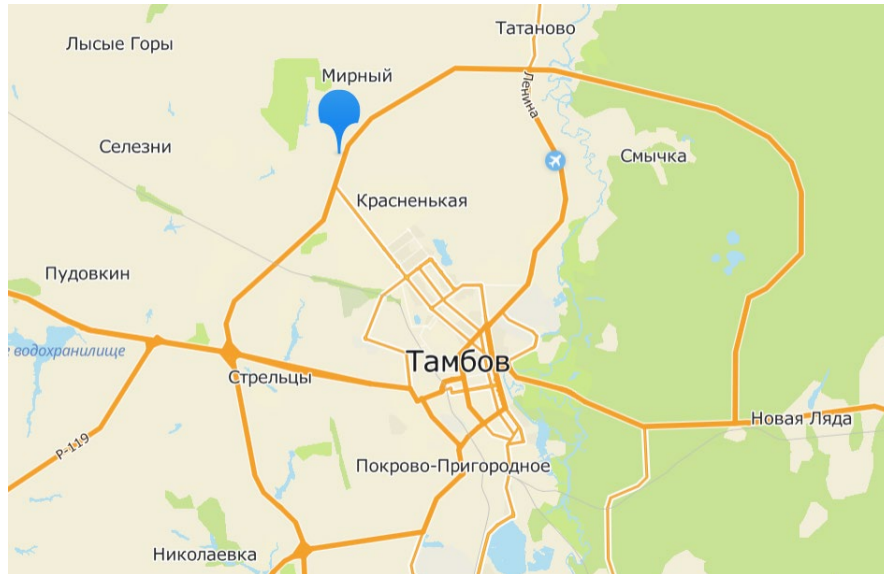


Рисунок 2.1 – Местоположение полигона ТКО ООО «КомЭк»



Рисунок 2.2 – Полигон ТКО ООО «КомЭк»: 1 – зона складирования ТКО; 2 – сортировочный цех; 3 – административная часть; 4 – закрытая городская свалка ТКО

Площадь зоны складирования ТКО равняется 16,8 га. Мощность полигона 1,5 млн т. Основание полигона представлено водоупорным слоем из тяжелого суглинка и глины мощностью 5,5-6 м и 3,5-5 м соответственно, обладающих коэффициентом фильтрации, установленным нормативными документами – 0,00005-0,00075 м/сут. В основании полигона устроена дренажная траншея из железобетонных лотков, из которой по асбестоцементной трубе в приемный колодец автоматизированной насосной станции поступает фильтрат, который насосами подается по перфорированному шлангу на поверхность карт складирования ТКО для увлажнения в теплое время года. Также на полигоне предусмотрены грунтовый вал для пересыпки ТКО, нагорная канава для отделения потока поверхностных вод с прилегающей территории от участка захоронения ТКО, и ограждение по периметру для задержания легких фракций.

#### ***Полигон ТКО ООО «Новый Свет-ЭКО»***

Полигон ТКО ООО «Новый Свет-ЭКО» расположен в Ленинградской области (Гатчинский район) и представлен на рисунках 2.3, 2.4. Ближайшими населенными пунктами являются г. Гатчина – 2 км на запад и п. Новый Свет – 2,5 км к югу по прямой от границы полигона. Первоначально данная территория была отведена под строительство откормочного комплекса по производству свинины. Строительство комплекса было приостановлено и в 1999 году территория была перепрофилирована в полигон ТКО. Таким образом, полигон ООО «Новый Свет-ЭКО» располагается на месте недостроенного прудонакопителя и принят в эксплуатацию в 2001 г. Площадь зоны складирования составляет 35,7 гектара, мощность полигона – 10 млн т. По периметру полигона устроены дамба из местного суглинистого грунта и сетчатое ограждение. В основании полигона сформирован противofильтрационный экран, который состоит из двух слоев пленки, двух слоев рубероида и местного суглинистого грунта с коэффициентом фильтрации 0,0008 см/с мощностью 0,5 м. Полигон «Новый свет – ЭКО» принимает отходы населения Гатчинского и сопредельных районов Ленинградской области. Полигон осуществляет прием и захоронение

твердых (коммунальных, строительных и промышленных отходов) 3-5-го классов опасности.

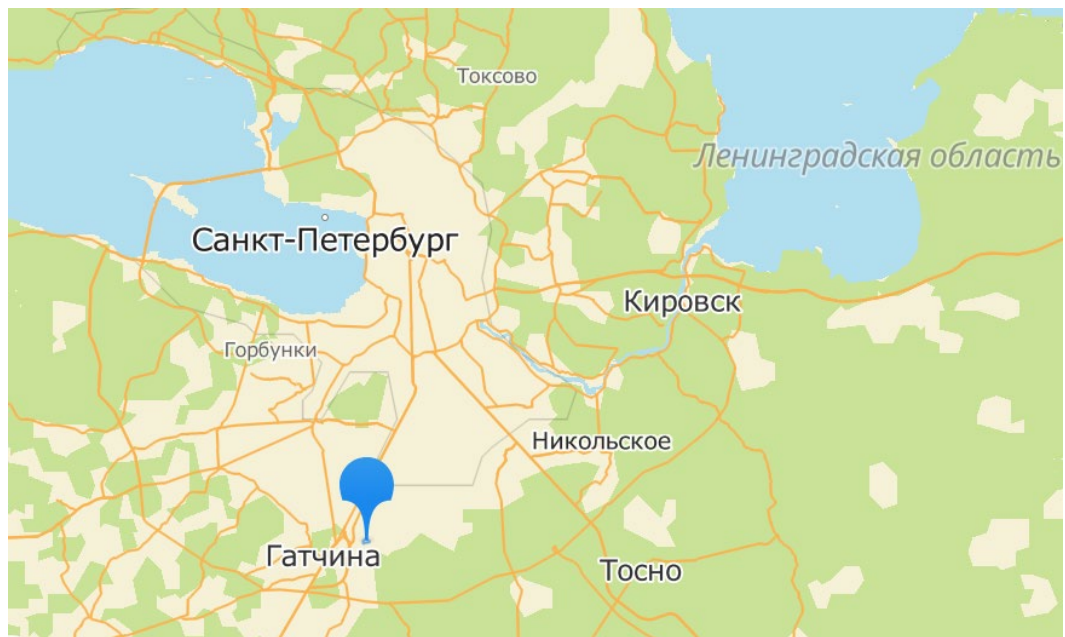


Рисунок 2.3 – Местоположение полигона ТКО ООО «Новый Свет-ЭКО»

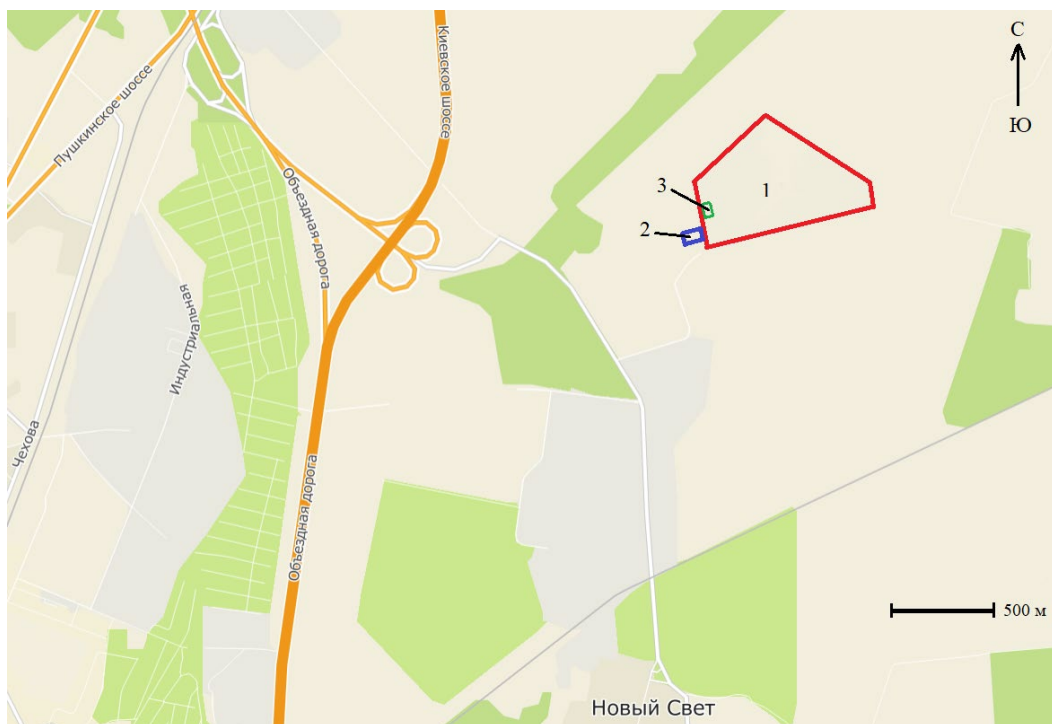


Рисунок 2.4 – Полигон ТКО ООО «Новый Свет-ЭКО»:

1 – зона складирования ТКО;

2 – административная часть; 3 – станция активной дегазации



На полигоне ТКО «Новый Свет - ЭКО» расположена линия сортировки входящих отходов, позволяющая отделять мелкую фракцию ТКО (0-80 мм), состоящую преимущественно из органических компонентов, и выбирать полезные компоненты из остального потока ТКО, пригодные для вторичной переработки. Мелкая фракция ТКО отправляется на площадку компостирования, где осуществляется стабилизация биологически активных компонентов, с последующим использованием полученного техногенного грунта в качестве изоляционного материала отходов.

Данный полигон оснащен станцией активной дегазации, в результате работы которой осуществляется сбор биогаза из толщи отходов для его утилизации и получения электроэнергии. На полигоне предусмотрен сбор образуемого фильтрата с помощью песчано-гравийного дренажа в основании участка складирования ТКО. Накопление фильтрата осуществляется в подземных металлических емкостях, куда он поступает самотеком по сети дрен. По достижении реперного значения объема емкостей, фильтрат либо поступает на рециркуляцию, либо вывозится для обезвреживания на лицензированное предприятие. Рециркуляция фильтрата позволяет достичь его частичного испарения и увлажнения свалочных масс, что в свою очередь увеличивает скорость разложения отходов и снижает содержание органических веществ в фильтрате. Согласно нормативным документам на полигоне ТКО «Новый свет – ЭКО» проводится постоянный мониторинг качества подземных вод и ближайших водных объектов, а также атмосферного воздуха и почв.

## **2.2. Методы исследования**

### **2.2.1. Рентгенофлуоресцентный анализ**

Рентгенофлуоресцентный анализ является одним из методов рентгеноспектрального анализа, которые основаны на взаимодействии рентгеновского излучения с анализируемым веществом. Метод используется для определения элементного состава. Использование рентгенофлуоресцентного

анализа приводит к воздействию на исследуемый образец рентгеновского излучения. При этом частично излучение проходит сквозь образец, частично поглощается им, и частично рассеивается. Результатом является испускание компонентами пробы вторичного рентгеновского излучения, что представляет собой рентгеновскую флуоресценцию, которая возникает за счет поглощения веществом рентгеновского излучения. В итоге атомы химических элементов излучают фотоны со строго конкретной энергией, которая не зависит от химического строения вещества и пропорциональна их концентрации в образце, что дает возможность не только качественного, но и количественного анализа [77].

В данной работе использовался рентгенофлуоресцентный EDS-спектрометр ED-2000 фирмы Oxford для определения элементного состава образцов сланцевой золы.

### **2.2.2. Рентгенофазовый анализ**

Рентгенофазовый анализ является методом идентификации кристаллических фаз. Качественный рентгенофазовый анализ позволяет разделять и идентифицировать отдельные фазы гетерогенной системы на основе присущих им значений межплоскостных расстояний и соответствующих интенсивностей линий рентгеновского спектра. Количественный рентгеновский фазовый анализ основан на зависимости интенсивности дифракционного отражения от содержания соответствующей фазы в исследуемом объекте [78]. Для рентгенофазового анализа использовался автоматический порошковый дифрактометр D2Phaser (Bruker). Программный комплекс PDXL2 (Rigaku) с использованием базы порошковых дифракционных данных Powder Diffraction File (PDF-2, ICDD, 2016) применялся для идентификации фаз образца. Количественный анализ осуществлялся с помощью метода полнопрофильного анализа (Ритвельда) с использованием структурных данных для каждой из фаз из Inorganic Crystal Structure Database (ICSD 2017/1) в программном комплексе TOPAS 4.0.

Данный метод использовался для фазового анализа сланцевой золы и литификата.

### **2.2.3. Сканирующая электронная микроскопия**

Сканирующая электронная микроскопия предназначена для получения увеличенного изображения объекта исследования путем сканирования по нему сфокусированным пучком электронов и регистрации детектором сигнала, возникающего в результате взаимодействия электронов с веществом. Анализ образцов осуществляется в режиме вакуума, т.к. в воздухе электрон не сможет долететь от источника до образца в связи с тем, что произойдет столкновение с молекулами воздуха, которые будут на его пути [79].

Исследование образцов литификата осуществлялось на растровом электронном микроскопе JSM 7001F (JEOL, Япония) с возможностью проведения рентгеноспектрального микроанализа INCA PentaFETx. Изображения получены во вторичных электронах. Регистрация вторичных электронов позволяет получить высокое пространственное разрешение ввиду того, что область их образования лежит около поверхности.

В данной работе сканирующая электронная микроскопия применялась для определения микроструктуры литификата.

### **2.2.4. Инфракрасная спектроскопия**

Основой данного метода является специфическое пропускание веществами ИК-излучения волн определенных длин. ИК-спектроскопия выявляет определенные функциональные группы, их связи друг с другом и количество в соединении. Фиксируемые в ИК-спектрах полосы пропускания обусловлены переходами между энергетическими уровнями в молекулах вещества, валентными, колебательными, деформационными. Полосы пропускания, обусловленные определенными группами атомов, называют

характеристическими и их используют для определения данных групп в исследуемых образцах [80].

В данной работе использовался спектрофотометр с Фурье-преобразованием Shimadzu IrTracer-100 (Япония) для анализа сухого остатка фильтрата и литификата.

### **2.2.5. Оптическая эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой**

Оптическая эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой – метод определения элементного состава вещества. Принцип данного метода основан на измерении излучения, испускаемого элементами в пробе, помещенной в индуктивно связанную плазму. Измеренные значения интенсивности эмиссии сравниваются со значениями интенсивности стандартов с известной концентрацией, что позволяет получить значение концентрации элемента в исследуемой пробе [81].

В данной работе использовался оптический эмиссионный спектрометр с индуктивно связанной плазмой Shimadzu ICPE-9000 (Япония) для определения количественного содержания тяжелых металлов в почвах, растениях, фильтрате, сланцевой золе, литификате и техногенном грунте.

### **2.2.6. Метод капиллярного электрофореза**

Метод капиллярного электрофореза применяется для определения ионных и нейтральных соединений различной природы. Принцип работы данного метода заключается в миграции и разделении веществ жидкой смеси в капилляре в результате воздействия электрического поля. Детекция компонентов определяется по скорости движения соединений смеси по капилляру, что зависит от заряда и массы компонента. В результате формируется электрофореграмма с пиками, по которой качественный состав определяется по времени достижения компонентов зоны детекции, а количественный – по площади пиков. [82].

В ходе данного исследования применялся капиллярный электрофорез КАПЕЛЬ-105М (Россия) для анализа фильтрата.

### **2.2.7. Фотометрический метод анализа**

Фотометрический метод анализа заключается в поглощении электромагнитного излучения веществами, подвергаемыми исследованию. В результате поглощения света атомы и молекулы анализируемых веществ переходят в новое возбужденное состояние. В результате использования фотометра происходит сравнение потока света, который прошел через контрольный раствор с известной концентрацией определяемого вещества, и потока света, который прошел через анализируемый образец. Для определения содержания вещества в водной среде используют градуировочный график [83].

В данной работе применялся спектрофотометр ПромЭкоЛаб ПЭ-5300В для анализа техногенного грунта.

### **2.2.8. Титриметрический метод анализа**

Титриметрический анализ – метод массового химического анализа, который основан на подсчете объема раствора реактива с известной концентрацией, расходуемого для реакции с определяемым соединением. Для точного определения окончания реакции применяются индикаторные соединения, способствующие изменению окраски [84]. Данный метод использовался в работе для анализа фильтрата и техногенного грунта.

### **2.2.9. Гравиметрический метод анализа**

Гравиметрический метод анализа основан на точном измерении массы вещества. В основе метода – закон сохранения массы веществ при химических превращениях. В работе данный метод применялся для определения сухого остатка фильтрата: аликвотную пробу фильтровали через фильтр «синяя лента», после чего выпаривали досуха на водяной бане [85].

### 2.2.10. Потенциометрический метод анализа

Измерение удельной электрической проводимости и рН фильтрата осуществлялось с помощью многопараметрического анализатора жидкости Multi 340i (WTW, Германия). Принцип работы анализатора – потенциометрический. Данный метод основан на измерении потенциалов на электродах первичных преобразователей. Анализатор оснащен рН-электродами и кондуктометрическими ячейками, которые позволяют автоматически получать значение рН и электропроводности жидкости.

### 2.2.11. Расчет эффективности сорбционной очистки

Эффективность очистки модельных растворов от ионов тяжелых металлов литификатом рассчитывалась по следующей формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{C_n - C_k}{C_n} * 100 \quad (2.1),$$

где  $\mathcal{E}$  – эффективность очистки, %;

$C_n$  – начальная концентрация, мг/дм<sup>3</sup>;

$C_k$  – конечная концентрация, мг/дм<sup>3</sup>.

### 2.2.12. Метод одноосного сжатия

Сущность метода одноосного сжатия заключается в измерении максимального значения разрушающего давления, приложенного к плоским торцам правильного призматического образца через плоские стальные плиты [86]. Определение предела прочности литификата при сжатии проводилось на установке одноосного сжатия ГТ 0.5.1 измерительно-вычислительного комплекса «АСИС» («НПП» Геотек», Россия).

### 2.2.13. Токсикологические исследования

Для оценки соответствия литификата и техногенного грунта «Единым санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю)» были проведены токсикологические исследования. Определение общей токсичности осуществлялось с помощью биотестирования на таких тест-объектах, как *Daphnia magna Straus* и *Chlorella vulgaris*. Определение острой токсичности при введении в желудок, ингаляционной опасности, раздражающего действия на кожные покровы и слизистые оболочки осуществлялось на лабораторных животных (белые крысы, морские свинки). Для анализов использовали образцы в нативном виде и их водные вытяжки.

### 2.3. Выводы

1. Представлено описание двух полигонов ТКО, расположенных в Тамбовской и Ленинградской областях. Данные полигоны являются источниками почв, растений, фильтрата и отходов, которые непосредственно исследуются в ходе работы. Рассмотренные полигоны отвечают санитарным требованиям по устройству и эксплуатации полигонов ТКО.

2. Описаны используемые методики анализа и средства измерения для исследования объектов данной работы. Использованные методы позволили определить химический состав фильтрата, фазовый состав сланцевой золы и литификата, агрохимические показатели техногенного грунта, закономерности литификации фильтрата, токсикологические параметры исследуемых объектов.

3. Достоверность результатов подтверждается использованием утвержденных в нормативных документах методик, современных методов исследования, высокоточного оборудования, а также значительным объемом анализов и использованием статистических методов обработки данных. Основные положения коррелируют с известными закономерностями в области исследования.

## **ГЛАВА 3. МОНИТОРИНГ ПОЛИГОНА ТКО ООО «КОМЭК»**

### **3.1. Анализ состояния почв и растений на прилегающей территории полигона ТКО ООО «КомЭк»**

Согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03, санитарно-защитная зона объекта захоронения ТКО ООО «КомЭк» определена в размере 500 м от границы территории предприятия.

Мониторинг объекта складирования ТКО состоит из контроля качества подземных вод, поверхностных водных объектов, атмосферного воздуха, почвы, растительности и акустического загрязнения в зоне геоэкологического воздействия полигона. Основными факторами отрицательного влияния на компоненты геосреды являются фильтрат и биогаз. Оценка качества почв является важным параметром в связи с тем, что почвам отведена функция сохранения условий обитания и разнообразия биоты по видам, а также обеспечения жизнедеятельности биогеоценозов и в целом биосферы [87]. Состояние почвы контролируется содержанием тяжелых металлов, имеющих предельно допустимые концентрации для почв. Однако, тяжелые металлы, извлекаемые из почвы растениями, связываются их корневой системой и мигрируют по стеблям в надземные части растений, где происходит их аккумуляция. Данные процессы обусловлены рядом биогеохимических реакций, которые происходят в системе «ризосфера – корни – надземные органы растений» [88, 89]. В связи с этим для объективной оценки качества почв исследование растений, произрастающих на данной почве, является необходимым, т.к. почва и растения создают единую систему содержания и движения элементов.

Объектом оценки воздействия полигона на почвы и растения прилегающей территории явился полигон ТКО ООО «КомЭк», расположенный в Тамбовской области. Исследуемая территория является равниной со слабохолмистым рельефом, имеет отметки высот от 180 до 161 м по абсолютным значениям и уклон с юго-запада на северо-восток. В ходе рекогносцировки объекта были определены 8 площадок размером 30x30 м на прилегающей территории полигона



(рисунок 3.1), где проводился отбор проб почв и растений для их последующего исследования.

На прилегающей к полигону территории флора преимущественно представлена травянистыми растениями с рудеральными видами – крапивой двудомной *Urtica dioica* L., мать-и-мачехой *Tussilago farfara* L., полынью горькой *Artemisia absinthium* L., хвощом обыкновенным *Equisetum arvense* L., топианамбуром *Helianthus tuberosus* L. и лопухом большим *Arctium lappa* L. Между действующим полигоном и закрытой городской свалкой наблюдаются также древесные растения, такие как ясень обыкновенный *Fraxinus excelsior* L. Среди преимущественно произрастающей флоры повсеместно на территории, прилегающей к полигону, наблюдаются только полынь *Artemisia absinthium* L. и крапива *Urtica dioica* L. В связи с этим мониторинг состояния почв и растений по содержанию в них ТМ осуществлялся путем анализа полыни горькой, крапивы и почв, на которых они были отобраны, для последующего сравнительного анализа. Анализ образцов растений осуществлялся отдельно по частям: корни растений, стебли растений и листья растений [90].

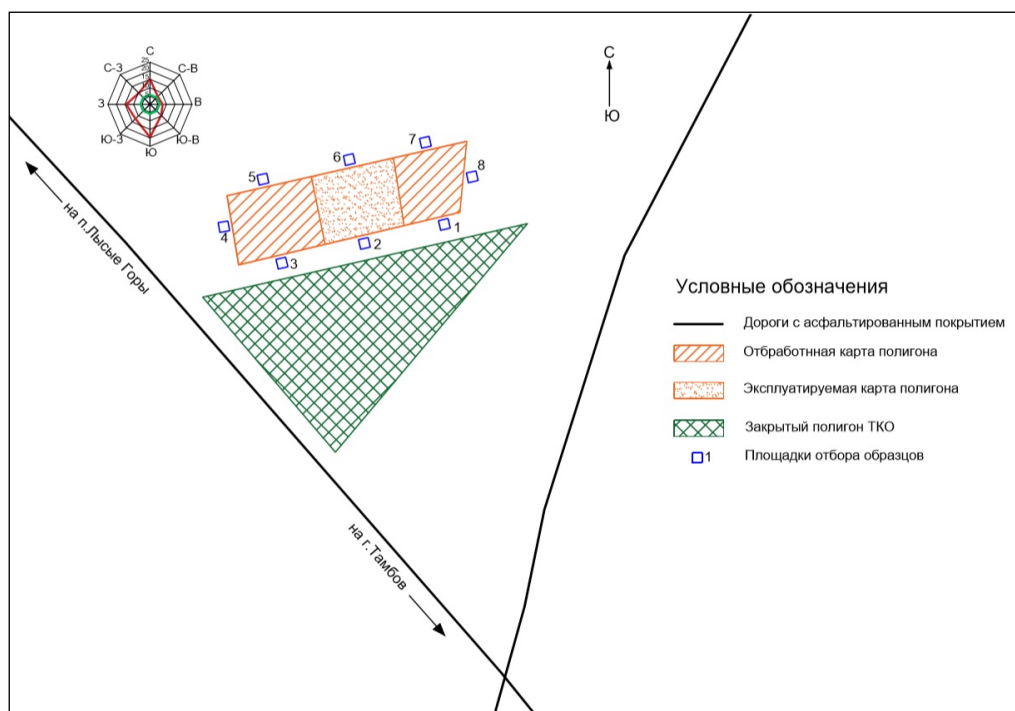


Рисунок 3.1 – Схема объекта

Результаты исследования валового содержания тяжелых металлов в оботранных почвах и растениях представлены в таблицах 3.1 и 3.2. Полученные концентрации ТМ в почвах сравнивались с ориентировочно-допустимыми концентрациями (ОДК) валового содержания ТМ для разных типов почв.

Таблица 3.1 – Концентрация Cu, Ni, Pb, Zn и Cd (мг/кг) в отобранных образцах почв и полыни

№ площад ки	Почва	ОДК для почв [91]	Корни	Стебли	Листья
<b>Cu</b>					
1	236,85 ± 9,95	66	23,32 ± 0,79	18,23 ± 0,77	40,94 ± 1,76
2	134,22 ± 7,11		21,00 ± 0,97	18,49 ± 0,80	26,33 ± 1,18
3	89,16 ± 3,68		18,65 ± 0,78	16,07 ± 0,64	25,06 ± 1,07
4	22,19 ± 0,88		15,06 ± 0,62	8,22 ± 0,37	15,40 ± 0,48
5	20,88 ± 0,94		14,79 ± 0,67	7,94 ± 0,44	18,31 ± 0,79
6	20,91 ± 0,79		16,16 ± 0,63	8,31 ± 0,31	14,64 ± 0,63
7	22,14 ± 0,94		15,77 ± 0,80	10,94 ± 0,37	21,59 ± 0,92
8	42,62 ± 1,96		19,27 ± 0,82	15,49 ± 0,74	17,87 ± 0,77
<b>Ni</b>					
1	61,85 ± 2,72	40	18,69 ± 1,03	6,09 ± 0,26	27,45 ± 1,25
2	86,36 ± 3,65		13,07 ± 0,57	7,96 ± 0,34	28,08 ± 1,17
3	56,03 ± 2,86		15,09 ± 0,55	5,02 ± 0,23	21,35 ± 0,63
4	22,46 ± 0,98		5,27 ± 0,22	2,99 ± 0,13	12,32 ± 0,39
5	25,32 ± 1,15		6,83 ± 0,29	3,15 ± 0,13	5,42 ± 0,23
6	23,26 ± 0,98		7,21 ± 0,30	5,10 ± 0,20	17,50 ± 0,73
7	22,70 ± 0,95		8,41 ± 0,37	5,63 ± 0,25	15,49 ± 0,65
8	30,65 ± 1,29		5,53 ± 0,27	3,26 ± 0,14	20,64 ± 0,89
<b>Pb</b>					
1	126,75 ± 6,46	65	5,64 ± 0,24	5,14 ± 0,22	26,09 ± 1,11
2	112,85 ± 5,25		<1,0	8,00 ± 0,40	15,07 ± 0,64
3	46,85 ± 2,11		<1,0	<1,0	5,96 ± 0,25
4	<1,00		<1,0	<1,0	<1,0
5	<1,00		<1,0	<1,0	<1,0
6	<1,00		<1,0	<1,0	<1,0
7	<1,00		<1,0	1,47 ± 0,06	<1,0
8	2,93 ± 0,14		<1,0	<1,0	<1,0

Продолжение таблицы 3.1

№ площадки	Почва	ОДК для почв [91]	Корни	Стебли	Листья
<b>Zn</b>					
1	786,49 ± 33,03	110	89,09 ± 4,72	113,67 ± 5,29	269,69 ± 14,21
2	643,55 ± 28,64		65,54 ± 2,80	188,02 ± 8,72	166,07 ± 7,12
3	314,85 ± 13,57		71,09 ± 2,99	123,32 ± 5,31	156,07 ± 7,60
4	35,64 ± 1,14		30,56 ± 1,30	38,92 ± 1,72	38,21 ± 1,62
5	34,22 ± 1,59		36,13 ± 1,76	55,48 ± 2,36	66,63 ± 3,57
6	30,44 ± 1,38		34,88 ± 1,44	34,49 ± 1,42	39,54 ± 1,66
7	29,86 ± 1,31		46,94 ± 1,88	64,80 ± 2,77	51,29 ± 2,40
8	56,12 ± 2,55		37,44 ± 1,57	71,44 ± 3,44	60,30 ± 2,76
<b>Cd</b>					
1	13,89 ± 0,67	1,0	0,90 ± 0,03	0,78 ± 0,04	2,07 ± 0,10
2	9,55 ± 0,43		0,56 ± 0,03	0,47 ± 0,02	1,38 ± 0,06
3	4,83 ± 0,27		0,41 ± 0,02	0,34 ± 0,01	0,78 ± 0,04
4	<0,1		<0,2	<0,2	<0,2
5	<0,1		<0,2	<0,2	<0,2
6	<0,1		<0,2	<0,2	<0,2
7	<0,1		<0,2	<0,2	<0,2
8	0,82 ± 0,04		0,27 ± 0,01	<0,2	0,52 ± 0,02

Таблица 3.2 – Концентрация Cu, Ni, Pb, Zn и Cd (мг/кг) в отобранных образцах почв и крапивы

№ площадки	Почва	ОДК для почв [91]	Корни	Стебли	Листья
<b>Cu</b>					
1	236,85 ± 9,95	66	27,50 ± 1,41	17,02 ± 0,83	35,16 ± 1,44
2	134,22 ± 7,11		14,74 ± 0,68	12,39 ± 0,64	34,73 ± 1,67
3	89,16 ± 3,68		26,90 ± 1,69	15,66 ± 0,67	32,35 ± 1,52
4	22,19 ± 0,88		11,04 ± 0,43	6,45 ± 0,31	13,02 ± 0,59
5	20,88 ± 0,94		11,63 ± 0,56	8,70 ± 0,34	13,84 ± 0,46
6	20,91 ± 0,79		13,32 ± 0,62	7,32 ± 0,29	16,64 ± 0,70
7	22,14 ± 0,94		14,33 ± 0,76	8,07 ± 0,36	19,96 ± 0,82
8	42,62 ± 1,96		15,79 ± 0,78	8,95 ± 0,38	23,02 ± 1,22

Продолжение таблицы 3.2

№ площад ки	Почва	ОДК для почв [91]	Корни	Стебли	Листья
<b>Ni</b>					
1	61,85 ± 2,72	40	25,94 ± 1,17	9,72 ± 0,44	35,66 ± 1,53
2	86,36 ± 3,65		7,15 ± 0,35	6,93 ± 0,34	19,84 ± 0,95
3	56,03 ± 2,86		6,12 ± 0,24	5,43 ± 0,30	11,79 ± 0,45
4	22,46 ± 0,98		3,07 ± 0,13	2,12 ± 0,11	6,07 ± 0,22
5	25,32 ± 1,15		6,02 ± 0,23	3,36 ± 0,14	7,28 ± 0,33
6	23,26 ± 0,98		4,07 ± 0,18	3,66 ± 0,15	11,24 ± 0,55
7	22,70 ± 0,95		7,07 ± 0,32	4,89 ± 0,19	8,33 ± 0,34
8	30,65 ± 1,29		8,18 ± 0,39	5,17 ± 0,22	9,99 ± 0,44
<b>Pb</b>					
1	126,75 ± 6,46	65	7,23 ± 0,33	10,57 ± 0,51	15,36 ± 0,69
2	112,85 ± 5,25		12,54 ± 0,59	11,32 ± 0,49	16,65 ± 0,78
3	46,85 ± 2,11		3,19 ± 0,17	7,54 ± 0,29	11,82 ± 0,61
4	<1,00		<1,0	<1,0	<1,0
5	<1,00		<1,0	<1,0	<1,0
6	<1,00		<1,0	<1,0	<1,0
7	<1,00		<1,0	<1,0	<1,0
8	2,93 ± 0,14		1,35 ± 0,05	<1,0	1,09 ± 0,04
<b>Zn</b>					
1	786,49 ± 33,03	110	94,66 ± 4,83	98,23 ± 4,81	149,59 ± 7,63
2	643,55 ± 28,64		175,15 ± 7,88	183,68 ± 8,63	222,27 ± 13,11
3	314,85 ± 13,57		60,62 ± 2,91	61,30 ± 2,64	77,27 ± 3,76
4	35,64 ± 1,14		36,07 ± 1,77	35,52 ± 1,49	26,07 ± 1,17
5	34,22 ± 1,59		40,02 ± 1,76	27,87 ± 1,14	22,88 ± 1,19
6	30,44 ± 1,38		35,07 ± 1,51	21,66 ± 0,76	31,97 ± 1,35
7	29,86 ± 1,31		41,04 ± 1,52	34,57 ± 1,93	36,66 ± 2,09
8	56,12 ± 2,55		35,78 ± 1,90	66,23 ± 3,19	31,07 ± 1,86
<b>Cd</b>					
1	13,89 ± 0,67	1,0	0,64 ± 0,03	0,31 ± 0,02	0,98 ± 0,05
2	9,55 ± 0,43		0,32 ± 0,02	<0,2	0,46 ± 0,02
3	4,83 ± 0,27		<0,2	<0,2	<0,2
4	<0,1		<0,2	<0,2	<0,2
5	<0,1		<0,2	<0,2	<0,2
6	<0,1		<0,2	<0,2	<0,2
7	<0,1		<0,2	<0,2	<0,2
8	0,82 ± 0,04		<0,2	<0,2	<0,2

В результате исследования было выявлено загрязнение почв на площадках № 1, 2 и 3 (рисунок 3.2), что соответствует участку между действующим и закрытым полигонами. Валовое содержание меди в данной зоне выше ОДК для почв в 1,4-3,6 раза, содержание никеля – в 1,4-2,2 раза, содержание свинца – в 1,7-2 раза, содержание цинка – в 2,9-7,2 раза, содержание кадмия – в 4,8-13,9 раза. Валовое содержание исследуемых металлов в почвах с западной, северной и восточной сторон не превышает валовых ОДК для почв. Содержание меди в остальных точках отбора ниже ОДК в среднем в 2,7 раза, содержание никеля – в 1,6 раза, содержание цинка – в 3,1 раза. Содержание свинца и кадмия на площадках № 4-7 ниже предела обнаружения, а на площадке № 8 - ниже ОДК в 22 раза и 1,2 раза соответственно.

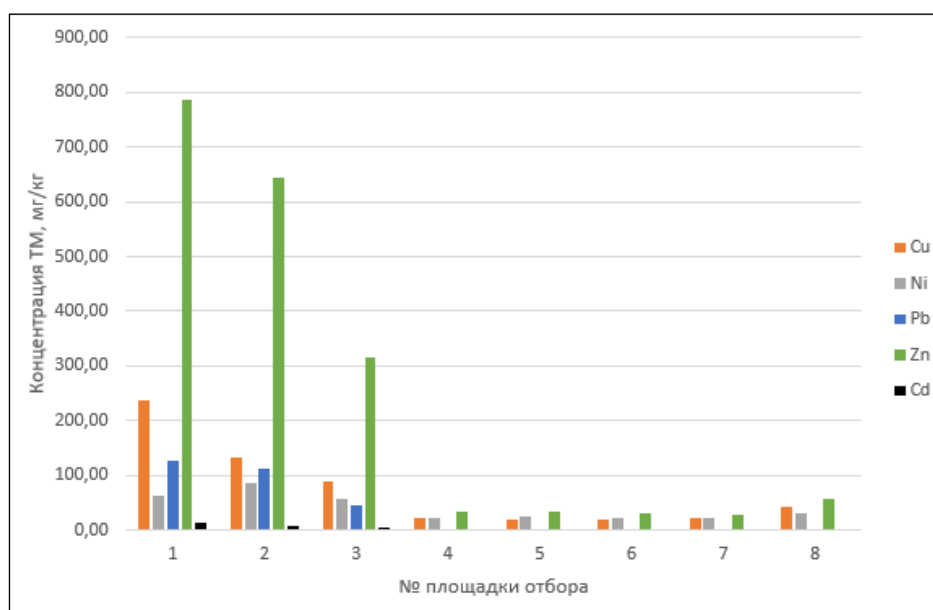


Рисунок 3.2 – Концентрация ТМ в почвах

Полученные данные свидетельствуют о загрязнении почв только с южной стороны исследуемого полигона, т.е. на границе с закрытой рекультивированной городской свалкой ТКО.

В геологическом отношении в строении территории принимают участие отложения четвертичной системы (Q): почвенно-растительный слой, суглинки твердые, относящиеся к покровно-делювиальным отложениям (Pr); глины и суглинки, относящиеся к флювиогляциальным отложениям днепровской морены

(fIIIdn и gIIIdn), а также отложения неогеновой системы (N): пески мелкие. Ключевыми параметрами миграции элементов в геологических условиях данной территории являются рельеф и роза ветров. Принимая во внимание уклон территории полигона с юго-запада на северо-восток, а также преобладающее направления ветров, можно сделать вывод, что повышенные концентрации ТМ в почвах продиктованы влиянием закрытой городской свалки, граничащей с исследуемым объектом. При этом защитные сооружения действующего полигона ТКО способствуют предотвращению миграции загрязняющих компонентов за пределы полигона, выполняя свое назначение.

В ходе исследования концентраций загрязняющих тяжелых металлов в растительных объектах было установлено наличие положительной корреляции между повышенными значениями содержания меди, никеля, свинца, цинка и кадмия в почвах на прилегающей территории и концентрациями соответствующих тяжелых металлов в корневой системе растений, произрастающих на данных почвах. В настоящее время отсутствуют единые критерии оценки предельных концентраций тяжелых металлов в органах растительных объектов. Существующие значения оптимальных, дефицитных и токсичных концентраций отдельных компонентов в растениях [92-95] имеют высокую вариативность и зависят от системы «почва – растение» в целом, что является ключевым для определения границы между достаточными и избыточными количествами определенных компонентов в растительных объектах. Ввиду вышеописанного в ходе данного исследования основное внимание было направлено на оценку миграции ТМ в системе «почва – растительный объект».

Валовые концентрации исследуемых ТМ в корнях и листьях полыни горькой и крапивы двудомной отображены на рисунках 3.3 и 3.4. У полыни горькой максимальная аккумуляция тяжелых металлов наблюдается в листьях. Данная закономерность большей аккумуляции металлов в листьях по сравнению с корнями выявлена независимо от площадки отбора образцов и, следовательно, независимо от загрязненности почв. У крапивы двудомной максимальная

аккумуляция ТМ в листьях наблюдается на загрязненной территории (площадки отбора № 1, 2 и 3) в отношении всех металлов, тогда как на площадках отбора № 4-8, расположенных на незагрязненных почвах, данная закономерность наблюдается только для меди и никеля. Для цинка на этих площадках характерно максимальное накопление в корнях крапивы, что, вероятно, связано с тем, что цинк является микроэлементом для растений и на незагрязненных почвах более востребован у крапивы на уровне корней.

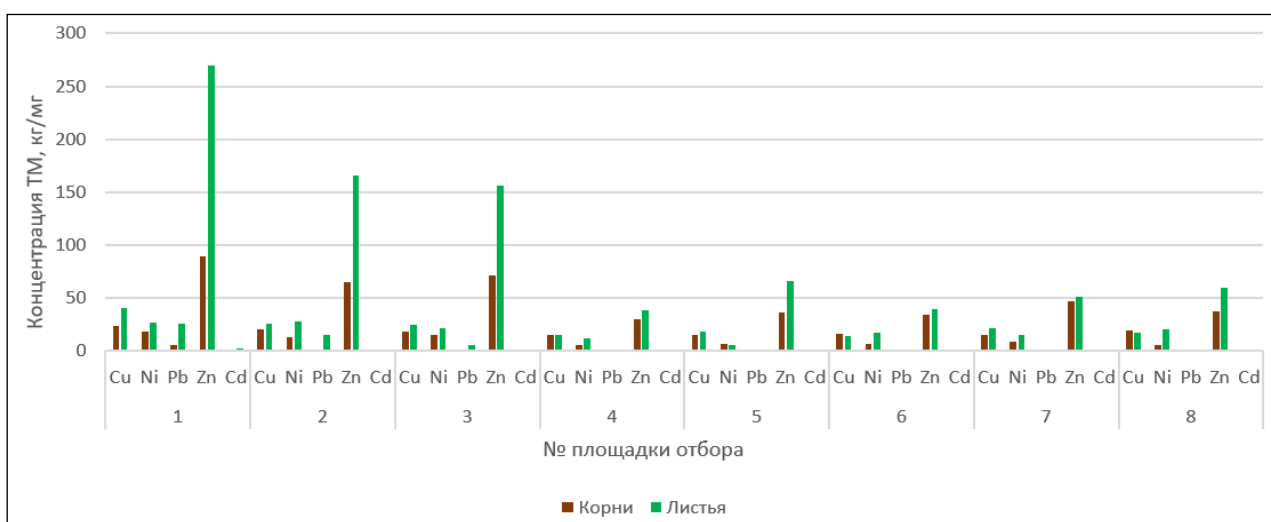


Рисунок 3.3 – Концентрация ТМ в корнях и листьях полыни горькой

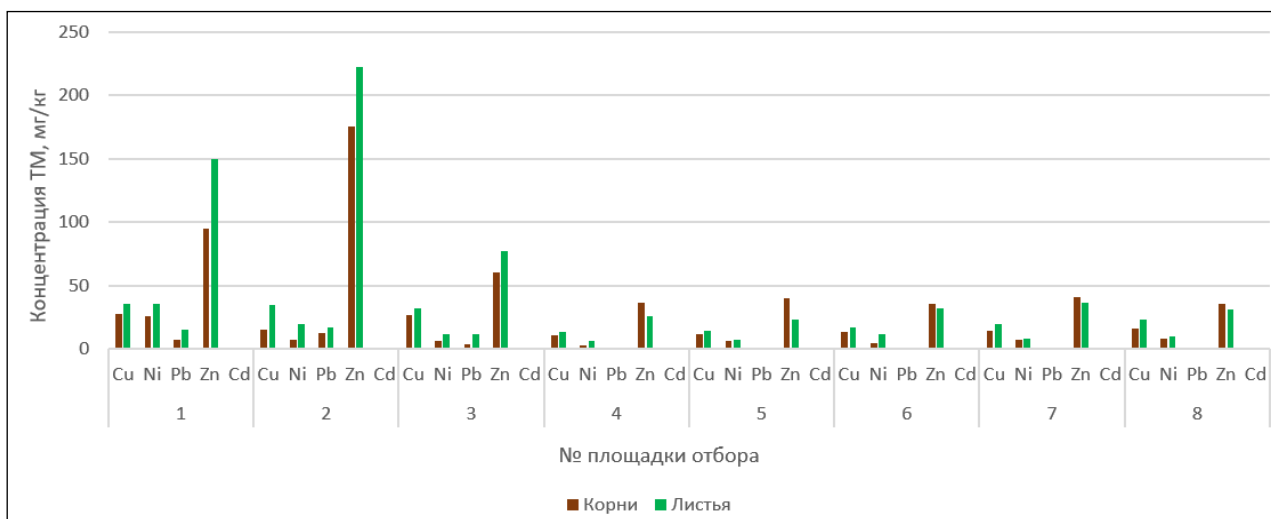


Рисунок 3.4 – Концентрация ТМ в корнях и листьях крапивы двудомной

На почвах, где превышены ОДК тяжелых металлов, ярко выражена способность полыни горькой накапливать бóльшую долю цинка и никеля по сравнению с почвами с допустимым содержанием ТМ. Аналогичный эффект у

крапивы отмечается относительно цинка. Анализ полученных данных по транзиту свинца показывает, что его содержание в корнях полыни преимущественно ниже предела обнаружения, кроме площадки отбора №1, что объясняется низкой биологической доступностью свинца [96]. Несмотря на это, в некоторых образцах полыни свинец был выявлен в стеблях и листьях, что можно объяснить следующим: 1 – тяжелые металлы могут оседать на растительные объекты и связываться их надземными органами в процессе эолового разноса с территории закрытой городской свалки; 2 – основная часть свинца может мигрировать в надземные органы горькой полыни. Крапива в отношении свинца обладает большей сорбционной емкостью по сравнению с полынью: на загрязненных площадках свинец обнаружен во всех органах растений. Миграция кадмия из почвы в исследуемые растения низкая, несмотря на высокое превышение его содержания над ОДК в почвах, что говорит о повышенной устойчивости рудеральных растений к действию неблагоприятных факторов [97]. Минимальные концентрации определяемых ТМ установлены в стеблях полыни и крапивы, что обусловлено выполнением транзитной функции данной частью растений [98].

Для оценки степени извлечения металлов из почвы корнями растений и эффективности их миграции в надземную часть растений были определены коэффициенты миграции тяжелых металлов в системах «почва-корень» и «корень-листья». Коэффициенты рассчитывались как отношение концентрации элемента в корне к концентрации элемента в почве и отношение концентрации элемента в листьях к концентрации элемента в корне соответственно (в мг/кг сухой массы). Коэффициенты переноса были рассчитаны для образцов растений, отобранных между действующим и закрытым полигонами, т.е. с площадок № 1, 2 и 3, где было выявлено загрязнение почв.

Эффективность извлечения и переноса металлов, измеренная в системе «почва-корень», различается как среди конкретных ТМ, так и в зависимости от определенной площадки отбора проб. У полыни коэффициент переноса меди в системе «почва-корень» варьирует в диапазоне от 0,1 до 0,21, коэффициент



переноса никеля – от 0,15 до 0,3, коэффициент переноса цинка – от 0,11 до 0,23, коэффициент переноса кадмия – от 0,06 до 0,08, коэффициент переноса свинца – 0,04. Для крапивы диапазоны значений выше: коэффициент переноса меди варьирует от 0,11 до 0,30, коэффициент переноса никеля – от 0,08 до 0,42, коэффициент переноса цинка – от 0,12 до 0,27, коэффициент переноса кадмия – от 0,03 до 0,05, коэффициент переноса свинца – от 0,06 до 0,11. Неоднородность показателей, вероятно, связана с различной сорбционной емкостью корней исследуемых растений в отношении поглощения ими разных металлов и ее зависимостью от степени загрязненности почв. Установленные коэффициенты миграции в системе «почва – корень» для полыни меньше рассчитанных в других исследованиях, аналогичных данному [89, 99], что можно объяснить повышенными концентрациями железа в почвах, на которых были отобраны исследуемые растения. Данное явление подтверждается представлением о том, что металлам свойственна конкуренция за места их связывания в корневой системе растительных объектов, что влияет на коэффициенты миграции тяжелых металлов в системе «почва – корень» на почвах с полиметаллическим загрязнением [100]. Коэффициенты переноса металлов в системе «корень – листья» больше коэффициентов изъятия элементов из почвы, на которой произрастали данные растения. У полыни коэффициент переноса меди в системе «корень – листья» варьирует в диапазоне от 1,25 до 1,76, кадмия – от 1,9 до 2,46, свинца – 4,63, цинка – от 2,20 до 3,03, никеля – от 1,42 до 2,15. Для крапивы коэффициент миграции меди находится в диапазоне от 1,2 до 2,36, кадмия – от 1,44 до 1,53, цинка – от 1,27 до 1,58, свинца – от 1,33 до 3,71, никеля – от 1,37 до 2,77. Из полученных результатов видно, что миграция ТМ между органами растений у полыни менее вариабельная, не зависит от степени загрязненности почвы и выше, чем у крапивы.

Учитывая наличие загрязнения ТМ на данной территории и способность дикорастущих растений поглощать их, предлагается использовать естественно произрастающие растения в качестве местного фиторемедиатора [101]. При этом, сравнивая миграцию ТМ по органам крапивы и полыни, а также учитывая

биомассу надземных частей растений, предпочтительным вариантом местного фиторемедиатора является полынь горькая *Artemisia absinthium* L. Использование полыни горькой в целях фиторемедиационной очистки почв от загрязняющих металлов создаст некий барьер для движения ТМ в направлении от закрытой свалки ТКО. Применение фиторемедиационной очистки полынью горькой можно рекомендовать для удаления ТМ из почв территорий, прилегающих к полигонам ТКО, в объектах Российской Федерации, где наблюдается естественное произрастание данного вида растительности. Следует отметить, что компонентный состав почв может влиять на эффективность извлечения ТМ корневой системой в связи с конкуренцией металлов.

### **3.2. Анализ фильтрата, образуемого на полигоне ТКО ООО «КомЭк»**

Выявленное загрязнение ТМ почв на территории между эксплуатируемым и закрытым полигонами ТКО является воздействием закрытой городской свалки. Одним из основных источников загрязняющих элементов является образованный фильтрат, мигрирующий в подземные горизонты грунтов. В силу отсутствия возможности отобрать фильтрат на рекультивированной городской свалке для оценки степени его загрязненности было принято решение провести анализ фильтрата полигона ТКО ООО «КомЭк».

Отбор фильтрата осуществлялся в 2018 г. Анализ химического состава фильтрата проводился согласно стандартным методикам, описанным в главе 2. Результаты исследования приведены в таблице 3.3.

Согласно полученным данным, состав фильтрата соответствует «молодому» типу. Превышение ПДК выявлено для железа – в 109 раз, для кадмия – в 23 раза, для хрома – в 16,2 раза, для никеля – в 13,5 раза, для цинка – в 2,6 раза, для марганца – в 27 раз, для магния – в 3 раза, для натрия – в 7,8 раза. Содержание БПК<sub>5</sub> и ХПК превышает ПДК в 2039 и 451 раз соответственно. Концентрация иона аммония выше ПДК в 1408 раз, иона сульфата – в 1,4 раза, иона хлорида – в 28 раз.

Очевидно, что природоохранные меры необходимы для предотвращения миграции фильтрата за пределы полигона. Также целесообразным является использование превентивных мер, таких как отделение и стабилизация органических компонентов ТКО, что позволит снизить содержание БПК и ХПК в образуемом фильтрате. В настоящее время подобные технологии повсеместно используются за рубежом и внедрены на некоторых полигонах России.

Таблица 3.3 – Характеристика фильтрата полигона ТКО ООО «КомЭк»

№	Показатель	Ед. изм.	Значение	ПДК [91, 102]
1	рН	ед.рН	6,7 ± 0,2	6,5-9,0
2	БПК <sub>5</sub>	мг О <sub>2</sub> /л	<b>8156 ± 298</b>	4
3	ХПК	мг О <sub>2</sub> /л	<b>13539 ± 681</b>	30
4	Хлориды	мг/дм <sup>3</sup>	<b>9788 ± 607</b>	350
5	Сульфаты	мг/дм <sup>3</sup>	<b>698 ± 45</b>	500
6	Общий азот	мг/дм <sup>3</sup>	2750 ± 159	-
7	Аммоний-ион	мг/дм <sup>3</sup>	<b>2112 ± 167</b>	1,5
8	Калий	мг/дм <sup>3</sup>	1179 ± 125	-
9	Натрий	мг/дм <sup>3</sup>	<b>1565 ± 82</b>	200
10	Кальций	мг/дм <sup>3</sup>	52 ± 4	180
11	Магний	мг/дм <sup>3</sup>	<b>151 ± 10</b>	50
12	Железо общее	мг/дм <sup>3</sup>	<b>32,9 ± 3,7</b>	0,3
13	Медь	мг/дм <sup>3</sup>	0,49 ± 0,08	1,0
14	Кадмий	мг/дм <sup>3</sup>	<b>0,023 ± 0,004</b>	0,001
15	Ртуть	мг/дм <sup>3</sup>	< 0,009	0,0005
16	Кобальт	мг/дм <sup>3</sup>	< 0,01	0,1
17	Хром	мг/дм <sup>3</sup>	<b>0,81 ± 0,08</b>	0,05
18	Свинец	мг/дм <sup>3</sup>	< 0,1	0,01
19	Мышьяк	мг/дм <sup>3</sup>	< 0,01	0,01
20	Цинк	мг/дм <sup>3</sup>	<b>12,9 ± 0,7</b>	5,0
21	Никель	мг/дм <sup>3</sup>	<b>0,27 ± 0,02</b>	0,02
22	Марганец	мг/дм <sup>3</sup>	<b>2,7 ± 0,1</b>	0,1

### 3.3. Выводы

1. Проведена оценка качества почв и растений на прилегающей территории полигона ТКО, расположенного в Тамбовской области. Показана эффективная работа природоохранных мероприятий на эксплуатируемом полигоне. Однако обнаружено отрицательное воздействие закрытой городской свалки на зону между ней и исследуемым объектом.

2. Проанализирована миграция ТМ из почв в растительные объекты, произрастающие на данных почвах (на примере полыни горькой *Artemisia absinthium* L. и крапивы двудомной *Urtica dioica* L.). Подтверждена положительная корреляция между повышенными значениями содержания исследуемых ТМ в почвах и уровнями концентраций соответствующих тяжелых металлов в растительных объектах.

3. Рассчитана степень извлечения тяжелых металлов из почв растительными объектами, произрастающими на данных почвах естественным путем. Рассчитаны коэффициенты переноса ТМ в системе «почва – корень». Для полыни установлена закономерность максимального концентрирования исследуемых ТМ в листьях растений. Для крапивы данная закономерность различается в зависимости от металла и степени загрязненности почв, на которых были отобраны образцы. Рассчитаны коэффициенты переноса ТМ между органами растительных объектов в системе «корень – листья», которые позволяют дать рекомендации по применению полыни горькой в качестве местного фиторемедиатора для сокращения содержания ТМ в миграционном потоке элементов от закрытой свалки.

4. Проведен химический анализ фильтрата действующего полигона, который показал значительные превышения ПДК. Рекомендовано использовать превентивные меры в виде стабилизации органической фракции ТКО для снижения токсичности образуемого фильтрата.

## ГЛАВА 4. ПРОИЗВОДСТВО ТЕХНОГЕННОГО ГРУНТА

### 4.1. Ресурсный потенциал мелкой фракции ТКО

Директива Совета ЕС по полигонам депонирования твердых отходов в 1999 году поставила цель обеспечить меры для эксплуатации полигонов ТКО так, чтобы за время существования полигона и протекающих в его теле процессов стремиться к максимальному сокращению и предотвращению негативного влияния на компоненты геосреды, в частности, на подземные воды и поверхностные водные объекты, почвенный горизонт и атмосферный воздух, в том числе и в глобальном значении, учитывая парниковый эффект, а также различные риски и дискомфорт, возможные для нанесения здоровью человека, оказавшегося в зоне воздействия полигона. Достижение цели осуществляется посредством рециклинга, компостирования, производства биогаза и/или переработки с получением материалов/энергии. Одним из ключевых действий стратегии является сокращение объемов разлагаемых микроорганизмами отходов, подлежащих захоронению. Это производится путем отбора органических компонентов с последующим компостированием, что позволяет стабилизировать органические фракции ТКО.

В настоящее время в России известны технологии компостирования органической фракции ТКО [103-106]. Известные способы основаны либо на извлечении органических фракций, добавлении ферментирующих добавок с последующим открытым (полевым) компостированием, либо на биотермической обработке смешанных отходов во вращающемся барабане с последующим отделением мелкой фракции, содержащей преимущественно биоразлагаемые компоненты, и ее дозреванием открытым методом. Результатом компостирования является стабилизированная органическая масса с низкой биологической активностью. В случае дополнительной механической обработки полученного продукта возможно производство компоста, пригодного для сельскохозяйственной деятельности. Однако на практике в связи с отсутствием в нашей стране отдельного сбора ТКО получение качественного компоста

сопряжено с трудностями ввиду загрязненности полученного материала тяжелыми металлами. Наиболее распространенной схемой стабилизации органических отходов является отделение мелкой фракции ТКО с помощью дискового сита и аналогичных механизмов и дальнейшее компостирование в буртах. Полученный техногенный грунт используется в качестве материала для пересыпки отходов и отсыпки откосов полигонов.

На полигоне ТКО ООО «Новый Свет-ЭКО», расположенном в Ленинградской области, применяется технология компостирования органической фракции отходов. В настоящее время технологическая схема получения техногенного грунта заключается в следующем: смешанные отходы поступают на дисковое сито, в результате чего происходит отделение мелкой фракции ТКО (0-80 мм); далее с помощью магнитного сепаратора из мелкой фракции извлекаются черные металлы; полученная органоминеральная сырьевая смесь (ОМСС) отправляется на площадку компостирования, где осуществляется буртовое компостирование материала в течение 90 дней. Полученный техногенный грунт захоранивается как биостабилизированный материал.

Проведенный морфологический состав смешанных ТКО, принимаемых на захоронение полигоном ООО «Новый Свет-ЭКО», и отделенной мелкой фракции (0-80 мм) представлен в таблице 4.1.

Данные таблицы 4.1 свидетельствуют о том, что в ТКО содержится 50,7 % фракции, которая подлежит компостированию или размещению на полигонах в случае отсутствия технологии компостирования. Основными балластными для компостирования компонентами мелкой фракции являются стеклобой (до 20 %), полимеры и камни. При этом стеклобой является вторичным продуктом, который может быть реализован на продажу при его извлечении. Таким образом, без дополнительной сортировки в техногенном грунте захоранивается ценный ресурс. При этом такое качество техногенного грунта непригодно для применения изоляции откосов полигона в связи с наличием балластных включений (стекло, пластик), в том числе и легких фракций, которые будут уноситься воздушными потоками за пределы полигона.

Таблица 4.1 – Морфологический состав ТКО и отделенной фракции 0-80 мм

Наименование	ТКО	0-80 мм	0-80 мм
	% масс	% масс	% масс
Картон	11,6	4,2	8,3
Полимеры	13,7	2,7	5,3
Дерево	3,2	0,6	1,2
Металлолом черный	1,3	0,5	1,0
Алюминиевая банка	0,2	-	-
Стекло	11,1	9,4	18,5
Пищевые отходы и растительные компоненты	31,6	30,5	60,1
Обувь	0,7	-	-
Резина	0,1	-	-
Подгузники	2,5	-	-
Текстиль	6,1	-	-
Тетра-пак	0,5	-	-
Камень	3,7	2,8	5,5
Прочее	13,0	0,03	0,05
Упаковка	0,7	-	-
ИТОГО	100	50,7	100

На рисунке 4.1 представлен внешний вид отделенной мелкой фракции.



Рисунок 4.1 – Мелкая фракция ТКО (0-80 мм)

В ходе данной работы была предложена модернизация технологической схемы производства техногенного грунта, заключающаяся в предварительной механизированной обработке мелкой фракции ТКО. Суть состоит в оснащении существующей линии отбора мелкой фракции ТКО воздушным сепаратором для отбора легких фракций и оптическим сепаратором для отбора стеклобоя. Для подтверждения возможности отбора стеклобоя из мелкой фракции ТКО были проведены испытания в лаборатории австрийской компании «Binder+Co AG», которые показали положительный результат. Было выявлено, что качество чистоты выделяемого стеклобоя зависит от количества раз прохождения материала через оптический сепаратор. В результате полученных данных на производственный участок АО «Автопарк № 1 «Спецтранс» был закуплен воздушный сепаратор для проведения опытных испытаний первой стадии модернизированного технологического процесса. Таким образом, на производственных мощностях АО «Автопарк № 1 «Спецтранс» был проведен процесс по извлечению мелкой фракции из смешанных ТКО, извлечению черных металлов из мелкой фракции, извлечению легких фракций, пригодных для производства альтернативного топлива. Полученная тяжелая фракция была отправлена на завод по переработке стеклобоя ООО «Элемент Ресайклинг», где была проведена вторая часть опытных испытаний по извлечению ВМР из фракции 0-80 мм. Завод ООО «Элемент Ресайклинг» оснащен каскадом оптических сепараторов производства «Binder+Co AG» для получения чистых фракций стеклобоя различного цвета. В результате проведенных экспериментов было выявлено, что для достижения необходимой для продажи чистоты стеклобоя мелкая фракция ТКО должна пройти 2 трека оптического сепаратора (рисунок 4.2).

Итогом проведенных опытных испытаний явилась технологическая схема обработки мелкой фракции ТКО с целью дополнительного извлечения вторичных ресурсов: (1) дисковое сито для отделения фракции 0-80 мм, (2) магнитный сепаратор для отделения черных металлов, (3) воздушный сепаратор для выделения легких фракций, (4) оптический сепаратор для извлечения



стеклобоя, (5) дополнительный магнитный сепаратор для контрольного извлечения магнитных включений. Данная опытная линия обработки фракции 0-80 мм ТКО позволила отбирать ценные компоненты из мелкой фракции с их вовлечением в дальнейшую вторичную переработку, что приводит к обогащению пищевыми отходами ОМСС, непосредственно подлежащей компостированию (Приложение А).



Рисунок 4.2 – Стеклобой, выделенный из мелкой фракция ТКО (0-80 мм)

Проведенные эксперименты по извлечению полезных компонентов из мелкой фракции ТКО представлены в таблице 4.2. Результатом обработки мелкой фракции ТКО являются: ОМСС, подлежащая дальнейшему компостированию, стеклобой, альтернативное топливо и металлолом. Таким образом, после выделения полезных фракций, ОМСС на 90 % состоит из биоразлагаемых отходов. Далее в результате полевого компостирования ОМСС производится техногенный грунт, обладающий однородной структурой и пригодный для изоляции откосов.

Стеклобой представляет собой отходы, состоящие из частей тех или иных стеклянных изделий, например, стеклотары, стеклоблоков, листового стекла и т.д. Стеклобой является ценным вторичным сырьем, с успехом используемым в рамках вторичного производства, причем многократно. Применение вторичного стекла позволяет снижать энергетические и материальные затраты на производственный процесс. Стоимость смешанного по цвету стеклобоя, выделенного из мелкой фракции ТКО, составляет в среднем 1700 руб/т. При

обработке 1 тонны отходов по предложенной схеме доля извлеченного стеклобоя составит до 100 кг, что эквивалентно 170 рублям.

Альтернативное топливо – твердое топливо, полученное из ТКО, в состав которого входят высококалорийные фракции, не пригодные для вторичной переработки (бумага, полимеры, текстиль, дерево, тетрапак). В Европе использование альтернативного топлива из ТКО является общепринятой практикой более 30 лет, и его производство является одним из распространенных методов обращения с отходами. Основными потребителями топлива из отходов являются цементная, металлургическая и энергетическая отрасли. Теплотворная способность топлива из отходов эквивалентна углю и в зависимости от сорта составляет 3500-6000 ккал/кг. Использование энергетического потенциала отходов в качестве топлива позволяет сокращать долю депонированных ТКО за счет их вовлечения в хозяйственный оборот и уменьшать потребление первичных энергетических ресурсов (углеводородов).

Таблица 4.2 – Морфологический состав мелкой фракции и результат ее подготовки

Наименование	Мелкая фракция	ОМСС	Стеклобой	Альтернативное топливо	Металлолом
	% масс	% масс	% масс	% масс	% масс
Картон	8,3	7,7	-	0,6	-
Полимеры	5,3	0,1	-	5,2	-
Дерево	1,2	1,0	-	0,2	-
Металлолом черный	1,0	0,2	-	-	0,8
Стекло	18,5	1,4	17,1	-	-
Пищевые отходы и растительные компоненты	60,1	56,6	-	3,5	-
Камень	5,5	5,5	-	-	-
Прочее	0,05	0,05	-	-	-
ИТОГО	100	72,6	17,1	9,5	0,8

На рисунке 4.3 представлена блок-схема производства техногенного грунта: (а) – до модернизации, (б) – после модернизации. Видно, что из первоначальной массы мелкой фракции при использовании модернизированной технологии извлекается 27,4 % товарной продукции, которая является вторичными материальными ресурсами, и производится 51 % техногенного грунта. При производстве техногенного грунта по схеме до модернизации количество образуемого техногенного грунта больше, однако в нем содержатся и тем самым подлежат захоронению все компоненты, которые извлекаются в случае использования модернизированной технологии.

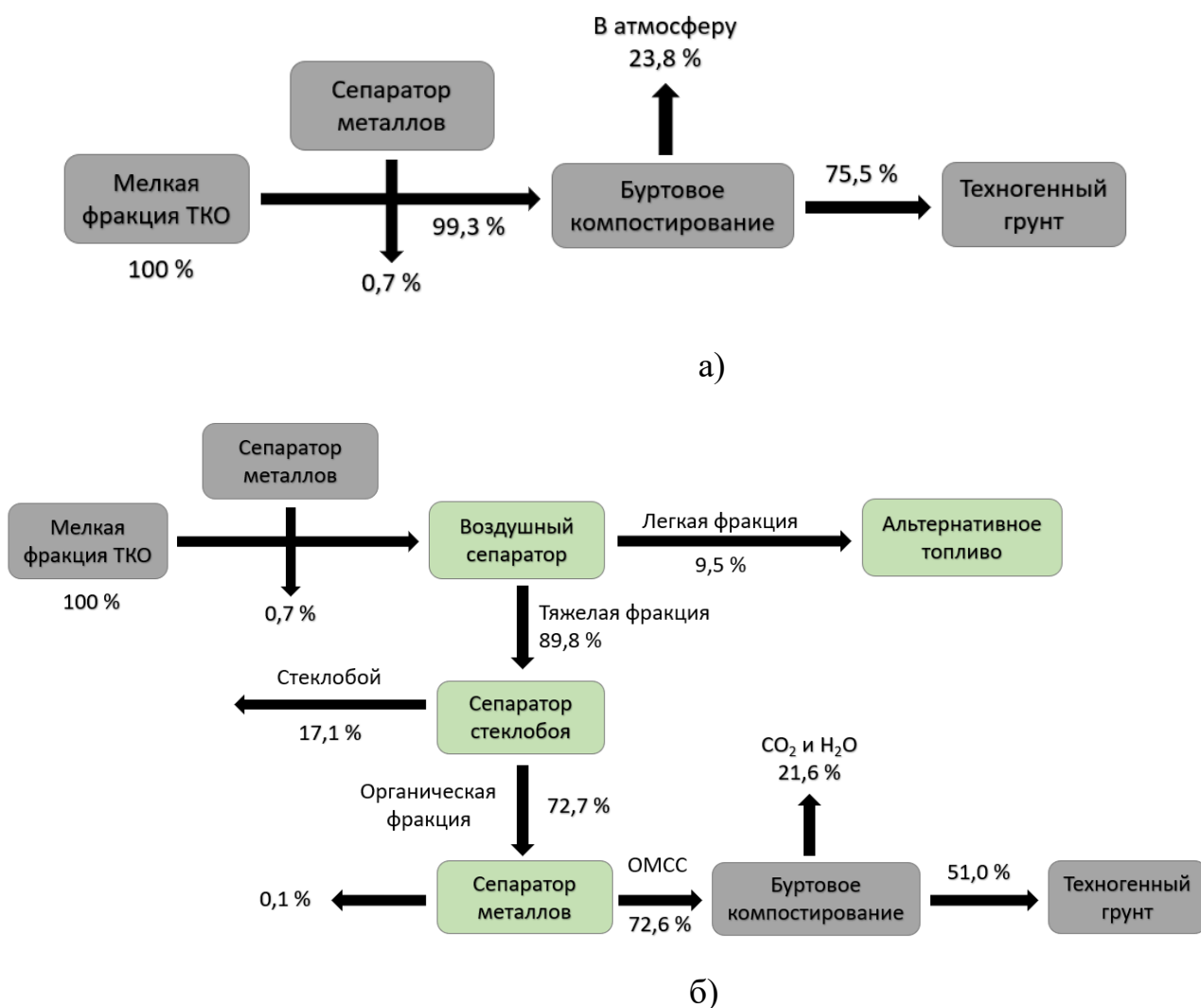


Рисунок 4.3 – Блок-схема утилизации мелкой фракции ТКО:

а) - до модернизации; б) - после модернизации

Таким образом, в результате применения предложенной механико-биологической технологии утилизации мелкой фракции ТКО достигается максимальное использование ее ресурсного потенциала путем извлечения стеклобоя, легких фракций, пригодных для альтернативного топлива и производства техногенного грунта, что суммарно направлено на сохранение природных ресурсов и снижение геоэкологического воздействия полигона.

#### **4.2. Компостирование подготовленной мелкой фракции ТКО**

Площадка компостирования на полигоне ТКО ООО «Новый Свет-ЭКО» представляет собой открытый участок с твердым уплотненным основанием, на которое уложена водонепроницаемая пленка. По границе площадки устроены обваловка и сбор фильтрата, образуемого в процессе компостирования, и ливнестоков.

На участке погрузчик с органоминеральной сырьевой смесью формирует параллельные друг другу бурты трапецевидной формы (рисунок 4.4). Аэрация буртов осуществляется ворошителем, благодаря конструкции которого осуществляется перемешивание компостируемого материала с помощью вращающегося вала при движении ворошителя по бурту с сохранением сформированной формы бурта (рисунок 4.5).



Рисунок 4.4 – Бурты компостируемого материала



Рисунок 4.5 – Аэрация буртов с помощью ворошильной машины

На участке компостирования в буртах происходит аэробное разложение подготовленной мелкой фракции ТКО. Исходный материал содержит в себе необходимую для процесса разложения микрофлору. Активация её деятельности достигается аэрацией разлагаемой массы и дальнейшим поддержанием ее влажности. В результате жизнедеятельности сапрофитных аэробных микроорганизмов в массе материала активно протекают реакции разложения органических фракций, сопровождающиеся выделением тепла, которое является результатом обмена веществ микроорганизмов в процессе биохимических реакций. Для поддержания жизнедеятельности микроорганизмов необходим приток кислорода, который осуществляется ворошением буртов 2 раза в неделю при температурном режиме выше  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и 1 раз в неделю при температурном режиме ниже  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для увлажнения компостируемого материала, что необходимо для поддержания оптимального уровня влажности, используется собранный фильтрат. При компостировании материал уменьшается в объеме и массе за счет образования  $\text{CO}_2$  и испарения влаги в ходе разложения органических веществ. Биодеградация ингредиентов приводит к потере 30-40 % органического вещества в виде углекислого газа и воды. По истечении 60 дней в бурте замедляются процессы активного разложения и начинается стадия стабилизации, длящаяся 30 дней и характеризующаяся изменением pH среды и

температурой компостируемого материала. В результате компостирования производится техногенный грунт, представленный на рисунке 4.6.



Рисунок 4.6 – Техногенный грунт

### 4.3. Выводы

1. Модернизированная технология утилизации мелкой фракции ТКО направлена на использование максимального ресурсного потенциала отходов и производство техногенного грунта.

2. Обработка мелкой фракции ТКО (0-80 мм) позволяет извлекать 27,4 % вторичных материалов: 17,1 % стеклобоя, 9,5 % материала для альтернативного топлива и 0,8 % металлолома.

3. В результате обработки мелкой фракции ТКО органоминеральная смесь, подвергаемая компостированию, обогащается биоразлагаемыми компонентами до 90 %.

## ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ФИЛЬТРАТА МЕТОДОМ ЛИТИФИКАЦИИ

### 5.1. Характеристика фильтрата

Исходный фильтрат, отобранный на полигоне ТКО «Новый Свет-ЭКО» представляет собой непрозрачную жидкость темно-коричневого цвета (рисунок 5.1) с неприятным запахом с оттенками аммиака, сероводорода, меркаптанов.



Рисунок 5.1 – Фильтрат полигона ТКО

Фильтрат отбирался для анализа в разное время года на протяжении трех лет с 2017 по 2020 год. Анализ химического состава фильтрата проводился согласно стандартным методикам, описанным в главе 2. Результаты исследования приведены в таблице 5.1.

Наличие большого количества сухого остатка, который превышает ПДК в 8,4 раза, свидетельствует о высоком содержании нелетучих соединений, таких как гумусовые вещества и соли металлов. Концентрации тяжелых металлов в

фильтрате незначительны, что говорит об их осаждении в виде сульфидов, гидроксидов и гуматов.

Таблица 5.1 – Характеристика фильтрата полигона ТКО «Новый Свет-ЭКО»

№	Показатель	Ед. изм.	Значение	Вариация, %	ПДК [91, 102]
1	рН	ед.рН	7,9 ± 0,2	2,6	6,5-9,0
2	Электропроводность	мкС/см	24900 ± 2821	11,3	-
3	БПК <sub>5</sub>	мг О <sub>2</sub> /л	<b>2533 ± 187</b>	7,4	4
4	ХПК	мг О <sub>2</sub> /л	<b>9163 ± 634</b>	6,9	30
5	Сухой остаток	мг/дм <sup>3</sup>	<b>12610 ± 1232</b>	9,7	1500
6	Хлориды	мг/дм <sup>3</sup>	<b>5712 ± 731</b>	12,8	350
7	Сульфаты	мг/дм <sup>3</sup>	217 ± 20	9,2	500
8	Гидрокарбонаты	мг/дм <sup>3</sup>	11641 ± 898	7,7	-
9	Нитраты	мг/дм <sup>3</sup>	<b>48,8 ± 6,1</b>	12,6	45
10	Нитриты	мг/дм <sup>3</sup>	<b>12,6 ± 1,2</b>	9,8	3,0
11	Аммоний-ион	мг/дм <sup>3</sup>	<b>1803 ± 205</b>	11,3	1,5
12	Калий	мг/дм <sup>3</sup>	1168 ± 189	16,1	-
13	Натрий	мг/дм <sup>3</sup>	<b>2223 ± 340</b>	15,3	200
14	Кальций	мг/дм <sup>3</sup>	<b>334 ± 44</b>	13,2	180
15	Магний	мг/дм <sup>3</sup>	<b>156 ± 26</b>	17,1	50
16	Железо общее	мг/дм <sup>3</sup>	<b>27,1 ± 6,4</b>	23,7	0,3
17	Медь	мг/дм <sup>3</sup>	0,16 ± 0,03	18,9	1,0
18	Кадмий	мг/дм <sup>3</sup>	<b>0,0017 ± 0,0002</b>	15,1	0,001
19	Ртуть	мг/дм <sup>3</sup>	< 0,009	-	0,0005
20	Кобальт	мг/дм <sup>3</sup>	0,0096 ± 0,0024	25,1	0,1
21	Хром	мг/дм <sup>3</sup>	<b>1,92 ± 0,17</b>	9,1	0,05
22	Свинец	мг/дм <sup>3</sup>	0,0027 ± 0,0007	26,6	0,01
23	Мышьяк	мг/дм <sup>3</sup>	< 0,01	-	0,01
24	Цинк	мг/дм <sup>3</sup>	0,43 ± 0,07	17,6	5,0
25	Никель	мг/дм <sup>3</sup>	<b>0,23 ± 0,02</b>	7,3	0,02
26	Марганец	мг/дм <sup>3</sup>	<b>1,16 ± 0,14</b>	12,2	0,1

Превышение ПДК выявлено для железа – в 90 раз, для кадмия – в 1,7 раза, для хрома – в 38,4 раза, для никеля – в 11,5 раза, для марганца – в 11,6 раза, для магния – 3,1 раза, для кальция – в 1,8 раза, для натрия – в 11,1 раза. Содержание БПК<sub>5</sub> и ХПК превышает ПДК в 633 и 305 раз соответственно. Отношение



БПК<sub>5</sub>/ХПК, являющееся характерным для понимания стадии разложения захороненных отходов, составляет 0,27, что означает завершившуюся деструкцию основной части легкоразлагаемой органики. Также выявлено превышение ПДК для нитратов – в 1,1 раза, нитритов – в 4,2 раза и иона аммония – в 1202 раза. Концентрация хлоридов в фильтрате превышает ПДК в 16 раз.

Также был проведен ИК-спектральный анализ сухого остатка фильтрата. Результаты представлены на рисунке 5.2 и в таблице 5.2.

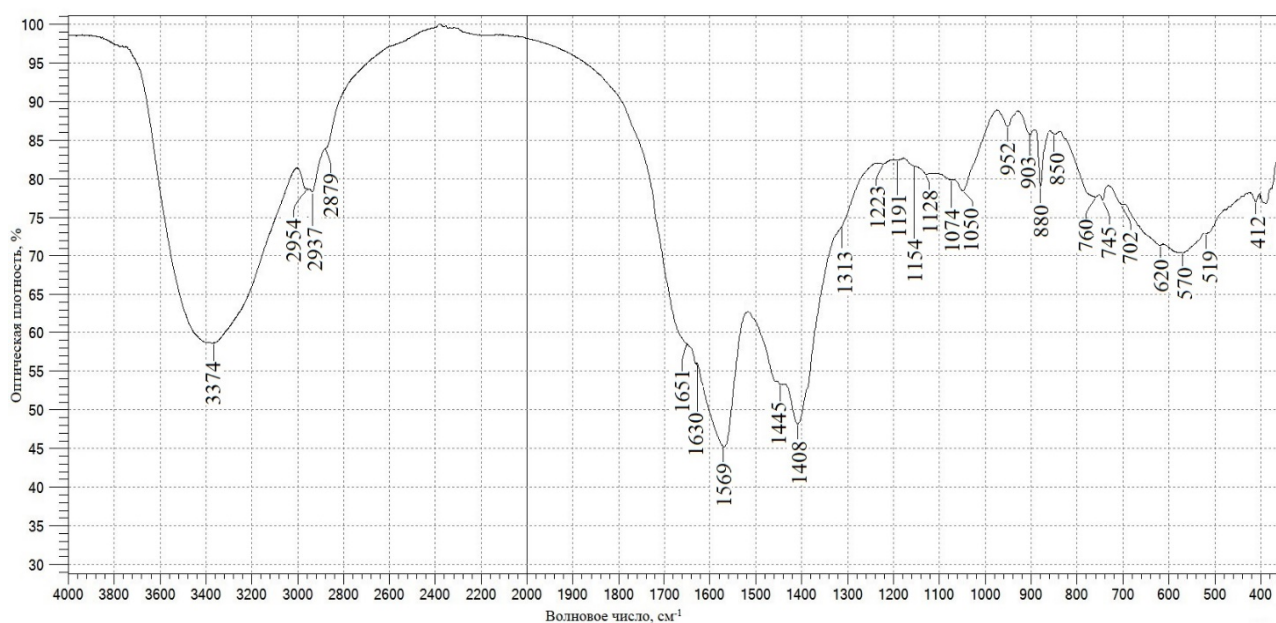


Рисунок 5.2 – ИК-спектры сухого остатка фильтрата

Данные по характеристическим полосам свидетельствуют о том, что в сухом остатке фильтрата присутствует широкий набор органических веществ: соединения ароматического ряда, фенолы, амины, амиды, как правило, объединенные в полиассоциаты. Последнее может интерпретироваться как гумусовые соединения сложного строения.

Исходя из результатов проведенных исследований можно сделать вывод о том, что фильтрат является токсичной жидкостью, относящейся к 3-му классу опасности. Полученные данные согласуются с теоретическими и опытными характеристиками фильтрата других исследователей в зависимости от времени эксплуатации полигона [30,33].

Таблица 5.2 – Характеристические частоты функциональных групп, обнаруженных в сухом остатке [107]

Тип колебаний, функциональная группа	Интенсивность	Характеристическая частота, см <sup>-1</sup>
Маятниковые колебания сульфат-аниона SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	слабая	412
Маятниковые колебания орто-, мета-, пара-заместителей ароматического кольца	слабая	519; 570; 620
Маятниковые колебания С–Н, N–Н	слабая	702; 745; 760; 850; 903; 952
Маятниковые колебания альдегидной группы у ароматического кольца	средняя	880
Деформационные колебания в С–О, С–N, С–С групп	слабая	1050÷1223
Деформационные колебания О–Н групп	слабая	1313
Деформационные колебания С–Н, NH <sup>+</sup> , C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> –ОН	средняя	1408; 1445
Деформационные колебания С <sup>&lt;O</sup> – групп	сильная	1569
Деформационные колебания С=C, С=N, С=О	слабая	1630; 1651
Валентные колебания С–Н	слабая	2879; 2937; 2954
Валентные колебания О–Н и N–Н в полиассоциатах	сильная широкая	3374

Необходимость утилизации образующегося фильтрата очевидна. На полигоне ТКО ООО «Новый Свет-ЭКО» фильтрат собирается в накопительные подземные емкости с помощью дренажа в основании полигона, после чего с помощью насосной системы отправляется на рециркуляцию или вывозится на утилизацию в специализированные организации. Собственного оборудования для очистки фильтрата на полигоне нет.

В ходе литературного обзора и изучения мировой практики утилизации фильтрата наиболее перспективной технологией была выделена цементация фильтрата с помощью минеральных вяжущих, как безотходный метод переработки фильтрата. В ходе данной работы была разработана рецептура

литификации фильтрата (изменения его агрегатного состояния) с получением твердого продукта – литификата, пригодного для нужд полигона, без использования цемента в качестве вяжущего.

## 5.2. Характеристика сланцевой золы

К основным видам строительных вяжущих материалов относятся: воздушная известь, гипсовые вяжущие, магнезиальные вяжущие и портландцемент. При развитии технологии вяжущих было выявлено, что некоторые отходы производства проявляют характеристики, сходные с минеральными вяжущими, что привело к добавлению отходов производства в качестве сырья для изготовления вяжущих (доменный шлак, золошлаковые отходы, нефелиновый шлам) или в качестве добавки к строительным материалам. Использование отходов производства в строительных целях позволяет сокращать полигоны захоронения и приводит к некоторому снижению производства цемента, которое сопряжено с выделением диоксида углерода, что приводит к нарушению баланса углеродного цикла.

При сжигании горючих сланцев при температурах 1300-1400 °С на тепловых электростанциях образуется минеральный остаток – сланцевая зола в количестве около 45 %. Сланцевая зола является вторичным продуктом – отходом, при использовании сланцев в качестве технологического топлива. В настоящее время найдено применение сланцевой золы в различных сферах промышленности с целью вовлечения отхода в хозяйственный оборот. Сланцевую золу используют в качестве добавки к цементу и сухим смесям, что позволяет производить различные строительные материалы, например тротуарную плитку, кирпич или керамзитобетонные блоки. Также зола от сжигания горючих сланцев используется для укрепления грунтов в дорожном строительстве, для инкапсуляции загрязняющих компонентов в почвах и грунтах, при производстве полимерных материалов и в качестве подщелачивателя в сельском хозяйстве [108-110].

Химический состав исследуемой сланцевой золы представлен в таблице 5.3. Содержание валовых форм тяжелых металлов отображено в таблице 5.4. Сланцевая зола по составу относится к высокоосновной смеси на основе силикатов с высоким содержанием щелочно-земельных металлов, что широко используется в технологии вяжущих.

Таблица 5.3 – Химический состав сланцевой золы

Хим. соединение	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO <sub>св</sub>
Кол-во, %	30-40	24-32	3-5	6-9	3,5-4,5	6-10	2,5-5,5	0,1-0,7	8-14

В составе сланцевой золы содержится свободный оксид кальция, который также наблюдается и в составе цемента. Отличием агрегатного состояния свободного оксида кальция в сланцевой золе от агрегатного состояния свободного оксида кальция в клинкере заключается в том, что частицы золы, подвергаясь высоким температурам в течение 4-7 секунд, не способны сформировать компактную кристаллическую решетку, которая образуется при длительном воздействии высокой температуры (30-40 минут), как в случае с цементом. Формирование трещин в бетоне через 2-3 года обосновывается именно гидратацией плотной кристаллической решетки [111]. Таким образом, сланцевая зола не имеет способности к описанному механизму разрушения бетона в будущем в связи с особенностью сжигания горючих сланцев. Размер частиц данной золы менее 40 мкм, при этом доля частиц менее 20 мкм составляет 80 % массы. Удельная поверхность частиц сланцевой золы составляет 350 м<sup>2</sup>/кг. В состав сланцевой золы входит до 30 % стекловидной фазы.

Дифрактограмма рентгенофазового анализа сланцевой золы представлена на рисунке 5.3. Согласно количественному фазовому анализу, в состав сланцевой золы входят такие минералы, как алит (6-8 %), белит (5-6 %), целит (3-5 %), которые характерны для клинкера. Также зола включает в себя портландит в количестве 10-16 %, кварц – 13-16 %, кальцит – 12-15 %, ангидрит – 7-14 %, известь – 8-12 %, периклаз – 3-5 %, ортоклаз – 1-2 %, мелантерит – 1-2 %.

Таблица 5.4 – Содержание валовых форм тяжелых металлов в сланцевой золе

TM	C, мг/кг	ПДК/ОДК [91], мг/кг
Cu	7,12 ± 0,65	132
Zn	61,1 ± 7,32	220
Pb	42,3 ± 3,8	130
Cd	0,24 ± 0,02	2
Co	4,86 ± 0,34	-
Ni	16,3 ± 1,5	80
Mn	310 ± 32	1500
Cr	25 ± 2	-
Hg	0,072 ± 0,006	2,1
As	8,1 ± 0,4	10

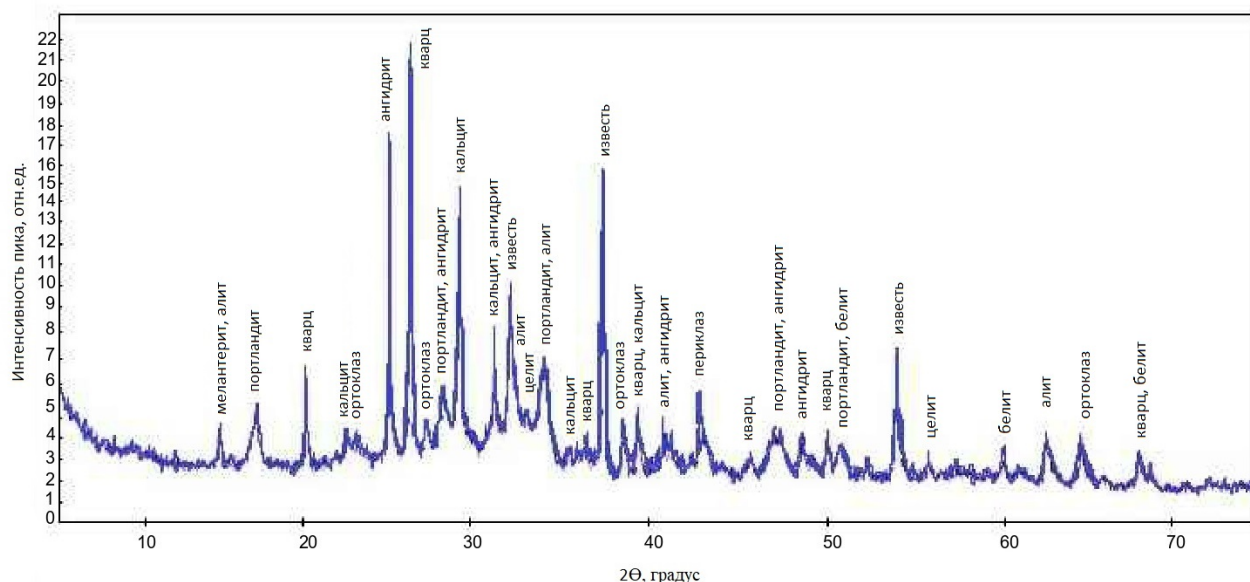


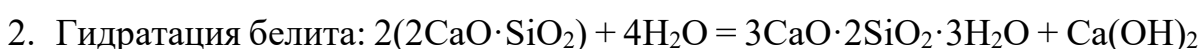
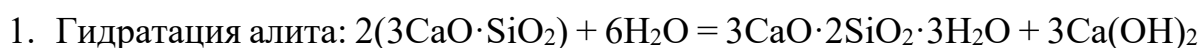
Рисунок 5.3 – Дифрактограмма сланцевой золы

Таким образом, сланцевая зола обладает вяжущими свойствами, благодаря чему используется в качестве добавки к бетонным смесям, заменяя до 25 % цемента, что является экономически выгодным. При этом использование сланцевой золы вместо части цемента не сказывается негативно на прочностных свойствах, а также морозостойкости, коррозионной и гидротермической устойчивости [108, 111]. Основным минусом является содержание тяжелых металлов, однако, при взаимодействии с цементом происходит их инкапсулирование и они оказываются иммобилизованы.

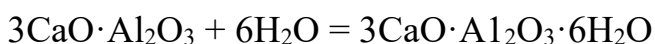
### 5.3. Разработка рецептуры утилизации фильтрата методом литификации

В технологии литификации вяжущим, используемым для отверждения фильтрата полигонов ТКО, является цемент. Основой данной технологии является гидратация цемента. Процесс структуро- и фазообразования в системе «цемент – вода» осуществляется путем растворения клинкерных минералов, их химической реакции с водой и кристаллизации новых соединений, которые протекают как в зоне взаимодействия этих веществ, так и на поверхности вяжущего, т.е. на границе раздела фаз. Известно, что принципиальное образование гидросиликатов кальция не зависит от добавок и протекает аналогично процессам гидратации цемента [112].

Смешивание цемента с водой дает старт химическим превращениям основных клинкерных минералов и свободного оксида кальция [113]:



3. Гидратация целита (трехкальциевого алюмината):



4. Гидратация четырехкальциевого алюмоферрита:



5. Гидратация извести:  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2$

В ходе данной работы при разработке рецептуры смеси для литификации фильтрата вместо цемента была использована сланцевая зола, содержащая клинкерные минералы и свободный оксид кальция. Полученным продуктом являлся литификат.

Лабораторные эксперименты заключались в смешивании 1 л фильтрата со сланцевой золой в различном соотношении, перемешивании миксером со скоростью 100 об/мин, после чего смесь переносилась в подготовленную форму и выдерживалась до отверждения без тепловой обработки. Было выявлено, что при соотношении фильтрата и золы, равном 1:1, гидравлического действия золы

недостаточно для связывания фильтрата, поскольку около 15 % жидкости оставалось после перемешивания на поверхности формирующегося твердого продукта (рисунок 5.4). В течение трех дней явлений, сопровождающих твердение, не наблюдалось. Затем после испарения несвязанной воды наступал медленный процесс твердения. Однако при аналогичном соотношении дистиллированной воды и золы схватывание смеси наблюдалось через 8 часов. Очевидно, что содержащиеся в фильтрате органические вещества и растворимые соли замедляют нормальное протекание процесса гидратации и снижают прочность полученного материала.

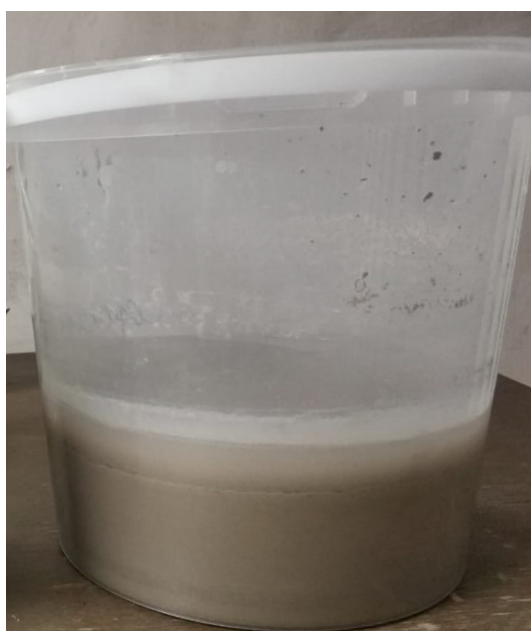


Рисунок 5.4. – Смесь фильтрата с золой в соотношении 1:1

Дальнейшие исследования проводились в направлении увеличения количества золы по отношению к фильтрату до достижения эффекта полного связывания фильтрата после смешивания компонентов. При соотношении фильтрата и золы, равным 1:2,2, была получена сметаноподобная масса, схватывание которой наблюдалось через 22 ч. По истечении 28 дней образец по внешнему виду можно было сравнить с газобетонным блоком, однако сцепления золы с фильтратом не происходило, и при механическом воздействии образец крошился в пыль, что не является удовлетворительным.

### 5.3.1. Рецептатура литификата с серной кислотой и сланцевой золой (рецептура № 1)

Наиболее явной причиной низкого сцепления материала является высокое содержание органических веществ в фильтрате, особенно гуминовых кислот, растворимых в щелочной среде. При создании кислой среды гуминовые кислоты теряют растворимость и способны осаждаться, а также ионы металлов (железа, алюминия, цинка и др.) способны образовывать малорастворимые комплексные соединений с ионами гуминовых веществ. При этом происходит разложение органических соединений с образованием и выделением оксида и углерода и метана. Кроме того, ионы сульфата являются активатором гидратации стекловидной фазы золы. В связи с вышеизложенным было принято решение проводить литификацию фильтрата в две стадии: 1 – активация фильтрата серной кислотой, 2 – отверждение смеси при смешивании со сланцевой золой.

В процессе активации фильтрата серной кислотой раствор обогащается избыточными ионами сульфата и при дальнейшем добавлении содержащей известь золы они способны к образованию фаз ангидрита и гипса.

Высокое содержание аммония в фильтрате способствует образованию в технологических растворах устойчивых аммиачных комплексов железа, цинка и меди. Вывод азота в виде газообразного аммиака позволит перевести данные металлы в твердую фазу, что осуществляется при смещении рН в щелочную среду на втором этапе литификации во время внесения сланцевой золы:  $[\text{NH}_4^+] + \text{OH}^- \rightarrow \text{NH}_3\uparrow + \text{H}_2\text{O}$ .

Эксперименты по разработке рецептуры № 1 для литификации фильтрата в лабораторных условиях включали следующие стадии:

- 1) отмеренный объем фильтрата (1 л) переносится в емкость для смешивания;
- 2) отмеренный объем серной кислоты (94 % масс.) в количестве 1-10 % от объема фильтрата приливается в емкость к фильтрату, после чего происходит



активное пенообразование и последующее смешивание с помощью миксера со скоростью 100 об/мин в течение 5 минут для равномерного распределения;

3) отмеренный объем сланцевой золы в количестве 1-1,6 кг вносится в полученную суспензию, при этом перемешивание смеси продолжается еще в течение 15 минут с целью равномерного распределения составляющих смеси во всем объеме. Количество сланцевой золы ограничено по экономическим показателям и данным о ее способности связывания воды в соотношении 1:1;

4) после перемешивания достигается образование пластичной пастообразной массы, которая переносится в подготовленную форму для твердения.

В ходе проведенных лабораторных экспериментов было выявлено, что при внесении в фильтрат серной кислоты в количестве 1 % от объема фильтрата (1 л) и сланцевой золы в количестве 1,6 кг весь фильтрат был связан, однако отверждение происходит медленно. На вторые сутки смесь оставалась пластичной. Схватывание образца наблюдалось через 36-40 ч. При добавлении меньшего количества сланцевой золы часть фильтрата оставалась на поверхности смеси несвязанной. Добавление 5 % серной кислоты от объема фильтрата (1 л) и 1,6 кг сланцевой золы сократило время схватывания материала до 24 ч. При добавлении меньшего количества сланцевой золы фильтрат связывался, но материал на протяжении трех суток оставался пластичным. При добавлении серной кислоты в количестве 10 % от объема фильтрата (1 л) и сланцевой золы в количестве 1,6 кг материал схватывался за 4,5 часа. При уменьшении дозировки сланцевой золы до 1 кг схватывание смеси наступало через 6 ч. Последующее увеличение дозировки серной кислоты на 1 % не приводило к уменьшению срока схватывания материала.

Таким образом, было найдено оптимальное соотношение компонентов **рецептуры № 1**: 1 л фильтрата, 100 мл серной кислоты и 1,2 кг сланцевой золы. Схватывание смеси наступало через 5 часов. После 28 дней твердения полученный материал обладал высокой связанностью, не крошился в пыль, как без использования серной кислоты, и имел прочность на одноосное сжатие 5,5

МПа. Полученный по рецептуре № 1 твердый продукт был исследован на содержание тяжелых металлов: валовых и подвижных форм (таблицы 5.5 и 5.6).

Таблица 5.5 – Содержание валовых форм ТМ (мг/кг) в литификате по рецептуре № 1

ТМ	Литификат	ПДК/ОДК [91]
Cu	5,12 ± 0,45	132
Zn	36,0 ± 2,5	220
Pb	28,1 ± 2,2	130
Cd	0,43 ± 0,04	2
Co	2,52 ± 0,15	-
Ni	12,1 ± 0,9	80
Mn	200 ± 24	1500
Cr	18,2 ± 1,6	-
Hg	<0,1	2,1
As	8,41 ± 1,02	10

Таблица 5.6 – Содержание подвижных форм ТМ (мг/кг) в литификате по рецептуре № 1

ТМ	Литификат	ПДК [91]
Cu	1,32 ± 0,11	3
Zn	14,3 ± 1,1	23
Pb	3,22 ± 0,38	6
Co	1,12 ± 0,13	5
Ni	4,14 ± 0,52	4
Mn	80,1 ± 9,6	100
Cr	3,92 ± 0,39	6

Содержание ТМ не превышает ПДК для населенных пунктов. Однако, несмотря на удовлетворительные результаты полученного материала, дальнейшие его исследования не проводились в связи с высокой концентрацией серной кислоты, необходимой для его производства. Применение серной кислоты приводит к высоким затратам на сырьевые материалы (таблица 5.7), транспортировку, хранение и нержавеющее оборудование. Кроме того, отказ от использования серной кислоты обоснован аспектами безопасности

(минимизация рисков, отсутствие кислотного хозяйства, вопросы техники безопасности, комфортные условия труда).

Таблица 5.7 – Финансовые затраты на материальные расходы для получения литификата по рецептуре № 1

Компонент	Соотношение	Ед.	Цена, руб.
Фильтрат	м <sup>3</sup>	1	
Серная кислота	л/м <sup>3</sup> фильтрата	100	1650
Сланцевая зола	т/м <sup>3</sup> фильтрата	1,2	2880
Литификат	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> фильтрата	1,5	4530
Итого на 1 м <sup>3</sup> литификата			3020

### 5.3.2. Рецептура литификата с сульфатом алюминия и сланцевой золой (рецептура № 2)

Дальнейшая работа была заключена в поиске альтернативы серной кислоте, которая позволила бы получить литификат удовлетворительного качества при минимально возможном количестве минерального агента – сланцевой золы. На основе литературного обзора по нейтрализации фильтрата и способам его очистки было выявлено, что сульфат алюминия может выполнять как функцию коагулянта, так и функцию подкислителя до необходимого уровня рН. Сульфат алюминия проявляет особую эффективность при применении для очистки вод с повышенным содержанием дубильных и гуминовых веществ. Широко известный сульфат железа по сравнению с сульфатом алюминия имеет ряд недостатков, а именно: повышенные кислотные свойства, что оказывает корродирующее действие на аппаратуру; возможность образования растворимых сильно окрашенных комплексов при взаимодействии ионов железа с некоторыми органическими соединениями; менее развитую поверхность образуемых при очистке хлопьев. В связи с этим последующие эксперименты проводились с использованием сульфата алюминия в качестве добавки на первой стадии литификации.

Безводный сульфат алюминия – порошок белого цвета с плотностью 2710 кг/м<sup>3</sup>. Из водных растворов в интервале температур от -12 до 112,2 °С кристаллизуется 18-водный сульфат алюминия. Достоинствами сульфата алюминия по сравнению с серной кислотой являются более низкая стоимость, а также отсутствие опасности при работе с ним.

Суммарно уравнение гидролиза сульфата алюминия имеет вид, из которого понятны природа понижения рН фильтрата до необходимого уровня для осаждения гуминовых кислот, физический смысл коагуляции, а также аналогичность процесса добавления в фильтрат серной кислоты:  $Al_2(SO_4)_3 + 6H_2O = 2Al(OH)_3\downarrow + 3H_2SO_4$ .

В процессе гидролиза коагулянта в фильтрате происходит соосаждение с образующимся гидроксидом алюминия гуминовых солей тяжелых металлов и сульфата кальция, разрушается термодинамическое равновесие системы и выделяются растворенные газы.

Исследования использования сульфата алюминия в качестве активатора коагуляции фильтрата показали, что приготовления концентрированных растворов не потребуется, т.к. в среде полигонного фильтрата сульфат алюминия хорошо гидролизуется, смещая рН среды в кислую область (5,0-5,5), растворяясь и обеспечивая параллельную дегазацию. В связи с этим в последующих экспериментах применялся твердый гранулированный коагулянт.

Эксперименты по разработке рецептуры № 2 для литификации фильтрата в лабораторных условиях включали следующие стадии:

- 1) отмеренный объем фильтрата (1 л) переносится в емкость для смешивания;
- 2) отмеренный объем сульфата алюминия (5-50 г) добавляется в емкость к фильтрату, после чего происходит смешивание с помощью миксера со скоростью 100 об/мин в течение 10-30 минут до полного растворения введенного коагулянта;
- 3) отмеренный объем сланцевой золы в количестве 1-2 кг вносится в полученную суспензию, при этом перемешивание смеси продолжается еще в

течение 15 минут с целью равномерного распределения составляющих смеси во всем объеме. В данном случае количество сланцевой золы было увеличено для оценки влияния концентрации компонентов на схватывание материала;

4) после перемешивания достигается образование пластичной пастообразной массы, которая переносится в подготовленную форму для твердения.

В результате проведенных экспериментов по необходимому количеству сульфата алюминия для осаждения имеющихся в фильтрате загрязнителей было выявлено, что при превышении концентрации коагулянта в количестве 50 г на 1 л фильтрата его растворение останавливается, что свидетельствует о перенасыщении раствора. Таким образом, подбор количества необходимой золы для отверждения смеси проводился при использовании 50 г сульфата алюминия на 1 л фильтрата. Результаты проведенных экспериментов отображены на рисунке 5.5. На основе полученных результатов сделан вывод о том, что оптимальное количество золы составило 1,2 кг на 1 л фильтрата.

Далее был проведен ряд экспериментов для определения возможности снижения количества сульфата алюминия в экономических целях. Проведенные исследования представлены на рисунке 5.6.

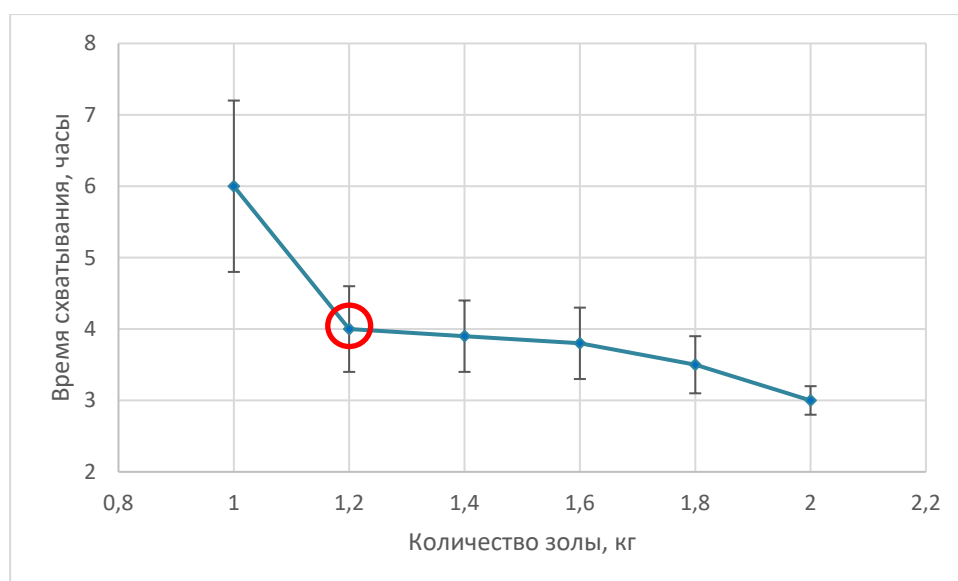


Рисунок 5.5 – Зависимость времени схватывания смеси от количества золы при концентрации сульфата алюминия, равной 50 г на 1 л

В данном случае постоянным было соотношение фильтрата и сланцевой золы, равное 1 л : 1,2 кг. Было выявлено, что при снижении сульфата алюминия до 15 г на 1 л фильтрата золы в количестве 1,2 кг недостаточно для связывания всего объема фильтрата. При этом по экономическим соображениям приоритетным является использование большего количества сульфата алюминия, а не золы. В итоге оптимальной концентрацией сульфата алюминия является 30 г на 1 л фильтрата.

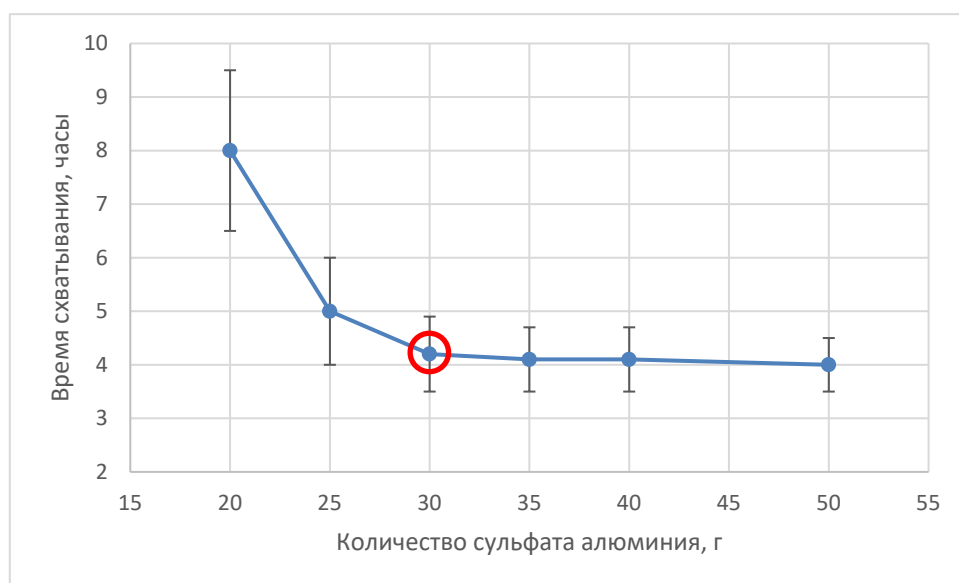


Рисунок 5.6 – Зависимость времени схватывания смеси от количества сульфата алюминия при соотношении фильтрата и золы, равном 1 л : 1,2 кг

Таким образом, была разработана оптимальная рецептура литификации фильтрата с использованием сульфата алюминия на первой стадии и сланцевой золы – на второй. Последующие исследования проводились с литификатом, произведенным по **рецептуре № 2**: 1 л фильтрата : 30 г сульфата алюминия : 1,2 кг сланцевой золы. Финансовые затраты на материальные расходы для получения литификата по рецептуре № 2 представлены в таблице 5.8.

При взаимодействии компонентов смеси происходит активное газообразование, в результате которого улетучивается 0,5-1 % исходной массы. Качественный анализ выбросов, образуемых при литификации, выявил следующие соединения: аммиак, метан, сероводород, оксид углерода, диоксид

азота, диметилбензол, толуол, трихлорметан, тетрахлорметан. Таким образом, при смешивании 1 л фильтрата, 30 г сульфата алюминия и 1,2 кг сланцевой золы образуется 2,26-2,27 кг литификата и 11-23 г газов.

Таблица 5.8 – Финансовые затраты на материальные расходы для получения литификата по рецептуре № 2

Компонент	Соотношение	Ед.	Цена, руб.
Фильтрат	м <sup>3</sup>	1	
Сульфат алюминия	кг/м <sup>3</sup> фильтрата	30	426
Сланцевая зола	т/м <sup>3</sup> фильтрата	1,2	2880
Литификат	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> фильтрата	1,4	3306
Итого на 1 м <sup>3</sup> литификата			2361

Учитывая химический состав фильтрата, при литификации полученной смеси можно прогнозировать образование гипса и сингенита за счет взаимодействия щелочных сульфатов с образующимся гидроксидом кальция и формирование этtringита за счет реакции алюминатов кальция с образующимся гидроксидом кальция. Также предполагается кристаллизация карбонатов щелочных металлов путем взаимодействия гидроксида кальция с газовыми компонентами (углекислый и сернистый газы), которые образуются при обработке фильтрата сульфатом алюминия.

Сравнивая две полученные рецептуры, можно сделать вывод, что рецептура № 2 обладает следующими преимуществами: безопасность производства, более низкая стоимость сульфата алюминия по сравнению с серной кислотой, более быстрое схватывание материала при оптимальном соотношении компонентов. Последующие исследования проводились с литификатом, изготовленным по рецептуре № 2.

#### 5.4. Исследование характеристик литификата

Для проведения исследований свойств и характеристик литификата были произведены образцы из фильтрата, отобранного в разных точках полигона, по

разработанной рецептуре № 2. Пример полученного литификата при утилизации фильтрата представлен на рисунке 5.7.



Рисунок 5.7 – Литификат, полученный при утилизации фильтрата

Произведенный литификат исследовался на содержание тяжелых металлов, как валовых, так и подвижных форм. Валовые концентрации тяжелых металлов в литификате отображены в таблице 5.9. Концентрации подвижных форм тяжелых металлов в твердом продукте представлены в таблице 5.10.

Согласно полученным данным, превышений ПДК для почв населенных пунктов для ТМ не было выявлено, а значит, подобранная альтернатива серной кислоте в виде сульфата алюминия так же хорошо связывает тяжелые металлы при литификации.

Далее был проведен рентгенофазовый анализ литификата для выявления основных кристаллических фаз. Дифрактограмма литификата представлена на рисунке 5.8. По результатам количественного анализа основными фазами литификата являются кальцит в количестве 46-50 % и этtringит – 27-30 %. Кроме того, было выявлено наличие кварца в количестве 9-12 %, гидрокалумита – 8-10 %, гипса – 2-3 % и мусковита – 2-3 %.



Таблица 5.9 – Содержание валовых форм ТМ (мг/кг) в литификате по рецептуре № 2

ТМ	Литификат	ПДК/ОДК [91]
Cu	4,87 ± 0,31	132
Zn	41,2 ± 2,7	220
Pb	33 ± 3,2	130
Cd	0,37 ± 0,03	2
Co	2,13 ± 0,18	-
Ni	11,4 ± 0,8	80
Mn	224 ± 18	1500
Cr	15,3 ± 1,7	-
Hg	<0,1	2,1
As	7,22 ± 0,84	10

Таблица 5.10 – Содержание подвижных форм ТМ (мг/кг) в литификате по рецептуре № 2

ТМ	Литификат	ПДК [91]
Cu	1,15 ± 0,09	3
Zn	7,2 ± 0,7	23
Pb	2,75 ± 0,19	6
Co	1,04 ± 0,11	5
Ni	3,43 ± 0,38	4
Mn	87,4 ± 7,1	100
Cr	4,73 ± 0,42	6

Был проведен анализ литификата методом ИК-спектроскопии, результаты которого представлены на рисунке 5.9. ИК-спектры литификата свидетельствуют о присутствии полос поглощения, которые характерны для силикатов и карбонатов, что согласуется с результатами рентгенофазового анализа. Кроме того, было выявлено присутствие функциональных групп: –ОН, –СН<sub>2</sub>, –СН<sub>3</sub>, дающих основание предполагать проявление хемосорбционных свойств литификата [114].

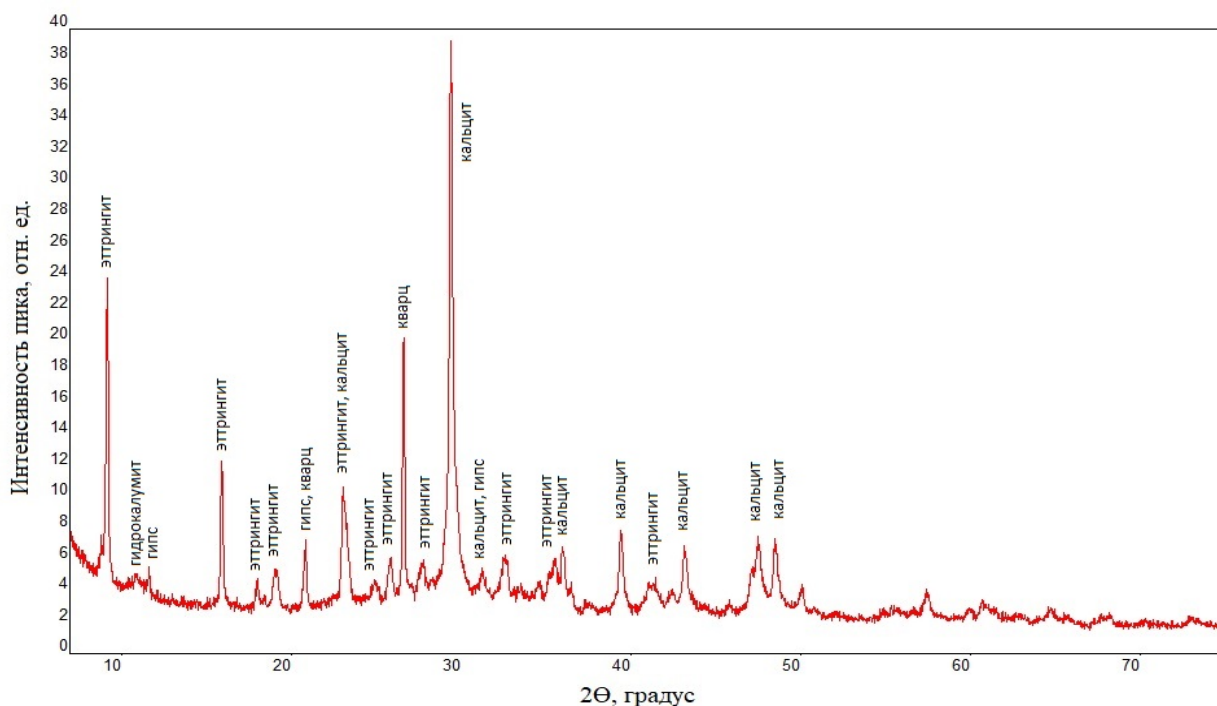


Рисунок 5.8 – Дифрактограмма литификата по рецептуре № 2

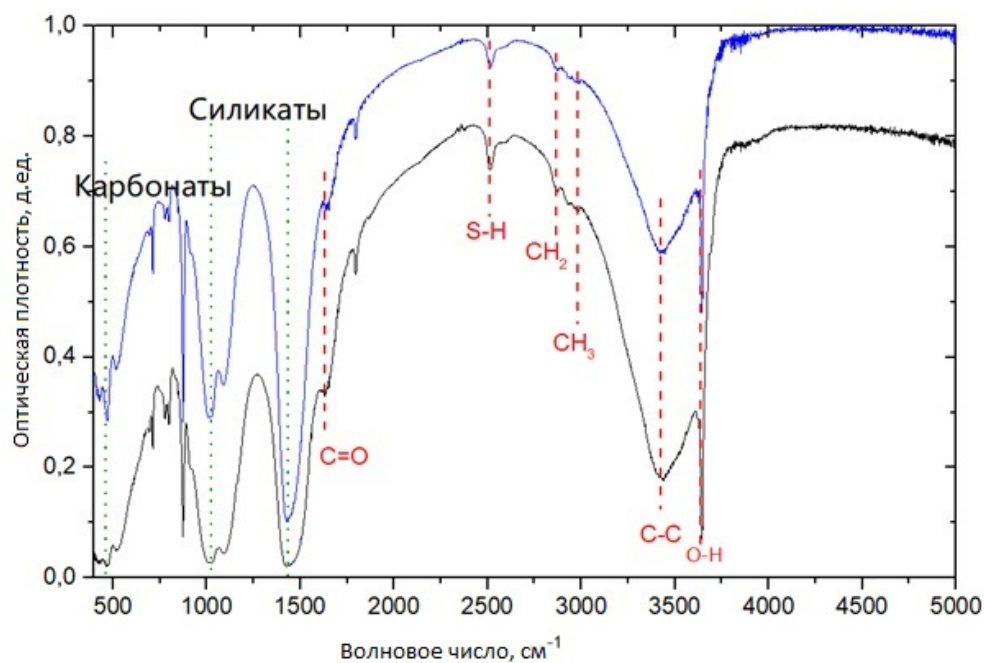
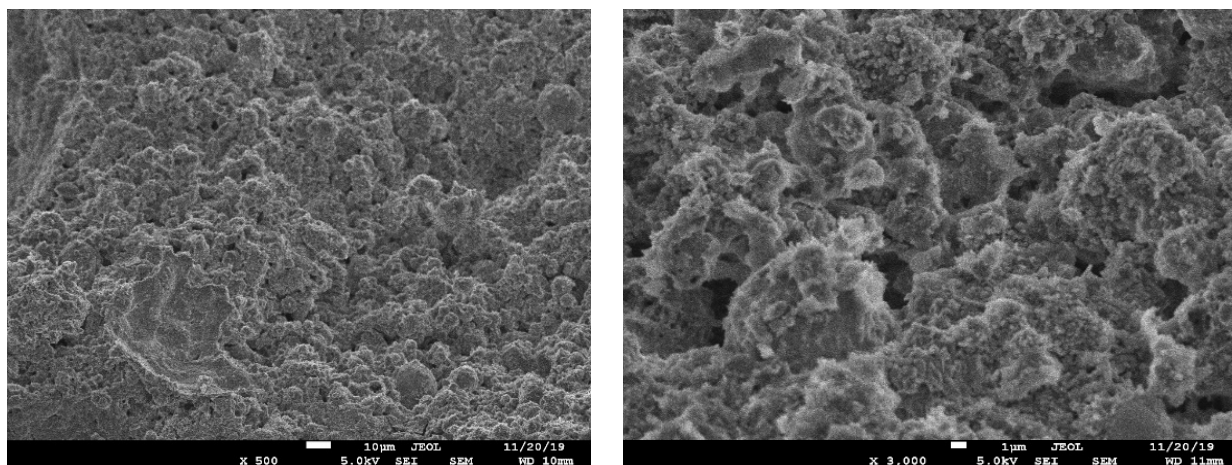


Рисунок 5.9 – ИК-спектры литификата по рецептуре № 2

Проведенный микроструктурный анализ литификата (рисунок 5.10) показал наличие развитой пористости на поверхности материала, что дает основание предполагать способность литификата к физической адсорбции поллютантов в его поры.



а)

б)

Рисунок 5.10 – Микроструктура литфиката по рецептуре № 2:

а) - x 500; б) - x 3000

Испытания на прочность литфиката при одноосном сжатии выявили следующие результаты: в сухом состоянии  $R_{сж}=6,8\pm 0,3$  МПа (рисунок 5.11 а) и в водонасыщенном состоянии  $R_{сж}=4,8\pm 0,4$  МПа (рисунок 5.11 б), что говорит о потери прочности в водонасыщенном состоянии на 30 % и связано в первую очередь с минералогическим составом. Однако, это не является критичным при создании замкнутой схемы использования полученного продукта для нужд полигона.

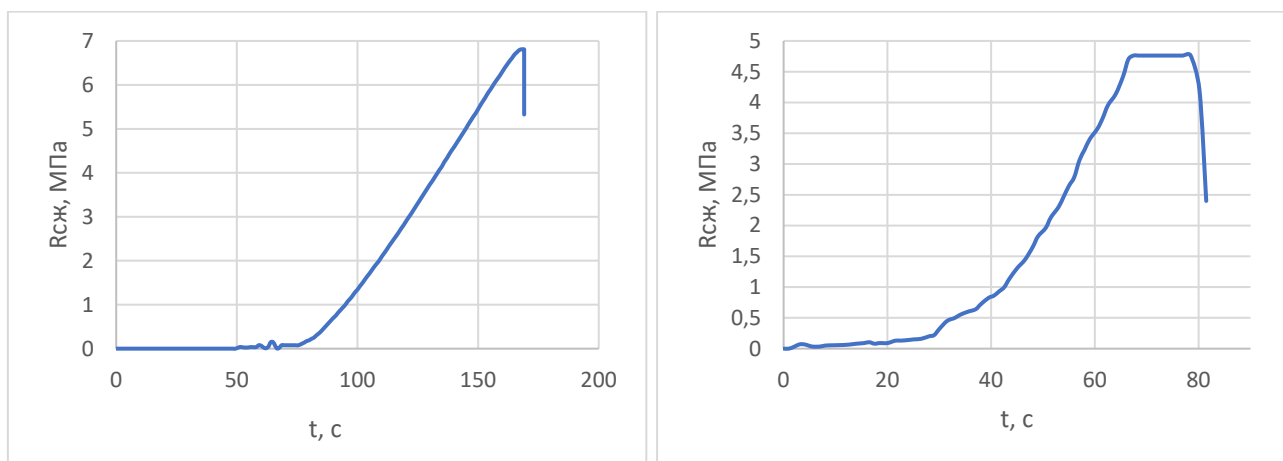


Рисунок 5.11 – Определение предела прочности литфиката при одноосном сжатии: а) в сухом состоянии; б) в водонасыщенном состоянии

Также в аккредитованной лаборатории были проведены токсикологические исследования литфиката (Приложение Б) на белых крысах

и морских свинок (таблица 5.11) и биотестирование на *Daphnia magna Straus* и *Chlorella vulgaris* (таблица 5.12).

Таблица 5.11 – Токсикологические исследования литификата на лабораторных животных

Определяемые показатели	Ед. изм.	Результаты исследования	НД на метод исследования
Острая токсичность при введении в желудок DL <sub>50</sub> (белые крысы)	мг/кг	DL <sub>50</sub> >5000	Инструкция 1.1.11-12-35-2004
Ингаляционная опасность методом статической ингаляционной затравки, (н.у.), экспозиция 2 часа, (белые мыши)		Летучие компоненты не вызывают раздражение слизистых оболочек глаз и верхних дыхательных путей. Гибели животных не отмечено.	М.П. «Рекомендации для предварительной оценки токсичности химических веществ ускоренным методом»
Кожно-раздражающее действие (белые крысы) -однократно -повторно	баллы	0 0	МУ №2102-79
Раздражающее действие на слизистые оболочки глаз (морские свинки)	баллы	0	МУ №2196-80

Литификат в соответствии с ГОСТ 12.1.007 [115] относится к 4-му классу опасности и токсического действия на организм человека не оказывает. Средняя смертельная доза при введении в желудок составляет более 5000 мг/кг. Раздражающее действие на кожные покровы и слизистые оболочки глаз отсутствует. Летучие компоненты не оказывают раздражающего действия на верхние дыхательные пути.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что при утилизации фильтрата методом литификации с использованием сульфата алюминия и сланцевой золы производится товарный безопасный твердый продукт – литификат.

Таблица 5.12 – Токсикологические исследования литификата методом биотестирования

Определяемые показатели	Ед. изм.	Результаты исследования				Величина доп. уровня	НД на метод исследования
Разведение экстракта, действующее на гидробионты	%	Гибель дафний				$A \leq 10$	ФР.1.39.2007.03222
		24 ч	48 ч	72 ч	96 ч		
		0	0	0	0		
1 (без разбавления)		0	0	0	0		
Контроль		0	0	0	0		
Чувствительность хлореллы при кратности разведения:	%					$-30 < I < +20$	ПНДФ ФТ 14.1:2:3:4.10-04 Т 16.1:2:2.3:3.7-04
		+9,6					
		0					
1 (без разбавления)							
Контроль							

Проанализировав материалы, которые необходимы при эксплуатации и рекультивации полигонов ТКО, а также учитывая фазовый состав литификата, было предложено применение литификата в качестве:

- изолирующего материала для пересыпки отходов при эксплуатации полигона;
- материала для засыпки трещин и провалов при рекультивации полигона (планировка поверхности);
- дренажного материала для строительства газотранспортных систем при устройстве дегазации полигона на этапе рекультивации.

Предложенное использование литификата согласуется с основным нормативным документом по эксплуатации и рекультивации полигонов ТКО: Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для ТБО [18].

В результате проделанной работы было получено экспертное заключение ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в городе Санкт-Петербург», которое подтверждает возможность использования литификата для нужд полигона (Приложение В).

## 5.5. Выводы

1. Разработан метод обезвреживания фильтрата, позволяющий производить твердый продукт – литификат – за счет перевода агрегатного состояния из жидкого в твердое с использованием сульфата алюминия и сланцевой золы.

2. Исследования свойств литификата показали, что содержание тяжелых металлов в нем не превышает ПДК для почв населенных пунктов; литификат является безопасным с токсикологической точки зрения; основными кристаллическими фазами литификата являются кальцит и этtringит; литификат обладает прочностью на одноосное сжатие 6,8 МПа.

3. Предложено использование литификата в качестве изолирующего слоя для пересыпки отходов при эксплуатации полигонов и материала для планировки поверхности и устройства газодренажных систем на этапе рекультивации полигонов ТКО.

## ГЛАВА 6. ЗАМКНУТАЯ СХЕМА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОЛИГОНОВ ТКО

### 6.1. Исследование свойств техногенного грунта

В результате предварительной обработки мелкой фракции ТКО и последующего компостирования был получен обогащенный биоразлагаемыми компонентами техногенный грунт. Для подтверждения высокого биологического потенциала техногенного грунта из ТКО были определены его агрохимические параметры. Также техногенный грунт был проанализирован на содержание тяжелых металлов. Результаты проведенных анализов представлены в таблицах 6.1 и 6.2.

Таблица 6.1 – Агрохимические показатели техногенного грунта

Показатели	Ед.изм.	Значение
рН	ед.рН	7,80 ± 0,28
Углерод органический	%	30,2 ± 1,8
Азот общий	%	1,82 ± 0,18
Азот аммонийный	мг/кг	606 ± 54
Азот нитратный	мг/кг	2430 ± 195
Фосфор	мг/кг	1640 ± 152
Калий	мг/кг	1335 ± 104

Таблица 6.2 – Содержание валовых форм тяжелых металлов (мг/кг) в техногенном грунте

ТМ	Концентрация	ПДК/ОДК [91]
Cu	86 ± 18	132
Zn	385 ± 51	220
Pb	143 ± 36	130
Cd	0,37 ± 0,09	2
Ni	22 ± 7	80
Mn	95 ± 13	1500
Hg	0,46 ± 0,12	2,1
As	0,7 ± 0,3	10

Из таблицы 4.1 видно, что техногенный грунт характеризуется высоким содержанием питательных элементов – азота, фосфора, калия, которые

необходимы для роста растительных объектов и их развития, а значит, полученный продукт будет способствовать развитию проростков высших растений. При этом отношение C/N составляет 16,6, что является оптимальным, т.к. при отношении  $C/N > 20$  доступность азота снижается, и микробный метаболизм постепенно сокращается, в результате чего наступает азотное голодание растительных объектов. Концентрация аммонийного азота характеризует активность процесса аммонификации – основного процесса разложения азотсодержащих органических соединений. Аммонификация осуществляется многими микроорганизмами при различных условиях, т.е. в данном процессе участвуют как бактерии, которым необходим кислород, так и микроорганизмы, активизирующиеся при отсутствии кислорода, а также грибы и актиномицеты. Образование нитратного азота осуществляется в ходе процессов нитрификации – следующей стадии трансформации азота в почвенном покрове. Интенсивность нитрификации является показателем плодородия почвы, т.к. для жизнедеятельности нитрифицирующих бактерий необходимы определенные условия, отклонение от которых (не подходящий температурный режим, недостаточное количество кислорода, высокая влажность) приводит к остановке их жизнедеятельности и оказывает влияние на количество нитратного азота в почве. Изменения концентрации нитратного азота сигнализируют о процессе преобразования азотсодержащих органических веществ, при этом интенсивность нитрификации часто применяется как показатель готовности, т.е. зрелости компостируемого материала в отношении органогенных субстратов [116, 117]. Преобладание нитратных форм в техногенном грунте свидетельствует о его высокой зрелости как компостного материала и о соблюдении необходимых кислородных условий, которые стимулируют окислительный процесс азотсодержащих органических компонентов.

Результаты таблицы 6.2 показывают, что содержание цинка и свинца выше ПДК для почв населенных пунктов в 1,8 раза и в 1,1 раза соответственно. При этом содержание меди, кадмия, никеля, марганца, ртути и мышьяка находится в



допустимых границах. Однако, необходимо учитывать, что вариативность полученных данных по содержанию тяжелых металлов зависит от исходного материала. Ввиду этого возможность использования полученного продукта вне полигонов ТКО не рассматривалась в рамках данного исследования.

Также были проведены токсикологические исследования техногенного грунта, которые представлены в таблицах 6.3 и 6.4.

Таблица 6.3 – Токсикологические исследования техногенного грунта методом биотестирования

Определяемые показатели	Ед. изм.	Результаты исследования	Величина доп. уровня	НД на метод исследования			
Разведение экстракта, действующее на гидробионты	%	Гибель дафний				$A \leq 10$	ФР.1.39.200 7.03222
		24 ч	48 ч	72 ч	96 ч		
		0	0	0	0		
1 (без разбавления)		0	0	0	0		
Контроль		0	0	0	0		
Индекс токсичности $I_t$	%	115,4				$80 \leq I_t \leq 120$	ФР.1.31.200 9.06301
1 (без разбавления)							

В соответствии с ГОСТ 12.1.007 [115] техногенный грунт относится к 4-му классу опасности (малоопасные вещества) и токсического действия на организм человека не оказывает. Техногенный грунт не обладает раздражающим действием на кожные покровы, слизистые оболочки глаз и верхние дыхательные пути.

По результатам полученных данных техногенный грунт предлагается использовать в качестве материала изоляции откосов на этапе эксплуатации полигонов ТКО, что способствует:

- снижению захоронения высокореакционных органических отходов, в результате чего снижаются эмиссии биогаза и уменьшается токсичность образуемого фильтрата;
- экономии грунтовых ресурсов, необходимых для изоляции откосов;

- улучшению эстетического вида полигона за счет высокого биологического потенциала техногенного грунта, что способствует самозарастанию откосов;
- уменьшению количества образуемого фильтрата за счет расходования поступающей влаги на транспирацию растениями, произрастающими на откосах полигона.

Таблица 6.4 – Токсикологические исследования техногенного грунта на лабораторных животных

Определяемые показатели	Ед. изм.	Результаты исследования	НД на метод исследования
Острая токсичность при введении в желудок DL <sub>50</sub> (белые крысы)	мг/кг	DL <sub>50</sub> >5000	МУ №2163-80 Инструкция 1.1.11-12-35-2004
Ингаляционная опасность методом статической ингаляционной затравки, (н.у.), CL <sub>50</sub> (мг/м <sup>3</sup> ), (белые мыши)		Летучие компоненты не вызывают раздражение слизистых оболочек глаз и верхних дыхательных путей. Гибели животных не отмечено. CL <sub>50</sub> >50000	
Кожно-раздражающее действие (белые крысы) -однократно -повторно	баллы	0 0	МУ №2102-79
Раздражающее действие на слизистые оболочки глаз (морские свинки)	баллы	0	МУ №2196-80

## 6.2. Сорбционные свойства литификата

В результате проведенных ИК-спектрометрического и микроструктурного анализов литификата были выявлены предпосылки для проявления хемосорбционных и адсорбционных свойств продукта утилизации фильтрата. Для подтверждения полученных данных был проведен эксперимент определения

сорбционной емкости литификата и его эффективности очистки модельного раствора фильтрата от ТМ (медь, цинк, свинец, никель, хром, кадмий, кобальт) в статических условиях при измельчении образца до размера 50-150 мм. Полученные результаты представлены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Сорбционная емкость литификата ( $A_0$ ) и эффективность очистки модельного раствора ( $\Xi$ ) литификатом

ТМ	$C_{нач}$ , г/дм <sup>3</sup>	$C_{кон}$ t=24 ч, мг/дм <sup>3</sup>	$C_{кон}$ t=21 сут, мг/дм <sup>3</sup>	$\Xi$ , t=21 сут, %	$A_0$ , 21 сут, мг/г
Cu	31,5	0,062	0,049	99,8	1,57
Zn	28,3	0,24	0,035	99,9	1,4
Pb	12,8	0,008	0,007	99,9	0,64
Ni	29,1	8,3	0,165	99,4	1,45
Cr	26,1	17,8	18,3	29,9	0,39
Cd	9,14	0,2	0,009	99,9	0,46
Co	9,7	1,8	0,0044	99,95	0,48

Из таблицы 6.5 видно, что эффективность очистки ТМ литификатом через 21 сутки достигает 99 % практически по всем исследуемым тяжелым металлам. При этом суммарная сорбционная емкость литификата составляет 6,4 мг/г. Несмотря, на относительно невысокую сорбционную емкость, данное свойство является дополнительным положительным аспектом при использовании литификата в качестве изоляционного материала для отходов. В данном случае материал, полученный в ходе утилизации фильтрата, будет способствовать уменьшению концентрации тяжелых металлов во вновь образуемом фильтрате за счет сорбции в слоях пересыпки отходов литификатом.

### 6.3. Технологическая схема производства литификата

На основании подобранной рецептуры производства литификата с сульфатом алюминия и сланцевой золой была разработана технологическая схема производства литификата, представленная на рисунке 6.1.

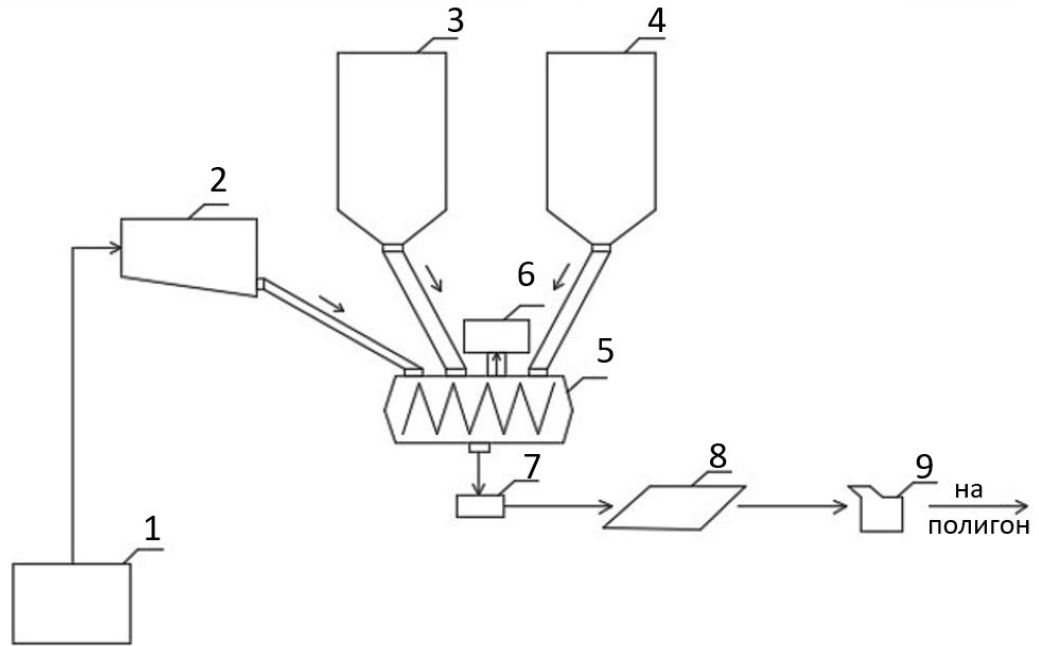


Рисунок 6.1 – Технологическая схема производства литификата: 1-сбор фильтрата; 2-емкость для фильтрата; 3-силос для сульфата алюминия; 4-силос для золы; 5-смеситель; 6-газовый абсорбер; 7-формовка; 8-площадка для затвердевания; 9-дробилка

Фильтрат, который образуется на всех этапах жизни полигона, по дренажной системе в основании полигона собирается и накапливается в подземных емкостях 1, после чего осуществляется его откачка с помощью илососа и доставка на площадку литификации. На участке литификации фильтрат из илососа перекачивается в емкость 2, откуда поступает в смеситель 5. Для определения количества подаваемого в смеситель фильтрата используется расходомер. Смеситель представляет собой горизонтальную емкость-барабан с расположенным в нем соосно перемешивающим валом. Далее в смеситель из силоса 3 подается сульфат алюминия, результатом чего является выделение газов и пенообразование при химическом взаимодействии компонентов. Производимое в смесителе интенсивное перемешивание обеспечивает полное растворение сульфата алюминия, частичное разрушение данной системы, в частности разрываются прослойки жидкости, что способствует высвобождению пузырьков газа. Далее в смеситель по наклонному шнеку вводится сланцевая

зола из силоса 4, при подаче которой начинается процесс отверждения смеси, в основе которого гидравлическое твердение вяжущих веществ. Образующиеся при смешивании компонентов газы из смесителя поступают через специальный отводной люк по газоходу в абсорбер для улавливания газов 6. В результате смешивания компонентов формируется пастообразный материал, который из смесителя поступает в тару 7 через разгрузочный люк для дальнейшего затверждения на площадке 8 с образованием литификата. После отверждения материала осуществляются его дробление 9 и транспортировка на полигон в качестве необходимых материалов для эксплуатации и рекультивации полигона.

#### **6.4. Экономические показатели производства литификата**

Капитальные затраты на создание площадки литификации фильтрата с оборудованием производительностью 5 м<sup>3</sup> в час представлены в таблице 6.6. Капитальные вложения составляют 6,2 млн руб.

Операционные годовые расходы представлены в таблице 6.7. Согласно выполненному экономическому расчету, удельные затраты на утилизацию 1 м<sup>3</sup> фильтрата составляют 3448 руб. с учетом амортизации оборудования. Для обоснования целесообразности использования данной технологии было произведено сравнение с таким методом очистки, как обратный осмос. Обратный осмос более 10 лет является наиболее распространенной технологией очистки фильтрата за рубежом и используется, как самостоятельно, так и в комплексе с биологическими методами очистки в качестве финальной стадии. В России за последние годы резко увеличилось количество полигонов, использующих обратный осмос, что сопряжено с реализацией реформы обращения с отходами производства и потребления в Российской Федерации. На сегодняшний день системами обратного осмоса оснащены как действующие, так и рекультивируемые полигоны ТКО: СПК «Казацкий» (г. Губкин), КПО «Восток», «Тимохово», «Царево», «Ядрово», ООО «Экотехнопарк», ООО «Сергиево-Посадский МПК», ООО «Каширский МПК» (Московская обл.), ООО «ПЖКХ»

(г. Казань), ООО «Технострой» (Владимирская обл.), «ЭкоЛэнд» (г.Новокузнецк), полигон ТКО в п. Лоо (г. Сочи) и др.

Таблица 6.6 – Капитальные затраты на литификацию

Наименование	Цена, руб.
Силос панельный, V-64м <sup>3</sup> , Н-9780 мм	664 160
Силос сварной, V-36м <sup>3</sup> , Н-8780 мм	342 080
Механический ротационный датчик предельного уровня сыпучих материалов	46 600
Абсорбер	184 170
Предохранительный клапан для силоса	36 170
Вибратор с предохранительной цепью и площадкой крепления	30 520
Затвор дисковый поворотный с ручным приводом	27 170
Шнек наклонный	317 750
Опорная площадка разборная на болтах для силоса	586 000
Смеситель СО-2500 из нержавеющей стали по ТЗ	1 470 800
Насос	41 670
Тензодатчики	137 700
Шкаф управления в кислотостойком исполнении	101 250
Емкость для фильтрата	291 650
Оборудование для разгрузки продукта литификации	500 000
Строительные работы	1 185 400
Монтаж и доставка	259 670
<b>ИТОГО</b>	<b>6 222 760</b>

Несмотря на относительно низкие прямые операционные затраты (600-900 руб/м<sup>3</sup>) при использовании обратного осмоса, стоит обратить внимание на высокие капитальные вложения – 95 млн. руб., выше капитальных затрат на установку литификации в 15 раз. Более того использование обратного осмоса включает в себя дополнительные операционные расходы, связанные с вывозом на захоронение образуемого концентрата (3000-4000 руб/м<sup>3</sup>). При этом с точки зрения снижения экологического воздействия обратный осмос сопряжен с образованием вторичного отхода – концентрата, что является неоспоримым минусом в сравнении с технологией литификации. Кроме того, технология литификации позволяет совместно утилизировать полигонный фильтрат и промышленный отход, а также реализовать принцип циркулярной экономики и

использовать полученный продукт для нужд полигона, что дополнительно позволяет экономить грунтовые ресурсы, сохранять природные ландшафты и дополнительно экономить на закупке грунта, стоимость которого составляет в среднем 270 руб/м<sup>3</sup>.

Таблица 6.7 – Годовые операционные расходы на литификацию

Наименование затрат	Стоимость, руб
Расходы на оплату труда производственных рабочих	2 553 000
Амортизация	813 049
Ремонт/отчисления в ремонтный фонд	186 655
Электроэнергия	699 834
Топливо и смазочные материалы	572 880
Материальные расходы:	
- сланцевая зола	98 208 000
- сульфат алюминия	14 526 600
<b>Суммарные финансовые потребности</b>	<b>117 560 017</b>
<b>Удельные расходы на утилизацию 1 м<sup>3</sup> фильтрата</b>	<b>3 448</b>

Производство литификата позволяет отказаться от вывоза фильтрата на утилизацию в стороннюю организацию и использовать полученный литификат в качестве грунта для пересыпки отходов. Результатом использования технологии литификации является экономическая выгода размером 5,4 млн руб. в год (на примере полигона ООО «Новый Свет-ЭКО»).

### 6.5. Замкнутая схема управления ресурсным потенциалом ТКО

В ходе выполнения диссертационного исследования были разработаны технологии и получены:

1. Техногенный грунт при утилизации мелкой фракции ТКО (0-80 мм), полученной при первичной сортировке отходов.
2. Литификат при утилизации фильтрата, образуемого на полигонах ТКО.

В результате диссертационной работы предлагается использовать полученные из отходов и фильтрата материалы, переводя их в ранг продуктов, для нужд полигонов ТКО. Схема использования продуктов, полученных на основе отходов и фильтрата полигонов, в качестве материалов, необходимых при эксплуатации и рекультивации полигонов ТКО, представлена на рисунке 6.2.

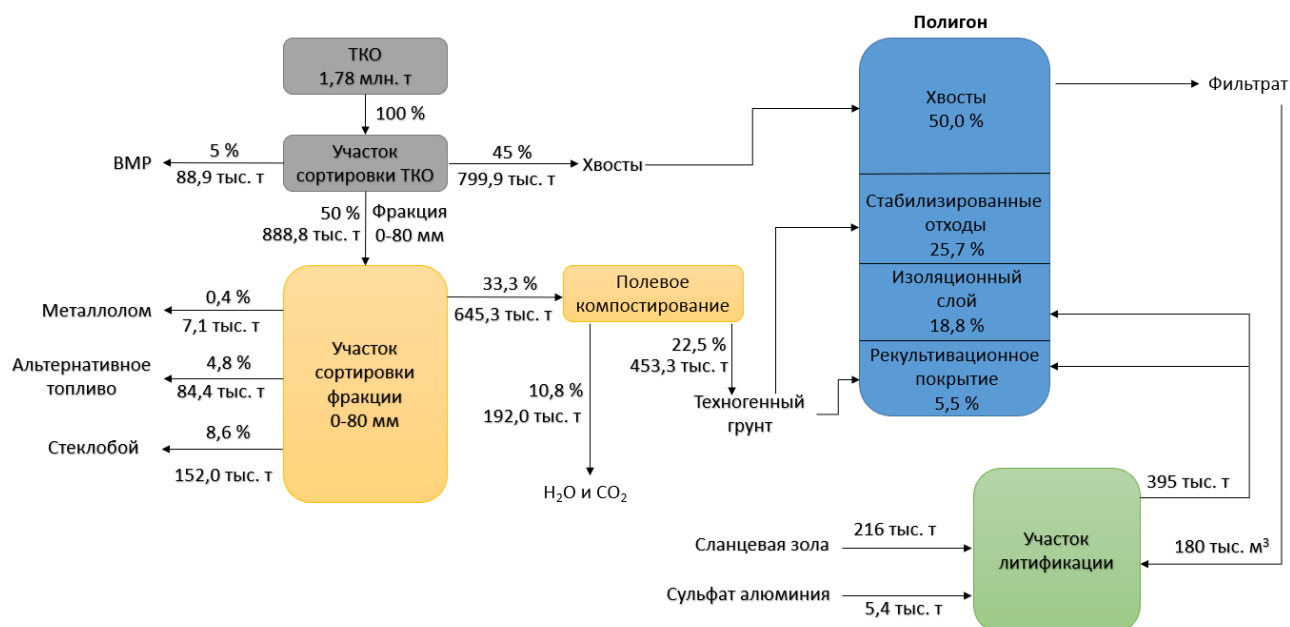


Рисунок 6.2 – Ресурсосберегающая схема снижения геоэкологического воздействия полигона

Отходы, поступающие на сортировочный комплекс, проходят обработку мелкой фракции (0-80 мм), что позволяет извлекать стеклобой, материал для альтернативного топлива и металлолом. Остатки сортировки (органоминеральная смесь) отправляются на компостирование, результатом чего является техногенный грунт, пригодный для изоляции откосов при эксплуатации полигонов. Избыток техногенного грунта захоранивается в качестве стабилизированного отхода, что позволяет снижать эмиссии парниковых газов и токсичность фильтрата. Фильтрат, образующийся на полигоне ТКО, собирается по дренажной системе и поступает на участок литификации, где осуществляется производство литификата – твердого экологически безопасного продукта взаимодействия фильтрата с сульфатом алюминия и сланцевой золой, который применяется в качестве материала пересыпки отходов при эксплуатации



полигона и в качестве материала планировки поверхности и газодренажных систем на этапе рекультивации полигона. Техногенный грунт и литификат полностью закрывают нужды полигона в грунтовых ресурсах.

Использование данной схемы позволяет осуществить управление ресурсным потенциалом ТКО для минимизации воздействия полигонов на компоненты геосреды за счет: 1) сохранения природных грунтовых ресурсов; 2) снижения образуемых парниковых газов; 3) снижения токсичности фильтрата; 4) совместной утилизации полигонного фильтрата и промышленного отхода.

Представленная схема управления ресурсным потенциалом твердых отходов прошла апробацию на полигоне ТКО Ленинградской области ООО «Новый Свет-ЭКО» (Гатчинский район).

Созданная в ходе данной работы лабораторная установка литификации фильтрата была масштабирована до производственной и внедрена на предприятии ООО «Новый Свет-ЭКО» (рисунок 6.3, приложение Г). В результате работы установки в течение первого года после ввода в эксплуатацию было утилизировано 7 000 м<sup>3</sup> фильтрата, что позволило произвести 10 000 м<sup>3</sup> литификата.

Также были внедрены разработки по получению и использованию техногенного грунта на полигоне ООО «Новый Свет-ЭКО». Испытания, проведенные с обработкой мелкой фракции ТКО, позволили произвести 1400 т техногенного грунта, извлечь 470 т стеклобоя, 260 т материала для альтернативного топлива и 22 т металлолома. Техногенный грунт был использован для изоляции части откоса полигона (март 2020 г.), после чего был проведен контроль за формирующимся покровом растительных объектов. Было выявлено, что формирование растительного покрова на откосе начинается уже с первого года. В самом начале зарастания ведущая роль была отведена растениям, чьи семена содержались в техногенном грунте: тыквы, томаты, арбузы, кабачки. Далее разнообразие растительного покрова дополнялось представителями местной флоры, преимущественно сорно-полевыми и рудеральными видами

(крапива, осот полевой, чертополох курчавый, одуванчик лекарственный, тысячелистник обыкновенный, пижма обыкновенная, полынь обыкновенная).



Рисунок 6.3 – Установка литификации фильтрата на полигоне  
ООО «Новый Свет-ЭКО»



Рисунок 6.4 – Самозарастание откоса, отсыпанного техногенным грунтом

Постепенно частичное покрытие травяными видами становилось более повсеместным, что привело к эстетическому виду откоса полигона. Результаты самозарастания откоса (октябрь 2020 г.) представлены на рисунке 6.4. Необходимо отметить, что растительность на откосах способствует некоторому уменьшению образования фильтрата за счет расходования поступающей влаги на транспирацию растениями.

## 6.6. Выводы

1. Полученный в ходе компостирования органоминеральной смеси техногенный грунт обладает высоким биологическим потенциалом, что подтверждено агрохимическими показателями, однако содержание тяжелых металлов в нем превышает ПДК для почв населенных пунктов, что ограничивает его использование вне полигонов ТКО.

2. Использование техногенного грунта в качестве материала для изоляции откосов на этапе эксплуатации полигонов позволяет экономить грунтовые ресурсы, снижать эмиссии биогаза и токсичность фильтрата, а также улучшать эстетический вид полигона ТКО за счет самозарастания откосов.

3. Выявлено, что литификат обладает сорбционной емкостью по отношению к тяжелым металлам, что будет способствовать снижению концентрации ТМ во вновь образуемом фильтрате при использовании литификата в качестве материала пересыпки отходов.

4. Рассчитаны капитальные затраты, необходимые для установки литификации фильтрата, которые составляют 6,2 млн руб., а также операционные расходы на утилизацию фильтрата методом литификации, которые составляют 3 448 руб/м<sup>3</sup>.

5. Разработана замкнутая схема использования ресурсного потенциала ТКО для снижения геоэкологического воздействия полигонов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен мониторинг почв и растений на территории, прилегающей к полигону ТКО ООО «КомЭк», в результате которого было выявлено негативное воздействие закрытой городской свалки, расположенной с южной стороны исследуемого полигона, выраженное в превышении ПДК для почв по содержанию тяжелых металлов. Анализ миграции ТМ из почвы в растения позволил дать рекомендации по использованию полыни горькой *Artemisia absinthium* L. в качестве местного фиторемедиатора для снижения концентрации ТМ в миграционном потоке от закрытой свалки ТКО.

2. Модернизирована технология получения техногенного грунта из мелкой фракции ТКО, которая позволяет дополнительно извлекать 27 % вторичных ресурсов: стеклобой, материал для производства альтернативного топлива и металлолом. В результате апробации модернизированной схемы получения техногенного грунта на полигоне ТКО ООО «Новый Свет-ЭКО» было извлечено 470 т стеклобоя, 260 т материала для альтернативного топлива, 22 т металлолома и произведено 1400 т техногенного грунта. Техногенный грунт был использован для изоляции части откоса полигона вместо грунта, что позволило сэкономить грунтовые ресурсы, снизить эмиссии парниковых газов и токсичность образуемого фильтрата.

3. Разработан безотходный способ утилизации фильтрата полигонов ТКО путем изменения агрегатного состояния из жидкого в твердое с использованием сульфата алюминия и промышленного отхода – сланцевой золы. Основными кристаллическими фазами литификата являются кальцит и этtringит. Полученный литификат пригоден для применения в качестве материалов, необходимых на этапах эксплуатации и рекультивации полигонов. Литификат обладает сорбционной емкостью 6,4 мг/г и прочностью на одноосное сжатие 6,8 МПа. Концентрации подвижных форм тяжелых металлов в литификате не превышают ПДК для почв населенных пунктов.

4. Доказано, что продукты, полученные из отходов и фильтрата: техногенный грунт и литификат, относятся к 4-му классу опасности

(малоопасные вещества) и токсического действия на организм человека не оказывают.

5. На основании разработанной технологии утилизации фильтрата была создана промышленная установка литификации производительностью 5 м<sup>3</sup> в час. В результате внедрения данной установки на полигоне ООО «Новый Свет-ЭКО» было утилизировано 7 000 м<sup>3</sup> фильтрата, что позволило произвести 10 000 м<sup>3</sup> литификата, который был использован в качестве материала изоляции отходов.

6. Рассчитаны капитальные затраты, необходимые для установки литификации фильтрата, которые составляют 6,2 млн руб., а также операционные расходы на утилизацию фильтрата методом литификации, которые составляют 3 448 руб/м<sup>3</sup>.

7. Разработана и апробирована на полигоне ООО ТКО «Новый Свет-ЭКО» схема эксплуатации и рекультивации полигонов с использованием ресурсного потенциала отходов полигона ТКО и продукта их деструкции – фильтрата, которые явились сырьем для производства техногенного грунта и литификата соответственно. Техногенный грунт используется в качестве материала изоляции откосов, а литификат – в качестве материала изоляции отходов. Данная схема обеспечивает использование отходов полигона в замкнутом цикле, что соответствует требованиям циркулярной экономики.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

АУ – активированный уголь

БПК – биологическое потребление кислорода

ВМР – вторичные материальные ресурсы

ГОС – галогенорганические соединения

ИТМ – ионы тяжелых металлов

МБО – механико-биологическая обработка

ОДК – ориентировочно допустимая концентрация

ОМСС – органоминеральная сырьевая смесь

ООУ – общий органический углерод

ПВД – полиэтилен высокого давления

ПВХ – поливинилхлорид

ПДК – предельно допустимая концентрация

ПНД – полиэтилен низкого давления

ПП – полипропилен

ПС – полистирол

ПЭТ – полиэтилентерефталат

СПАВ – синтетические поверхностно-активные вещества

ТКО – твердые коммунальные отходы

ТМ – тяжелые металлы

ХПК – химическое потребление кислорода

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Орлова А.М. Современные проблемы твердых бытовых отходов // А.М. Орлова, М.Н. Попова. Монография. - М.: МГСУ, 2010. - 216 с.
2. Гарин В.М. Экология для технических вузов: учеб. Пособие / В.М. Гарин, И.А. Кленова, В.И. Колесников. - Ростов-на-Дону: Феникс, 2001.- 384 с.
3. Вайсман Я.И. Управление отходами. Захоронение твердых бытовых отходов: учеб. пособие. / Я.И. Вайсман, В.Н. Коротаев, В.Ю. Петров. - Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2001. - 133 с.
4. Об отходах производства и потребления: Федеральный закон № 89-ФЗ от 24.06.1998 (ред. от 14.06.2020 с изм. и доп.). - М., 2020.
5. Kaza S. What a Waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050. / S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, F. Van Woerden. // Washington: World Bank.- 2018.- 273 p.
6. Ильиных Г.В. Тенденции и закономерности изменения норм накопления, состава и свойств ТБО / Г.В. Ильиных, Ю.В. Завизион, Н.Н. Слюсарь, В.Н. Коротаев // Экология и промышленность России. - 2013.- № 10.- С. 22-25.
7. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году: государственный доклад [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.mnr.gov.ru/docs/o\\_sostoyanii\\_i\\_ob\\_okhrane\\_okruzhayushchey\\_sredy\\_rossiyskoy\\_federatsii/gosudarstvennyy\\_doklad\\_o\\_sostoyanii\\_i\\_ob\\_okhrane\\_okruzhayushchey\\_sredy\\_rossiyskoy\\_federatsii\\_v\\_2018/](http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2018/) (дата обращения: 30.04.2020).
8. Кирсанов С.А. Мировой и российский опыт утилизации твердых бытовых отходов / С.А. Кирсанов, Г.В. Мустафин // Вестник Омского университета. Серия «Экономика». - 2014. - № 2. - С. 114-120.

9. Об утверждении комплексной стратегии обращения с твердыми коммунальными (бытовыми) отходами в Российской Федерации: Приказ Минприроды России от 14.08.2013 № 298. - М., 2013.
- 10.Ежова А.А. Сравнительный анализ зарубежного и российского опыта в сфере обращения с твердыми бытовыми отходами / А.А.Ежова, Н.К. Андросова // Известия Саратовского ун-та. Серия Химия. Биология. Экология. - 2013.- Т. 13.- № 3. - С. 94-97.
- 11.Шубов Л.Я. Seriously о сортировке ТКО / Л.Я. Шубов, О.Н. Борисова, И.Г. Доронкина // Твердые бытовые отходы.- 2016. - № 3. - С. 26-30.
- 12.Осипов В.И. Управление твердыми коммунальными отходами как федеральный экологический проект / В.И. Осипов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. - 2019. - № 3. - С. 3-11.
- 13.Баратов С.Э. Вторичная переработка стекла в России: взгляд изнутри / С.Э. Баратов // Наука, техника и образование. - 2015. - № 3. - С. 33-35.
- 14.Абдуллаев Р.А. Модификация вторичных полимеров / Р.А. Абдуллаев, Г.П. Овчинникова, Т.П. Устинова // Пластические массы.- 2012. - № 4.- С. 49-53.
- 15.Растянникова Е.В. Вторичное использование ресурсов в металлургической промышленности в России и Китае / Е.В. Растянникова // Инновации и инвестиции. - 2019. - № 7. - С. 81-85.
- 16.Смолин А.С. Вторичные волокнистые материалы из отходов производства и потребления картонно-бумажной продукции / А.С. Смолин, А.В. Кулешов, М.В. Ванчаков // Российский химический журнал. - 2011. - Т. 55. - № 1. - С. 50-56.
- 17.Подлипский И.И. Эколого-геологическая оценка территории полигонов бытовых отходов. / И.И.Подлипский // Lambert Acad. Publ. - 2015. - 200 с.



18. Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов. - М., 1998. - 39 с.
19. СП 320.1325800.2017. Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектирование, эксплуатация и рекультивация. - М.: Стандартинформ, 2017. - 16 с.
20. Ашихмина Т.В. Загрязнение грунтовых вод в результате эксплуатации полигона твердых бытовых отходов / Т.В. Ашихмина // Экология и промышленность России. - 2011. - № 6. - С. 42-43.
21. Бузина И.Н. Состояние почв и оценка окружающей среды вокруг полигона твердых бытовых отходов / И.Н. Бузина, Пузик В.К. // Вестник БГСХА. - 2014. - № 3. - С. 102–106.
22. Куриленко В.В. Эколого-геологическая и биогеохимическая оценка воздействия полигонов твердых отходов на состояние окружающей среды / В.В. Куриленко, И.И. Подлипский, Н.Г. Осмоловская // Экология и промышленность России. - 2012.- № 11.- С. 28-32.
23. Подлипский И.И. Геоэкологическая оценка прилегающих территорий полигона бытовых отходов (г. Питкяранта, республика Карелия) / И.И. Подлипский // Вестник СПбГУ. Серия Геология. География. - 2013. - № 2.- С. 48-56.
24. Слюсарь Н.Н. Оценка долгосрочных эмиссий объектов захоронения твердых коммунальных отходов: результаты полевых исследований и лабораторного моделирования / Н.Н. Слюсарь, Я.И. Вайсман, В.Н. Коротаяев // Экология и промышленность России. - 2016. - Т. 20. - № 4. - С. 32-39.
25. Assessment of shallow groundwater contamination resulting from a municipal solid waste landfill – a case study in Lianyungang, China / G. Chen, Y. Sun, Z. Xu et al. // Water. - 2019. - Vol. - 11, P - 2496.

26. Migration of hazardous components of municipal landfill leachates into the environment / V. Popovych, J. Telak, O. Telak et al. // *Journal of Ecological Engineering*. - 2020. - Vol. 21. - No. 1. - P. 52-62.
27. Гуман О.М. Гидрогеохимическая модель полигона ТБО / О.М. Гуман, И.А. Долинина // *Известия УГГУ*. - 2003. - № 18. - С. 262-273.
28. Volatile organic compounds (VOCs) in solid waste landfill cover soil: Chemical and isotopic composition vs. degradation processes / A. Randazzo, M. Asensio-Ramos, G.V. Melian, et al. // *Science of The Total Environment*. - 2020. - Vol. 726. P - 138326.
29. Масликов В.И. Оценка геоэкологического риска загрязнения атмосферы выбросами полигонов ТБО для выбора мероприятий по рекультивации / В.И. Масликов, А.Н. Чусов, А.В. Черемисин, М.Г Рыжакова // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. - 2012. - № 1. - С. 239-243.
30. Вайсман Я.И. Управление отходами. Сточные воды и биогаз полигонов захоронения твердых бытовых отходов. / Я.И. Вайсман - Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2012.- 259 с.
31. Dubrova S.V. Functional city zoning. Environmental assessment of ecological substance migration flows / S.V. Dubrova, I.I. Podlipiski, V.V. Kurilenko, W. Siabato // *Environmental Pollution*. - 2015. - Vol. 197. - P. 165-172.
32. Рекомендации по сбору, очистке и отведению сточных вод полигонов захоронения твердых бытовых отходов. - М.: АКХ им. Памфилова, 2003. - 47 с.
33. Christensen T. Landfilling of waste: Leachate. / T. Christensen, R. Cossu, R. Stegmann London: Elsevier, 1992. - 431 p.

34. Управление водным балансом полигона ТБО на примере полигона в г. Краснокамске / Я.И. Вайсман, С.Ю. Чудинов, Д.С. Кравченко и др. // Вестник ПНИПУ. Урбанистика. - 2012. - №1. - С. 43-57.
35. Вайсман Я.И. Управление отходами. Полигоны захоронения ТБО: учеб. пособие. / Я.И. Вайсман, В.Н. Коротаев, В.Ю. Петров, А.М. Зомарев - Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2007. - 463 с.
36. Польшгалов С.В. Опасные материалы в составе твердых коммунальных отходов / С.В. Польшгалов, Г.В. Ильиных, Я.В. Базылева, В.Н. Коротаев // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. - 2015. - № 3 - С. 129-144.
37. Путилина В.С. Влияние органического вещества на миграцию тяжелых металлов на участках складирования твердых бытовых отходов / В.С. Путилина, И.В. Галицкая, Т.И. Юганова // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН. - 2005. - № 76. - С. 1-100.
38. Christensen T.H. Sanitary landfilling: process, technology and environmental impact. T.H. Christensen, R., R Cossu Stegmann. - London: Academic Press, 1989. - 592 p.
39. Грибанова Л.П. Процессы на полигонах / Л.П. Грибанова // Твердые бытовые отходы. - 2006. № 7. - С. 4-7.
40. Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment. / H. Luo, Y. Zeng, Y. Cheng, D. He, X. Pan // Science of The Total Environment. - 2020. - Vol. 703 –P - 135468.
41. Милютин Н.О. Фильтрат полигонов ТКО: образование, характеристика и обезвреживание. / Н.О. Милютин, Ю.А. Смятская, Н.А. Политаева, П.С. Зеленковский // Бутлеровские сообщения. - 2020. - Т.61. - № 3. - С. 79-85.

42. McBean E.A. Leachate collection design for containment landfills. / E.A. McBean, R. Poland, F.A. Rovers, A.J. Crutcher // *Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE*. - 1982. - Vol. 108. - No. 1. - P. 204-209.
43. Biological degradation of MSW in a methanogenic reactor using treated leachate recirculation / R. He, D. Shen, J. Wang et al. // *Process Biochemistry*. - 2005. - Vol. 40. - P. 3660-3666.
44. Landfill leachate treatment methods: A review / J. Wiszniowski, D. Robert, J. Surmacz-Gorska et al. // *Environmental Chemistry Letters*. - 2015. - Vol. 4. - No. 1. - P. 51-61.
45. Вайсман Я.И. Физико-химические методы защиты биосферы. Очистка фильтрационных вод полигонов захоронения твердых бытовых отходов: учеб. пособие. / Я.И. Вайсман - Пермь: Изд-во ПНИПУ. 2005. - 197 с.
46. Salem Z. Evaluation of landfill leachate pollution and treatment. *Desalination*. / Z. Salem, K. Hamouri, R. Djemaа, K. Allia - 2008. - Vol. 220. - P. 108-114.
47. Novel and conventional technologies for landfill leachates treatment: A review / V. Torretta, N. Ferronato, I. Katsoyiannis et al. // *Sustainability*. - 2016. - Vol. 9. - No. 1. - P. 1-39.
48. Кашковский В.И. Комплексная очистка фильтрационных вод / В.И. Кашковский, В.Н. Горбенко, Ю.Б. Синяков, Д.Г. Вальчук // *Твердые бытовые отходы*. - 2010. - №4. - С. 34-39.
49. High-efficiency nutrients reclamation from landfill leachate by microalgae *Chlorella vulgaris* in membrane photobioreactor for bio-lipid production / H. Chang, X. Quan, N. Zhong et al. // *Bioresource Technology*. - 2018. - Vol. 266. - P. 374-381.
50. Запольский А.К. Коагулянты и флокулянты в процессах очистки воды. / А.К. Запольский - Л.: Химия, 1987. - 208 с.

51. Zouboulis A.I. The application of bioflocculant for the removal of humic acids from stabilized landfill leachates / A.I. Zouboulis, C. Xiao-Li, I.A. Katsoyiannis // *Journal of Environmental Management*. - 2004. - Vol. 70. - No. 1. - P. 35-41.
52. Кушевич А.С. Реагентная очистка фильтрата ТБО / А.С. Кушевич, С.А. Маннанова // *Башкирский экологический вестник*. - 2011. - №3 - №4. - С. 34-35.
53. Сатин И.В. Очистка фильтрата коагулированием и сорбцией на активированных углях / И.В. Сатин, И.В. Борейко // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. - 2010. - № 3. - С. 266-269.
54. Федосова Т.А. Сорбционная очистка фильтрационных вод полигонов ТБО / Т.А. Федосова, С.И. Рощина, М.С. Никитичева // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. - 2014. - №8. - С. 103-106.
55. Малышева А.В. Очистка фильтратов полигонов: мембранные технологии / А.В. Малышева // *Твердые бытовые отходы*. - 2011. - № 6. - С. 32-33.
56. Drouiche M.C. Stabilization/solidification by hydraulic binders of metal elements from landfill leachate / M.C. Drouiche, K. Moussaceb, E. Joussein, J.C. Bollinger // *Nova Biotechnologica et Chimica*. - 2019. - Vol. 18 - N1. - P. 72–83.
57. Stabilisation /solidification of landfill leachate concentrate and its residue obtained by partial evaporation / J. Hendrych, R. Hejralova, J. Krouzek, P. Spacek, J. Sobek // *Waste Management*. - 2019. - Vol. 95. - P. 560–568.
58. Paria S. Solidification-stabilization of organic and inorganic contaminants using portland cement: A literature review / S. Paria, P.K. Yuet // *Environmental Reviews*. - 2006. - Vol. 14. - P. 217–255.
59. Пат. 2460704 Российская Федерация, МПК С 04 В 28/00, С 04 В 18/30, С 04 В 18/18. Способ утилизации фильтрата полигона твердых бытовых

- отходов и золы. / Островкин И.М., Островкин П.И.; заявитель и патентообладатель Островкин И.М., Островкин П.И. № 2010149883/03; заявл. 07.12.10; опубл. 10.09.12. - Бюл. №25. - 7 с.
60. Robinson A.H. Landfill leachate treatment / A.H. Robinson // Membrane & Technology. - 2005. - Vol. 2005. - No. 6. - P. 6-12.
61. Пат. 2186618 Российская Федерация, МПК В 01 J 20/24, В 01 D 39/00, В 01 D 39/04, В 01 J 20/00, В 01 J 20/10, В 09 В 1/00, С 02 F 1/28. Биосорбционный фильтр для очистки сточных вод. / Вайсман Я.И., Зайцева Т.А., Рудакова Л.В., Глушанкова И.С., Шишкин Я.С., Никитенко А.С.; заявитель и патентообладатель Перм. гос. техн. ун-т. № 2001100980/12; заявл. 09.01.01; опубл. 10.08.02. - Бюл. №22.- 6 с.
62. Бронникова О.И. Очистка фильтрата полигона твердых бытовых отходов / О.И. Бронникова, О.Н. Новиков, М.Ю. Метляева // Сибирь-Восток. - 2006. - № 2. - С.42-47.
63. Поворов А.А. Технология очистки дренажных полигонных вод / А.А. Поворов, В.Ф. Павлова, Н.А. Шиненкова, О.Ю. Логунов // Твердые бытовые отходы. - 2009. - №4. - С.26-27.
64. Пат. 2589139 Российская Федерация, МПК С 02 F 9/08, С 02 F 1/42, С 02 F 1/44, С 02 F 1/461, С 02 F 1/52, В 01 D 36/00, В 01 D 61/02, В 01 D 61/14. Способ очистки дренажных вод полигонов твердых бытовых отходов./ Поворов А.А., Павлова В.Ф., Кротова М.В., Шиненкова Н.А., Трифонова Т.А., Начева И.И. ..., и др.; заявитель и патентообладатель ООО «БМТ». № 2014128230/05; заявл. 09.07.14; опубл. 10.07.16. -Бюл. №3. -16 с.
65. Анализ методов очистки фильтрата полигонов ТКО / Н.О Милютина, Н.А. Политаева, П.С. Зеленковский и др // Вестник Евразийской науки. - 2020. - Т.12. - № 3. - С. 1-11.

66. Базылева Я.В. Анализ перспектив извлечения материального и энергетического потенциала из потоков твердых бытовых отходов / Я.В. Базылева, Н.Н. Слюсарь, Г.В. Ильиных, В.Н. Коротаев // Теоретическая и прикладная экология. - 2013. - № 1. - С. 61-66.
67. Семин Е.Г. Геоэкологический резерв в системе обращения с ТБО / Е.Г. Семин, К.Н. Цирикова // Жизнь, безопасность, экология. - 2012. - № 3-4. - С. 86-90.
68. Ножевникова А.Н. Биотехнология и микробиология анаэробной переработки органических коммунальных отходов. / А.Н. Ножевникова, А.Ю. Каллистов, Ю.В. Литти, М.В. Кевбрин - М.: Университетская книга, 2016. - 320 с.
69. Мирный А.Н. Государственное управление отходами в рамках концепции устойчивого развития. / А.Н. Мирный, В.Е. Мурашов, В.Е. Корецкий - М.: АКХ им. К.Д. Памфилова, 2012. - 351 с.
70. Вайсман Я.И. Компостирование твердых органических отходов производства и потребления. Вермикомпостирование: монография. / Я.И. Вайсман - Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. - 557 с.
71. Changes in global trends in food waste composting: Research challenges and opportunities / S.K. Awasthi, S. Sarsaiya, M.K. Awasthi et al. // Bioresource Technology. - 2020. - Vol. 299 – P- 122555.
72. Xiao Y. Continuous thermophilic composting (CTC) for rapid biodegradation and maturation of organic municipal solid waste / Y. Xiao, G.-M Zeng, Z.-H. Yang // Bioresource Technology. - 2009. - Vol. 100. - P. 4807-4813.
73. Неклюдов А.Д. Аэробная переработка органических отходов в компосты / А.Д. Неклюдов, Г.Н. Федотов, А.Н. Иванкин // Прикладная биохимия и микробиология. - 2006. - Т. 42. - № 4. - С. 389-403.

74. Евдокимов С.В. Обеспечение экологической безопасности при переработке ТБО. Экология и промышленность России. / С.В.Евдокимов, А.А. Орлова, Г.Ф. Дубинина - 2015. -Т. 19. - № 11. - С. 36-40.
75. Montejo C. Influence of input material and operational performance on the physical and chemical properties of MSW compost / C. Montejo, C. Costa, M. C. Marquez // Journal of Environmental Management. - 2015. - Vol. 162. - P. 240-249.
76. Ильиных Г.В. Морфологический состав отходов: основные тенденции изменения // Твердые бытовые отходы. / Г.В. Ильиных, В.Н. Коротаев, Н.Н. Слюсарь - 2011. - № 8. - С. 38-41.
77. Дитц А.А. Определение элементного состава вещества методом рентгенофлуоресценции: методические указания. / А.А. Дитц - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. - 20 с.
78. Дмитриенко А.О. Теория рентгенофазового анализа. Учебно-методическое пособие. / А.О. Дмитриенко, Г.Н. Макушова, М.В. Пожаров - Саратов, 2016. - 51 с.
79. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения. / М.М. Криштал, И.С. Ясников, В.И. Полунин и др. - М.: Техносфера, 2009. - 208 с.
80. Колесник И.В. Инфракрасная спектроскопия: методическая разработка. / И.В. Колесник, Н.А. Саполетова - М.: МГУ, 2011. - 88 с.
81. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия: Атомная спектроскопия. / М.А. Ельяшевич - М.: Либроком, 2018. - 416 с.
82. Комарова Н.В. Практическое руководство по использованию систем капиллярного электрофореза «КАПЕЛЬ». / Н.В. Комарова, Я.С. Каменцев - СПб.: ООО «Веда», 2006. - 212 с.



- 83.Алесковский В.Б. Физико-химические методы анализа. / В.Б. Алесковский, В.В. Бардин, Е.С. Бойчинова - Л.: Химия, 1988. - 376 с.
- 84.Дубова Н.М. Титриметрические методы анализа: учебно-методическое пособие. / Н.М. Дубова, Т.М. Гиндуллина - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011.-100 с.
- 85.ПНД Ф 14.1:2:4.261-2010. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации сухого и прокаленного остатка в пробах питьевых, природных и сточных вод гравиметрическим методом. -М., 2015. -11 с.
- 86.ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. - М: ИПК Изд - во стандартов, 2001. - 41 с.
- 87.Добровольский Г.В. Сохранение почв как незаменимого компонента биосферы: функционально-экологический подход. / Г.В. Добровольский, Е.Д. Никитин - М.: Наука/Интерпериодика, 2000. - 185 с.
- 88.Гришина А.В. Транслокация тяжелых металлов и приемы детоксикации почв(грунтов) / А.В. Гришина, В.Ф. Иванова // Агрехимический вестник. - 1997. - № 3. - С. 36–41.
- 89.Подлипский И.И. Аккумулятивная биоиндикация в инженерно-экологических изысканиях / И.И. Подлипский // Инженерные изыскания. - 2014. - № 1. - С. 54–62.
- 90.Милютин Н.О. Анализ миграции тяжелых металлов в системе «почва–растение» при эколого-геологической оценке окружающей среды вокруг полигона ТКО в г. Тамбов / Н.О. Милютин, Н.Г. Осмоловская, Н.А. Политаева, В.В. Куриленко // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология.-2020. - № 3. - С. 55-63.

91. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. - 2021. - 469 с.
92. Обухов А.И. Охрана и рекультивация почв, загрязненных тяжелыми металлами / А.И. Обухов, Л.Л. Ефремова // Тяжелые металлы в окружающей среде и охрана природы: матер. II Всесоюз. конф. - М., 1988. - Ч. 1. - С. 23-35.
93. Прохорова Н.В. Аккумуляция ТМ дикорастущими и культурными растениями / Н.В. Прохорова - Самара: Изд-во Самарского ун-та, 1998. - 131 с.
94. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 3rd Edition. / A. Kabata-Pendias CRC Press, Boca Raton, 2001.- 403 p.
95. Verloo M. Analytical and biological criteria with regard to soil pollution / M. Verloo, A. Cottenie, G. Van. Landschoot // Landwirtschafliche Forschung: Kongressband. - 1982. - P. 394-403.
96. Phytoremediation of contaminated soils by heavy metals and PAHs. A brief review / A. Cristaldi, G.O. Contia, E.H. Jho, P. Zuccarello, A. Grasso, C. Copata, M. Ferrantea // Environmental Technology & Innovation. - 2017. - Vol. 8. - P. 309-326.
97. Milyutina N. Migration of heavy metal in the soil-plant system in the territory adjacent to the MSW landfill / N. Milyutina, N. Osmolovskaya, N. Politaeva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 403.
98. Квеситадзе Г.И. Метаболизм антропогенных токсикантов в высших растениях. / Г.И. Квеситадзе, Г.А. Хатисашвили, Т.А. Садунишвили, З.Г. Евстигнеева - М.: Наука, 2005. - 199 с.
99. Кудряшова В.И. Дикорастущие растения как объект мониторинга загрязнения почвы тяжелыми металлами / В.И. Кудрашова, Д.И.

- Башмакова, Т.Н. Гудошникова // Вестник Мордовского ун-та. Ботаника и физиология растений. -2007. - №4.- С. 22-26.
100. Титов А.Ф. Тяжелые металлы и растения. / А.Ф. Титов, Н.М. Казнина, В.В. Таланова - Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. - 194 с.
101. Пат. 2665073 Российская Федерация, МПК А 01 В 79/02, В 09 С 1/00. Фиторемедиационный способ очистки почв, загрязненных тяжелыми металлами. / Куриленко В.В., Осмоловская Н.Г.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет». № 2017137084; заявл. 20.10.17; опубл. 28.08.18. - Бюл. №25. - 18 с.
102. Беспмятнов Г.П. Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде. Справочник. / Г.П. Беспмятнов, Ю.А. Кротов - Л.: Химия, 1985. - 528 с.
103. Витковская С.Е. Агрэкологические основы использования биотермически переработанных твердых бытовых отходов для повышения плодородия кислых почв: автореф. дис. ... д - ра биол. наук (06.01.03)./ С.Е. Витковская - СПб, 2006. - 48 с.
104. Жилинская Я.А. Рекультивация полигонов захоронения твердых бытовых отходов продуктами механо-биологической переработки отходов: автореф. дис. ... канд. техн. наук (03.00.16). / Я.А. Жилинская - Пермь, 2010. - 16 с.
105. Заболотских В.В. Технологические приёмы улучшения качества компоста, получаемого из органических отходов / В.В. Заболотских // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2016. - Т.18. - №5(3). - С. 437-445.
106. Пат. 2103246 Российская Федерация, МПК С 02 F 11/04, С 02 F 11/16, С 02 F 103/20, С 05 F 9/00. Способ переработки твердых бытовых отходов в

- компост. / Лихачев Ю.М., Архипченко И.А., Федашко М.Я.; заявители и патентообладатели Лихачев Ю.М., Архипченко И.А., Федашко М.Я. № 97101391/25; заявл. 24.01.97; опубл. 27.01.98. - Бюл. №3. - 5 с.
107. Казицина Л.А. Применение ИК-, УФ-, ЯМР-спектроскопии в органической химии: учеб. пособие для вузов. / Л.А. Казицина, Н.Б. Куплетская - М.: Высш. школа, 1971. - 264 с.
108. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве / Н.И. Ватин, Д.В. Петросов, А.И. Калачев и др // Инженерно-строительный журнал. - 2011. - № 4. - С. 16-23.
109. Назаренко М.Ю. Эффективность применения горючих сланцев и сланцезольных отходов для очистки воды от органических загрязнителей / М.Ю. Назаренко, Н.К. Кондрашева, С.Н. Салтыкова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2016. - Т. 327. - № 9. - С. 95-103.
110. Янин Е.П. Горючие сланцы и окружающая среда (экологические последствия добычи, переработки и использования). / Е.П. Янин - М.: ИМГРЭ, 2003. - 86 с.
111. Смоленский О.В. Использование зол уноса ТЭЦ в производстве строительных материалов и строительстве / О.В. Смоленский // Технологии бетонов. - 2012. - №1-2. - С. 10-11.
112. Селиванова С.В. Статика и динамика процессов иммобилизации отходов мегаполиса: автореф. дис. ... канд. техн. наук (05.00.36). / С.В. Селиванов - СПб, 2004. - 18 с.
113. Суворова А.А. Химия неорганических вяжущих материалов. / А.А. Суворова, Т.Д. Пришлецова, Г.Н. Сычева, Р.П. Соболев - М.: Моск. гос. ун-т природообустройства, 2007. - 57 с.

114. Литификация фильтрата полигонов ТКО как способ его утилизации / А.В. Язев, Н.О. Милютина, Н.А. Аверьянова и др. // Экология и промышленность России. - 2020. - Т. 24. - № 6. - С. 36-41.
115. ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. - М.: Стандартинформ, 2007. - 5 с.
116. Витковская С.Е. Изменение содержания подвижных форм химических элементов в процессе трансформации органического вещества компоста из твердых бытовых отходов / С.Е. Витковская // Агрохимия. - 2005. - № 4. - С. 27–31.
117. Chefetz B. Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste / B. Chefetz, P. Hatcher, Y. Hadar, Y. Chen // J. Environ. Qual. - 1996. - V. 25. - № 4. - P. 776–785.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



Акционерное Общество  
**«Автопарк № 1 «Спецтранс»**  
 ИНН 7830002705/КПП 781001001  
 ОГРН 1027804847696  
 Люботинский пр. 7, Санкт-Петербург, 196105  
 ген. директор 388-36-64, гл. инженер 388-37-63,  
 главный бухгалтер 369-63-13 Факс: 388-67-80  
 E-mail: dir@spetl.ru, [www.spetl.ru](http://www.spetl.ru)

09.06.2020 № БН  
 На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Заведующей кафедрой  
 экологической геологии  
 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский  
 государственный университет»  
 Федоровой И.В.

*Уважаемая Ирина Викторовна!*

В АО «Автопарк № 1 «Спецтранс» разработана технология утилизации мелкой фракции ТКО, в основе которой лежит производство техногенного грунта с попутным извлечением вторичных материалов (стеклобой, металлолом, легкие фракции, пригодные для использования в качестве альтернативного топлива). Настоящим письмом подтверждаю, что аспирантка кафедры экологической геологии Санкт-Петербургского государственного университета Милотина Наталья Олеговна участвовала в разработке данной технологии.

На производственных площадках АО «Автопарк № 1 «Спецтранс» были проведены опытные испытания описанного технологического процесса. В рамках расширения производственных мощностей запланировано внедрение технологии утилизации мелкой фракции ТКО на предприятии АО «Автопарк № 1 «Спецтранс».

**Генеральный директор  
 АО «Автопарк № 1 «Спецтранс»**



**Язев А.В.**

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО НАДЗОРУ В СФЕРЕ ЗАЩИТЫ ПРАВ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ И БЛАГОПОЛУЧИЯ ЧЕЛОВЕКА

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ  
«ЦЕНТР ГИГИЕНЫ И ЭПИДЕМИОЛОГИИ В ГОРОДЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГ»**

**АККРЕДИТОВАННЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ЦЕНТР**  
Санкт-Петербург, Волковский пр., дом. 77; тел: 570-38-11; тел/факс: 571-14-47  
ОКПО 76204627, ОГРН 1057810163652, ИНН/КПП 7816363890/781601001

Аттестат аккредитации РОСС RU. 0001.510151,  
дата внесения в Реестр аккредитованных лиц 27.10.2016

**УТВЕРЖДАЮ**

Заместитель главного врача  
по организации лабораторного дела  
ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии  
в городе Санкт-Петербург»

Т.А. Гречанинова  
«20» февраля 2018 г.



**ПРОТОКОЛ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ № 1506/250**  
от 20.02.2018 г.

**Наименование предприятия, организации (заявителя):** ООО «Новый Свет-ЭКО».

**Юридический адрес:** 188361, Ленинградская область, Гатчинский район, вблизи пос. Новый свет, уч. № 2.

**Код пробы (образца):** УА-18-1506

**Наименование пробы(образца):** твердый продукт очистки фильтрата.

**Изготовитель:** ООО «Новый Свет-ЭКО», Россия.

**Место отбора пробы (образца):** г. Санкт-Петербург, ул. Старообрядческая, д. 9.

**Дата отбора пробы (образца):** 02.02.2018 г., акт отбор пробы (образца) б/н от 02.02.2018 г.

**Должность, ФИО лица, проводившего отбор проб:** главный технолог ООО «Новый Свет-ЭКО» Аверьянова Н.А.

**Цель исследований:** соответствие «Единым санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю)», утвержденным решением Комиссии таможенного союза от 28.05.2010 г. № 299.

**Основание для проведения:** договор.

**Ответственный за оформление протокола:**

**В.В. Романовский**

1. Результаты испытаний распространяются на представленную пробу.
2. Настоящий документ не может быть частично или полностью воспроизведен (скопирован или распечатан) без разрешения на то аккредитованного испытательного лабораторного центра.

## Продолжение Приложения Б

**АККРЕДИТОВАННЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ЦЕНТР  
ФБУЗ «ЦЕНТР ГИГИЕНЫ И ЭПИДЕМИОЛОГИИ В ГОРОДЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГ»**

**ТОКСИКОЛОГИЧЕСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ**

Код пробы (образца): УА-18-1506

Наименование пробы (образца): твердый продукт очистки фильтрата.

Регистрационный номер в журнале: 250.

Дата доставки пробы (образца): 02.02.2018 г.

Дата начала исследований: 05.02.2018 г.

Дата окончания исследований: 20.02.2018 г.

**Условия моделирования исследований:** Для определения острой токсичности на лабораторных животных при внутрижелудочном введении использовали представленный образец, который вводился в виде водной вытяжки. Ингаляционную опасность методом статической ингаляционной заправки проводили, используя образец в нативном виде. Для оценки раздражающего действия на кожные покровы и слизистые оболочки использовали водную вытяжку из образца. Испытания проводили на теплокровных половозрелых животных - белых крысах массой 200-220 г, белых мышах массой 22-25 г и морских свинок массой 450-480 г в опытных и контрольных группах. В качестве тест-объектов для биотестирования использовали культуру водоросли хлореллы и дафнии (*Daphnia magna* Straus). В опытах исследовали водные вытяжки из представленной пробы.

**Средства измерения:**

Тип прибора	Заводской номер	Сведения о государственной поверке
Весы лабораторные электронные AF 225DRCE	138977002	№ 0122854 до 15.08.2018 г.
Весы лабораторные электронные CE 612-C	23425190	№ 0068109 до 21.05.2018 г.
Измеритель плотности суспензии ИПС-03	№ 01030009	№ 0171518 до 22.10.2018 г.

**Результаты испытаний:**

Определяемые показатели	Единицы измерения	Результаты исследований	ИД на метод исследований
<b>Исследования на лабораторных животных</b>			
Острая токсичность при введении в желудок, DL <sub>50</sub> (белые крысы)	мг/кг	DL <sub>50</sub> > 5000	Инструкция 1.1.11-12-35-2004
Ингаляционная опасность методом статической ингаляционной заправки, (н.у.), экспозиция 2 часа, (белые мыши)	-	Летучие компоненты не вызывают раздражение слизистых оболочек глаз и верхних дыхательных путей. Гибели животных не отмечено.	М.П. «Рекомендации ускоренным методом», Л.1971
Кожно-раздражающее действие (белые крысы) - однократно - повторно	баллы	0 0	МУ № 2102-79
Раздражающее действие на слизистые оболочки глаз (морские свинки)	баллы	0	МУ № 2196-80



## Продолжение Приложения Б

Определяемые показатели	Единицы измерения	Результаты исследований	Величина допустимого уровня	НД на метод исследований			
<b>Биотестирование</b>							
Разведение экстракта, действующее на гидробионты	%	Гибель дафний					
		24 час	48 час	72 час	96 час		
		0	0	0	0		
1 (без разбавления)		0	0	0	0	A ≤ 10	ФР.1.39.2007.03222
Контроль		0	0	0	0		
Чувствительность хлореллы при кратности разведения:	%						
1 (без разбавления)							
Контроль		+9,6 0					

Заведующий токсикологической лабораторией



Л.А. Пунда

Ответственный исполнитель:  
химик-эксперт медицинской организации



К.С. Кудряшева

## ПРИЛОЖЕНИЕ В



УТВЕРЖДЕНО  
Приказом ФБУЗ «Центр гигиены  
и эпидемиологии в городе Санкт-Петербург»  
от 16 июня 2016 года № 335

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО НАДЗОРУ В СФЕРЕ ЗАЩИТЫ  
ПРАВ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ И БЛАГОПОЛУЧИЯ ЧЕЛОВЕКА**

**Федеральное бюджетное учреждение здравоохранения  
«Центр гигиены и эпидемиологии в городе Санкт-Петербург»**

**УТВЕРЖДАЮ**

Первый заместитель  
главного врача по организации  
деятельности учреждения  
/И.В. Драй/



**ЭКСПЕРТНОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

78.01.06.23.99.19.Т.3968 «17» 10. 2018 года

по результатам санитарно-эпидемиологической экспертизы

**Заявитель:** Общество с ограниченной ответственностью «Новый Свет - ЭКО» (ООО «Новый Свет - ЭКО»).

**Место нахождения:** 188361, Ленинградская обл., Гатчинский р-н, вблизи пос. Новый Свет, участок №2.

**Основание для проведения экспертизы:** договор №050455 от 09.10.2018г., письмо ООО «Новый Свет - ЭКО» исх. №424 от 08.10.2018г. (вх. №12952 от 09.10.2018 г.).

**Дата проведения экспертизы:** с 11.10.2018г. по 16.10.2018г.

**Объект экспертизы:** документация ТУ №23.99.19-014-51549182-2018 «Инертный изолирующий материал».

**Состав экспертных материалов:** Технические условия №23.99.19-014-51549182-2018 «Инертный изолирующий материал».

**Вопросы, поставленные экспертом (цель экспертизы):** экспертиза документации на соответствие (не соответствие) санитарно-эпидемиологическим требованиям.

**Установлено:**

Санитарно-эпидемиологическая экспертиза документации ТУ №23.99.19-014-51549182-2018 «Инертный изолирующий материал», проведена на основании представленных документов на соответствие требованиям СанПиН 2.1.7.1322-03 «Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и

№ А- 0000370195

Продолжение: листов 3  
с № А-0000370196  
по № А-0000370198

ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в городе Санкт-Петербург»,  
191023, г. Санкт-Петербург, ул. М. Садовая, д.1 (для переписки),  
тел.(812) 570-38-11, т/ф. (812) 570-60-76

от 14.10 2018 г. № 78.01.06.23.99.197.3968 К экспертному заключению

потребления» (п. 2.1), СП 2.1.7.1386-03 «Санитарные правила по определению класса опасности токсичных отходов производства и потребления».

При производстве инертного изолирующего материала используют фильтрат полигона твердых коммунальных отходов. В составе фильтрата не должно быть твердых включений.

При производстве инертного изолирующего материала марки МИ используется минеральный остаток от сжигания горючих сланцев при температурах около 1300-1400°C на тепловых электростанциях. Торговая марка минерального остатка «Zolest-bet».

При производстве инертного изолирующего материала марки МСЛ используется зола (пыль), уловленная при обжиге известняка, состоящая частично из обожженного известняка, активной извести, зольных остатков. Содержание активных CaO + MgO должно составлять 3% - 28 %.

#### Гигиенические характеристики:

№	Наименование показателя	Материал для изоляции		Материал для строительных и ландшафтных работ	
		(Марка МИ)		(Марка МСЛ)	
1	2	3	4	5	6
1	Фазовое состояние	раствор	твердый	раствор	твердый
2	Внешний вид	пульпа	кусковой	пульпа	кусковой
3	Цвет	от светло-серого до темно-серого		от светло-серого до темно-серого	
4	Влажность, %	20 - 25	2 - 5	20 - 25	2 - 5
5	РН водной вытяжки	11 - 12	11 - 12	11 - 12	11 - 12
6	Концентрации металлов:	мг/кг, не более:		мг/кг, не более:	
6.1	Валовое содержание металлов: Ртуть Мышьяк Медь Цинк Свинец Кадмий Никель Марганец	не более K <sub>max</sub>	не более K <sub>max</sub>	до ПДК	до ПДК

№ А- 0000370196

ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в городе Санкт-Петербург»,  
191023, г. Санкт-Петербург, ул. М. Садовая, д.1 (для переписки),  
тел. (812) 570-38-11, т/ф. (812) 570-60-76

К экспертному заключению  
от 14.10.2018 г. № 78.01.06.23.99.197.3968

6.2	Подвижные формы металлов: Медь Цинк Свинец Кобальт Никель Марганец Хром	не более $K_{max}$	не более $K_{max}$	до ПДК	до ПДК
7	Бенз(а)пирен, мг/кг	не более 5 ПДК		до ПДК	до ПДК
8	Удельная активность техногенного радионуклида цезий -137, Бк/кг	не более 100		не более 100	
9	Удельная активность техногенного радионуклида стронций - 90, Бк/кг	не более 1000		не более 1000	
10	Острая токсичность: - при введении в желудок (белые крысы), $DL_{50}$	$DL_{50} > 5000,0$ мг/кг		$DL_{50} > 5000,0$ мг/кг	
11	Ингаляционная опасность методом статической ингаляционной заправки (н.у), экспозиция 2 часа, (белые мыши)	Летучие компоненты не вызывают раздражение слизистых оболочек глаз и верхних дыхательных путей. Гибели животных не отмечено		Летучие компоненты не вызывают раздражение слизистых оболочек глаз и верхних дыхательных путей. Гибели животных не отмечено	
12	Кожно-раздражающее действие (белые крысы), баллы: - однократно - повторно	0 0		0 0	
13	Раздражающее действие на слизистые оболочки глаз (морские свинки), баллы	отсутствует		отсутствует	
14	Разведение экстракта, действующего на гидробionты, %	A < 10		A < 10	
15	Чувствительность хлореллы при кратности разведения, %:	-30 < I < +20		-30 < I < +20	

**Область применения:** в качестве вторичного (строительного) сырья для использования в ходе строительных работ под отсыпки котлованов и выемок, на участках озеленения с подсыпкой слоя чистого грунта, при рельефных и ландшафтных работах, ремонте дорог и т.д., промежуточной и окончательной изоляции на полигонах твердых коммунальных (бытовых) и промышленных отходов; рекультивации полигонов твердых коммунальных (бытовых) и промышленных отходов.

Инертный изолирующий материал представляет собой однородную в своей массе минеральную массу. Производится марки МИ и марки МСЛ в твердом (кусковом) виде и

№ А- 0000370197

ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в городе Санкт-Петербург»,  
191023, г. Санкт-Петербург, ул. М. Садовая, д.1 (для переписки),  
тел.(812) 570-38-11, т/ф. (812) 570-60-76

от 14.10.2018 г. № 78.01.06.23.99.19Т.3968 К экспертному заключению

в виде раствора (пульпы).

**Необходимые условия использования, хранения, транспортировки и меры безопасности:** Инертный изолирующий материал поставляется потребителю партиями. Партией считается любое количество однородного по физико-химическим и гигиеническим свойствам инертного изолирующего материала, образованного по одному конкретному адресу объемом не более 1400 м<sup>3</sup>.

Инертный изолирующий материал поставляется в насыпном виде в контейнерах и в виде пульпы.

Транспортирование инертного изолирующего материала осуществляется навалом в крытых транспортных средствах автомобильным транспортом в соответствии с правилами перевозок грузов, действующими на транспорте данного вида; должны быть предусмотрены меры, обеспечивающие охрану окружающей среды от загрязнения.

Инертный изолирующий материал допускается хранить на специально оборудованной площадке в металлических контейнерах или буртах. Инертный изолирующий материал хранят на площадках, не подвергающихся подтоплению тальмами и грунтовыми водами. Площадки для хранения должны быть оборудованы жижесборниками.

**Информация, сопровождаемая партию:** на каждую единицу упаковки должна быть нанесена маркировка: наименование предприятия-изготовителя, юридический адрес, телефон, факс, логотип или товарный знак изготовителя; наименование продукта, марку; страна изготовителя; дата изготовления; номер партии.

#### Заключение:

На основании проведенной санитарно-гигиенической экспертизы документации ТУ № 23.99.19-014-51549182-2018 «Инертный изолирующий материал», соответствует требованиям СанПиН 2.1.7.1322-03 «Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления» (п. 2.1), СП 2.1.7.1386-03 «Санитарные правила по определению класса опасности токсичных отходов производства и потребления».

Эксперт-врач по общей гигиене  
отдела коммунальной гигиены и гигиены градостроительства



А.В. Бек

Эксперт, и.о. заведующего отделом коммунальной гигиены  
и гигиены градостроительства



А.В. Ткаченко

№ А- 0000370198

ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в городе Санкт-Петербурге»,  
191023, г. Санкт-Петербург, ул. М. Сидовая, д.1 (для переписки),  
тел. (812) 570-38-11, т/ф. (812) 570-60-76

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г



Акционерное Общество  
«Автопарк №1 «Спецтранс»  
ИНН 7830002705/КПП 781001001  
ОГРН 1027804847696  
Лоботинский пр.7, Санкт-Петербург, 196105  
ген.директор 388-36-64, гл.инженер 388-37-63,  
главный бухгалтер 369-63-13 Факс: 388-67-80  
E-mail: dir@spest1.ru, www.spest1.ru

06.05.2019 № 54  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Утверждаю  
Генеральный директор  
АО «Автопарк №1 «Спецтранс»  
Язев А.В.  
М.П.



## АКТ

**о внедрении технологии получения и использования  
литификата из фильтрата на полигоне ТКО**

Акционерное общество «Автопарк №1 «Спецтранс» работает на рынке обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) с 1936 года. Производственное обеспечение компании насчитывает более 400 единиц автомобильной спецтехники, при помощи которой ежегодно вывозится более 5 млн. м<sup>3</sup> отходов. На балансе Компании находится крупнейший на Северо-Западе частный полигон, отвечающий самым современным требованиям, заводы по переработке твердых коммунальных отходов.

Настоящим актом подтверждаем, что разработанная сотрудниками «Автопарк №1 «Спецтранс» при участии аспирантки кафедры экологической геологии Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета Милутиной Натальи Олеговны технология получения литификата из фильтрата, образующегося при эксплуатации полигона, апробирована и внедрена на полигоне для размещения твердых коммунальных отходов АО «Автопарк №1 «Спецтранс» в целях использования промежуточной и окончательной изоляции на полигонах твердых коммунальных (бытовых) и промышленных отходов; рекультивации полигонов твердых коммунальных (бытовых) и промышленных отходов.

Директор по развитию

Главный технолог

Колычев И.Н.

Аверьянова Н.А.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Санкт-Петербургский политехнический  
 университет Петра Великого»  
 (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,  
 ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251  
 тел.: +7(812)297 2095, факс: +7(812)552 6080  
 office@spbstu.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по образовательной  
 деятельности

Е.М. Разинкина

2020 г.

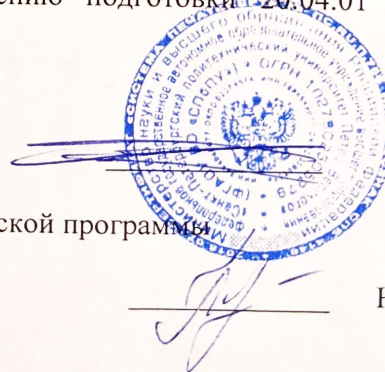


**АКТ**  
 о внедрении результатов диссертационной работы  
 Милютиной Натальи Олеговны  
 в учебный процесс

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертационной работы аспирантки Милютиной Н.О. по мониторингу полигонов ТКО, литификации, как технологии утилизации фильтрата полигонов ТКО и производству изоляционного материала для откосов полигонов из отходов с дополнительным извлечением вторичных материалов внедрены в учебный процесс Санкт-Петербургского политехнического университета. Данные результаты используются при подготовке выпускных квалификационных работ магистрантов, а также включены в состав учебно-методического комплекса по дисциплинам «Переработка и утилизация твердых бытовых отходов, Российский и международный опыт», «Современные методы защиты окружающей среды», «Экологический мониторинг, надзор и контроль за обеспечением экологической безопасности» для магистрантов, обучающихся по магистерской программе «Экологическая безопасность в промышленности» по направлению подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность»

Директор ИСИ

Научный руководитель магистерской программы  
 «Экологическая безопасность  
 в промышленности»



Г.Л. Козинец

Н.А. Политаева