

На правах рукописи



МИЛЮТИНА НАТАЛЬЯ ОЛЕГОВНА

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

25.00.36 – Геоэкология (строительство и ЖКХ)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет».

Научный руководитель:

Куриленко Виталий Владимирович

доктор геолого-минералогических наук, профессор

Зеленковский Павел Сергеевич,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Шершнева Мария Владимировна

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Инженерная химия и
естествознание» ФГБОУ ВО «Петербургский
государственный университет путей сообщения
Императора Александра I»

Михайлова Надежда Викторовна

кандидат технических наук,
заместитель генерального директора по научной
работе НПК «Механобр-техника»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский
технический университет»

Защита состоится «23» декабря 2021 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.02, по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (www.pstu.ru).

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д ПНИПУ.05.02

кандидат технических наук, доцент

Е.В. Калинина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 – 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.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 25.00.36 – Геоэкология (строительство и ЖКХ) по пункту 5.14.

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 СПбГУ (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 результатов исследований. 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 и объем диссертации. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, отражены научная новизна и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, изложена структура диссертации.

В первой главе приведены результаты анализа современной научно-технической и патентной литературы по проблемам воздействия полигонов ТКО на окружающую среду. Оценены механико-биологическая обработка отходов и методы очистки фильтрата, образующегося при эксплуатации полигонов. Основным продуктом механико-биологической обработки отходов является техногенный грунт, полученный путем компостирования выделенной из ТКО органической фракции. Ключевой проблемой техногенного грунта является отсутствие стабильности состава, высокая вариативность содержания тяжелых металлов в продукте и потеря вторичных ресурсов (стеклобой, материал для альтернативного топлива), входящих в состав продукта. Основным недостатком существующих способов очистки фильтрата является образование вторичных отходов в количестве до 50 %. Наибольший интерес представляет технология литификации фильтрата – изменения его агрегатного состояния из жидкого в твердое с получением нового продукта без образования вторичных отходов.

Вторая глава посвящена описанию объектов, методов исследования и методик выполнения экспериментов. Объектами исследования явились: 1 – действующий с 2007 г.

полигон ТКО «КомЭк», расположенный в Тамбовской области, имеющий площадь захоронения ТКО 16,8 га и мощность 1,5 млн. т; 2 – действующий с 2001 г. полигон ТКО «Новый Свет-ЭКО», расположенный в Ленинградской области, имеющий площадь захоронения ТКО 35,7 га и мощность 10 млн. т.

При выполнении работы применялись физико-химические методы анализа (атомно-эмиссионная спектрометрия, фотоколориметрия, титриметрия, растровая электронная микроскопия, ИК-спектроскопия, рентгенофазовый анализ, рентгенофлуоресцентный анализ, метод капиллярного электрофореза, гравиметрический метод, потенциометрический метод, метод одноосного сжатия) и методики определения токсикологических характеристик (острая токсичность, ингаляционная опасность, кожно-раздражающее действие и раздражающее действие на слизистые оболочки глаз на лабораторных животных; биотестирование на *Daphnia magna Straus* и *Chlorella vulgaris*). Данные методы позволили изучить химический состав фильтрата, физико-химические свойства литификата, закономерности и механизмы процесса литификации фильтрата, а также агрохимические показатели техногенного грунта.

Третья глава посвящена проведению мониторинговых исследований и оценке воздействия полигона ТКО «КомЭк», расположенного в Тамбовской области в непосредственной близости к закрытой городской свалке, на почво-грунты прилегающей территории.

В п. 3.1. представлены результаты исследования почво-грунтов и растений, естественно произрастающих вокруг полигона, по степени загрязненности ТМ. Полученные данные выявили повышенное содержание ТМ на территории между эксплуатируемым и закрытым полигонами (валовое содержание меди 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). Учитывая уклон территории объекта, а также господствующие направления ветров сделан вывод, что причиной загрязненности почво-грунтов является закрытая городская свалка ТКО. Использование существующих защитных мероприятий (противофильтрационное основание полигона, система сбора фильтрата в основании полигона по дренажным трубам, насосная станция перекачки фильтрата, нагорная канава из протифильтрационного материала по периметру, ограждение по периметру) обеспечивают минимизацию геоэкологического воздействия действующего полигона. В ходе работы была проанализирована степень извлечения тяжелых металлов растениями, естественно произрастающими на данной территории (на примере полыни горькой *Artemisia absinthium* L. и крапивы жгучей *Urtica urens* L.). Установлена положительная корреляция между содержанием ТМ в почвах и растениях. На участке загрязненной ТМ почвы были рассчитаны коэффициенты переноса ТМ в системах «почва-корень» и «корень-листья». Миграция ТМ между органами растений у полыни менее вариабельная, не зависит от степени загрязненности почвы и выше, чем у крапивы, что делает ее более подходящим естественным фиторемедиатором на данной территории. Более того, биомасса надземных частей растения у полыни выше, что также положительно сказывается на эффективности

извлечения ТМ из почвы. Таким образом, естественно произрастающие растения являются биофильтром и могут использоваться в качестве фиторемедиатора для снижения потока загрязняющих веществ, мигрирующих от закрытой городской свалки.

В п. 3.2. представлены результаты анализа фильтрата, образующегося на исследуемом полигоне, которые выявили значительные превышения ПДК по БПК₅ и ХПК (в 2039 и 451 раз соответственно). Очевидно, что сокращение захоронения биологически активных органических компонентов привело бы к уменьшению токсичности фильтрата. При этом нарушение защитных мероприятий полигона может привести к миграции фильтрата, в связи с чем необходимым является его сбор и утилизация.

Четвертая глава посвящена модернизации производства техногенного грунта из мелкой фракции ТКО путем компостирования с дополнительным извлечением вторичных ресурсов.

В п. 4.1. представлены данные проведенного анализа морфологического состава смешанных отходов, поступающих на полигон ТКО «Новый Свет-ЭКО» (Ленинградская область), которые показали, что 50-55 % составляет мелкая фракция ТКО (0-80 мм), состоящая преимущественно из биоразлагаемых отходов. При этом в мелкой фракции содержится до 30 % балластных для компостирования компонентов, которые могут быть реализованы как вторичное сырье. В настоящее время активно применяется практика компостирования мелкой фракции ТКО без предварительной обработки. В ходе работы была модернизирована технология производства техногенного грунта, применяемая на полигоне ТКО «Новый Свет-ЭКО» (рисунок 1).

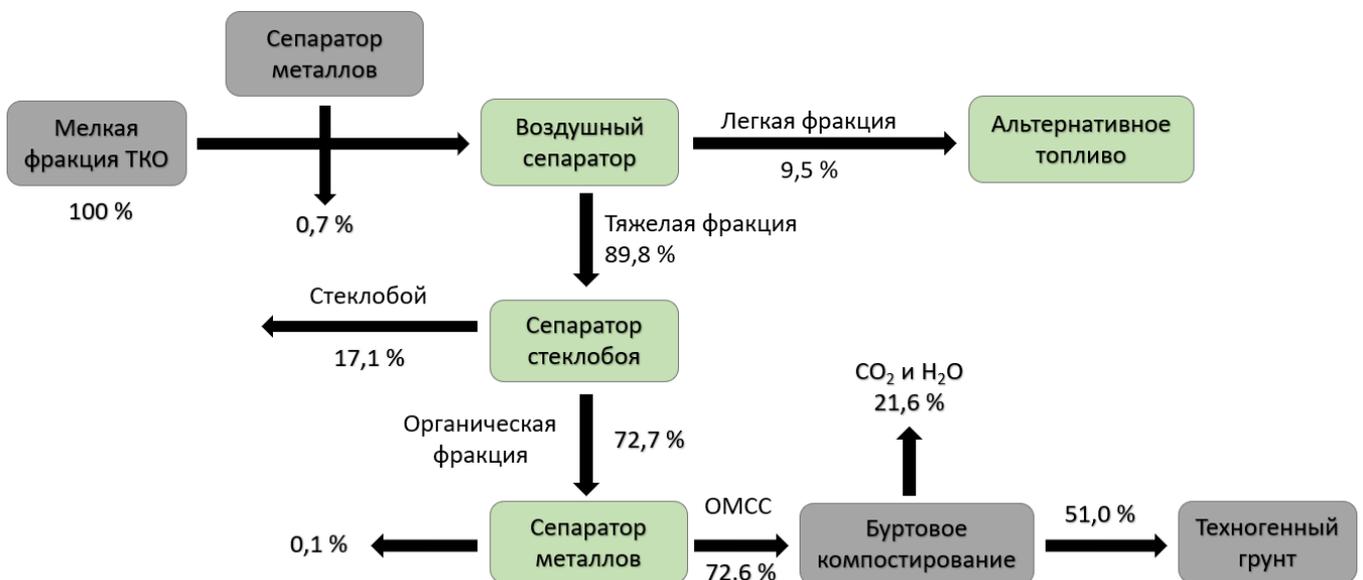


Рисунок 1 – Блок-схема производства техногенного грунта с извлечением вторичного сырья

Внесенные изменения направлены на предварительную обработку мелкой фракции ТКО с целью извлечения компонентов, вовлекаемых в дальнейшую вторичную переработку, что способствует обогащению органическими отходами органоминеральной сырьевой смеси (ОМСС) – фракции, подлежащей компостированию. В результате, получаемый техногенный грунт на 90 % состоит из биоразлагаемых компонентов.

Оптимизация технологического процесса заключается во внедрении в линию обработки мелкой фракции воздушного сепаратора, сепаратора стеклобоя и второго магнитного сепаратора, которые позволяют извлекать 27,4 % товарной продукции, подлежащей вторичной переработке. Результатом компостирования ОМСС, полученной после сепарации мелкой фракции, является 51 % однородного техногенного грунта. Таким образом, достигается максимальное использование ресурсного потенциала мелкой фракции отходов, которая, как правило, подлежит захоронению.

В п. 4.2. описано производство техногенного грунта, основанное на технологии открытого полевого компостирования в буртах. Для обеспечения эффективного разложения органических фракций исходного материала осуществляется перемешивание буртов с периодичностью 1-2 раза в неделю. В течение 60 дней происходит активное разложение материала в буртах, после чего наступает стадия стабилизации, длящаяся 30 дней. В результате производится техногенный грунт.

Пятая глава посвящена разработке метода утилизации фильтрата полигона ТКО «Новый Свет-ЭКО» путем изменения агрегатного состояния загрязненной жидкости – фильтрата, в твердый продукт – литификат.

В п. 5.1. представлены результаты химического анализа фильтрата полигона ТКО ООО «Новый Свет-ЭКО» (таблица 1), которые выявили следующие превышения ПДК: количество сухого остатка – в 8,4 раза, содержание БПК₅ и ХПК – в 633 и 305 раз соответственно, содержание нитритов – в 4,2 раза, иона аммония – в 1202 раза, хлоридов – в 16 раз. Проведенный ИК-спектральный анализ сухого остатка фильтрата выявил наличие широкого набора органических веществ: соединения ароматического ряда, фенолы, амины, амиды. Концентрации тяжелых металлов в фильтрате незначительны, что говорит об их осаждении в виде сульфидов, гидроксидов и гуматов. Согласно химическому составу фильтрата полигона ООО «Новый Свет-ЭКО», он относится к метаногенному типу, образующемуся на фазе стабильного метаногенеза.

Таблица 1 – Химический состав фильтрата

№	Показатель	Ед. изм.	Значение	ПДК
1	рН	ед.рН	7,9 ± 0,2	6,5-9,0
2	Электропроводность	мкС/см	24900 ± 2821	-
3	БПК ₅	мг О ₂ /л	2533 ± 187	4
4	ХПК	мг О ₂ /л	9163 ± 634	30
5	Сухой остаток	мг/дм ³	12610 ± 1232	1500
6	Хлориды	мг/дм ³	5712 ± 731	350
7	Сульфаты	мг/дм ³	217 ± 20	500
8	Гидрокарбонаты	мг/дм ³	11641 ± 898	-
9	Нитраты	мг/дм ³	48,8 ± 6,1	45
10	Нитриты	мг/дм ³	12,6 ± 1,2	3,0
11	Аммоний-ион	мг/дм ³	1803 ± 205	1,5
12	Натрий	мг/дм ³	2223 ± 340	200

В п. 5.2. изложена суть существующей технологии литификации фильтрата, где основным вяжущим компонентом является цемент. Однако, его использование экономически невыгодно для утилизации фильтрата. Более того, производство цемента сопряжено с выделением диоксида углерода, являющегося парниковым газом. В качестве варианта

альтернативы интерес представляет производственный отход – сланцевая зола, которая

образуется при сжигании горючих сланцев на тепловых электростанциях. Химический состав золы представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав сланцевой золы

Хим. соед-е	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO _{св}
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

Сланцевая зола по составу относится к высокоосновной смеси на основе силикатов с высоким содержанием щелочноземельных металлов, что широко используется в технологии вяжущих. Содержание ТМ (таблица 3) ограничивает ее использование в других сферах (производство строительных материалов, дорожное строительство, сельское хозяйство) в качестве основного компонента.

Таблица 3 – Содержание валовых форм ТМ в сланцевой золе

ТМ	Сод-е, мг/кг	ПДК/ОДК, 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

Проведенный рентгенофазовый анализ показал, что в сланцевой золе содержатся клинкерные минералы, характерные для цемента: алит (6-8 %), белит (5-6 %), трехкальциевый алюминат (3-5 %), что говорит о возможности использования данного материала в качестве альтернативы цементу. Использование отхода от сжигания горючих сланцев вместо цемента позволяет снизить техногенную нагрузку на геосреду.

В п. 5.3. представлены результаты разработки рецептуры литификации фильтрата на основе сланцевой золы. Выявлено, что гидравлического свойства используемой золы недостаточно для эффективного перевода фильтрата в твердый продукт из-за недостаточной связанности полученного материала.

Известно, что 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 углерода и метана. Кроме того, ионы сульфата являются активатором гидратации стекловидной фазы золы. В связи с вышеизложенным в качестве активатора литификации фильтрата при использовании сланцевой золы была выбрана серная кислота и литификация проводилась в 2 этапа: 1 – смешивание фильтрата с серной кислотой; 2 – добавление сланцевой золы. В результате был получен литификат удовлетворительной связанности, обладающий прочностью на одноосное сжатие в сухом состоянии 5,5 МПа. Содержание подвижных форм ТМ в данном продукте не превышало ПДК для почв населенных пунктов. Однако, использование серной кислоты является экономически не обоснованным и опасным для производства.

Альтернативой серной кислоте по действию на фильтрат при его литификации является сульфат алюминия. 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: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 6\text{H}_2\text{O} = 2\text{Al}(\text{OH})_3\downarrow + 3\text{H}_2\text{SO}_4$. В ходе экспериментов было подобрано оптимальное соотношение компонентов для производства литификата с использованием сульфата алюминия (30 г на 1 л фильтрата) и сланцевой золы (1,2 кг на 1 л фильтрата).

В п. 5.4 представлены результаты исследования основных свойств полученного литификата с разработанной оптимальной рецептурой компонентов смеси. Были изучены физико-химические, механические и токсикологические свойства полученного литификата. Результаты содержания подвижных форм тяжелых металлов в литификате представлены в таблице 4. Превышения ПДК для почв населенных пунктов не выявлено.

Таблица 4 – Содержание подвижных форм ТМ в литификате

ТМ	Cu	Zn	Pb	Co	Ni	Mn	Cr
Сод-е, мг/кг	1,15±0,09	7,2±0,7	2,75±0,19	1,04±0,11	3,43±0,38	87,4±7,1	4,73±0,42
ПДК, мг/кг	3	23	6	5	4	100	6

Результаты рентгенофазового анализа литификата представлены на рисунке 2. Основными фазами литификата являются кальцит в количестве 46-50 % и эттрингит – 27-30 %. Также были выделены фазы кварца – 9-12 %, гидрокалумита – 8-10 %, гипса – 2-3 % и мусковита – 2-3 %.

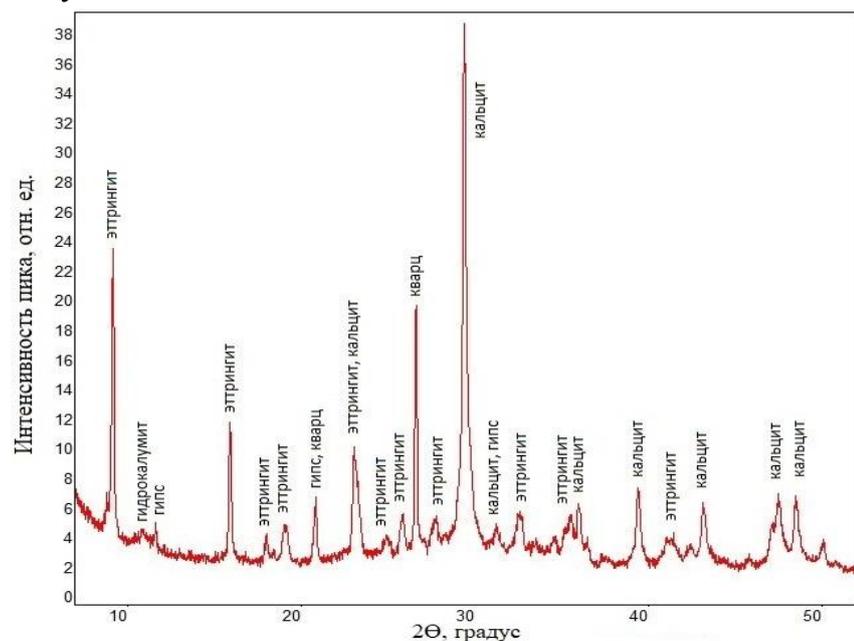


Рисунок 2 – Дифрактограмма литификата

Испытания на прочность литификата при одноосном сжатии выявили следующие результаты: в сухом состоянии $R_{сж}=6,8\pm0,3$ МПа (рисунок 5 а) и в водонасыщенном состоянии $R_{сж}=4,8\pm0,4$ МПа (рисунок 5 б). Потеря прочности в водонасыщенном состоянии составляет 30 %, что связано с минералогическим составом литификата.

Также были проведены токсикологические исследования литификата на белых крысах и морских свинках и биотестирование на *Daphnia magna Straus* и *Chlorella vulgaris*. Литификат в соответствии с ГОСТ 12.1.007 относится к 4-му классу опасности и токсического действия на организм человека не оказывает, что доказывает экологическую безопасность полученного материала.

Результаты ИК-спектрометрического анализа литификата (рисунок 3) выявили наличие функциональных групп: -ОН, CH₂, -CH₃, что дает основание предполагать проявление хемосорбционных свойств у литификата. Микроструктурный анализ показал наличие развитой пористой поверхности (рисунок 4), что предполагает механизм физической адсорбции поллютантов в поры литификата.

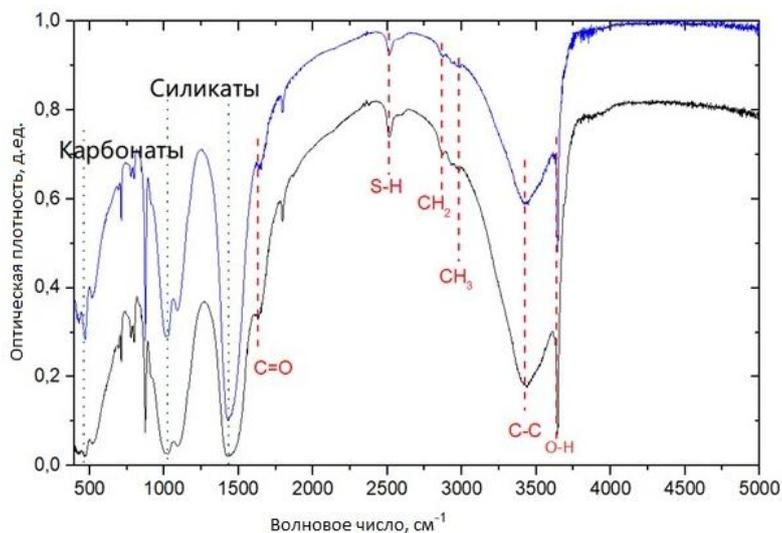


Рисунок 3 – ИК-спектры литификата

На основании изученных свойств было предложено применение литификата для нужд полигонов ТКО в качестве: изолирующего материала для пересыпки отходов при эксплуатации полигона; материала планировки поверхности при рекультивации полигона; дренажного материала для строительства газотранспортных систем при устройстве дегазации полигона на этапе рекультивации.

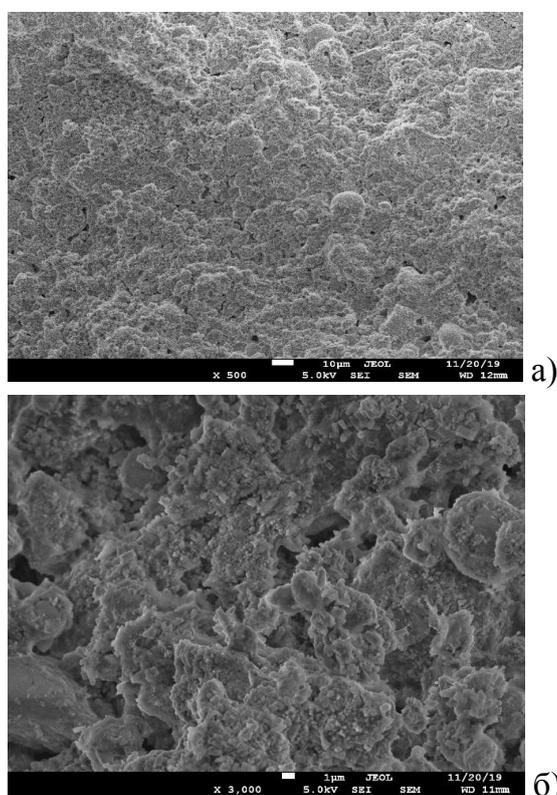


Рисунок 4 – Микроструктура поверхности литификата:
а) x 500; б) x 3000

По результатам данной работы было получено экспертное заключение от ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в г. Санкт-Петербург» согласно которому подтверждается возможность использования литификата для нужд полигона.

В шестой главе обоснована разработка схемы использования ресурсного потенциала ТКО для снижения геоэкологического воздействия полигонов. Мелкая фракция ТКО является основой для производства техногенного грунта, а фильтрат, образующийся на полигонах, трансформируется в литификат.

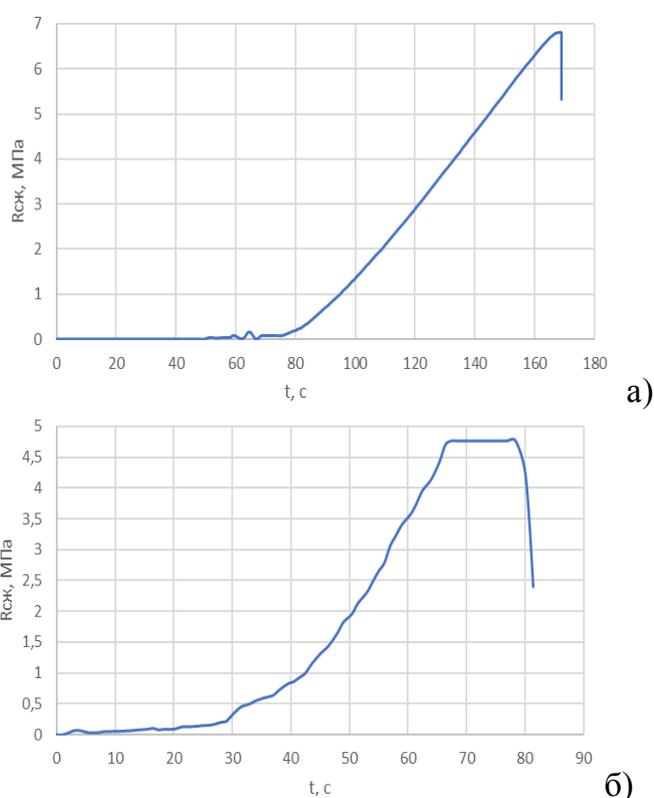


Рисунок 5 – Определение прочности литификата при одноосном сжатии: а) в сухом состоянии; б) в водонасыщенном состоянии

В таблицах 5 и 6 представлены результаты агрохимических показателей полученного техногенного грунта: выявлено высокое содержание питательных элементов – азота, фосфора, калия, необходимых для роста и развития растений. При этом содержание ТМ превышает ПДК для населенных пунктов по цинку и свинцу, что ограничивает его применение вне полигона. По результатам работы предложено использование полученного техногенного грунта в качестве изоляционного материала откосов при эксплуатации полигонов ТКО и рекультивационного покрытия после закрытия полигонов, что позволит снизить захоронение биологически активных органических отходов; сохранить природные грунтовые ресурсы; улучшить эстетический вид полигона за счет самозарастания откосов; уменьшить количество образуемого фильтрата за счет расходования поступающей влаги на транспирацию растениями, которые растут на откосах полигона.

Таблица 5 – Агрохимические показатели техногенного грунта

Показатели	Ед.изм.	Концентрация
pH	ед. pH	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 – Валовое содержание ТМ в техногенном грунте

ТМ	Сод-е, мг/кг	ПДК/ОДК, мг/кг
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

Для подтверждения сорбционных свойств литификата был проведен эксперимент определения сорбционной емкости литификата и его эффективности очистки модельного раствора фильтрата от ТМ в статических условиях при измельчении образца до размера 50-150 мм (таблица 7). Из таблицы 7 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, что позволит сократить количество тяжелых металлов во вновь образуемом фильтрате при использовании литификата в качестве изоляционного материала пересыпки отходов.

Таблица 7 – Сорбционная емкость (А) и эффективность очистки раствора (Э)

ТМ	$C_{нач}$, г/дм ³	$C_{кон}$ t=24ч, мг/дм ³	$C_{кон}$ t=21сут, мг/дм ³	Э, t=21 сут, %	А, 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

В ходе исследования была разработана технологическая схема переработки фильтрата в литификат (рисунок 6).

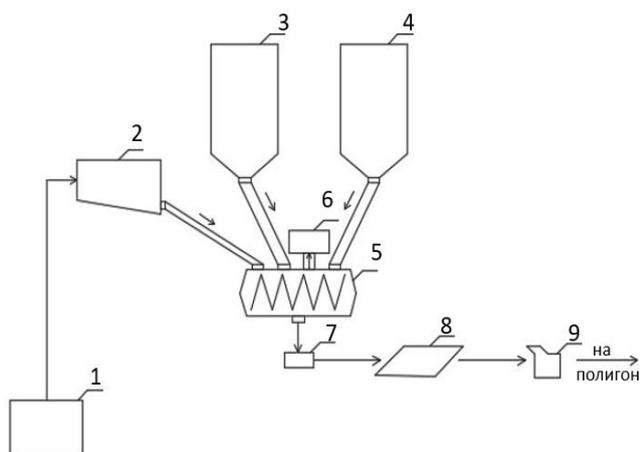


Рисунок 6 – Технологическая схема производства литификата: 1-сбор фильтрата; 2-емкость для фильтрата; 3-силос для сульфата алюминия; 4-силос для золы; 5-смеситель; 6-газовый абсорбер; 7-формовка; 8-площадка для затвердевания; 9-дробилка

Образующийся на полигоне фильтрат доставляется на участок литификации и поступает в горизонтальный смеситель из накопительной емкости. Далее в смеситель из силоса подается сульфат алюминия в количестве 3 % от массы фильтрата, что запускает процесс коагуляции. Осуществляется перемешивание в течение 10 минут. Далее из второго силоса вводится сланцевая зола, в количестве 120 % от массы фильтрата, при подаче которой происходит процесс литификации, основанный на гидравлическом твердении вяжущих. Образующиеся при смешивании компоненты газы (0,5-1 % от общей массы смеси) из смесителя поступают через специальный отводной люк по газоходу в абсорбер для улавливания газов. В результате смешивания в течение 15 минут образуется пластичная пастообразная масса, которая через разгрузочный люк смесителя поступает в тару для дальнейшего затвердевания и набора прочности в течение 25-28 дней. После отверждения материала осуществляется его дробление и транспортировка на полигон в качестве изоляционного материала для эксплуатации и рекультивации полигона. На основании разработанной технологии была создана промышленная установка литификации фильтрата производительностью 5 м³ в час, которая расположена на полигоне ООО «Новый Свет-ЭКО» в Гатчинском районе Ленинградской области. На примере данной установки были рассчитаны экономические показатели производства литификата: удельные затраты на утилизацию 1 м³ фильтрата составляют 3448 руб. с учетом амортизации оборудования. Для обоснования целесообразности использования данной технологии было произведено сравнение с наиболее распространенным в настоящее время методом очистки фильтрата – обратным осмосом. Несмотря на относительно низкие прямые операционные затраты (600-900 руб/м³) при использовании обратного осмоса, стоит обратить внимание на высокие капитальные вложения – 95 млн. руб., что в 15 раз больше, чем капитальные вложения для установки литификации. Более того использование обратного осмоса включает в себя дополнительные операционные расходы, связанные с вывозом на захоронение образуемого концентрата (3000-4000 руб/м³). При этом с точки зрения снижения геоэкологического 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

Образующийся на полигоне фильтрат доставляется на участок литификации и поступает в горизонтальный смеситель из накопительной емкости. Далее в смеситель из силоса подается сульфат алюминия в количестве 3 % от массы фильтрата, что запускает процесс коагуляции. Осуществляется перемешивание в течение 10 минут. Далее из второго силоса вводится сланцевая зола, в количестве 120 % от массы фильтрата, при подаче которой происходит процесс литификации, основанный на гидравлическом твердении вяжущих. Образующиеся при смешивании компоненты газы (0,5-1 % от общей массы смеси) из смесителя поступают через специальный отводной люк по

продукт для нужд полигона, что дополнительно позволяет экономить грунтовые ресурсы и сохранять природные ландшафты.

Результатом проведенных исследований явилась схема максимального использования ресурсного потенциала ТКО (рисунок 7).

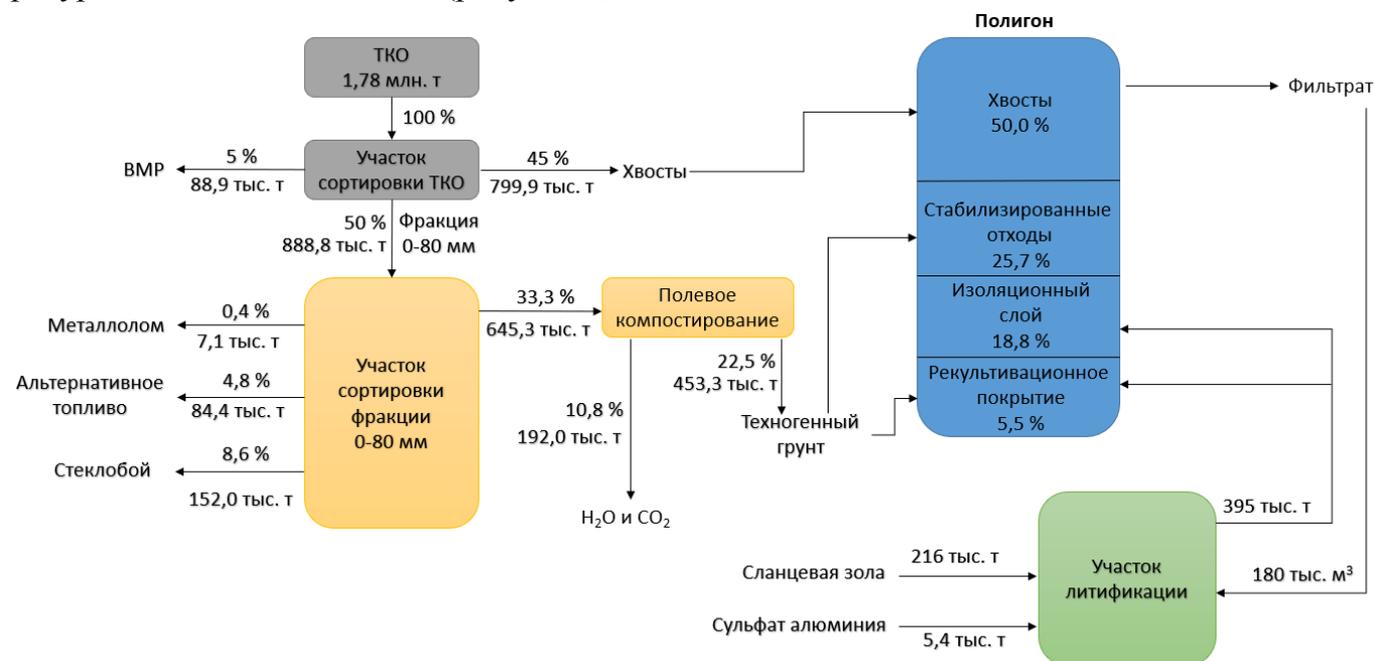


Рисунок 7 – Ресурсосберегающая схема снижения геоэкологического воздействия полигона

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 и рекультивации 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 изоляции отходов при эксплуатации полигона и в качестве материала планировки поверхности на этапе рекультивации полигона. Техногенный грунт и литификат полностью закрывают нужды полигона в природных 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 апробирована на полигоне ООО «Новый Свет-ЭКО», расположенном в Гатчинском районе Ленинградской области. В результате работы установки в течение первого года после ввода в эксплуатацию было утилизировано 7 000 м³ фильтрата, что позволило произвести 10 000 м³ литификата, который был

использован в качестве материала изоляции отходов. Испытания, проведенные с обработкой мелкой фракции ТКО, позволили произвести 1400 т техногенного грунта, которым была отсыпана часть откоса полигона. При этом было получено 752 т вторичного сырья, а также сокращено количество депонированных биологически активных органических отходов.

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. Содержание подвижных форм ТМ в литификате не превышает 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 м³ в час. В результате внедрения данной установки на полигоне ООО «Новый Свет-ЭКО» было утилизировано 7 000 м³ фильтрата, что позволило произвести 10 000 м³ 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/м³.

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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях и в изданиях, приравненных к ним:

1. Язев А.В. Литификация фильтрата полигонов ТКО как способ его утилизации / А.В. Язев, Н.О. Милютина, Н.А. Аверьянова, Е.С. Великосельская, Н.А. Политаева // Экология и промышленность России. – 2020. – Т. 24. – № 6. – С. 36-41. (**GeoRef, Scopus**)

2. Милютина Н.О. Анализ методов очистки фильтрата полигонов ТКО / Н.О. Милютина, Н.А. Политаева, П.С. Зеленковский, И.И. Подлипский, Е.С. Великосельская // Вестник Евразийской науки. – 2020. – Т.12. – № 3. – С. 1-11.

3. 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. (**Scopus**)

Прочие работы по теме диссертации:

4. Милютина Н.О. Анализ миграции тяжелых металлов в системе “почва–растение” при эколого-геологической оценке окружающей среды вокруг полигона ТКО в г. Тамбов / Н.О. Милютина, Н.Г. Осмоловская, Н.А. Политаева, В.В. Куриленко // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. – 2020. – № 3. – С. 55-63.

5. Милютина Н.О. Фильтрат полигонов ТКО: образование, характеристика и обезвреживание / Н.О. Милютина, Ю.А. Смятская, Н.А. Политаева, П.С. Зеленковский // Бутлеровские сообщения. – 2020. – Т.61. – № 3. – С. 79-85.

6. Milyutina N.O. Method of MSW landfill reclamation using waste conversion products / N.O. Milyutina, N.A. Averianova, E.S. Velikoselsksya, D.M. Malyuhin, N.A. Politaeva // Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals. – 2020. – P.244-251.

7. Милютина Н.О. Особенности геохимических процессов в теле полигонов ТКО / Н.О. Милютина, В.В. Куриленко, Д.М. Малюхин // IX Сибирская конф. молодых ученых по наукам о Земле: материалы. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. – С. 377-379.

8. Милютина Н.О. Содержание тяжелых металлов в теле полигона ТКО «Новый Свет-ЭКО» / Н.О. Милютина, В.В. Куриленко // Современные исследования в геологии: сб. тезисов докладов. Молодежной научно-практической конф. и XVI конф. студенческого научного общества. – СПб.: Изд-во ВВМ, 2018. – С. 184-185.

9. Милютина Н.О. Основные этапы биохимических процессов в теле полигонов ТКО / Н.О. Милютина, Д.М. Малюхин, В.В. Куриленко // Экологические проблемы недропользования. Наука и образование: материалы восемнадцатой Междунар. научной конф. – СПб.: Изд-во «ЛЕМА», 2018. – С.212-214.

10. Милютина Н.О. Влияние биопрепаратов на процесс компостирования техногрунта из ТКО / Н.О. Милютина, И.И. Подлипский, П.С. Зеленковский, Д.М. Малюхин // Геология, геоэкология, эволюционная география: материалы XVIII Междунар. семинара. – СПб.: Издво РГПУ им. А.И. Герцена, 2019. – С. 176-179.

11. Milyutina N.O. Method of MSW landfill reclamation using waste conversion products / N.O. Milyutina, D.M. Malyuhin, N.A. Politaeva // XII Russian-German raw materials forum: Abstract book. – St. Petersburg: Saint Petersburg Mining University, 2019. – P. 87-88.

12. Милютина Н.О. Изучение свойств литификата, полученного из фильтрата полигона ТКО / Н.О. Милютина, Н.А. Аверьянова, Н.А. Политаева // Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения: сб. научных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конф. – Саратов: ООО «Амирит», 2019. – С. 188-191.

13. Милютина Н.О. Содержание тяжелых металлов в техногрунте и взошедших на нем растениях / Н.О. Милютина, Н.А. Политаева // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конф. с междунар. участием. Лучшие доклады. – СПб.: ПОЛИТЕХПРЕСС, 2019. – С. 55-58.