

СЛЮСАРЬ НАТАЛЬЯ НИКОЛАЕВНА

**ТЕОРИЯ, МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛИГОНОВ
ЗАХОРОНЕНИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ
НА ПОСТЭКСПЛУАТАЦИОННОМ ЭТАПЕ**

25.00.36 – Геоэкология (строительство и ЖКХ)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный консультант: **Коротаев Владимир Николаевич**
доктор технических наук, профессор

**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»

Васильев Андрей Витальевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Химическая технология и
промышленная экология» ФГБОУ ВО «Самарский
государственный технический университет»

Дыганова Роза Яхиевна
доктор биологических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Инженерная экология и
рациональное природопользование» ФГБОУ ВО
«Казанский государственный энергетический
университет»

**Ведущая
организация:** Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»

Защита состоится 21 ноября 2019 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д ПНИПУ.05.02 Пермского национального исследовательского политехнического университета, по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

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

Автореферат разослан 17 сентября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д ПНИПУ.05.02
кандидат технических наук, доцент

Е.В. Калинина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Захоронение твердых коммунальных отходов (ТКО) является неотъемлемым элементом систем обращения с отходами. В каждом регионе России насчитываются сотни объектов захоронения ТКО, находящихся на разных этапах жизненного цикла и оказывающих воздействие на окружающую среду. Техногенные образования, к которым относятся полигоны захоронения ТКО, остаются источниками негативного воздействия на окружающую среду на протяжении сотен лет после их закрытия (Brunner, 1995, 2003; Lechner, 1994, 1997; Коротаев, 2000; Laner, 2011; Scharff, 2013, и др.). Отсутствие минимального набора технических элементов защиты окружающей среды на большинстве выведенных из эксплуатации объектов захоронения ТКО приводит к неконтролируемым эмиссиям биогаза и фильтрата.

В настоящее время в России принята стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления, реализуется приоритетный проект снижения негативного воздействия на окружающую среду посредством ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде. Невозможность единовременного и быстрого вывода из системы обращения с отходами старых свалок и полигонов требует разработки решений по приоритетной рекультивации и/или ликвидации объектов, основанной по оценке их уровня воздействия на окружающую среду, и внедрения технологий минимизации экологического ущерба и безопасного завершения жизненного цикла.

В России не закреплено понятие постэксплуатационного этапа жизненного цикла полигона захоронения отходов, не сформированы требования к обслуживанию объектов после их вывода из эксплуатации. Актуальной является задача оценки длительности постэксплуатационного обслуживания объекта захоронения отходов и выбора технологических и организационных решений по управлению долгосрочными эмиссиями и минимизации накопленного экологического ущерба.

Степень разработанности темы исследования. Воздействие полигонов захоронения ТКО на окружающую среду и закономерности формирования биогаза и фильтрата полигонов на стадии активной эксплуатации достаточно хорошо изучены (Рудакова, 2000; Черемисин, 2004; Федоров, 2004; Максимова, 2004; Глушанкова, 2004; Щербина, 2005; Федоров, 2005; Тагилова, 2006; Шаимова, 2009; Чусов, 2013; Масликов, 2013; Тупицина, 2014, и др.). Сформулированы базовые принципы и критерии достижения стабильного состояния полигонов захоронения отходов (Cossu, 2005; Scharff, 2007; Lechner, Huber-Humer, 2011). В то же время изучение остаточной степени разложения отходов и долгосрочных эмиссий полигонов на завершающих этапах жизненного цикла остается актуальной задачей, требующей дополнительного изучения.

В настоящее время разработаны и используются методы управления эмиссиями биогаза (Ефремова, 2004; Лиллепярк, 2004; Reinhart, Barlaz, 2010) и образованием фильтрата (Hjelmar, 1995; Varina, 2003; Глушанкова, 2003), в том числе разработаны методы управления полигоном как биологическим реактором

(Pohland, 1998; Рудакова, 2000; Vigneron, 2009), базовые принципы восстановления и использования территорий, нарушенных размещением отходов (Максимова, 2004; Армишева, 2008; Потапов, Тупицина, Чертес, 2014; Оффрихтер, 2016; Савельев, 2016), формируется понятие объектов захоронения отходов как источников ресурсов (Армишева, 2008; Чусов, Масликов, 2013; Wolfsberger, 2016; Winterstetter, Fellner, 2018).

Несмотря на множество выполненных ранее исследований, дискуссионными остаются вопросы оценки времени ассимиляции полигона окружающей средой, завершения жизненного цикла объекта и обеспечения безопасности при проведении рекультивационных работ на старых свалках и полигонах. В России вопрос безопасного завершения жизненного цикла объектов захоронения отходов требует дополнительной проработки. В нормативных документах отсутствует понятие постэксплуатационного этапа жизненного цикла полигона, российские нормативные требования по рекультивации полигонов захоронения отходов прописывают устройство верхнего гидроизолирующего покрытия, создание которого тормозит процессы биоразложения отходов и значительно продлевает время, необходимое для ассимиляции полигона окружающей средой.

Построение моделей прогноза долгосрочного воздействия объектов захоронения отходов на окружающую среду, основанных на анализе совокупности геоэкологических характеристик и закономерностях формирования биогеохимической стабильности массива, позволит обосновать и оценить эффективность организационных и технических решений по сокращению эмиссии и минимизации ущерба окружающей среде на постэксплуатационном этапе, а также использовать ресурсный потенциал объектов захоронения ТКО.

Работа является обобщением результатов исследований, выполненных в рамках совместных научных проектов международных исследовательских групп ученых (гранты Министерства образования Пермского края №С-26/623, 2012 г., С-26/174.8, 2019 г.), госбюджетной НИР № 5.3490.2011, 2011 г., гранта РФФИ_р № 17-45-590858, 2017 г., государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках мероприятия «Инициативные научные проекты» (код заявки 5.9729.2017/8.9, 2017 г.).

Цель – разработка теоретических основ, методов и технологий обеспечения безопасного уровня геоэкологического воздействия объектов размещения твердых коммунальных отходов на постэксплуатационном этапе.

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

1. На основании анализа данных мониторинга объектов захоронения ТКО, находящихся на разных стадиях жизненного цикла, установить характер и масштаб воздействия полигонов и свалок на окружающую среду и выявить тенденции изменения уровня и продолжительности воздействия на постэксплуатационном этапе.

2. Выявить основные закономерности протекания процессов разложения компонентов ТКО в массиве объекта захоронения ТКО, влияющие на формирование биогеохимической стабилизации массива на

постэксплуатационном этапе жизненного цикла объекта, оценить длительность эмиссий объектов захоронения отходов.

3. Разработать методику ранжирования выведенных из эксплуатации свалок и полигонов на основании оценки рисков для окружающей среды.

4. Разработать основные технические, технологические и экологические требования к выводу из эксплуатации и завершению жизненного цикла объектов захоронения ТКО, обеспечивающие сокращение долгосрочных эмиссий и срока ассимиляции объектов окружающей средой.

5. Оценить закономерности трансформации и возможность извлечения ресурсного потенциала массивов захоронения ТКО на завершающих этапах жизненного цикла объектов.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 25.00.36 – Геоэкология (строительство и ЖКХ) по пунктам: 5.12. «Геоэкологическое обоснование безопасного размещения, хранения и захоронения токсичных, радиоактивных и других отходов, включая строительные конструкции и материалы с наведенной радиацией или загрязненные химическими веществами» и 5.16. «Технические средства, технологии и сооружения для локализации и ликвидации негативных природных и техногенных воздействий на окружающую среду при осуществлении строительной и хозяйственной деятельности».

Научная новизна:

1. Разработана детерминированная математическая модель долгосрочных эмиссий загрязняющих веществ объектов захоронения ТКО, позволившая установить сроки достижения нормативов допустимого воздействия на окружающую среду лимитирующих показателей эмиссионных потоков объектов захоронения ТКО с заданной вероятностью.

2. Впервые разработаны теоретические основы обеспечения геоэкологической безопасности объектов захоронения ТКО, основанные на совокупности физико-химических характеристик отходов разного возраста захоронения и прогнозной модели долгосрочных эмиссий объекта.

3. Разработаны основанные на рискологическом подходе методические основы минимизации воздействия объектов накопленного вреда окружающей среде и предложена алгоритмическая модель их реализации.

4. Предложен комплексный подход, включающий модель и организационно-технологические решения по обеспечению безопасного уровня геоэкологического воздействия объектов размещения отходов на постэксплуатационном этапе.

5. Предложены ресурсные критерии к технико-экономической оценке мероприятий для завершения жизненного цикла объектов захоронения ТКО, основанные на исследовании ресурсных характеристик массива отходов и выявлении закономерностей их трансформации в долгосрочной перспективе.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты научных исследований внедрены на практике при разработке проектной документации с получением положительных решений государственной экспертизы и последующей реализацией проектов строительства полигонов захоронения ТКО

г. Кунгура (2007), ЗАТО Звездный (2010), Пермский край, г. Радужный, Владимирская область (2010), с.п. Лямина, г. Сургут (2012), рекультивации полигона захоронения ТКО г. Краснокамска, Пермский край (2018); рекультивации свалок г. Кунгура (2007), г. Добрянки (2008), г. Березники (2009), Пермский край, г. Хабаровска (2010); ликвидации объектов размещения отходов филиала «АЗОТ» ОАО «ОХК «УРАЛХИМ» в г. Березники (2012), рекультивации карьера «Баратаевский», г. Ульяновск (2018); разработке схемы санитарной очистки территорий Кунгурского района (2008), Чусовского района (2010); концепции и программы обращения с отходами производства и потребления на территории Нижегородской области (2008), территориальной схемы обращения с отходами ХМАО-Югра (2010), территориальной схемы обращения с отходами, в том числе твердыми коммунальными отходами Пермского края (2016).

Результаты исследований использованы при корректировке СП 2.1.7.1038-01 «Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для твердых бытовых отходов» и разработке информационно-технического справочника наилучших доступных технологий «Размещение отходов производства и потребления».

Новизна технических решений подтверждена тремя патентами на изобретения и двумя патентами на полезную модель. Имеется свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Материалы диссертации используются в учебном процессе ПНИПУ при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Техносферная безопасность», профиль подготовки «Защита окружающей среды» и магистров направлению 38.04.02 «Менеджмент», профиль подготовки «Бизнес и менеджмент природных ресурсов и окружающей среды» в Уральском федеральном университете ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Методология и методы исследования. При выполнении работы использовались натурные и лабораторные исследования, методы анализа и обобщения информации, системного анализа, экспертных оценок, анализа жизненного цикла, анализа материальных потоков, математического и имитационного моделирования, математической статистики, физико-химические методы исследования образцов отходов, биохимические методы исследования газового потенциала и анаэробного разложения отходов в лабораторных реакторах, методы термического анализа.

Экспериментальные исследования проводились на базе лабораторий ПНИПУ, Университета природных ресурсов и прикладных естественных наук г. Вены (ABF-BOKU) и Технического университета г. Гамбурга (TUHH).

Положения, выносимые на защиту:

1. Теоретическое обоснование сроков достижения биогеохимической стабилизации массива отходов, определенные по времени достижения нормативов допустимого воздействия на окружающую среду лимитирующих веществ в эмиссионных потоках объектов захоронения ТКО.

2. Методология оценки геоэкологической безопасности объектов захоронения ТКО, основанная на совокупности физико-химических характеристик складированных отходов разного возраста захоронения и прогнозе долгосрочных эмиссий объектов.

3. Методика анализа экологических рисков и алгоритмическая модель вывода из эксплуатации объектов накопленного вреда окружающей среде и минимизации экологического ущерба.

4. Комплекс технологических решений снижения воздействия объектов захоронения отходов на окружающую среду на постэксплуатационном этапе.

5. Ресурсный подход к технико-экономической оценке проектов завершения жизненного цикла объектов захоронения ТКО, учитывающий изменение ресурсного потенциала массивов захоронения во времени.

Степень достоверности результатов подтверждается применением современных методов проведения полевых, камеральных и лабораторных исследований, значительным объемом исследований, выполненных в натурных условиях, достаточной сходимостью модельных и экспериментальных данных, применением статистических методов обработки данных.

Апробация результатов исследований. Основные положения и результаты докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конгрессах, конференциях и научно-практических семинарах, в том числе на международном форуме по управлению отходами, природоохранным технологиям и возобновляемой энергетике WasteTech/ВэйстТэк (г. Москва, 2009, 2013, 2015, 2017); I Международной конференции «From Sanitary to Sustainable Landfilling: why, how, and when?» (г. Вена, Австрия, 2010); II Международной конференции «The II International Conference on Final Sinks - Sinks a Vital Element of Modern Waste Management» (г. Эспоо, Финляндия, 2013); 14-й и 16-й Международном симпозиумах Sardinia (г. Санта Мария ди Пула, Италия, 2013, 2017); I, II и III Международной конференции «От обращения с отходами к управлению ресурсами» (г. Пермь, 2013, 2015, 2017); Евразийском симпозиуме по управлению отходами «EurAsia Waste Management Symposium» (г. Стамбул, Турция, 2014); международном симпозиуме «SUM 2014. Symposium on urban mining» (г. Бергамо, Италия, 2014); 9-я и 11-я Международной конференциях «Deponietechnik» (г. Гамбург, Германия, 2014, 2018); III Международной конференции «3rd International Conference on Final Sinks» (г. Тайпей, Тайвань, 2015); международном конгрессе «ISWA World Congress» (г. Нови Сад, Сербия, 2016); III Общероссийском форуме «Экотехнопарки России» (г. Москва, 2019); международной бизнес-конференции «Практика переработки органических отходов в России и в Европе» (г. Москва, 2019).

Публикация результатов. По теме диссертации опубликовано 60 работ, из них 18 статей в журналах, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных изданий, 10 статей в журналах, индексируемых в международных реферативных базах, 2 монографии, 3 патента на изобретение, 2 патента на полезную модель, одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 241 странице машинописного текста, включает 31 таблицу, 106 рисунков. Список использованной литературы содержит 315 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования и представлена степень ее разработанности, сформулированы основная цель и задачи исследования, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, изложены выносимые на защиту основные положения, приведена краткая характеристика работы.

В **первой главе** дан анализ состояния проблемы долгосрочного воздействия полигонов захоронения ТКО на окружающую среду. Исследования (Neuer, Stegmann, 1997; Krümpelbeck 2000; Максимова, 2005; Laner, 2011) и собственные исследования автора показывают, что полигоны захоронения ТКО на протяжении десятков лет являются потенциальными источниками негативного воздействия на окружающую среду. Качественные и количественные характеристики эмиссионных потоков объектов захоронения отходов изменяются на протяжении жизненного цикла объектов. Показано, что приоритетным потоком является биогаз, в то же время долгосрочное воздействие полигонов связано с воздействием фильтрата.

В РФ не закреплено понятие постэксплуатационного этапа жизненного цикла полигона захоронения отходов. Как следствие, после вывода из эксплуатации старые свалки и полигоны остаются источниками воздействия на компоненты окружающей среды. Мониторинг таких объектов не проводится, информация о реальном уровне воздействия, в том числе прогнозная, зачастую отсутствуют.

Качественный и количественный состав эмиссий объекта захоронения отходов на постэксплуатационном этапе определяется набором технических и организационных мероприятий по управлению полигоном, реализуемых на протяжении всего жизненного цикла объекта. Наиболее эффективными являются технологии предварительной обработки отходов перед захоронением и решения по ликвидации массивов захоронения и рекуперации участков. При этом выведенные из эксплуатации массивы захоронения ТКО можно рассматривать как объекты отложенных ресурсов. Экскавация массива отхода и последующее извлечение ресурсного потенциала позволяет минимизировать воздействие объекта на компоненты окружающей среды и вернуть вторичные ресурсы (вторичное сырье, свалочный грунт, энергетические фракции отходов) в хозяйственное использование.

Во **второй главе** разработаны теоретические и методологические положения оценки состояния массива захоронения ТКО на основе ряда совокупных геоэкологических характеристик и обоснованы методики проведения полевых и лабораторных исследований.

Массив захоронения ТКО представляет собой сложную геотехническую систему, основные характеристики которой изменяются во времени. Существующие подходы оценки воздействия объектов на окружающую среду

основаны на оценке качественных характеристик биогаза и фильтрата и условий их распространения в окружающей среде. В то же время подавляющая часть старых объектов захоронения отходов не имеет минимального набора технических сооружений, что не позволяет отбирать и анализировать пробы фильтрата, контролировать эмиссии биогаза. Поэтому предложенный автором метод проведения полевых и лабораторных исследований и последующей оценки геоэкологической устойчивости объектов захоронения ТКО основан на анализе состава и свойств твердого материала массива объекта захоронения отходов и может использоваться в том числе для анализа состояния несанкционированных объектов разного срока эксплуатации, не оборудованных инженерными системами.

Разработанные подходы к исследованию массивов захоронения были апробированы на свалках и полигонах захоронения ТКО, находящихся на разных этапах жизненного цикла. Отбор проб отходов был выполнен на полигонах и свалках Пермского края, Московской и Свердловской областей. Характеристика исследуемых объектов представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Краткая характеристика объектов исследования

Объект	Годы эксплуатации	Статус объекта	Мощность, тыс. м ³	Площадь, га	Дата отбора проб	Глубина отбора проб, м
П.Кр	С 2008	Эксплуатируется	142,7	13,0	Июль, 2013	0 – 6
С.Кр	1963 – 2008	Закрит, не рекультивирован	697,3	10,5	Июнь, 2014	0 – 9
С.Ку	С 1965	Эксплуатируется	205,4	18,65	Март, 2014	0 – 8
С.Ку	1965 – 2007	Закрит, рекультивирован	Нет данных	9,85	Март, 2014	0 – 2
С.Гм	1952 – 1982	Закрит, не рекультивирован	14 900	29,75	Май, 2014	0 – 8
П.Д	1965 – 2014	Эксплуатируется	130	2,7	Январь, 2015	0 – 9
П.Вп	С 1970	Эксплуатируется	375	5,0	Октябрь, 2014	0 – 7
П.Н	С 1998	Эксплуатируется	Нет данных	10,0	Январь, 2019	0 – 3
П.П	С 1992	Эксплуатируется	Нет данных	6,0	Январь, 2019	0 – 5
С.Ч	С 1985	Эксплуатируется	205	4,2	Май, 2019	0 – 4

В качестве объектов для проведения полевых исследований были выбраны объекты захоронения ТКО разного срока эксплуатации, отличающиеся имеющейся инфраструктурой (наличием или отсутствием системы сбора

фильтрата) и геометрией массива захоронения (высота массива захоронения). Выбранные объекты расположены в одинаковых климатических условиях и характеризуются близким компонентным составом захороненных отходов.

Исследования на полигонах и свалках включали в себя в том числе «историческое описание» массива захоронения, геометрии полигона, данных инженерных изысканий и экологического мониторинга. В отличие от общепринятых подходов, исследования массивов проводились по ряду показателей твердого вещества в массиве захоронения. Отбор проб выполнялся при помощи экскаватора по профилю массива захоронения с интервалом 1,5–2,0 м. Минимальная масса отбираемой пробы составляла 100 кг. Всего с исследуемых объектов было отобрано 123 пробы. Лабораторные исследования включали в себя определение фракционного и компонентного состава ТКО. Для подтверждения возможности опытно-промышленной обработки потоков экскавированных отходов ряд проб дополнительно анализировался на комплексе оптико-механической сортировки.

Лабораторные исследования образцов отходов включали в себя определение стандартных физико-химических параметров (рН, влажность, ХПК, БПК₅, зольность, органический углерод, общий азот, органический азот, азот аммонийный, нитраты, нитриты, хлориды, сухой остаток водной вытяжки, удельная электропроводность водной вытяжки). Помимо общепринятых исследований были проведены тесты, характеризующие потенциал метанообразования образцов отходов, такие как определение дыхательной активности (RI_4) и тест газообразования (GS_{21}).

В качестве альтернативного метода оценки реакционной способности отходов использовались метод термического анализа. Термогравиметрические исследования и дифференциальная сканирующая калориметрия образцов проведены в среде воздуха и в среде аргона.

Физическое моделирование процессов разложения веществ в массивах захоронения отходов и долгосрочных эмиссий биогаза и фильтрата проводили с использованием специально разработанного лабораторного комплекса, состоящего из емкостей-биореакторов, расположенных в термоизолированном боксе. Ускорение процессов разложения отходов в биореакторах проводилось за счет добавления воды. Программа исследований в лабораторном комплексе включала замер объема и компонентного состава биогаза и анализ фильтрата по ряду показателей (рН, сухой остаток, удельная электропроводность, азот аммонийный, нитриты, нитраты, хлориды, ХПК, БПК₅).

В **третьей главе** обобщены результаты полевых и лабораторных исследований по оценке геоэкологической устойчивости объектов захоронения ТКО и продолжительности эмиссий биогаза и фильтрата. Выполнено моделирование долгосрочных процессов разложения отходов в массивах отходов, построены прогнозные оценки эмиссий биогаза и фильтрата на постэксплуатационном этапе.

Принимая массив объекта захоронения отходов как совокупность множества слоев (ячеек) отходов с разной интенсивностью процессов разложения и формирования эмиссионных потоков, модель полигона можно представить как:

$$\begin{cases} \frac{dw^k}{dt} = a^k - b_1^k w^k(t), \\ \frac{dq^k}{dt} = b_2^k w^k(t) - c^k q^k(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $a(t)$ – интенсивность процесса привноса веществ в систему (накопление отходов в массиве захоронения ТКО);

$b(t)$ – интенсивность процесса трансформации веществ в массиве захоронения (разложение отходов);

$c(t)$ – интенсивность формирования эмиссий веществ в окружающую среду;

$w(t)$ – количество отходов, приходящееся на единицу объема массива захоронения ТКО;

$q(t)$ – концентрация веществ – продуктов разложения отходов в единице объема полигона;

$k = \overline{1, K}$ – номер слоя (ячейки) полигона.

Измерение концентраций веществ в массиве захоронения отходов в некоторый фиксированный момент времени позволяет получить сведения о результатах процессов разложения отходов и формирования эмиссионных потоков в различных слоях (ячейках) массива, имеющих разный возраст захоронения (как правило, с глубиной возраст отходов увеличивается), и перенести результаты измерений на более новый (вышележащий) слой массива захоронения с целью прогнозирования изменения содержания веществ.

Аналитическое решение разбито на два интервала. Первый интервал соответствует эксплуатационному этапу жизненного цикла полигона – фазе накопления отходов в массиве захоронения ($t \leq t_1$) при $w(0) = 0$ и $q(0) = 0$ с начальными условиями:

$$\begin{cases} w(t) = \frac{a(1 - e^{-b_1 t})}{b_1}, \\ q(t) = \frac{ab_2(b_1(-e^{-ct}) + c(e^{-b_1 t} - 1) + b_1)}{b_1 c(b_1 - c)}. \end{cases} \quad (2)$$

Второй интервал соответствует фазе разложения отходов и фазе формирования эмиссий ($t \geq t_1$) при $a = 0$ с начальными условиями:

$$\begin{cases} w(t_1) = w_1 = \frac{a(1 - e^{-b_1 t_1})}{b_1}, \\ q(t_1) = q_1 = \frac{ab_2(b_1(-e^{-ct_1}) + c(e^{-b_1 t_1} - 1) + b_1)}{b_1 c(b_1 - c)}. \end{cases} \quad (3)$$

После преобразования решение можно представить в виде:

$$\begin{cases} w(t) = w_1 e^{b_1(t-t_1)}, \\ q(t) = \left(q_1 - \frac{b_2}{b_1 + c} w_1 \right) e^{-c(t-t_1)} + \frac{b_2}{b_1 + c} w_1 e^{b_1(t-t_1)}. \end{cases} \quad (4)$$

Второе уравнение системы (3) представляет собой сумму двух экспонент, отражающих два противоположно направленных процесса. С одной стороны, концентрация веществ в массиве захоронения увеличивается за счет процесса разложения отходов, с другой – уменьшается за счет эмиссионного потока

веществ в окружающую среду. В зависимости от соотношения интенсивностей этих процессов система может вести себя по-разному.

При $\left(q_1 - \frac{b_2}{b_1+c} w_1\right) e^{-c(t-t_1)} > \frac{b_2}{b_1+c} w_1 e^{b_1(t-t_1)}$ происходит накопление вещества в массиве полигона. При $\left(q_1 - \frac{b_2}{b_1+c} w_1\right) e^{-c(t-t_1)} < \frac{b_2}{b_1+c} w_1 e^{b_1(t-t_1)}$ – снижение концентрации загрязняющих веществ в эмиссионных потоках по закону, близкому к экспоненциальному.

Приняв гипотезу о существенном преобладании процесса формирования эмиссионных потоков, можно представить динамику снижения концентраций веществ в эмиссионных потоках полигона захоронения ТКО с использованием экспоненциального закона. Предлагаемая модель предполагает ряд допущений, в том числе постоянство скорости трансформации отходов в массиве полигона. Принимается постоянство проникновения влаги в массив отходов и непрерывный беспрепятственный отвод продуктов разложения компонентов ТКО за границы системы.

Полученные зависимости легли в основу обработки результатов полевых и лабораторных исследований и позволили установить сроки достижения нормативов допустимого воздействия на окружающую среду лимитирующих показателей эмиссионных потоков объектов захоронения ТКО. В качестве показателей, достижение которых говорит о геоэкологической устойчивости массива захоронения ТКО приняты значения предельно допустимых концентраций веществ в водных объектах. В связи с отсутствием российских аналогов значения дыхательной активности отходов сравнивались с критериями, предлагаемыми в работах Stegmann (2006), Cossu (2007).

Прогнозное время достижения t_n приемлемых значений y_n (предельно допустимого уровня генерации биогаза, предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водных объектах) выполнено с учетом определения доверительных границ и оценки 5 %-ного и 95 %-ного персентилей по концентрациям ($y_{0.05}$, $y_{0.95}$). По результатам экстраполяции данных, полученных в ходе полевых исследований, определены нижняя и верхняя границы времени достижения нормативов допустимого воздействия на окружающую среду по ряду показателей (Таблица 2).

Период достижения приемлемых эмиссий биогаза в несколько раз меньше, чем достижение приемлемых концентраций загрязняющих веществ в фильтрате. К лимитирующим показателям можно отнести значения ХПК водной вытяжки отходов и азота аммонийного. Однако следует учитывать, что относительно короткий период достижения приемлемых значений для хлорид-ионов связан в том числе с установленными высокими значениями предельно допустимых концентраций вещества в водных объектах. В связи с чем при выборе лимитирующих показателей введен в рассмотрение коэффициент изменения концентраций со временем k_{st} . Показатели с наименьшими коэффициентами изменения концентраций со временем k_{st} рекомендуется принимать как показатели-маркеры оценки долгосрочных эмиссий на объектах захоронения отходов: RI_4 , ХПК, хлорид-ион.

Таблица 2 – Оценка периодов достижения нормативов допустимого воздействия на окружающую среду, формируемых эмиссиями полигонов захоронения ТКО

Параметр	Нормируемый показатель	Период достижения t_n , лет		Коэффициент изменения концентрации во времени, k_{st}
		y_n	$y_{0.05} / y_{0.95}$	
Дыхательная активность (RI_4), мгО ₂ /г сух. в-ва	RI_4	30	13 / 55	0,041
Потенциал газообразования (GS_{21}), л/кг сух. в-ва	GS_{21}	8	1 / 19	0,090
ХПК, мг/дм ³	ПДК	109	72 / 143	0,036
БПК ₅ , мгО ₂ / дм ³	ПДК	69	37 / 92	0,071
Хлорид-ион Cl ⁻ , мг/л	ПДК	21	3 / 29	0,043
Азот аммонийный N-NH ₄ , мг/л	ПДК	110	105 / 119	0,079

Установленные показатели времени достижения приемлемых уровней эмиссий ограничены для использования в умеренно-континентальном климате (с учетом количества атмосферных осадков).

В четвертой главе разработана методика ранжирования объектов захоронения ТКО по степени экологического риска и алгоритмическая модель минимизации накопленного экологического ущерба.

Методика оценки экологических рисков основана на балльной оценке совокупности геоэкологических и технологических критериев, учитывающих территориальное размещение объектов (законодательные требования к расположению объектов), геологические и гидрологические условия среды, геоэкологические характеристики массива захоронения (показатели биохимической стабильности отходов в массиве захоронения, обуславливающие уровень эмиссий фильтрата и биогаза), техническое обеспечение объектов (наличие или отсутствие технических систем защиты окружающей среды). Формирование перечня критериев проводилось в том числе с учетом требований нормативно-технической документации по проектированию и эксплуатации объектов захоронения отходов, результатов собственных исследований по оценке биохимической стабильности отходов в массиве захоронения.

Суммарный экологический риск объекта захоронения (R) рассчитывается по формуле

$$R = \sum_{i=1}^n G_i K_i F_i \quad (5)$$

где G_i – весовой коэффициент группы критериев в диапазоне от 0 до 100;

K_i – весовой коэффициент критерия риска в диапазоне от 0 до 1;

F_i – фактор влияния критерия.

Анализ экологического риска объектов захоронения ТКО основан на оценке двадцати критериев. Ранжирование критериев оценки риска проводилось отдельно для каждой группы. Критерии, относящиеся к оценке размещения объектов, не ранжировались, так как в данную группу попадают критерии, законодательно ограничивающие выбор территории размещения объекта захоронения отходов. Фактор влияния критерия, косвенно отражающий вероятность возникновения и уровень негативного воздействия объекта захоронения отходов на окружающую среду, определялся на основании нормативных требований к размещению участков объектов захоронения ТКО, технических и технологических требований обеспечения безопасной эксплуатации объектов и результатов полевых и лабораторных исследований на исследуемых объектах. Пример ранжирования критериев оценки приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Значимые критерии и факторы влияния критериев оценки экологического риска объектов захоронения ТКО

Критерий	K_i	F_i	Описание критерия
Территориальные критерии ($G_i = 100$)			
Удаленность от жилой застройки	1,0	1	> 500 м
		4	< 500 м
Удаленность от поверхностных водозаборов	1,0	1	За пределами ЗСО водозаборов
		2	В третьем поясе ЗСО водозаборов
		3	Во втором поясе ЗСО водозаборов
		4	В первом поясе ЗСО водозаборов
Геологические и гидрогеологические ($G_i = 50$)			
Глубина залегания грунтовых вод, м	0,3	1	> 5
		2	3 – 4
		3	2 – 3
		4	< 2
Критерии биохимической стабильности отходов ($G_i = 25$)			
Содержание биоразлагаемой фракции отходов, %	0,3	1	> 10
		2	10 – 30
		3	30 – 60
		4	60 – 100
Технологические критерии ($G_i = 5$)			
Наличие системы сбора и очистки фильтрата	0,2	1	Система сбора и очистки фильтрата
		2	Фильтрат копится в теле свалки
		3	Копится в понижениях местности
		4	Просачивается в подстил. грунты

На основании комплексной оценки критериев были получены граничные условия для ранжирования объектов захоронения ТКО по степени экологического риска:

– $R > 1200$ соответствует высокому потенциалу опасности объекта захоронения ТКО. Объект является источником сверхнормативного воздействия на окружающую среду, необходимы приоритетные мероприятия по выводу объекта из эксплуатации, ликвидации и/или рекультивации;

– $R = 1060–1200$ соответствует умеренному потенциалу опасности объекта. Объект захоронения отходов является источником воздействия на окружающую среду, рекомендуется проведение мероприятий по доведению объекта до нормативных требований с последующей рекультивацией;

– $R < 1060$ соответствует низкому потенциалу опасности объекта. Объект не оказывает существенного воздействия на окружающую среду; возможно продолжение эксплуатации объекта.

Транспортно-технологическая модель построена на базе имитационной модели и реализована в среде программного продукта AnyLogic. Для каждого объекта алгоритмической модели (объекта захоронения ТКО) может быть задано (предопределено) или найдено решение «рекультивация на месте» (*РЕК*) или «ликвидация объекта с перезахоронением отходов на санитарном полигоне» (*ЛИКВ*). Таким образом, решение для сети объектов представляется строкой-вектором из N элементов (объектов захоронения ТКО), который показывает решение для каждого объекта в отдельности.

Поиск оптимального по критерию стоимости решения основан на решении суммы уравнений:

$$\begin{aligned} C_{\text{рек } i} &< C_{\text{ликв } i} = \text{РЕК}, \\ C_{\text{рек } i} &> C_{\text{ликв } i} + C_{\text{тр } j} = \text{ЛИКВ}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $C_{\text{рек } i}$ – стоимость рекультивации i объекта, руб.;

$C_{\text{ликв } i}$ – стоимость ликвидации i объекта, руб.;

$C_{\text{тр } i-j}$ – стоимость транспортирования отходов с объекта i на объект j (объект-реципиент), руб.

Стоимость работ по рекультивации и ликвидации объектов определяется на основании сметных расчетов. Транспортные затраты рассчитываются с учетом особенностей дорожной сети.

Объединение решений с результатами оценки экологического риска объектов захоронения ТКО позволяет найти оптимальное эколого-экономическое решение путем ввода в систему уравнений дополнительных условий:

$$\begin{aligned} C(R)_{\text{рек } i} &= C_{\text{рек } i} / (R_i - 1060), \\ C(R)_{\text{ликв } i} &= C_{\text{ликв } i} / R_i, \end{aligned} \quad (7)$$

где $C(R)_{\text{рек } i}$ – эффективность вложения средств с учетом минимизации экологического риска при рекультивации объекта;

$C(R)_{\text{ликв } i}$ – эффективность вложения средств с учетом минимизации экологического риска при ликвидации объекта.

Алгоритмическая модель минимизации экологического ущерба за счет вывода из эксплуатации и рекультивации/ликвидации объектов накопленного экологического ущерба представлена на рисунке 1.

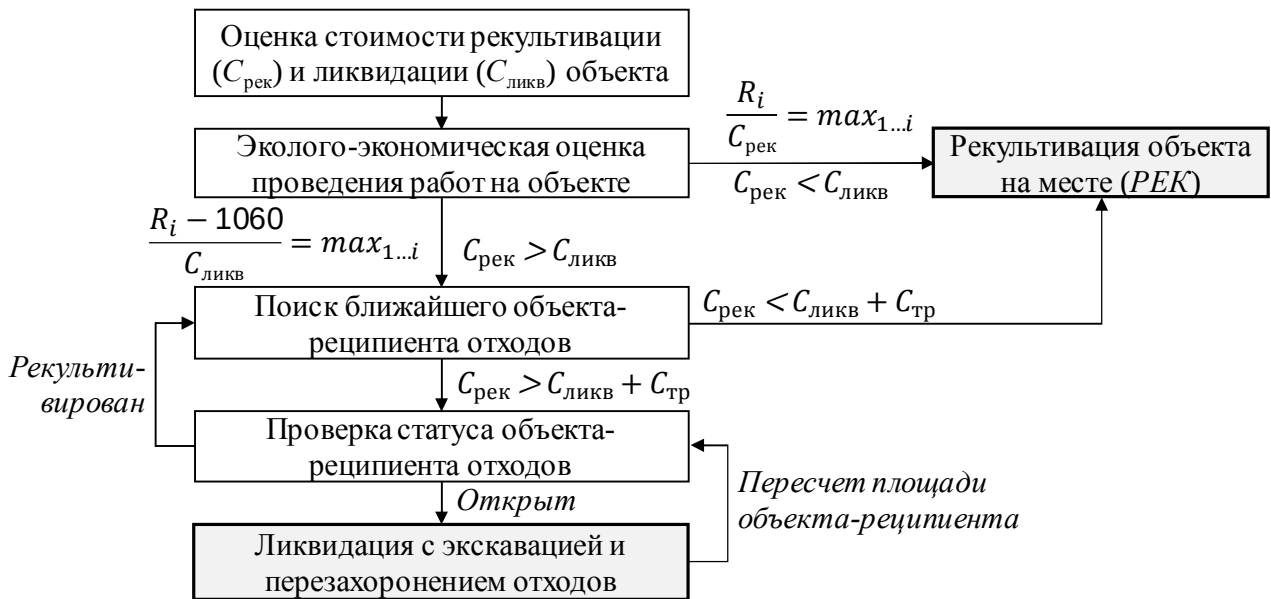


Рисунок 1 – Алгоритмическая модель вывода из эксплуатации объектов накопленного экологического ущерба

Результатом моделирования является ГИС-модель размещения объектов и результирующая строка-вектор решений для каждого из объектов захоронения отходов (Рисунок 2), позволяющие оптимизировать затраты на вывод объектов из эксплуатации с проведением работ по минимизации накопленного экологического ущерба.

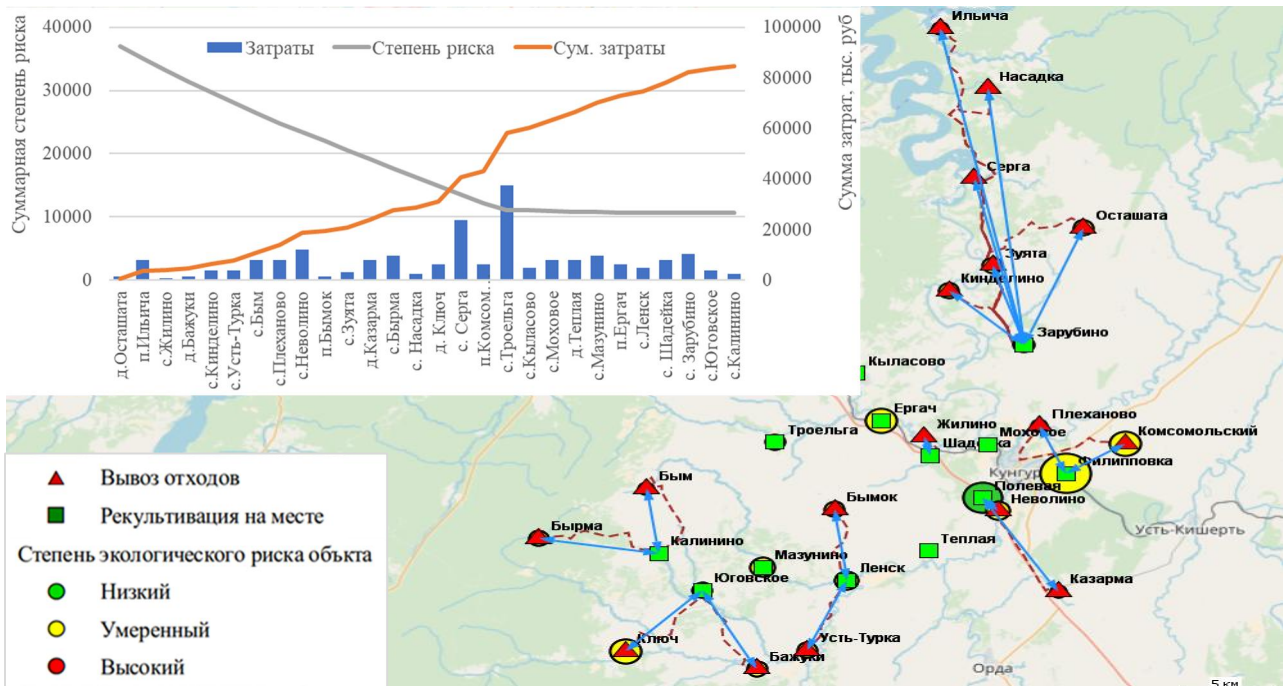


Рисунок 2 – Результаты решения «Максимальное снижение экологического ущерба при минимальных экономических затратах» (на примере решения задачи для Кунгурского района Пермского края)

Предложенный подход позволяет ранжировать объекты захоронения ТКО по степени экологического риска и в совокупности с разработанной транспортно-технологической алгоритмической моделью служит основой для разработки программ планомерного вывода объектов из эксплуатации и их рекультивации, позволяющих эффективно распределить финансовые ресурсы и добиться максимального снижения накопленного экологического ущерба.

В пятой главе предложен набор организационно-технологических решений по обеспечению безопасного уровня геоэкологического воздействия объектов размещения отходов на постэксплуатационном этапе и разработан комплексный подход оценки эффективности мероприятий по управлению эмиссиями.

Управление метановым потенциалом ТКО путем их предварительной обработки заключается в предварительной сортировке отходов и последующей их стабилизации. В качестве примера обработки ТКО, изменяющей их метановый потенциал, рассмотрены технологии ручной и оптико-механической сортировки. Удельный потенциал метанообразования общего потока «хвостов» сортировки изменяется в пределах $\pm 2\text{--}6\%$ потенциала исходной массы отходов за счет изменения удельного соотношения инертных и органических компонентов в процессе сортировки. Для оптико-механической сортировки этот показатель на 8 % ниже, чем при ручной, за счет меньшего содержания макулатуры. Удельный метановый потенциал «хвостов» увеличивается в случае ручной сортировки за счет изъятия инертных компонентов вторсырья (стекла, пластика) и соответствующего увеличения в «хвостах» сортировки удельного содержания метанообразующих компонентов. Уменьшение образования метана на полигоне достигается, в основном, за счет уменьшения количества вывозимых на полигон метанообразующих категорий отходов, в основном картона и бумаги.

На рисунке 3 приведены зависимости образования метана и снижение газообразования при использовании механобиологической обработки (МБО) отсева сортировки. При ручной сортировке достигается сокращение образования метана примерно на 14 % по сравнению с исходными значениями, при автоматической – на 32–47 %.

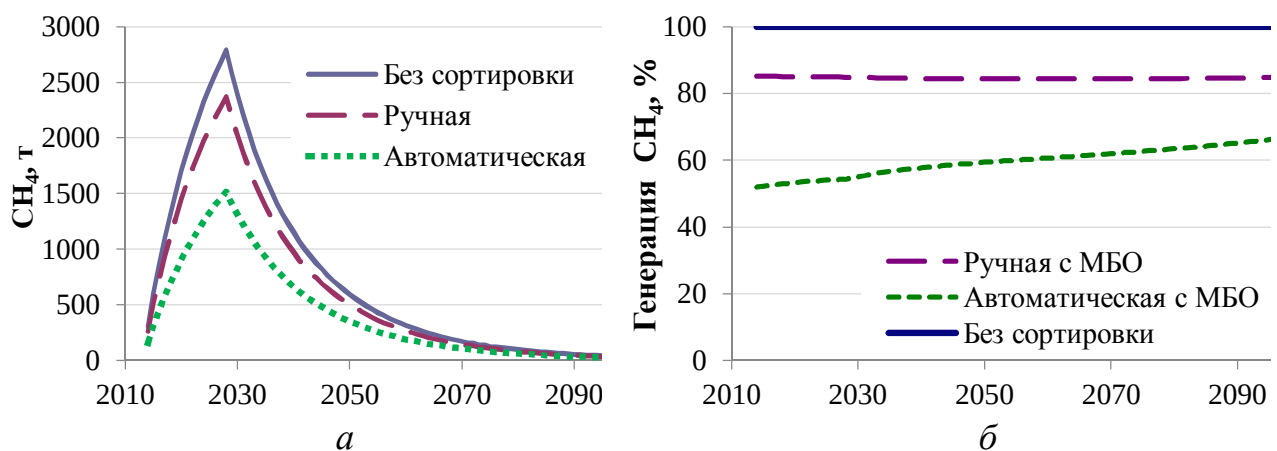


Рисунок 3 – Генерация метана на полигоне захоронения ТКО при использовании предварительной сортировки ТКО и МБО отсева по сравнению с прямым захоронением: *а* – динамика образования метана, *б* – снижение образования метана

Технология использования биостабилизированных материалов в составе выравнивающего слоя при рекультивации объектов захоронения ТКО направлена на минимизацию воздействия объектов на окружающую среду на завершающих этапах эксплуатации и постэксплуатационном этапе.

Технология предварительной биостабилизации отходов разработана для утилизации отсева и «хвостов» сортировки мусоросортировочной станции с последующим использованием полученных продуктов в качестве рекультивационного материала (технического грунта). Технологические решения предусматривают размещение предварительно измельченных (при необходимости) отходов на картах полевого компостирования с последующим дозреванием на картах размещения предварительно стабилизированного продукта.

Оценка длительности компостирования отсева и хвостов сортировки определена на основании экспериментальных исследований (Рисунок 4) по достижению нормативных показателей по параметрам ХПК и БПК₅ водной вытяжки (700 мг/дм³ и 500 мгО₂/дм³ соответственно).

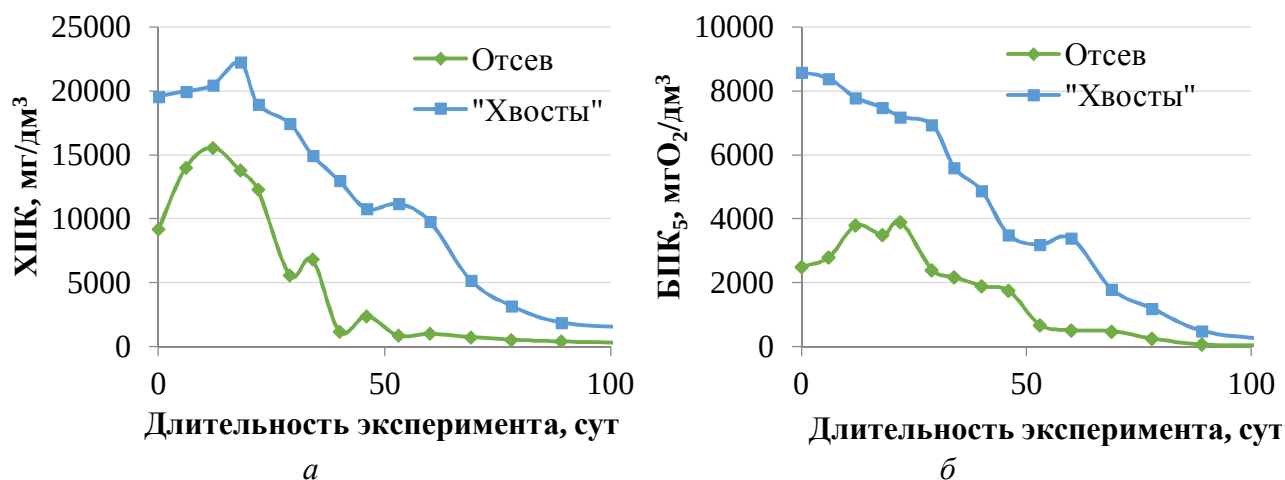


Рисунок 4 – Динамика изменения значений ХПК и БПК₅ водной вытяжки отсева и «хвостов» сортировки ТКО

Зафиксированный рост значений ХПК и БПК₅ водной вытяжки отсева сортировки ТКО в первые две недели эксперимента связан с лизисом клеточных стенок органических компонентов и высвобождением органических веществ. Падение значений ХПК и БПК₅ сопровождается последующим выходом процесса в лагфазу, когда скорости снижения ХПК и БПК₅ минимальны. Установлено, что выход в лагфазу при компостировании отсева наблюдается на 40–50-й день эксперимента, к 50-му дню значение ХПК снижается на 90,3 %, БПК₅ – 73,0 %. Снижение значений ХПК и БПК₅ до нормативных значений достигается на 53-и и 69-е сутки эксперимента соответственно.

При компостировании «хвостов» сортировки ТКО лагфаза наступает на 100-й день, что объясняется наличием органического углерода в труднодоступной форме (целлюлоза, текстиль). На момент окончания эксперимента (103-и сут) значение ХПК на 62 % превышало нормативное. При этом по БПК₅ нормативное значение достигается на 89-е сутки. Это объясняется

выщелачиванием из отходов биорезистентных примесей, отличающихся длительностью процессов деструкции. Интенсифицировать процессы компостирования «хвостов» сортировки рекомендуется путем добавления легкоокисляемой органики, инокулята микрофлоры или структураторов.

Результаты исследований внедрены при разработке проектной документации для рекультивации карьера «Баратаевский», г. Ульяновск (2017), в том числе при разработке технологического регламента получения рекультивационного материала (технического грунта) методом компостирования отсева и «хвостов» сортировки твердых коммунальных отходов и ТУ на рекультивационный материал.

Технология производства технического грунта (рекультивационного материала) методом обработки и полевого компостирования отходов, размещенных на свалках и полигонах захоронения ТКО, позволяет минимизировать воздействие выведенных из эксплуатации объектов размещения отходов и вовлечь в хозяйственный оборот вторичные материальные ресурсы (в том числе технический грунт, образовавшийся при биоразложении органических материалов в массиве объектов захоронения отходов). Технология производства технического грунта включает в себя экскавацию массива отходов, сортировку экскавированных материалов, дробление «хвостов» сортировки при необходимости и последующее полевое компостирование отсева и «хвостов» сортировки. Длительность полевого компостирования отсева и «хвостов» сортировки экскавированных материалов зависит от возраста экскавированных отходов (Рисунок 5).

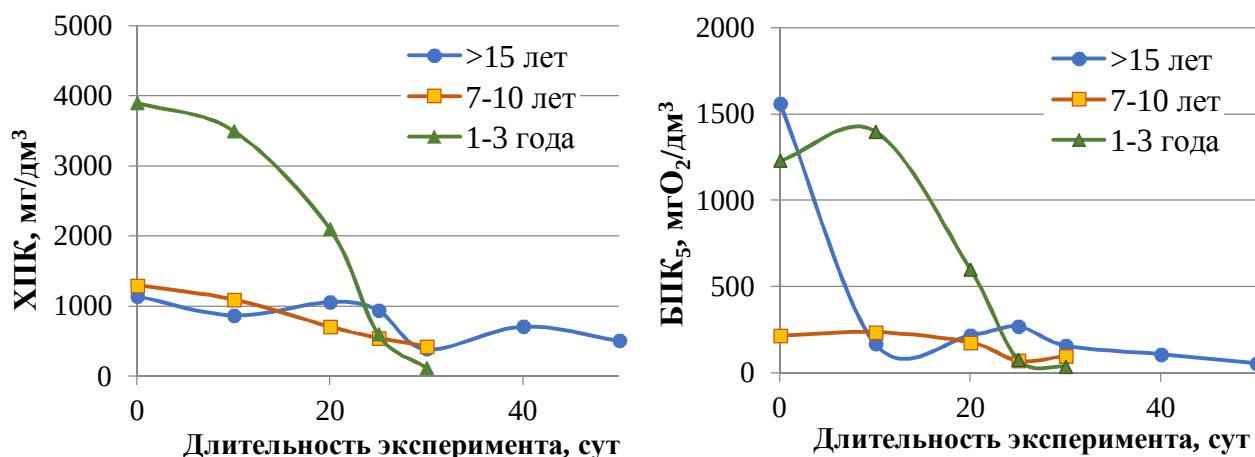


Рисунок 5 – Динамика изменения значений ХПК и БПК₅ водной вытяжки отсева сортировки экскавированных ТКО

Результатом технологического процесса являются технические грунты, используемые в качестве изолирующего грунта на полигонах захоронения ТКО, для технической рекультивации промышленных объектов, свалок и полигонов захоронения ТКО.

Результаты исследований внедрены при разработке технологического регламента производства технического грунта (рекультивационного материала

«Компостид») методом обработки и полевого компостирования отходов, размещенных на полигонах и свалках ТКО, и ТУ на технический грунт (2019).

Технические решения по использованию альтернативных материалов в составе верхнего гидроизолирующего покрытия объектов захоронения ТКО направлены на экономию природных грунтовых материалов и вовлечение отходов производства в хозяйственный цикл. Технические решения по рекультивации объектов захоронения ТКО предусматривают замену глинистых материалов, используемых для создания верхнего гидроизолирующего покрытия, на изолирующий материал, полученный из осадков очистных сооружений «АВИСМА», филиал ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» (г. Березники). Осадок очистных сооружений, образующийся в процессе нейтрализации и осветления производственных сточных вод «АВИСМА» путем добавления известкового молока и флокулянта, представляет собой массу глинистого материала с коэффициентом фильтрации не более $1,0 \cdot 10^{-3}$ см/с, влажностью не более 65 %, массовой долей частиц фракций от 0,005 до 0,05 мм не менее 60 %.

Замена глинистых материалов на рекультивационный материал из осадков сточных вод на объекте площадью 12 га позволяет снизить потребление природных материалов в объеме более 40 тыс. м³ и уменьшить стоимость рекультивационных работ на 12 %.

Технические решения по замене материалов внедрены при разработке проектной документации для рекультивации свалки твердых бытовых отходов г. Березники (2009), в том числе при разработке ТУ на рекультивационный материал из осадка очистных сооружений.

В **шестой главе** установлено, что выведенные из эксплуатации объекты захоронения ТКО можно рассматривать как запасы отложенных антропогенных ресурсов, состав и свойства которых изменяются во времени, и разработана методика технико-экономической оценки проектов рекультивации и ликвидации объектов захоронения ТКО, учитывающая изменение ресурсного потенциала массивов захоронения.

Ресурсный потенциал объекта захоронения отходов изменяется во времени ($РП_{O3t}$) и оценивается как сумма потенциалов извлечения вторичных материалов (вторичное сырье (ВС) и свалочный грунт (СГ)) и материалов, обладающих энергетической ценностью (ЭФ):

$$РП_{O3t} = \sum M_t^{BC} (C_t^{BC} - Z_t^{BC}) + \sum M_t^{ЭФ} (C_t^{ЭФ} - Z_t^{ЭФ}) \quad (8)$$

где $РП_{O3t}$ – ресурсный потенциал объекта захоронения в момент времени t ;

M_t^{BC} – масса извлекаемого компонента вторичного материала;

C_t^{BC} – потребительская ценность компонента вторичного материала;

Z_t^{BC} – затраты на извлечение компонента вторичного материала;

$M_t^{ЭФ}$ – масса извлекаемого материала, обладающего энергетической ценностью;

$C_t^{ЭФ}$ – потребительская ценность материала, обладающего энергетической ценностью;

$Z_t^{ЭФ}$ – затраты на извлечение материала, обладающего энергетической ценностью.

Проведенные полевые исследования и анализ полученных данных о фракционном и компонентном составе отходов, складированных в массивах захоронения отходов (Таблица 4), позволили оценить отложенный ресурсный потенциал объектов разного возраста и предложить направления использования экскавированных материалов.

Таблица 4 – Компонентный и фракционный состав экскавированных отходов на объектах захоронения ТКО разного возраста

Компонент	Средний возраст объекта, лет			
	1–5	6–15	16–30	> 30
Стекло	$9,3 \pm 5,6$	$6,8 \pm 3,1$	$6,5 \pm 3,1$	$4,5 \pm 3,0$
Камни	$11,1 \pm 9,0$	$17,2 \pm 7,1$	$12,0 \pm 6,8$	$11,3 \pm 4,7$
Металл	$2,1 \pm 1,9$	$1,1 \pm 1,1$	$2,7 \pm 3,1$	$3,1 \pm 3,5$
Древесина	$8,4 \pm 6,3$	$6,0 \pm 2,6$	$10,8 \pm 5,6$	$9,5 \pm 10,5$
Полимеры	$25,9 \pm 9,9$	$13,1 \pm 6,9$	$10,3 \pm 9,5$	$4,2 \pm 5,9$
Текстиль	$6,1 \pm 5,5$	$5,6 \pm 6,5$	$4,2 \pm 5,9$	$0,8 \pm 0,8$
Бумага	$8,9 \pm 7,6$	$2,6 \pm 2,8$	$1,8 \pm 3,0$	$1,1 \pm 2,6$
Свалочный грунт	$23,7 \pm 13,4$	$46,6 \pm 9,5$	$50,6 \pm 6,8$	$64,0 \pm 12,8$
Прочее	$4,5 \pm 3,7$	$1,0 \pm 0,7$	$1,0 \pm 0,8$	$1,4 \pm 1,4$
Фракция < 20 мм	$32,6 \pm 14,1$	$56,3 \pm 10,7$	$58,2 \pm 6,5$	$70,3 \pm 12,5$
Фракция 20–50 мм	$14,2 \pm 6,0$	$13,1 \pm 4,4$	$10,6 \pm 4,0$	$9,2 \pm 3,8$
Фракция 50–100 мм	$14,3 \pm 4,7$	$11,5 \pm 2,8$	$10,1 \pm 2,4$	$6,2 \pm 3,0$
Фракция > 100 мм	$39,0 \pm 16,6$	$19,1 \pm 9,1$	$21,0 \pm 9,5$	$14,2 \pm 10,0$

С точки зрения возврата материалов в ресурсный цикл наибольший интерес представляют фракции отходов, которые можно использовать вторично как рециклируемые материалы (бумага, картон, полимерные материалы, стекло, металл). Результаты исследований фракционного и компонентного состава массивов отходов разного возраста показали, что доля потенциального вторичного сырья резко уменьшается с увеличением возраста объекта захоронения (Рисунок 6).

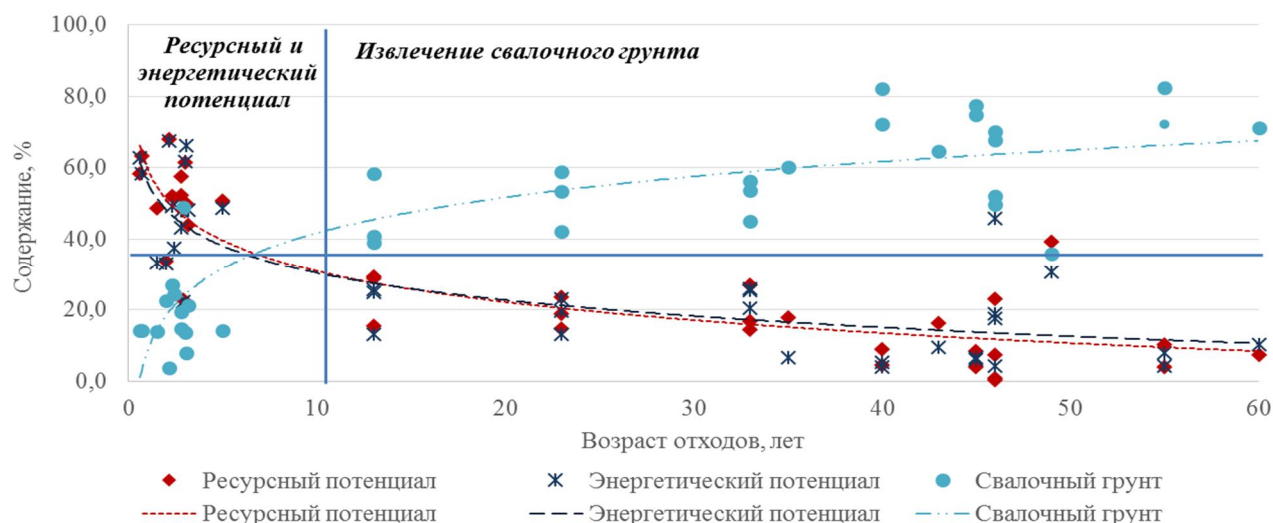


Рисунок 6 – Изменение ресурсного потенциала объектов захоронения ТКО

Результаты полупромышленного извлечения вторичного сырья из потока экскавированных отходов на комплексе оптико-механической сортировки показали, что наиболее полное выделение материалов (в том числе таких полимерных материалов, как ПЭТ, ПНД, ПВХ, ПП и т.п.) технически возможно только для отходов возраста 1–2 года. В пробах отходов, возраст которых не превышает 2 лет, можно идентифицировать и извлечь до 50 % фракций, доля отбора вторичного сырья для более старых отходов снижается до 10–15 %.

Сложность идентификации и извлечения отдельных фракций из потока отходов в первую очередь связана с высокой влажностью и степенью загрязнения отдельных компонентов. Максимальная влажность характерна для макулатуры (66 %), дерева (64 %) и комбинированной упаковки (55 %). Степень загрязнения экскавированных фракций ТКО варьируется от 2–3 % для макулатуры, стекла, текстиля до 15–20 % для 2D-полимеров (полиэтиленовые и полипропиленовые пленки) и 3D-полимеров (ПЭТ-бутылка).

Фракции отходов, не пригодные для вторичного использования из-за сильного загрязнения или высокой влажности, могут быть после предварительной сушки (в том числе в естественных условиях) использованы для производства вторичного топлива из отходов. Доля фракций отходов, обладающих высокой теплотворной способностью, зависит от компонентного состава захораниваемых отходов и возраста объекта захоронения. Потенциал извлечения энергетических фракций достигает 25–30 % и снижается до 5–10 % с увеличением возраста объектов захоронения. Теплота сгорания (на рабочую массу) экскавированных отходов изменяется в интервале от 7 МДж/кг для отходов возрастом 1–5 лет до 1,7 МДж/кг для отходов возрастом более 30 лет. Извлечение фракций отходов, обладающих энергетической ценностью, путем последовательной сортировки мелкой фракции и отдельных компонентов позволяет в 2–4 раза увеличить теплоту сгорания экскавированных отходов до 9–12 МДж/кг, в то время как масса потенциально возможного к извлечению вторичного топлива из отходов снижается с 17–23 до 5–7 % с увеличением возраста объекта.

Со временем происходит трансформация ресурсного потенциала объектов захоронения в части снижения содержания фракций отходов, которые могут быть использованы вторично или с извлечением энергии, и роста доли вторичных материалов, представленных свалочным грунтом. Доля свалочных грунтов на объектах захоронения, возраст которых превышает 15 лет, составляет более 50 % и достигает 80–85 % на объектах старше 30 лет.

Разработанная методика технико-экономической оценки проектов рекультивации выведенных из эксплуатации объектов захоронения ТКО предусматривает оценку эффективности проектов с учетом ряда факторов влияния (F_1 – F_{10}): дальность транспортирования на перезахоронение, стоимость сортировки мелкой фракции (свалочного грунта) и вторичного сырья, потребительская ценность вторичного сырья и энергетических фракций и т.д. Наиболее значимые факторы влияния на совокупные затраты эколого-экономической стоимости проектов экскавации массивов захоронения отходов определялись на основании калькуляция затрат по ряду сценариев и оценке

изменения совокупных затрат проектов рекультивации/ликвидации объектов захоронения ТКО при изменении наиболее существенных параметров на 1 %.

Оценка экономической эффективности извлечения вторичных ресурсов в ходе проведения рекультивационных работ на выведенных из эксплуатации объектах захоронения отходов проводилась на примере двух объектов (объект С.Б. и объект С.П.), отличающихся разной эффективностью использования площадей. Средняя нагрузка отходов составляет $4,4 \text{ м}^3/\text{м}^2$ и $1,1 \text{ м}^3/\text{м}^2$ на объектах С.Б и С.П соответственно. Оценка выполнена для пяти сценариев:

- сценарий С0. Базовый: рекультивация объекта в соответствие с существующими нормативными требованиями по рекультивации полигонов;
- сценарий С1. Вывоз отходов на ближайший санитарный полигон и рекультивация земельного участка;
- сценарий С2. Экскавация массива отходов с последующим использованием свалочного грунта в качестве грунтового материала для проведения рекультивации участка;
- сценарий С3. Экскавация массива отходов с извлечением свалочного грунта и вторичного сырья;
- сценарий С4. Экскавация массива отходов с извлечением свалочного грунта, вторичного сырья и энергетических фракций.

Каждый сценарий предусматривает оценку проекта по текущему, пессимистическому и оптимистическому варианту с учетом вероятности изменения факторов влияния. Выполненный анализ сценариев рекультивации/ликвидации объектов захоронения ТКО показал, что эффективность использования ресурсного потенциала массива захоронения в том числе зависит от геометрических характеристик объекта (удельной нагрузки ТКО на единицу площади объекта). Для малонагруженных объектов (Рисунок 7) экскавация массива отходов с последующим использованием свалочного грунта в качестве грунтового материала для проведения рекультивации участка позволяет сократить затраты на 10–15 % по сравнению с вывозом отходов на санитарный полигон.

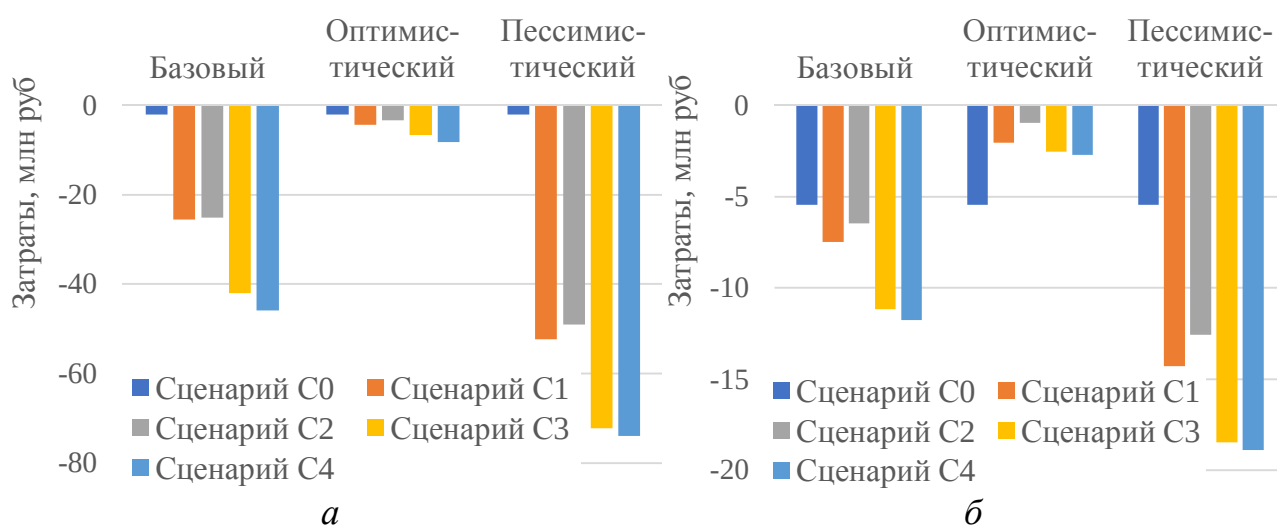


Рисунок 7 – Оценка затрат для реализации сценариев С0–С4:

а – объект С.Б; б – объект С.П

Извлечение вторичного сырья и фракций ТКО, обладающих энергетической ценностью, целесообразно только в случае оптимального соотношения факторов влияния. В этом случае экономия ресурсов составит 40–55 % по сравнению с базовым сценарием рекультивации объекта.

Анализ чувствительности совокупных затрат по выбранным сценариям показал, что наибольшим влиянием обладают факторы «Стоимость перезахоронения отходов на санитарном полигоне» (значимость фактора 0,57 %) и «Стоимость сортировки вторичного сырья» (значимость фактора 0,52 %).

Учитывая, что оценка ресурсного потенциала объекта захоронения отходов ($РП_{O3t}$) проводится по множеству факторов влияния ($F_1–F_{10}$), результаты оценки $РП_{O3t}$ целесообразно представить в виде 6-факторной декомпозиции (лепестковой диаграммы) (Рисунок 8), отражающей факторы влияния, обладающие наибольшей значимостью.

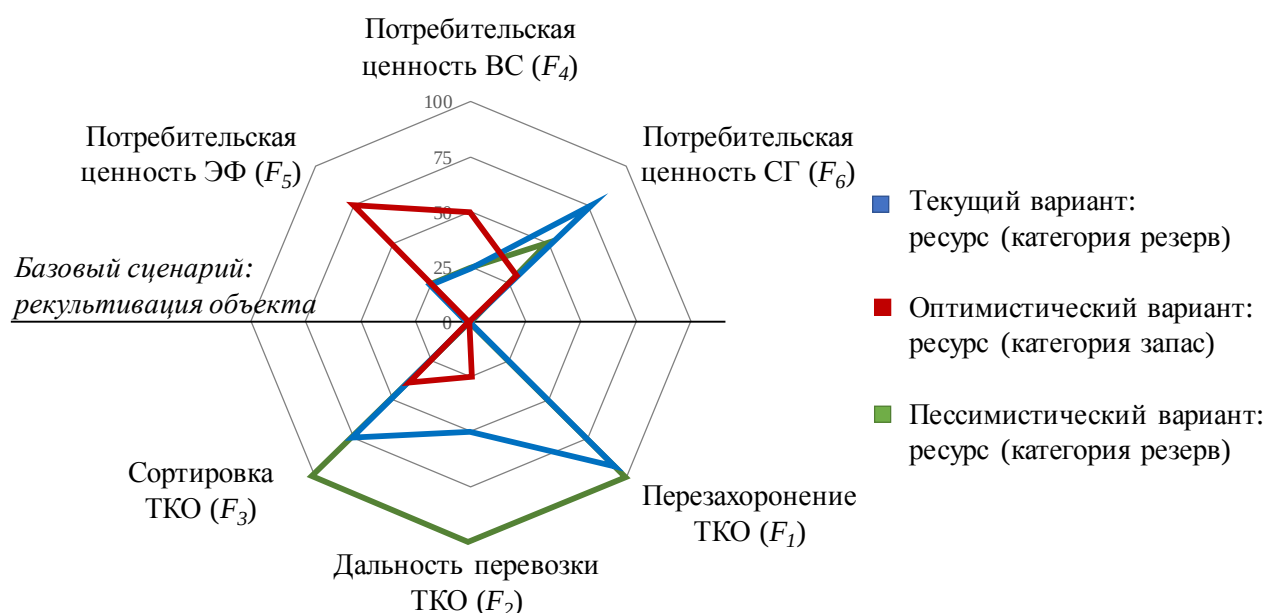


Рисунок 8 – Модель оценки ресурсной ценности объектов захоронения отходов (на примере объекта С.П)

По степени ресурсной ценности объекты захоронения отходов предложено рассматривать как техногенные месторождения двух категорий:

– объекты захоронения отходов «категории запас» представляют собой объекты, обладающие положительным ресурсным потенциалом, извлечение которого технически и экономически целесообразно в ближайшей временной перспективе.

– к объектам «категории резерв» относятся свалки и полигоны захоронения отходов с отрицательным (низким) ресурсным потенциалом. Данные техногенные месторождения оцениваются как экономически неэффективные.

Ресурсный потенциал объекта захоронения $РП_{O3t}$ оценивается как «категория резерв», если

$$S(F_{1-3}) > S(F_{4-6}), \quad (9)$$

и «категория запас», если

$$S(F_{1-3}) < S(F_{4-6}), \quad (10)$$

где

$$S(F_{1-n}) = \frac{1}{2} \left(\left| \begin{matrix} xF_1 & yF_1 \\ xF_2 & xF_2 \end{matrix} \right| + \left| \begin{matrix} xF_2 & yF_2 \\ xF_3 & xF_3 \end{matrix} \right| + \dots + \left| \begin{matrix} xF_n & yF_n \\ xF_1 & xF_1 \end{matrix} \right| \right). \quad (11)$$

По результатам оценок ресурсного потенциала исследуемых объектов захоронения отходов установлено, что объекты «категории запас» обладают следующими особенностями:

- являются относительно молодыми с точки зрения периода формирования и характеризуются высоким содержанием рециклируемых и энергетических фракций ТКО;

- объекты имеют площадное распределение и низкую удельную нагрузку ТКО на единицу площади основания объекта;

Доказано, что сформированность рынка услуг по обработке ТКО (низкие затраты на сортировку отходов) и рынка отходов в регионе (высокая потребительская ценность извлеченных ресурсов) являются ключевыми условиями геолого-экономической оценки проектов возврата отложенных в объектах захоронения ТКО ресурсов в производственные циклы и снижения нагрузки на окружающую среду от объектов накопленного экологического ущерба.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установленные на основании анализа данных полевых исследований и лабораторного моделирования закономерности изменения скорости разложения ТКО в массиве отходов во времени позволили установить индикаторные показатели длительности эмиссий биогаза и фильтрата и сроки достижения нормативов допустимого воздействия на окружающую среду в условиях умеренно-континентального климата: дыхательная активность (RI_4) – 30 лет, хлорид-ионы – 20 лет, ХПК – 110 лет, БПК₅ – 70 лет, азот аммонийный – 110 лет.

2. Разработаны теоретические основы обеспечения геоэкологической безопасности объектов размещения ТКО и прогноза их воздействия на окружающую среду, основанные на анализе совокупности характеристик твердых отходов в массиве захоронения. В отличие от существующих подходов, основанных на анализе показателей эмиссионных потоков объектов, предложенный подход основан на совокупности физико-химических характеристик складированных в массиве отходов разного возраста захоронения.

3. Разработанная методика анализа экологических рисков свалок и полигонов захоронения ТКО в совокупности с логистической моделью позволяют провести многовариантный расчет сценариев вывода из эксплуатации и ликвидации объектов накопленного экологического ущерба. Внедрение предложенного подхода позволяет сформировать программу ликвидации объектов с максимальным экологическим эффектом для территории.

4. Разработаны новые технологические решения по обеспечению безопасности объектов захоронения ТКО на постэксплуатационном этапе: предварительная обработка ТКО позволяет достичь сокращения образования метана примерно на 14 % при использовании ручной сортировки, на 32–47 % –

оптико-механической; подготовка массива отходов к закрытию и рекультивации путем заполнения стабилизированными отходами позволяет снизить выбросы метана на 88 %; экскавация массивов ТКО с последующей стабилизацией экскавированных материалов позволяет вернуть в использование до 80 % (масс.) ранее захороненных отходов; использование альтернативных материалов для создания верхнего рекультивационного слоя позволяет снизить потребление природных материалов и уменьшить стоимость работ на 12 %.

5. Доказано, что выведенные из эксплуатации объекты захоронения ТКО можно рассматривать как массивы отложенных материальных и энергетических ресурсов, потенциал которых трансформируется с течением времени. Потенциал извлечения вторичных материалов, представленных вторичным сырьем, и энергетических фракций отходов резко падает с 20–25 до 3–5 % в первые 5–7 лет после размещения отходов на объекте, в то же время ресурсный потенциал трансформируется в потенциал, представленный грунтовыми материалами, и достигает максимума 80–85 % после 20–30 лет захоронения.

6. Выбор технологии завершения жизненного цикла объектов захоронения ТКО предложено проводить с учетом ресурсного подхода, включающего технико-экономическую оценку ресурсной ценности массива захоронения. По степени ресурсной ценности объекты захоронения отходов предложено рассматривать как техногенные месторождения двух категорий: объекты захоронения отходов «категории запас» и объекты «категории резерв». Категория объекта определяется ресурсной ценностью объекта и зависит от ряда влияющих параметров: возраст объекта захоронения, сформированность рынка услуг по обработке ТКО и потребительская ценность отложенных ресурсов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

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

1. Увеличение жизненного цикла полигона ТБО / Н.Н. Слюсарь, В.Н. Коротаев, Г.М. Батракова, Ю.Н. Шлее, М.В. Висков // Экология и промышленность России. – 2010. – № 5. – С. 45–47.

2. Коротаев, В.Н. Оптимизация технологической схемы сортировки ТБО для урбанизированных территорий / В.Н. Коротаев, Н.Н. Слюсарь, Г.В. Ильиных // Экология и промышленность России. – 2010. – № 5. – С. 22–25.

3. Повышение эффективности извлечения ресурсного потенциала из твёрдых бытовых отходов / Я.И. Вайсман, В.Н. Коротаев, Н.Н. Слюсарь, В.Н. Григорьев // Экология и промышленность России. – 2011. – № 12. – С. 22–26.

4. Ильиных, Г.В. Методическое обеспечение экспериментальных исследований морфологического состава ТБО / Г.В. Ильиных, Н.Н. Слюсарь, В.Н. Коротаев // Экология и промышленность России. – 2011. – № 5. – С. 52–55.

5. Оценка объемов образования твердых бытовых отходов при построении локальных и региональных материальных балансов отходов / Ю.М. Макарова, Г.В. Ильиных, Н.Н. Слюсарь, В.Н. Коротаев, Я.И. Вайсман // Экология и промышленность России. – 2012. – № 11. – С. 22–27.

6. Ильиных, Г.В. Современные методические подходы к анализу морфологического состава ТБО с целью оценки их ресурсного потенциала / Г.В. Ильиных, В.Н. Коротаев, Н.Н. Слюсарь // Экология и промышленность России. – 2012. – № 7. – С. 40–45.

7. Исследования состава твердых бытовых отходов и оценка их санитарно-эпидемиологической опасности / Г.В. Ильиных, Н.Н. Слюсарь, В.Н. Коротаев, Я.И. Вайсман, Н.М. Самутин // Гигиена и санитария. – 2013. – № 1. – С. 53–55. (Scopus)

8. Armisheva, G. Briefing: Urban-mining of landfills / G. Armisheva, N. Sliusar, V. Korotaev // Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management. – 2013. – Vol. 166, № 4. – p. 153–157. (Scopus)

9. 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.

10. Слюсарь, Н.Н. Развитие системы строительства и эксплуатации объектов захоронения ТБО / Н.Н. Слюсарь // Экология и промышленность России. – 2013. – № 10. – С. 31–36.

11. Управление метановым потенциалом ТБО путем их предварительной обработки / Н.Н. Слюсарь, Г.В. Ильиных, Я.И. Вайсман, А.Ю. Пухнюк, Ю.Б. Матвеев // Экология и промышленность России. – 2013. – № 11. – С. 38–42.

12. Анализ перспектив извлечения материального и энергетического потенциала из потоков твёрдых бытовых отходов / Я.В. Базылева, Н.Н. Слюсарь, Г.В. Ильиных, В.Н. Коротаев // Теоретическая и прикладная экология. – 2013. – № 1. – С. 61–66.

13. Моделирование изменения эмиссионного потенциала твердых бытовых отходов при разных способах претритмента / Н.Н. Слюсарь, Я.И. Вайсман, И.С. Глушанкова, Л.В. Рудакова // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 3–4. – С. 716–721.

14. Management of municipal solid waste methane potential by using preliminary treatment / N. Sliusar, A. Pukhnyuk, V. Korotaev, Y. Matveev // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 15th. – 2015. – Vol. 1, issue 5. – P. 483–490. (Scopus)

15. Municipal solid waste composition of the city of Perm, Russia: Main changes over time / G. Ilinykh, Y. Vaisman, N. Sliusar, V. Korotaev // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 15th. – 2015. – Vol. 1, issue 5. – P. 579–586. (Scopus)

16. Оценка состояния полигонов захоронения ТБО по изменению органической составляющей / Ю.В. Завизион, Н.Н. Слюсарь, И.С. Глушанкова, Ю.М. Загорская, В.Н. Коротаев // Экология и промышленность России. – 2015. – № 7. – С. 26–31.

17. Слюсарь, Н.Н. Микробиологическая оценка свалочных новообразований на рекультивированных свалках твердых бытовых отходов / Н.Н. Слюсарь, Л.В. Рудакова, Е.С. Белик, Л.В. Рудакова, Е.С. Белик // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 13. – С. 230–234

18. Исследование возможности применения респирометрического теста для оценки стабильности свалочных грунтов / Ю.В. Куликова, О.С. Пьянкова, Н.Н. Слюсарь, Ю.М. Загорская, А.С. Атанова // Экология промышленного производства. – 2015. – № 3. – С. 18–23.

19. Исследование процесса выделения биогаза в лабораторных условиях с целью обоснования основных параметров технологии управления метаногенезом при контролируемом орошении / К.Э. Миниахметова, Ю.В. Завизион, Я.А. Жилинская, Н.Н. Слюсарь // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2015. – № 4. – С. 92–106.

20. Слюсарь, Н.Н. Возможности извлечения отложенных ресурсов из массивов захоронения твердых коммунальных отходов / Н.Н. Слюсарь // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2016. – № 1. – С. 63–78.

21. 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. Коротаев // Экология и промышленность России. – 2016. – № 4. – С. 32–39. (Scopus, GeoRef)

22. Применение синхронного термического анализа для оценки стабильности захороненных на полигонах твердых коммунальных отходов / Ю.В. Завизион, И.С. Глушанкова, Н.Н. Слюсарь, Я.И. Вайсман // Экология и промышленность России. – 2016. – № 6. – С. 43–49. (Scopus, GeoRef)

23. Слюсарь, Н.Н. Принципы управления полигоном захоронения твердых коммунальных отходов на разных этапах жизненного цикла / Н.Н. Слюсарь, А.Ю. Пухнюк // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2016. – Том 22, № 2. – С. 148–164.

24. Слюсарь, Н.Н. Визуальное обследование объектов захоронения отходов с использованием беспилотных летательных аппаратов / Н.Н. Слюсарь, В.Н. Коротаев, Ю.В. Куликова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2017. – № 4. – С. 25–36.

25. Завизион, Ю.В. Критерии выбора комплекса технических мероприятий снижения эмиссий на полигонах захоронения твердых коммунальных отходов / Ю.В. Завизион, Н.Н. Слюсарь, В.Н. Коротаев // Экология и промышленность России. – 2018. – № 9. – С. 52–57. (Scopus, GeoRef)

26. Testing of different waste analysis tools for municipal solid waste / J. Kaazke, N. Sliusar, O. Ulanova, G. Ilinykh, A. Tulokhonova, B.M. Wilke // Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management. – 2018. – Vol. 171, № 1. – P. 21–30. (Scopus)

27. Слюсарь, Н.Н. Экологический мониторинг объектов размещения отходов с применением беспилотных летательных аппаратов / Н.Н. Слюсарь, Г.М. Батракова // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22, № 8. – С. 44–49. (Scopus, GeoRef).

28. Polygalov, S. Challenges and opportunities for energy recovery from municipal solid waste in the Russian Federation / S. Polygalov, G. Ilinykh, N. Sliusar, V. Korotaev, I. Rukavishnikova // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2019. – Vol. 222. – P. 131–143. (Scopus)

Патенты:

29. Устройство для сбора биогаза: патент на полезную модель: пат. № 139421 Российская Федерация, МПК В09В 5/00 / Вайсман Я.И., Слюсарь Н.Н., Загорская Ю.М., Паршакова С.В.; заявитель и патентообладатель Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – № 2013153013/13; заявл. 28.10.2013; опубл. 18.03.2014.

30. Способ термической утилизации твердых бытовых отходов: пат. на изобретение: Пат. № 2536944 Российская Федерация, МПК В09В 3/00, В09С 1/06, F23G 5/027, F23G 5/34, E21В 43/295 / Коротаев В.Н., Вайсман Я.И., Слюсарь Н.Н., Базылева Я.В.; заявитель и патентообладатель Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – № 2013135434/13; заявл. 27.07.13; опубл. 24.12.2014.

31. Способ оценки компонентного состава твердых коммунальных отходов: пат. на изобретение: Пат. 2613589 Российская Федерация, МПК G01N 19/00 (2006.01) / Коротаев В.Н., Ильиных Г.В., Борисов Д.Л., Плыгалов С.В., Базылева Я.В., Вайсман Я.И., Слюсарь Н.Н., Куликова Ю.В.; заявитель и патентообладатель Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – № 2015152927; заявл. 09.12.2015; опубл. 17.03.2017.

32. Лабораторная установка для замера объема биогаза, образовавшегося при разложении органических материалов в анаэробных условиях: пат. на полезную модель: Пат. № 174038 Российская Федерация, МПК В09В 5/00 / Загорская Ю.М., Слюсарь Н.Н.; заявитель и патентообладатель Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – № 2017114738; заявл. 26.04.2017; опубл. 29.09.2017.

33. Способ получения альтернативного топлива из твердых коммунальных отходов: пат. на изобретение: Пат. 2681655 Российская Федерация, МПК С10L 5/48, С10L 5/40, В09В 3/00, В03В 9/06 / Плыгалов С.В., Коротаев В.Н., Бычков Е., Ильиных Г.В., Слюсарь Н.Н.; заявитель и патентообладатель Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – № 2018125358; заявл. 10.07.2018; опубл. 12.03.2019.

34. Программа для расчета состава и характеристик вторичного топлива из отходов при разных способах производства («RDF Maker»): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014662222 / Базылева Я.В., Курушин Д.С., Куликова Ю.В., Коротаев В.Н., Вайсман Я.И., Слюсарь Н.Н., Ильиных Г.В.; заявитель и правообладатель Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – №2014619878; дата гос. регистрации в реестре программ для ЭМВ 26.11.2014.

Монографии:

35. Управление отходами. Сбор, транспортирование, прессование, сортировка твердых бытовых отходов: монография / Я.И. Вайсман, В.Н. Коротаев, Н.Н. Слюсарь, В.Н. Григорьев. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 236 с.

36. Управление техногенными отходами / В.Н. Коротаев, Н.Н. Слюсарь, Я.А. Жилинская, Г.В. Ильиных, Т.Г. Филькин. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. – 390 с.

Прочие работы по теме диссертации:

37. Ахмадиев, М.В. Сравнительный анализ требований к организации оснований и конструкций верхнего рекультивационного покрытия полигонов ТБО / М.В. Ахмадиев, Н.Н. Слюсарь // Научные исследования и инновации. – 2010. – Т. 4, № 4. – С. 7–14.

38. Интенсивное использование территорий полигонов / В.Н. Коротаев, Н.Н. Слюсарь, М.В. Висков, Е.Ю. Буктеров, Ю.Н. Шлее // Твердые бытовые отходы. – 2010. – № 9. – С. 28–31.

39. Sliusar, N. Recovery of areas for MSW disposal / N. Sliusar, V. Korotaev, G. Armisheva // From Sanitary to Sustainable Landfilling: why, how, and when?: 1st International Conference on Final Sinks. – Vienna, 2010.

40. Слюсарь, Н.Н. Рекультивация закрытых свалок и полигонов с увеличенными углами откоса / Н.Н. Слюсарь, Ю.Н. Шлее // Твердые бытовые отходы. – 2011. – № 9. – С. 20–23.

41. Применение методологии управления рисками для объектов городской инфраструктуры на примере полигонов ТБО / В.В. Карманов, Г.С. Арзамасова., И.В. Новикова, Н.Н. Слюсарь // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2011. – № 2. – С. 15–28.

42. Слюсарь, Н.Н. Выбор системы дегазации свалки твердых бытовых отходов на примере города Хабаровска / Н.Н. Слюсарь, А.А. Сурков, Г.В. Ильиных // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2011. – № 3. – С. 65–74.

43. Сурков, А.А. Деструкция полимерных материалов в условиях полигона ТБО / А.А. Сурков, Н.Н. Слюсарь, С.В. Полыгалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2012. – № 3. – С. 74–82.

44. Слюсарь, Н.Н. Современные подходы к рекультивации свалок и полигонов захоронения твердых бытовых отходов / Н.Н. Слюсарь, Ю.М. Загорская, Ю. Шлее // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2012. – Т. 8, № 4. – С. 84–91.

45. Слюсарь, Н.Н. Обзор биологических методов оценки стабильности отходов в массиве полигона ТБО / Н.Н. Слюсарь, Ю.М. Загорская, Е.Б. Кроха // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2013. – Т. 10, № 2. – С. 120–130.

46. Изучение состава отходов массива полигона ТБО / Ю.М. Загорская, Н.Н. Слюсарь, С.В. Паршакова, Ю.В. Завизион // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2013. – № 4. – С. 144–154.
47. Sliusar, N. Energy resources recovery on municipal solid waste disposal / N. Sliusar, G. Armisheva // ISWA Beacon Conference "The 2nd International Conference on Final Sinks – Sinks a Vital Element of Modern Waste Management". – Espoo, Finland, 2013.
48. Kulikova, Y. Result of waste composition analysis in different areas of Russia / Y. Kulikova, G. Ilinikh, N. Sliusar // 14th International waste management and landfill symposium "Sardinia 2013". – Forte Village, S. Maria di Pula (CA), Italy, 2013.
49. Оценка влияния предварительной сортировки твердых бытовых отходов на образование метана в массиве полигона захоронения / Н.Н. Слюсарь, В.Н. Коротаев, О.А. Галкина, Ю.Б. Матвеев, А.Ю. Пухнюк // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2014. – Т. 13, № 1. – С. 17–28.
50. Слюсарь, Н.Н. Изучение фракционного и морфологического состава отходов старых свалок и полигонов / Н.Н. Слюсарь, Ю.М. Загорская, Г.В. Ильиных // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2014. – Т. 13, № 3. – С. 77–85.
51. Исследование свойств отходов разного срока захоронения / Ю.М. Загорская, Н.Н. Слюсарь, И.С. Глушанкова, Ю.В. Завизион // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2014. – № 1. – С. 40–50.
52. Sliusar, N. Studies on waste composition of old landfills and dump sites: case study in Perm region, Russia / N. Sliusar, Y. Zagorskaya, V. Korotaev // Deponietechnik 2014. Dokumentation der 9. Hamburger Abfallwirtschaftstage. – Hamburg, 2014.
53. Sliusar, N. Opportunities of landfill mining in the Russian Federation: reclamation of dumpsites and old landfills / N. Sliusar, V. Korotaev, Y. Zagorskaya // SUM 2014. Symposium on urban mining. – Bergamo, Italy, 2014.
54. Микробиологическая оценка процессов деструкции ТБО в теле полигона / Э.Х. Сакаева, Л.В. Рудакова, Н.Н. Слюсарь, Я.И. Вайсман, А.М. Зомарев // Твердые бытовые отходы. – 2015. – № 3. – С. 22–27.
55. Современные подходы к эксплуатации объектов захоронения ТБО / Н.Н. Слюсарь, В.Н. Коротаев, А.Ю. Пухнюк, Ю.Б. Матвеев, М. Рицковский // Твердые бытовые отходы. – 2015. – Т. 106, № 4. – С. 22–27
56. Завизион, Ю.В., Использование термического анализа для оценки степени стабильности ТБО / Ю.В. Завизион, Н.Н. Слюсарь, И.С. Глушанкова // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2015. – № 1. – С. 242–247.
57. Оценка физико-химических параметров отходов разного срока захоронения / Ю.В. Завизион, Н.Н. Слюсарь, И.С. Глушанкова, Ю.М. Загорская // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2015. – № 3. – С. 82–96

58. Слюсарь Н.Н. Использование результатов оценки экологического риска для разработки программ вывода из эксплуатации старых свалок / Н.Н. Слюсарь // Вестник МГСУ. – 2016. – № 8. – С. 88–99.

59. Слюсарь, Н.Н. Вывод из эксплуатации старых свалок ТКО / Н.Н. Слюсарь, В.Н. Коротаев // Твердые бытовые отходы. – 2016. – Т. 125, № 11. – С. 12–15.

60. Sliusar, N. A decision support tool for shifting from old dumpsites to sanitary landfills / N. Sliusar, A. Kyuchkin // 14th International waste management and landfill symposium “Sardinia 2017”. – Forte Village, S. Maria di Pula (CA), Italy, 2017.